

АКУСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЛОВ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация

Изложены правила и приемы акустического проектирования залов клубов, центров культуры, актов залов учебных заведений, микро-районных центров, конференц-залов и т.д., предназначенных для многоцелевого использования, вместимостью до 1000 слушателей. Даны указания по выбору объема и формы зала, допустимому запаздыванию звуковых отражений, правильному распределению отраженного звука, по его диффузности, времени реверберации и его расчету, а также приведены коэффициенты звукопоглощения разных материалов и другие данные для акустических расчетов, в том числе условия применимости геометрических отражений и приемы их построения. Пособие предназначено для студентов специальностей 290100, 290300, 290400, 290500, 291400.

Автор

Жабыко Е.И., Рублевская Н.И.

Сведения о печатной версии

Жабыко Е.И., Рублевская Н.И. Акустическое проектирование залов многоцелевого назначения: Учеб. пособие - /Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. - 89 с. ISBN 5-7596-0010-9

ВВЕДЕНИЕ

Среда, окружающая человека и ограниченная помещением, должна иметь такие характеристики, которые наиболее полно отвечают работе человеческого организма при выполнении данной функции. Характеристики среда определяются условиями зрительного восприятия и видимости, освещением, микроклиматом, а также акустическим режимом, характеризуемым качеством восприятия звука, если оно обуславливается данным функциональным процессом или уровнем мешающего шума, возникающего в помещении или проникающего в него.

Эти вопросы являются предметом изучения Строительной физики -прикладной области физики, дисциплины, тесно связанной с теорией проектирования зданий и их ограждающих конструкций.

Основной задачей архитектурной акустики является исследование условий, определяющих слышимость речи и музыки в помещениях, и разработка архитектурно-планировочных и конструктивных решений, обеспечивающих оптимальные условия слухового восприятия.

В нашей стране строится много зданий с залами. Большинство этих залов средней вместимости (не более 1000 слушателей), с воздушным объемом, не превышающим 6000 м³, имеют многоцелевое назначение. Это залы клубов и Центров культуры, микрорайонных центров, актовые залы учебных заведений, конференц-залы. Вопросы акустики таких залов и рассматриваются в материалах учебного пособия.

Будущие архитекторы и инженеры-строители при изучении курса, изложенного в данном пособии, должны приобрести знания, дающие возможность хорошо разбираться в области архитектурно-строительной акустики при проектировании залов различного назначения.

Эта работа преследует цель научить студентов анализировать и обобщать полученные расчетным путем данные, находить определенные закономерности, производить анализ полученных результатов и, наконец, формировать выводы.

1. АКУСТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЫБОР ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ЗАЛОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ

К залам с естественной акустикой относятся: лекционные, театральные, концертные залы многоцелевого назначения средней вместимости. Деление на залы с естественной акустикой и залы, оборудованные системой звукоусиления, условно. В настоящее время практически все большие залы оборудуют звукоусилительной установкой, но при этом сохраняются требования обеспечения оптимальных акустических условий без средств звукоусиления.

Основные акустические требования, предъявляемые к данным залам, во многом сходны и зависят главным образом от объемно-планировочных решений залов.

Для залов с естественной акустикой необходимо выполнение следующих основных требований:

- обеспечение всех зрителей достаточной звуковой энергией;
- создание диффузного звукового поля, исключающего возможность образования таких акустических дефектов, как эхо и фокусирование звука;
- обеспечение оптимального времени реверберации.

Удовлетворение данных требований достигается рациональным выбором объема, геометрической формы зала, очертания его внутренних поверхностей.

2. ВЫБОР ВОЗДУШНОГО ОБЪЕМА ЗАЛА

Общий воздушный объем зала должен назначаться в соответствии с существующими нормами, при этом рекомендуется исходить из объема $4,8 \text{ м}^3$ на одно слушательское место. При наличии у зала сценической коробки общий объем его назначается без учета объема сцены (табл. 1, 2).

В залах с воздушным объемом на одно слушательское место менее 4 м^3 время реверберации слишком мало и вместе с тем возникают затруднения в связи с необходимостью в этом случае надежно обеспечить непрерывную механическую вентиляцию зала [1].

Залы с воздушным объемом на одно слушательское место более 8 м^3 близки к концертным с большим временем реверберации и с повышенным запаздыванием звуковых отражений. Для снижения времени реверберации в такие залы приходится вводить большое

количество звукопоглощающих материалов, но и при этом зал оказывается недостаточно хорошим для многоцелевого назначения.

Кроме объема помещения, первостепенное влияние на его акустические качества оказывают форма зала в плане и продольном разрезе, конфигурация ограничивающих его поверхностей.

Таблица 1

Рекомендуемый оптимальный воздушный объем помещений на одно слушательское место

Назначение зрительного зала	Объем на одно слушательское место, м ³
Школьный класс, аудитория	4,5 , 5,5
Лекционный зал	4,0 , 5,5
Конференц-зал	4,5 , 5,5
Актовый зал школы (вуза)	5,0 , 6,0
Зал драматического театра	5,0 , 7,0
Зал театра оперы и балета	6,0 , 8,0
Концертный зал объемом: 6 000 , 10 000 м ³	6,0 , 7,0
10 000 , 15 000 м ³	7,0 , 9,0
Зал многоцелевого назначения	5,0 , 8,0
Культовое учреждение	9,0 , 11,0
Зал кинотеатра	4,0 , 5,0
Радиостудия (в зависимости от численности оркестра)	10,0 , 50,0

Таблица 2

Максимальные объемы помещений для выступлений (без усилителей)

Источник звука	Объем, м ³
Малоопытный оратор	3000
Опытный оратор	6000
Певец или музыкант (соло)	10000
Большой симфонический оркестр	20000
Сводный хор	50000

3. ВЫБОР ФОРМЫ ЗАЛА И ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

3.1. Общие пропорции и длина зала

3.2. Устройство балкона

3.1. Общие пропорции и длина зала

Основные рекомендации к форме залов:

- расстояние между источником звука и слушателями в последнем ряду должно быть минимальным;
- угол, под которым со сцены видны крайние места в первом ряду, должен быть возможно меньше;
- поверхности стен вблизи сцены должны способствовать отражению звука в зал;
- форма стен не должна вызывать фокусирования звука;
- исключение возможности образования многократного эха, особенно между параллельными стенами.

Некоторые из этих требований несовместимы, например, первое и второе, поэтому необходимо найти наиболее целесообразное решение.

Оценку формы и размеров залов, а также отдельных поверхностей с акустической точки зрения обычно производят на основе данных акустических исследований в натуре или на модели и с помощью геометрических построений.

Основные размеры зала должны удовлетворять существующим нормам. При этом по акустическим соображениям могут быть рекомендованы следующие правила:

- отношение длины зала к его средней ширине следует принимать более 1 и не более 2. Если это отношение более 2, то диффузность звука в зале значительно ухудшается. При отношении, меньшем 1 (широкий зал малой длины), получается нежелательное запаздывание отражений от боковых стен, и вследствие направленности источников звука ухудшается слышимость на боковых местах. Отношение, близкое к 1, также неблагоприятно для акустики зала;
- в тех же пределах (т. е. более 1 и не более 2) рекомендуется принимать и отношение средней ширины зала к его средней высоте, во всех случаях оно не должно превышать 3;
- длину залов, не имеющих сцены, рекомендуется брать не более 30 м (от задней стены до передней), а залов со сценой - не более 28 м (от задней стены до занавеса).

Рекомендуемые значения предельных удалений зрителей от источника звука приведены в табл. 3.

Таблица 3

Рекомендуемые значения предельных удалений зрителей от источника звука

Назначение зрительного зала	Предельное удаление зрителей
Аудитория	25 м от места расположения лектора
Конференц-зал	
Лекционный зал	
Зал драматического театра	
Зал театра оперы и балета: в партере	25 м от сцены
на балконе	30 м от сцены
Концертный зал	30 м от эстрады
Зал многоцелевого назначения средней вместимости	26 м от занавеса

3.2. Устройство балкона

В залах, вместимостью более 600 слушателей, целесообразно устройство одного или нескольких балконов. Этим достигаются снижение объема зала, уменьшение его длины и расчленение стен, что способствует хорошей акустике.

Отношение выноса балкона a_1 к средней высоте подбалконной пазухи h_1 (рис. I) должно быть не более 1,5. Такое же отношение должно соблюдаться и в ложах. Для пазухи над балконом (если над ним нет вышележащего балкона) отношение a_2/h_2 может быть увеличено до 2.

Предельная глубина подбалконного пространства не должна превышать 4,5 рядов мест для зрителей. Высота нижней грани передней части балкона над соответствующим рядом мест для зрителей партера должна быть не менее 5 м, а над последним рядом не менее 3,5, 4,0 м.

При соблюдении указанных условий достигаются хорошая слышимость и разборчивость в глубине этих пазух.

Наклон потолка пазух над и под балконом (см. рис. I) также улучшает слышимость в пазухах.

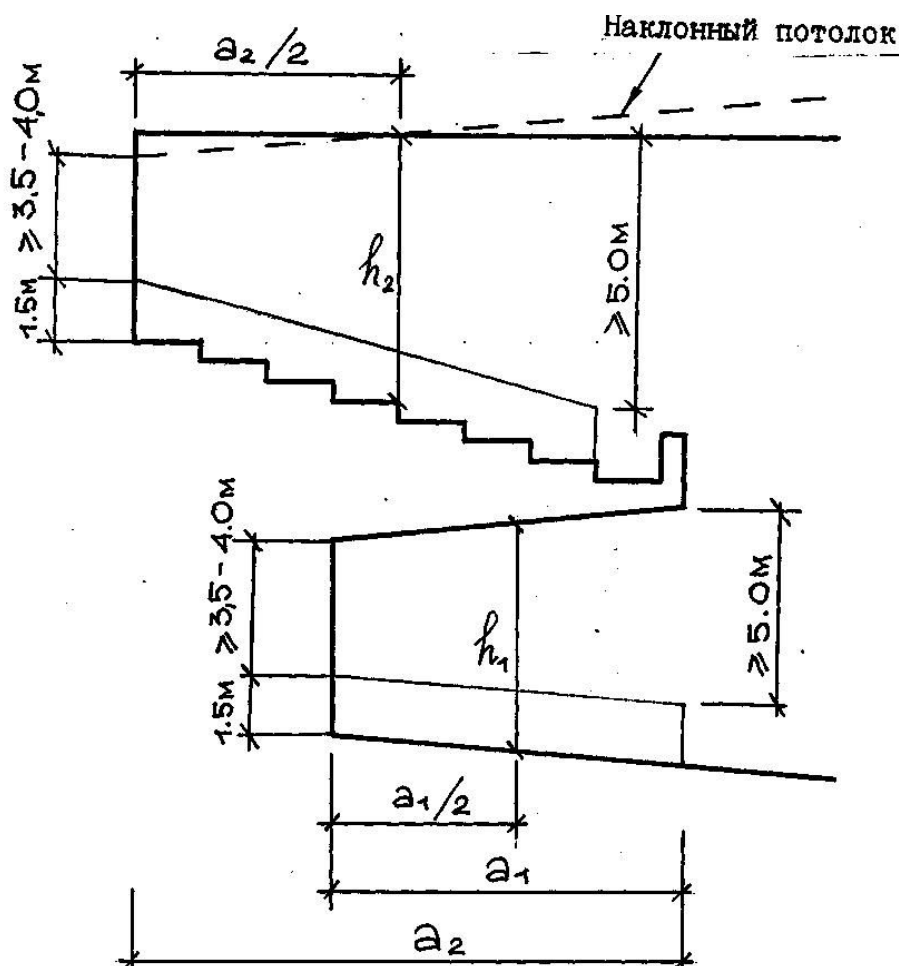


Рис. 1. Надбалконные и подбалконные пазухи

4. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВИДИМОСТИ

4.1. Размещение зрительских мест в горизонтальной плоскости (на плане помещения)

4.2. Размещение зрительских мест в вертикальной плоскости (на разрезе помещения)

4.1. Размещение зрительских мест в горизонтальной плоскости (на плане помещения)

Независимо от расположения слушателей по отношению к источнику звука к ним должен быть обеспечен непосредственный доступ прямых звуковых лучей. Это может быть выполнено лишь в том случае, если источник звука виден слушателю.

Обеспечение видимости объекта наблюдения зависит от взаимного расположения в пространстве объекта наблюдения, наблюдателя и сидящих впереди него зрителей, то есть от пространственного построения зрительских мест, обращенных к объекту наблюдения. Это пространственное построение - важнейший элемент проектирования всех видов помещений с местами для зрителей.

Пространственное построение мест для зрителей определяется их размещением в горизонтальной и вертикальной плоскостях, то есть на плане и на разрезе помещения.

Места в плане можно размещать в линейном порядке в затылок и в шахматном порядке (рис. 2). В качестве объекта наблюдения взята горизонтальная проекция центральной части портала сцены. К ней проведены лучи зрения при ограниченной видимости, когда головы впереди сидящих зрителей частично заслоняют объект наблюдения. Для характеристики условий ограниченной видимости и сравнения линейного и шахматного размещений мест на линии портала выделены зоны беспрепятственного прохождения лучей между головами впереди сидящих (зона I), зоны прохождения лучей над головами сидящих на два ряда впереди (зона II) и на один ряд впереди (зона III) с указанием величины каждой зоны в процентах.

Беспрепятственная видимость предполагает такое пространственное размещение зрителей относительно объекта наблюдения, при котором в поле зрения каждого зрителя находится полностью весь объект наблюдения.

При ограниченной видимости в поле зрения находится только часть объекта наблюдения, а остальная часть заслонена впереди сидящими людьми.

Минимально ограниченная видимость предполагает такие условия, при которых, невидимая часть объекта наблюдения доведена до минимума и, кроме того, обеспечена возможность видимости этой заслоненной части объекта при некотором отклонении зрителя в сторону (в пределах 0,4 ширины места в каждую сторону).

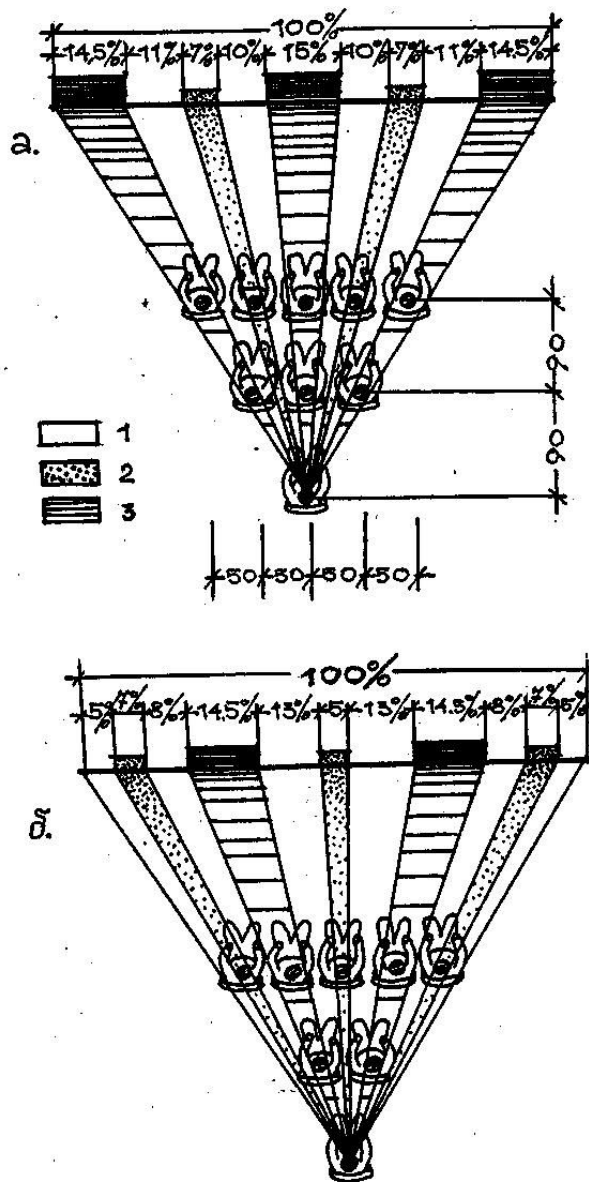


Рис. 2. Расположение зрительских мест: а – линейное, б – шахматное;

1 – зона I, беспрепятственная видимость;

2 – зона II, луч проходит над головой сидящего через ряд;

3 – зона III, луч проходит над головой сидящего в предыдущем ряду

Необходимые условия беспрепятственной или ограниченной видимости для каждого вида зрелищ устанавливаются специальными требованиями, исходя из особенностей объектов наблюдения. Например, арены для спортивных игр должны быть полностью в поле зрения каждого зрителя, что отвечает условиям беспрепятственной видимости (без учета так называемых "мертвых зон", заслоненных оборудованием арены; на хоккейном поле - полоса ближайшего к зрителю борта); в концертных залах допустима беспрепятственная видимость только части сцены и минимально ограниченная видимость ее остальной части.

На рис. 3 показаны условия видимости фигуры актера, стоящего на линии портала, для каждой из этих зон. В пределах зоны I фигура актера видна полностью (рис. 3а); в

пределах зоны II лучи проходят выше и видна часть фигуры актера (рис. 3б); в зоне III лучи зрения проходят еще выше и видна только верхняя часть фигуры (рис. 3 в).

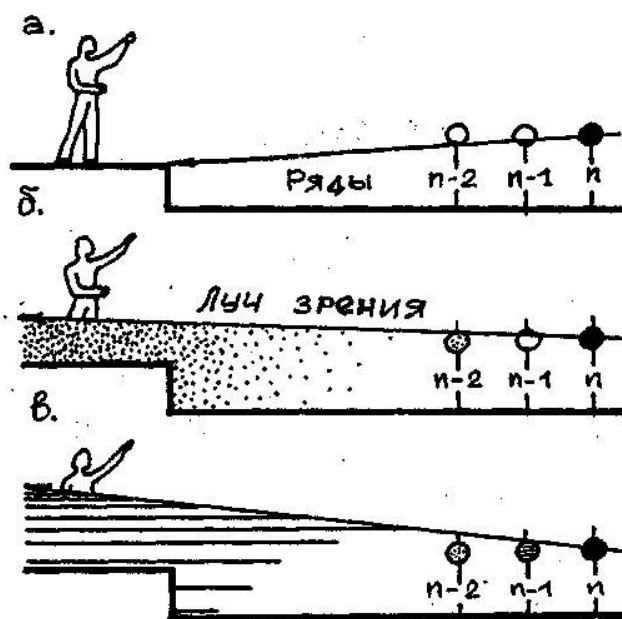


Рис. 3. Геометрические параметры условий видимости в зависимости от расположения зрителей в горизонтальной плоскости:

а – зона I – беспрепятственная видимость; б – зона II; в – зона III

Следовательно, при линейном расположении в затылок зона беспрепятственной видимости (зона I) составляет 42% видимого фронта портала, а при шахматном – 52%. Зона минимальной ограниченности (зона II) при линейном расположении охватывает 14%, а при шахматном – 19%. Соответственно зона ограниченной видимости (зона III) при линейном расположении – 44%, при шахматном – 29%. Таким образом, шахматная расстановка зрительских мест обеспечивает значительные преимущества условий видимости. Однако ряда зрительских мест уступами ограничивают проходы в зале, что приводит к неэкономичному использованию его площади. Если учесть возможность перемещения головы зрителя в пределах 0,4 ширины места, то различия в качественных характеристиках условий видимости при линейном и шахматном расположениях зрительских мест в значительной мере сглаживаются. Поэтому в качестве основного вида размещения мест в горизонтальной плоскости принята линейная схема как наиболее экономичная.

При криволинейном расположении рядов мест для зрителей к боковым частям зала линейная схема постепенно переходит в шахматную.

Как видно из рис. 2, условия видимости в горизонтальной плоскости зависят от удаления мест от сцены, от ширины ряда и места, от размещения мест относительно объекта наблюдения (центральное, боковое), то есть непосредственно связаны с планировкой зала и расположением в нем мест для зрителей.

4.2. Размещение зрительских мест в вертикальной плоскости (на разрезе помещения)

- 4.2.1. Определение профиля поверхности пола
- 4.2.2. Определение предельного удаления зрителей
- 4.2.3. Расположение рядов зрительских мест по наклонной прямой
- 4.2.4. Расположение рядов мест по кривой наименьшего подъема
- 4.2.5. Расположение подъема рядов мест в виде ломаной линии

4.2.1. Определение профиля поверхности пола

Условия беспрепятственной видимости в вертикальной плоскости обеспечиваются таким взаимным расположением объекта наблюдения и зрителей, при котором лучи зрения ко всем точкам объекта наблюдения проходят над головами впереди сидящих людей. Это может быть достигнуто следующими приемами:

- 1) расположением мест для зрителей на горизонтальной плоскости (пол зала горизонтальный), а объекта наблюдения - на такой высоте, при которой лучи зрения от каждого зрителя ко всем частям объекта проходят над головами впереди сидящих людей;
- 2) последовательным подъемом рядов мест для зрителей по мере их удаления от объекта наблюдения, обеспечивающим прохождение лучей зрения ко всем частям объекта наблюдения над головами сидящих людей;
- 3) подъемом объекта наблюдения и рядов мест для зрителей. При построении мест для зрителей в вертикальной плоскости для обеспечения беспрепятственной видимости всего объекта наблюдения выбирается наиболее неблагоприятная для видимости нижняя точка объекта наблюдения, лучи зрения к которой от каждого зрителя должны проходить над головой впереди сидящего человека. Эта точка называется расчетной точкой видимости. Положение расчетной точки устанавливается в зависимости от особенностей объекта наблюдения (табл. 4).

Таблица 4

Рекомендуемые положения расчетной точки видимости

Назначение зрительного зала	Место расположения расчетной точки видимости
Школьный класс	В центре нижней грани меловой доски
Лекционный зал	
Конференц-зал	
Зал драматического театра	На уровне планшета сцены по ее центральной оси на расстоянии 1,2 м от переднего края авансцены или на линии портала сцены
Зал театра оперы и балета	
Концертный зал	
Зал многоцелевого назначения	
Актный зал	В центре нижней границы экрана
Зал кинотеатра	
Цирк	Ближайший к зрителю край барьера

Уровень глаз сидящего зрителя над полом принимается 1,15 м (средняя величина, установленная на основе антропометрических измерений). Расстояние между уровнем глаз зрителя и верхней точки его головы, над которой проходит луч зрения сидящего сзади зрителя С, также установлено на основе антропометрических измерений. Для зрителей без головных уборов $C = 0,12$ м, для зрителей в головных уборах $C = 0,15$ м (рис. 4).

а) б)

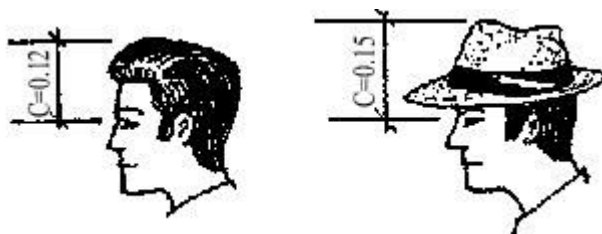


Рис. 4. Величина превышения луча зрения: а - для зрителей, находящихся в закрытых помещениях; б - для зрителей, сидящих на открытых трибунах

4.2.2. Определение предельного удаления зрителей

При расположении мест для зрителей на горизонтальной плоскости необходимо установить взаимосвязь их предельного удаления и уровня расположения объектов наблюдения над этой горизонтальной плоскостью (рис. 5).

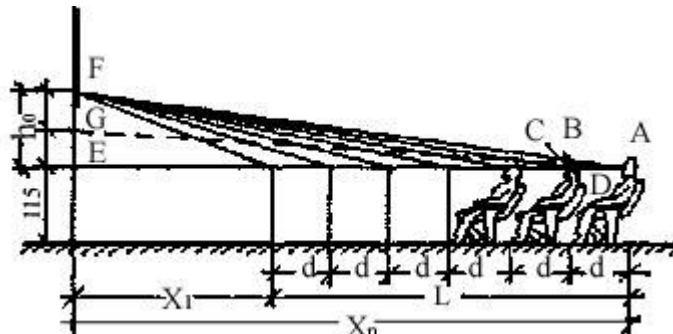


Рис. 5. Схема к расчету предельного удаления зрителей от объекта наблюдения в залах с горизонтальным полом

Обозначим положение расчетной точки видимости через F. Из подобия треугольников

$$\frac{BD}{FE} = \frac{AD}{AE},$$

ABD и AFE имеем

где $AD=d$ – ширина ряда;

$AE=x_n$ – удаление зрителя n -го ряда от объекта наблюдения;

$BD = C$ – превышение луча зрения над уровнем глаз впереди сидящего зрителя;

$FE - h_0$ - искомая высота уровня расположения объекта наблюдения над уровнем глаз зрителей (при прохождении луча зрения над головой зрителя следующего ряда).

Следовательно, из подобия треугольников ABD и AFE получаем $\frac{C}{h_0} = \frac{d}{x_n}$,

$$\text{откуда } h_0 = \frac{C \cdot x_n}{d} \quad (I)$$

Отсюда следует, что при большом количестве рядов потребуется значительный подъем объекта наблюдения над уровнем пола. Для многих объектов большой подъем недопустим. Например, сцена-эстрада может иметь высоту не более 1,1 м (то есть ниже уровня глаз сидящего зрителя), так как в противном случае создаются неблагоприятные условия зрительного восприятия с отрицательными углами к горизонту и часть сцены закрывается проекцией ее края; низ меловой доски в аудитории по условиям удобного пользования может быть расположен на 0,9,1 м от пола аудитории или кафедры.

Таким образом, подъем объекта наблюдения над уровнем пола ограничен. Поэтому формула (I) чаще используется для решения обратной задачи - определения предельного удаления зрителей x_n при заданном уровне расположения нижней точки объекта наблюдения h_0 :

$$x_n = \frac{h_0 \cdot d}{C} \quad (2)$$

Такие задачи решаются при проектировании относительно небольших помещений, в которых желательно иметь горизонтальный пол.

4.2.3. Расположение рядов зрительских мест по наклонной прямой

В зрительных залах и сооружениях большой вместимости обеспечение условий беспрепятственной или минимально ограниченной видимости объектов наблюдения достигается последовательным подъемом рядов мест.

В театрах и концертных залах для уменьшения высоты подъема рядов мест, а, следовательно, для сокращения общей высоты помещения и его строительного объема принимается минимально ограниченная видимость с превышением луча зрения $C = 0,06$, $0,08$ м.

При расположении рядов мест по наклонной прямой ступени подъема рядов мест будут одинаковыми (рис, б).

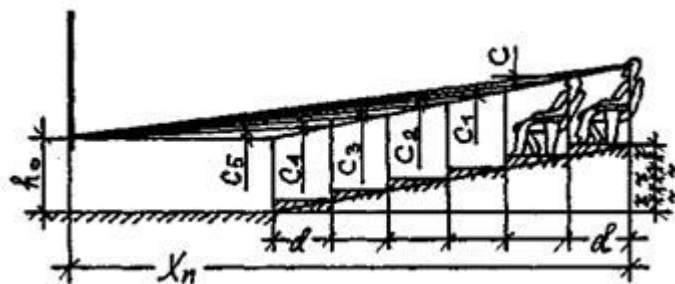


Рис. 6. Профиль подъема рядов мест по наклонной прямой

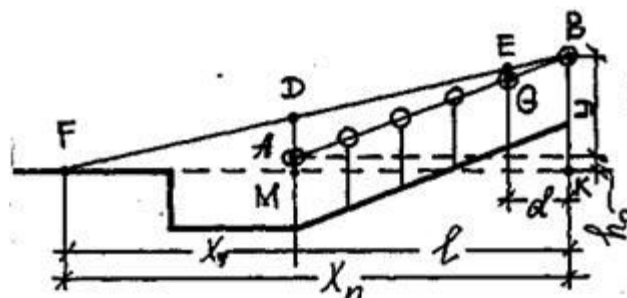


Рис. 7. Расчетная схема профиля подъема рядов по наклонной прямой

Из подобия треугольников ABD и GEE (рис. 7) получим

$$\frac{AD}{GE} = \frac{AB}{GB}$$

Из подобия треугольников FMD и FKB (см. рис. 7) следует

$$\frac{BK}{DM} = \frac{FK}{FM}$$

где $FM = x_1$ - удаление первого ряда зрителей от расчетной точки видимости F ;

$FK = x_n$ - удаление последнего ряда зрителей от точки F ;

$MA = h_0$ - превышение уровня глаз зрителя первого ряда над точкой F ;

l - общее протяжение одной группы рядов;

h - превышение уровня глаз зрителя последнего ряда над уровнем глаз зрителя первого ряда;

d - ширина ряда.

Следовательно, из подобия треугольников GBE и ABD , FMD и FKB получаем

$$\frac{AD}{GE} = \frac{l}{d}, \text{ но } GE = C, \text{ то есть } AD = \frac{l \cdot C}{d},$$

$$\frac{BK}{DM} = \frac{FK}{FM}, \text{ или } \frac{y + h_0}{h_0 + AD} = \frac{x_1 + l}{x_1};$$

$$y = \frac{(h_0 + AD) \cdot (x_1 + l)}{x_1} - h_0 = \frac{l \cdot h_0}{x_1} + \frac{AD \cdot (x_1 + l)}{d \cdot x_1},$$

но $AD = \frac{l \cdot C}{d}$, следовательно

$$y = \frac{l \cdot h_0}{x_1} + \frac{C \cdot l \cdot x_n}{d \cdot x_1} \quad (3)$$

Если уровень глаз зрителя первого ряда ниже точки F (положение характерное для кинотеатров), то h_0 отрицательное, а

$$y = -\frac{l \cdot h_0}{x_1} + \frac{C \cdot l \cdot x_n}{d \cdot x_1} \quad (4)$$

Если уровень глаз зрителя первого ряда находится на одном уровне с точкой F , то

$$h_0 = 0, \text{ тогда } y = \frac{C \cdot l \cdot x_n}{d \cdot x_1} \quad (5)$$

Если обеспечить нормативное превышение луча зрения C для зрителей самого верхнего ряда, то от ряда к ряду к низу эти превышения возрастают и достигают наибольшей величины во втором ряду. Так, на участке в семь рядов мест (см. рис. 6, 7) величина C возросла во втором ряду в 2,5 раза.

При большом количестве рядов возрастание величины C в нижних рядах может значительно превысить требуемую. Следовательно, общий подъем рядов будет также завышен, поэтому такое решение будет не экономично, так как потребуются излишняя высота помещения или трибун. Таким образом, расположение рядов мест по наклонной прямой целесообразно только при ограниченном числе рядов, находящихся в значительном удалении от источника звука, например на балконах и ярусах.

4.2.4. Расположение рядов мест по кривой наименьшего подъема

Для обеспечения беспрепятственной видимости при наименьшем подъеме рядов необходимо, чтобы нормативное превышение C для всех рядов было одинаковым.

Построение профиля с таким подъемом рядов может быть осуществлено графическим или аналитическим способом.

При графическом построении профиля вычерчивают в достаточно крупном масштабе (1:50 и более) схему продольного разреза зрительного зала по его центральной оси (рис. 8) с указанием расчетной точки объекта наблюдения F , а также положения глаз первого ряда зрителей (точка A) с привязкой размерами в вертикальном и горизонтальном направлениях к расчетной точке.

Затем вертикальными линиями наносят границы всех рядов мест; при этом допускается совмещать положение глаз зрителя каждого ряда с границей ряда (спинкой кресла).

От уровня глаз зрителя первого ряда вверх по вертикали откладывается отрезок $С$, равный нормативному для данного сооружения, и из точки F через вершину этого отрезка проводят прямую линию (луч) до пересечения с задней границей второго ряда. Это пересечение определяет уровень глаз зрителя второго ряда.

Для следующих рядов это построение последовательно повторяют.

В результате получается профиль так называемой кривой наименьшего подъема рядов мест при обеспечении всех рядов нормативного превышения луча зрения $С$, то есть условий беспрепятственной видимости.

Полученная кривая близка к гиперболе: пологий подъем в начальной части, ближайшей к объекту наблюдения, со все более увеличивающейся кривизной по мере удаления от него.

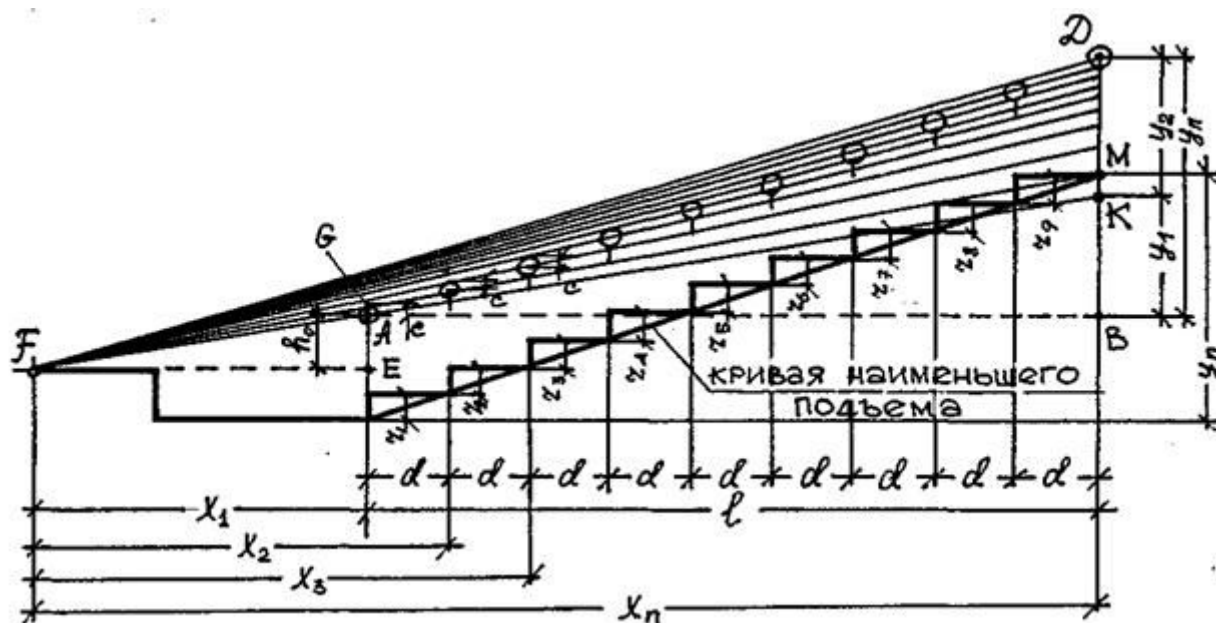


Рис. 8. Построение подъема рядов мест по кривой наименьшего подъема

Графический метод построения не совершенен, поскольку величины удаления от точки F и подъем рядов оцениваются десятками метров, а превышение лучей зрения - сотыми долями метра. Для достижения необходимой точности требуется большой масштаб чертежа, а при значительном количестве рядов чертеж оказывается громоздким и трудоемким в выполнении. Поэтому применение графического способа допустимо при проектировании небольших залов и сооружений.

Более надежным, точным и практичным способом построения профиля подъема рядов по кривой наименьшего подъема является аналитический, который подробно рассматривается в [2].

Построение профиля по кривой наименьшего подъема обеспечивает условия беспрепятственной видимости или нормативно ограниченной видимости при минимальной величине подъема рядов мест. Однако кривизна профиля от ряда к ряду изменяется, и все ступени подъема получаются разной величины, что усложняет строительство и исключает возможность применения промышленных конструкций. Поэтому в практике проектирования чаще применяют профиль подъема рядов мест в виде ломаной линии.

4.2.5. Расположение подъема рядов мест в виде ломаной линии

Профиль подъема рядов мест в виде ломаной линии состоит из отрезков наклонных прямых, вписанных в кривую наименьшего подъема в виде хорд отдельных участков этой кривой (рис. 9). Каждый отрезок имеет свой угол наклона и на нем размещают группу рядов с одинаковым уклоном.

По сравнению с профилем по кривой наименьшего подъема ломаный профиль дает увеличение подъема на 15 , 25% но значительно упрощает строительство. Чем ближе ломаная линия к кривой, тем меньше дополнительное увеличение подъема рядов. Размер каждого отрезка ломаной линии должен быть кратен ширине ряда. Точки перелома P должны находиться на границе последнего ряда каждой группы рядов.

Для приближения ломаного профиля к профилю кривой следует применять разбивку на небольшие отрезки, постепенно увеличивая количество рядов и длину отрезков по мере удаления от объекта наблюдения. Такая разбивка отвечает характеру кривой.



Рис. 9. Профиль подъема рядов в виде ломаной линии: P - точка перелома; углы $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$

Имеется математический метод определения оптимального числа рядов в группах, разработанный А. М. Данилюком (см. п. 4.3.1 и рис. 7).

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОТОЛКА И СТЕН ЗАЛА

- 5.1. Применение геометрических (лучевых) отражений и их построение
- 5.2. Допустимое запаздывание ранних звуковых отражений
- 5.3. Распределение отраженного звука
- 5.4. Предотвращение концентрации отраженного звука
- 5.5. Обеспечение достаточной диффузности звукового поля

5.1. Применение геометрических (лучевых) отражений и их построение

В зале звуковые волны распространяются от источника к ограждающим поверхностям, от которых многократно отражаются. В результате в помещении образуется звуковое поле.

Приближенная оценка формы и размеров помещений с акустической точки зрения состоит в анализе звукового поля на основе принципов геометрической акустики, то есть в рассмотрении распространения прямых и отраженных звуковых волн и построении так называемого "лучевого эскиза".

При определенных условиях можно вместо звуковых волн рассматривать звуковые лучи, в направлении которых распространяются эти волны. Распространение таких лучей аналогично распространению световых лучей в геометрической оптике, и построение геометрических (лучевых) отражений широко применяется в архитектурной акустике:

- 1) падающий и отраженный от какой-либо точки поверхности лучи образуют равные углы (угол падения и угол отражения) с нормалью к отраженной поверхности в этой точке;
- 2) падающий и отраженный лучи лежат совместно с нормалью в одной плоскости (лучевая плоскость).

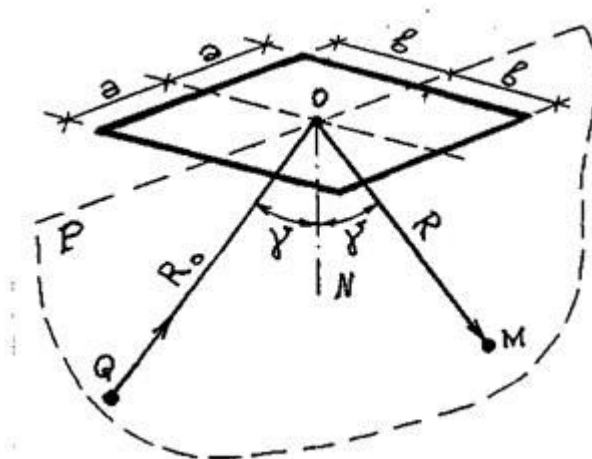


Рис. 10. Отражение звука от прямоугольного отражателя

Допустимость применения геометрических (лучевых) отражений зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и точке приема. Отражающая поверхность должна при этом иметь массу не менее 20 кг/м^2 , и ее коэффициент звукопоглощения α для рассматриваемых частот не должен превышать 0,1. На рис. 10 отражающая поверхность взята в виде прямоугольного плоского отражателя со сторонами, равными $2a$ и $2b$, центр его совпадает с точкой геометрического отражения O , а сторона $2a$ параллельна лучевой плоскости P , в которой лежат падающий луч QO , отраженный луч OM и нормаль ON ; R_0 - расстояние от

источника Q до точки O; R - расстояние от точки O до точки приема M; g - углы падения и отражения. Если ввести безразмерные величины

$$\begin{cases} u = a \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)}; \\ v = b \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)}, \end{cases} \quad (6)$$

где λ - длина звуковой волны, то абсолютное отклонение фактического уровня звукового давления в точке приема M от уровня, соответствующего строго геометрическому отражению, не превысит, дБ:

$$\Delta L = 4,4 \cdot \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{v} \right) \quad (7)$$

Применение геометрических отражений можно считать допустимым если DL не более 5 дБ, а наименьшая сторона отражателя не менее чем в 1,5 раза превышает длину волны λ . Длина волны λ связана с частотой f .

Если форма и ориентировка отражателя отличаются от показанных на рис. 10, то расчет значительно усложняется. Для ориентировочной оценки отклонения от геометрической акустики можно приближенно использовать формулу (7), вписав в отражатель прямоугольник, удовлетворяющий рис. 10.

Формула (7) применима и для отражателя, обладающего кривизной, если его наименьший радиус кривизны не менее чем в 2 раза превышает длину волны λ .

Поверхности, дающие направленные отражения, следует проектировать таким образом, чтобы условия применимости геометрических отражений выполнялись, по крайней мере, для частот, превышающих 300-400 Гц (то есть для звуковых волн длиной примерно 1 м и менее), так как эти частоты важны для разборчивости речи. Таким образом, для расчета можно принимать $\lambda = 1$ м. Если указанные условия выполнены, то построение геометрических отражений допустимо не только от центра отражателя но и от других точек его поверхности, удаленных от краев отражателя не менее чем в половину длины волны λ . При заданном требовании $\lambda \geq 1$ м это означает, что точки геометрического отражения должны браться не ближе 0,5 м от краев отражающей поверхности.

При построении геометрических отражений от плоскости удобен прием, показанный на рис. 11 а. Здесь используется мнимый источник Q_1 , симметричный с действительным точечным источником Q по отношению к отражающей плоскости и находящийся по другую ее сторону. Для построения мнимого источника надо опустить из точки Q перпендикуляр QA на отражающую плоскость и на продолжении его отложить отрезок AQ_1 , равный отрезку QA. Прямые, проведенные из мнимого источника Q_1 , после пересечения ими отражающей плоскости удовлетворяют условию равенства углов падения и отражения, то есть являются искомыми отраженными лучами, создаваемыми действительным источником Q.

Метод мнимых источников применим и при построении отражений от кривых поверхностей. Если требуется найти отражение от какой-либо точки O кривой поверхности C (см. рис. 11 б) при заданном положении источника Q , то следует в точке O построить касательную плоскость T к поверхности. Мнимым источником в этом случае является точка Q_1 , симметричная источнику Q относительно касательной плоскости; продолжение OM прямой Q_1O после пересечения ее с поверхностью C является искомым отраженным лучом. Здесь для каждой точки O отражающей поверхности приходится находить свой мнимый источник Q_1 в отличие от ранее рассмотренного случая (см. рис. II,а), у которой для отражения от любой ее точки мнимый источник один и тот же (при заданном положении источника Q). Суммарная длина $QO + OM$ лучей QO и OM , дающая длину полного хода отраженного звука от источника Q до некоторой точки приема M , равна расстоянию Q_1M от мнимого источника Q_1 до точки M (см. рис. 11а, 11б). При этом, разумеется, следует брать истинные длины указанных отрезков, а не их проекций.

Если лучевая плоскость P (см. рис.10) параллельна одной из плоскостей проекций (вертикальной или горизонтальной, то углы падения и отражения проецируются на эту плоскость без искажения, и построение отраженного луча выполняется при помощи описанных приемов.

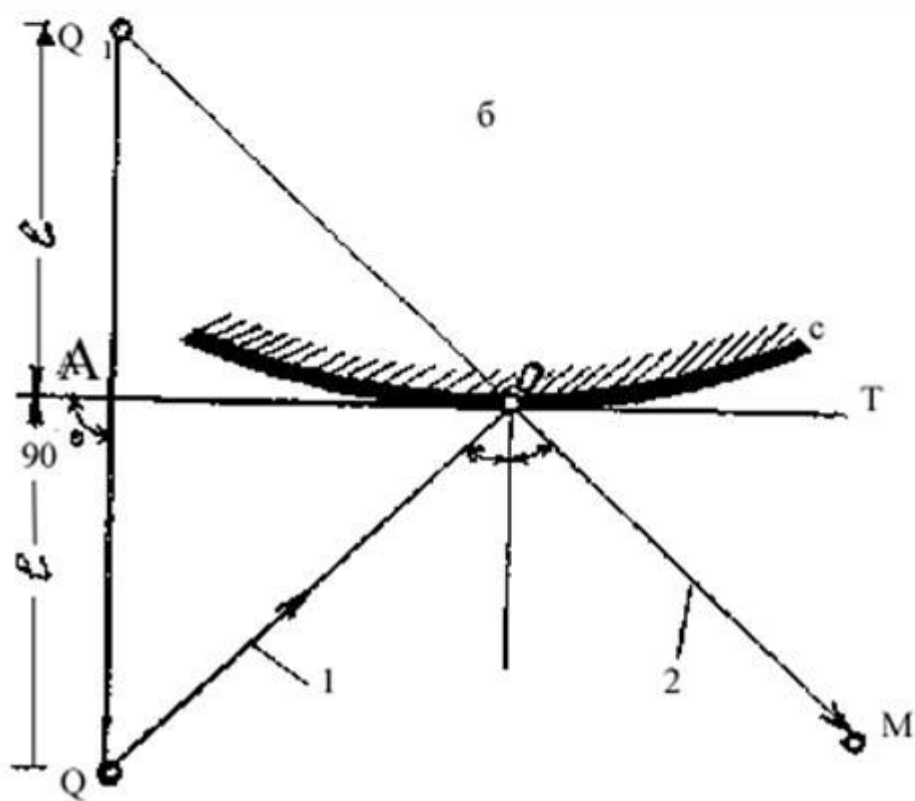
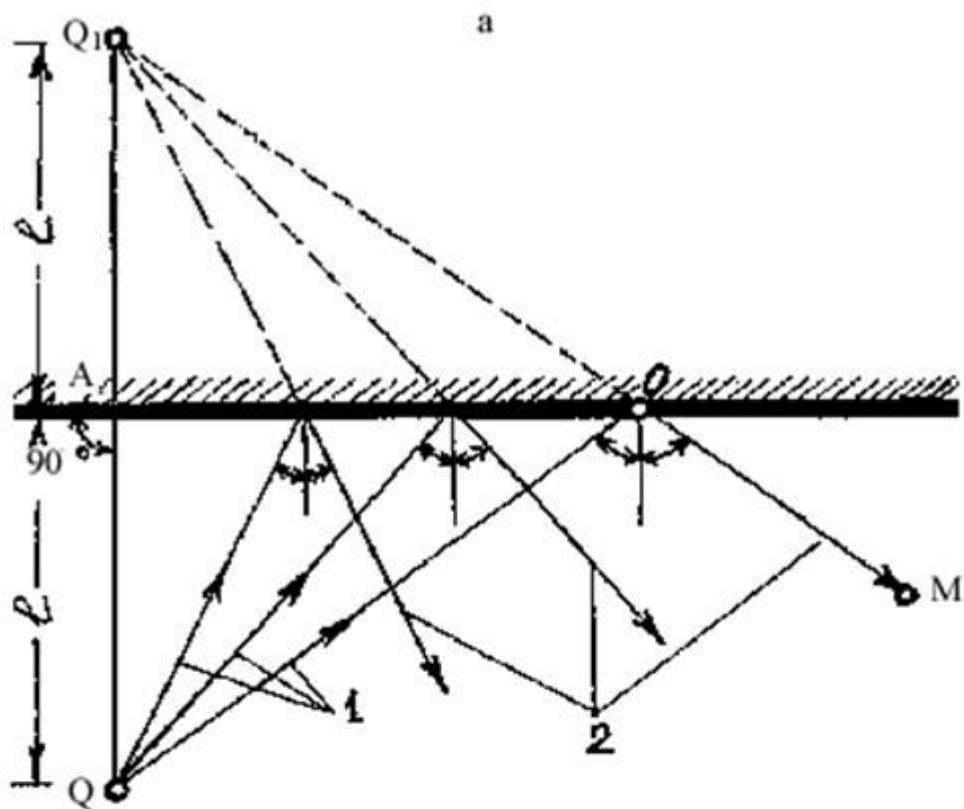


Рис. 11. Построение геометрических отражений звуковых лучей с помощью мнимого источника: а - отражение от плоскости;

б - отражение от кривой поверхности;

Q - источник звука;

Q_1 - мнимый источник звука;

1 - прямые лучи, 2 - отраженные.

Не представляет трудности построение отраженного луча и в тех случаях, когда лучевая плоскость не параллельна плоскости проекций, но ей параллельна лишь нормаль к отражающей поверхности в точке отражения. Это равносильно тому, что касательная плоскость к отражающей поверхности (в той же точке) перпендикулярна плоскости проекции.

Для примера на рис. 12 дано построение геометрического отражения, вызываемого отражателем, имеющим вид цилиндрической поверхности с произвольной криволинейной направляющей и с образующими, перпендикулярными вертикальной плоскости проекций. Отражатель помещен вблизи потолка перед эстрадой зала. Точечный источник звука задан его проекциями q и q' . Требуется найти геометрическое отражение от некоторой точки отражателя, имеющей проекции a и a' . В данном случае касательная плоскость к поверхности отражателя в этой точке перпендикулярна вертикальной плоскости проекции; вертикальная проекция этой касательной плоскости есть прямая $t't'$. Прямые $q'a'$ и qa являются вертикальной и горизонтальной проекциями луча, исходящего из источника и достигающего точки отражения.

Вертикальную проекцию мнимого источника q_1' находим, опустив из точки q' перпендикуляр $q'O'$ на прямую $t't'$ и отложив на его продолжении отрезок $O'q_1'$, равный отрезку $q'O'$. Снося точку q_1' на горизонтальную прямую, проходящую через точку q , находим горизонтальную проекцию мнимого источника q_1 . Продолжения прямых $q_1'a'$ и q_1a , лежащие вправо от точек a' и a , являются соответственно вертикальной и горизонтальной проекциями отраженного луча.

Вертикальная проекция отраженного луча пересекает в точке e' расчетную поверхность амфитеатра (проходящую на 1,2 м выше его пола, соответственно положению ушей слушателей). Снося точку e' на горизонтальную проекцию отраженного луча, находим горизонтальную проекцию e точки пересечения отраженного луча с расчетной поверхностью амфитеатра. Длина ломаной линии, имеющей проекции qae и $q'a'e'$, равна полному ходу отраженного звука от источника до точки приема с проекциями e и e' . Эта длина равна расстоянию от мнимого источника до точки приема. Прямая с проекциями qe и $q'e'$ дает ход прямого звука. На рис. 12 легко найти и ходы прямого и отраженного звука. Так, например, полный ход отраженного звука (от источника до точки приема) равен

$$\sqrt{(q_1 \cdot e)^2 + (f' \cdot q_1)^2},$$

где f - точка пересечения горизонтальной прямой, проведенной через точку e' , с вертикальной прямой q_1q_1' .

В случаях, когда касательная плоскость к отражающей поверхности не перпендикулярна ни к одной из плоскостей проекций, надо при помощи обычных методов начертательной геометрии (замена плоскостей проекций, вращение) перейти к конфигурации, в которой касательная плоскость станет перпендикулярной плоскости проекций.

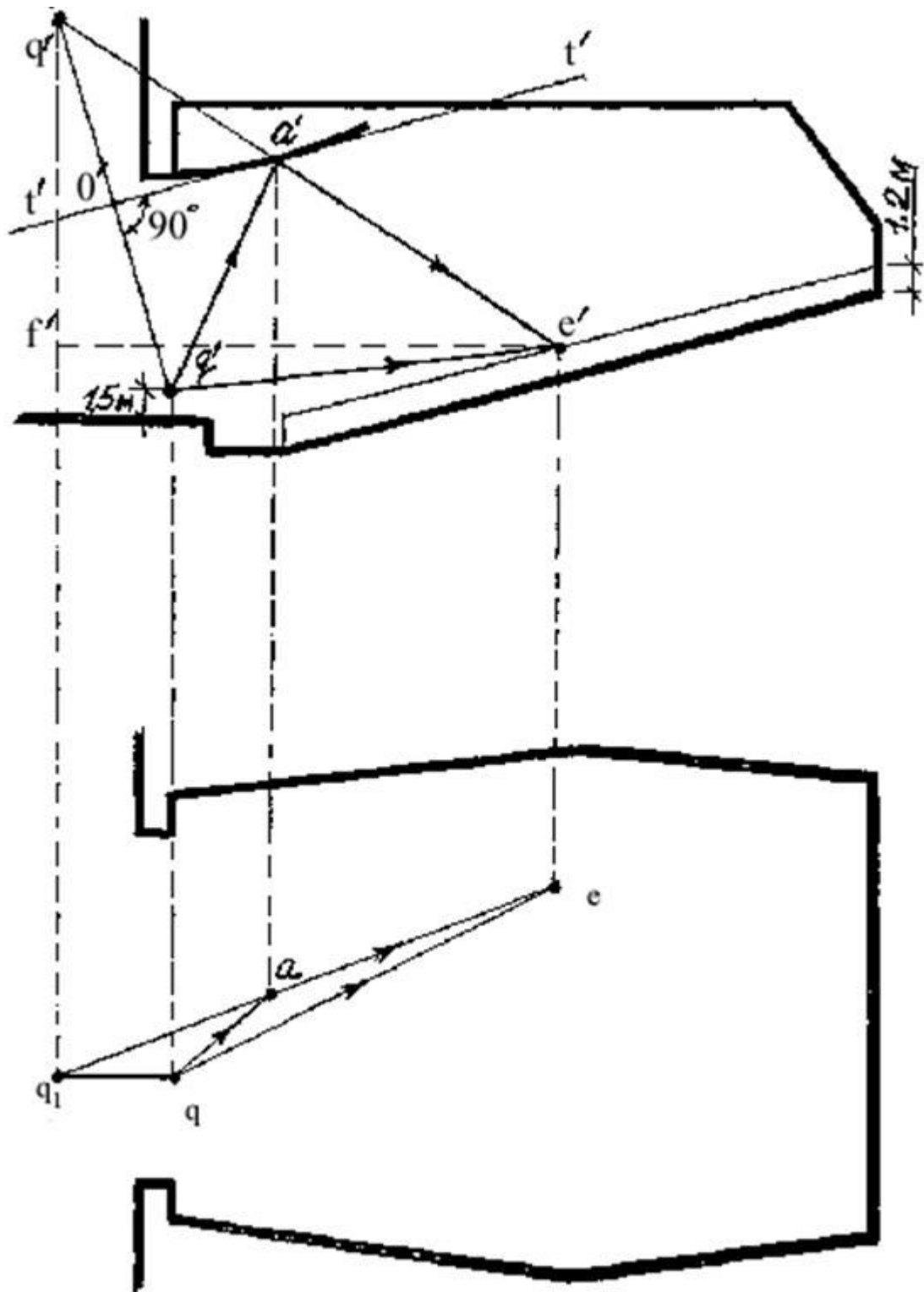


Рис. 12. Построение геометрического отражения при касательной плоскости, перпендикулярной плоскости проекции

5.2. Допустимое запаздывание ранних звуковых отражений

Достаточно ранние интенсивные звуковые отражения (в основном это первые, то есть однократные отражения от поверхности зала на пути звука от источника Q к слушателю M) дополняют прямой звук источника, улучшая слышимость и разборчивость (рис. 13).

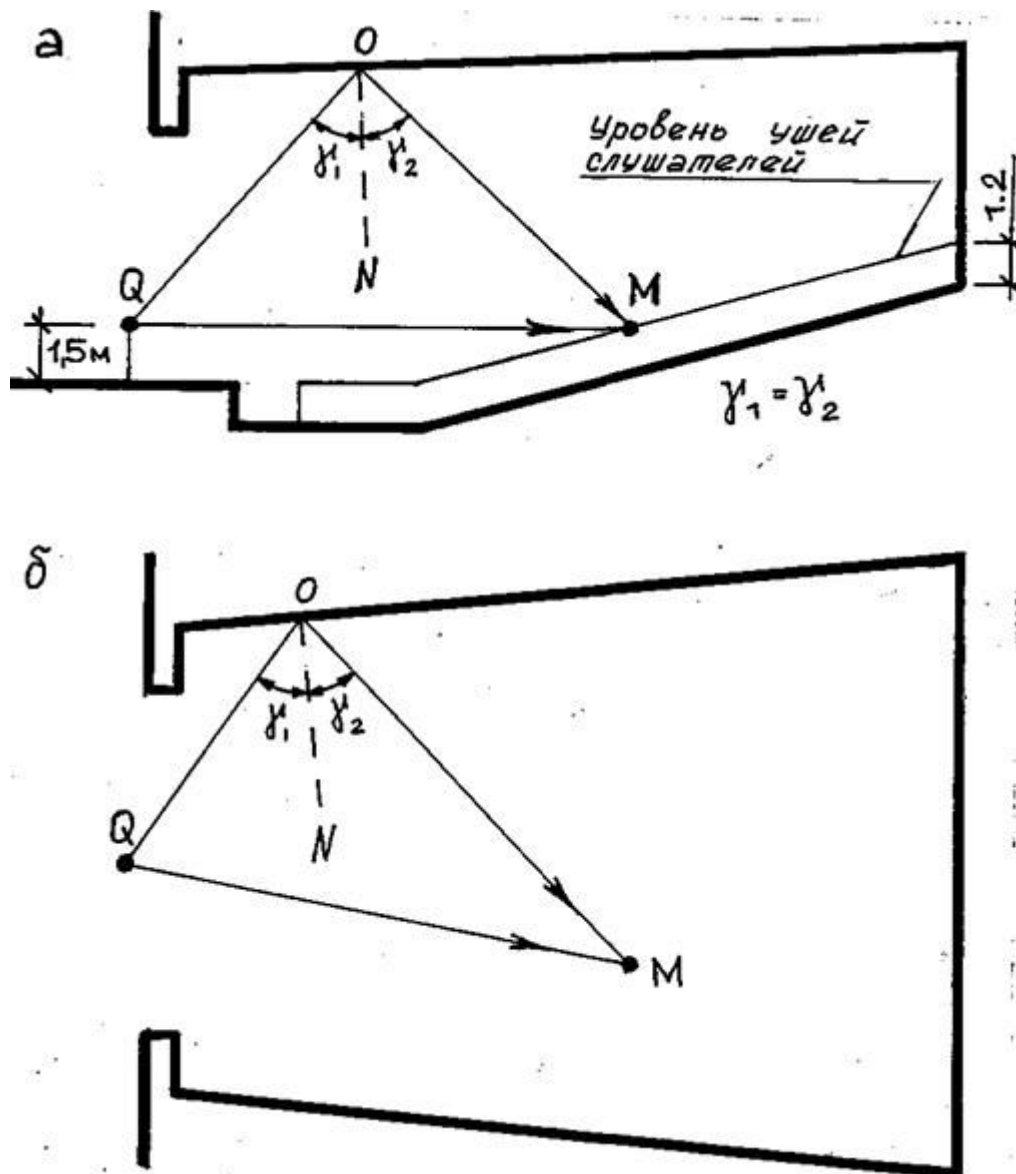


Рис. 13. Ход прямого звука и его первых отражений: N - нормаль к отражающей поверхности; а- продольный разрез зала; б - план зала

Интенсивными звуковыми отражениями являются (при достаточно малом их запаздывании) те, которые удовлетворяют условиям применимости геометрических отражений. На рис. 13 показан в виде лучей ход прямого звука от источника Q и первых отражений (с углом падения γ_1 , равным углу отражения γ_2) от потолка и стен, проходящих в какую-либо точку M в области расположения слушателей.

Если расстояние от источника Q до точки приема M превышает 8 м, следует обеспечить кроме прямого звука приход в эту точку мало запаздывающего первого отражения. Для хорошей разборчивости речи желательно, чтобы оно запаздывало по сравнению с приходом прямого звука не более чем на 20 мс. В случаях, когда добиться такого малого запаздывания затруднительно, оно может быть увеличено до 30 мс.

Так как скорость звука в воздухе составляет около 340 м/с, то запаздыванию на 20 мс соответствует разность ходов отраженного и прямого звука около 7 м, на 30 мс - 10 м. Таким образом, при расстоянии точки М от источника более 8 м для наиболее раннего отражения желательно, чтобы разность ходов $QO+OM+QM$ (рис. 13) не превышала 7 м, во всяком случае, не была больше 10 м. При этом следует брать истинные длины указанных отрезков, а не их проекций на чертеже.

Последовательные запаздывания прихода дальнейших отражений (то есть промежутки времени между приходами отдельных отражений) также не должны превышать указанных значений.

При расчетах разности ходов высота источника над полом эстрады или сцены принимается равной 1,5 м (уровень рта исполнителя), а высота точки приема над полом - равной 1,2 м (уровень уха слушателя).

5.3. Распределение отраженного звука

Очертания потолка и стен зала должны способствовать хорошему распределению отраженного от них звука, направляя большую долю его на удаленные от источника слушательские места. При проектировании зала следует при помощи геометрических (лучевых) построений контролировать распределение и запаздывание первых звуковых отражений от потолка и стен зала в соответствии с рекомендациями в п. 2.1.

Плоское горизонтальное очертание потолка (рис. 14) не является оптимальной его формой. Часть звука, отраженного от такого потолка, попадает в расположенные на расстоянии менее 8 м от источника передние ряды слушателей, для которых достаточная слышимость обеспечивается уже одним прямым звуком. Если высота передней части зала сравнительно велика, то запаздывание отраженного потолком звука по отношению к прямому звуку превышает указанные в п. 5.2 пределы.

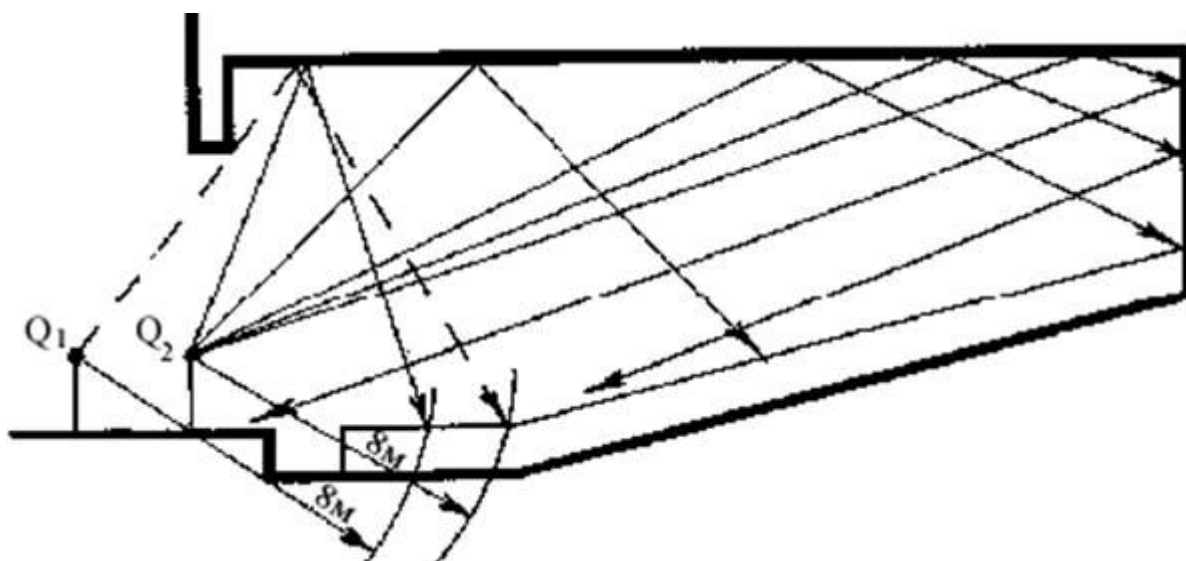


Рис. 14. Распределение отражений от плоского горизонтального потолка: Q_1 , Q_2 - источники звука

Вместе с тем, как видно из рис. 14, удаленная от источника часть такого потолка отражает звук не к слушателям, а на заднюю стену зала. Примыкая к задней стене под прямым углом, потолок дает после вторичного отражения от нее запаздывающее обратное отражение звука к источнику.

Распределение отраженного передней частью потолка звука можно улучшить устройством над эстрадой или авансценой отражателя (рис. 15), направляющего этот звук в основном не в передние ряды, а к более удаленным слушателям. Отражателю целесообразно придать показанное на рис. 15 выпуклое очертание, обеспечивающее хорошее распределение отраженного звука при разных положениях источника.

В виде такого отражателя выполняется передняя часть потолка или устраивается отражатель, подвешиваемый под потолком. Отражатель должен иметь массу не менее 20 кг/м^2 и может быть выполнен из железобетона, штукатурки по сетке или иного материала с малым коэффициентом звукопоглощения (не более 0,1 на частотах 125, 500 и 2000 Гц).

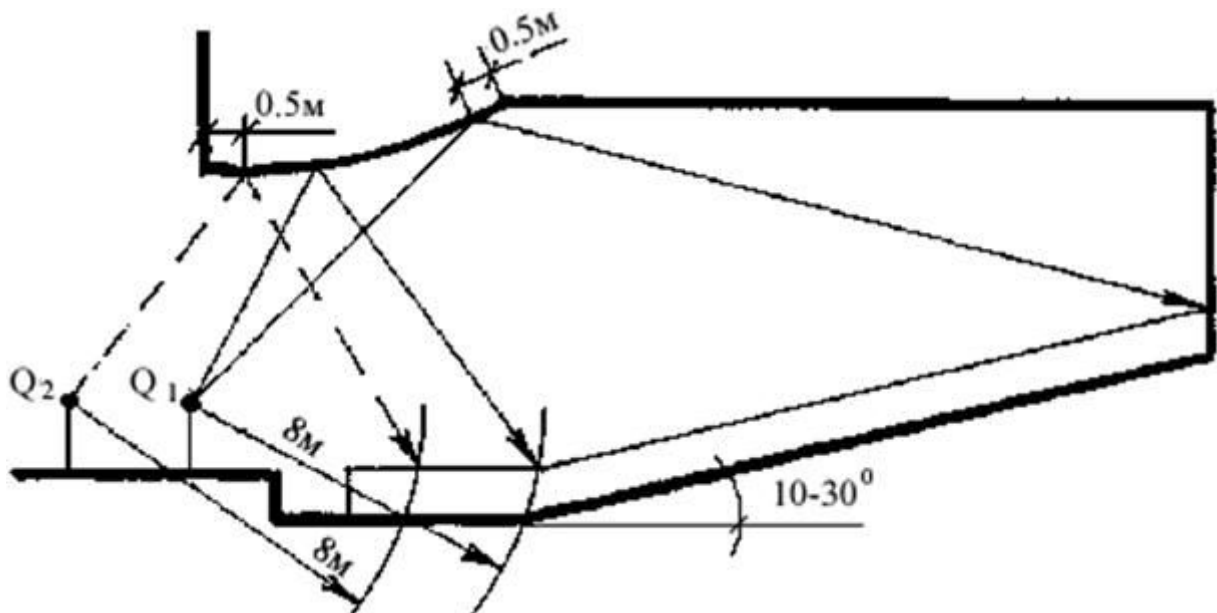


Рис. 15. Звукоотражатель в передней части потолка:

Q_1 и Q_2 - источники звука

Распределение звука, отраженного задней частью потолка, улучшается, если потолок имеет наклонный, примыкающий к задней стене участок (рис. 16а, б). В результате этого отраженный звук направляется, мало запаздывая по сравнению с прямым звуком, на задние места партера, улучшая там слышимость. Та же цель достигается наклоном в сторону слушателей задней стены (рис. 16, в). Полезным оказывается (в тех случаях, когда это согласуется с архитектурным замыслом) и наклон в сторону слушателей боковых стен, увеличивающий приходящую к слушателям долю звуковой энергии первых отражений от этих стен.

Часто применяющееся в практике проектирования залов расчленение потолка секциями (рис. 17) дает при правильном их очертании хорошее распределение отраженного звука.

Здесь следует обращать внимание на то, чтобы звуковые отражения от смежных секций перекрывали друг друга.

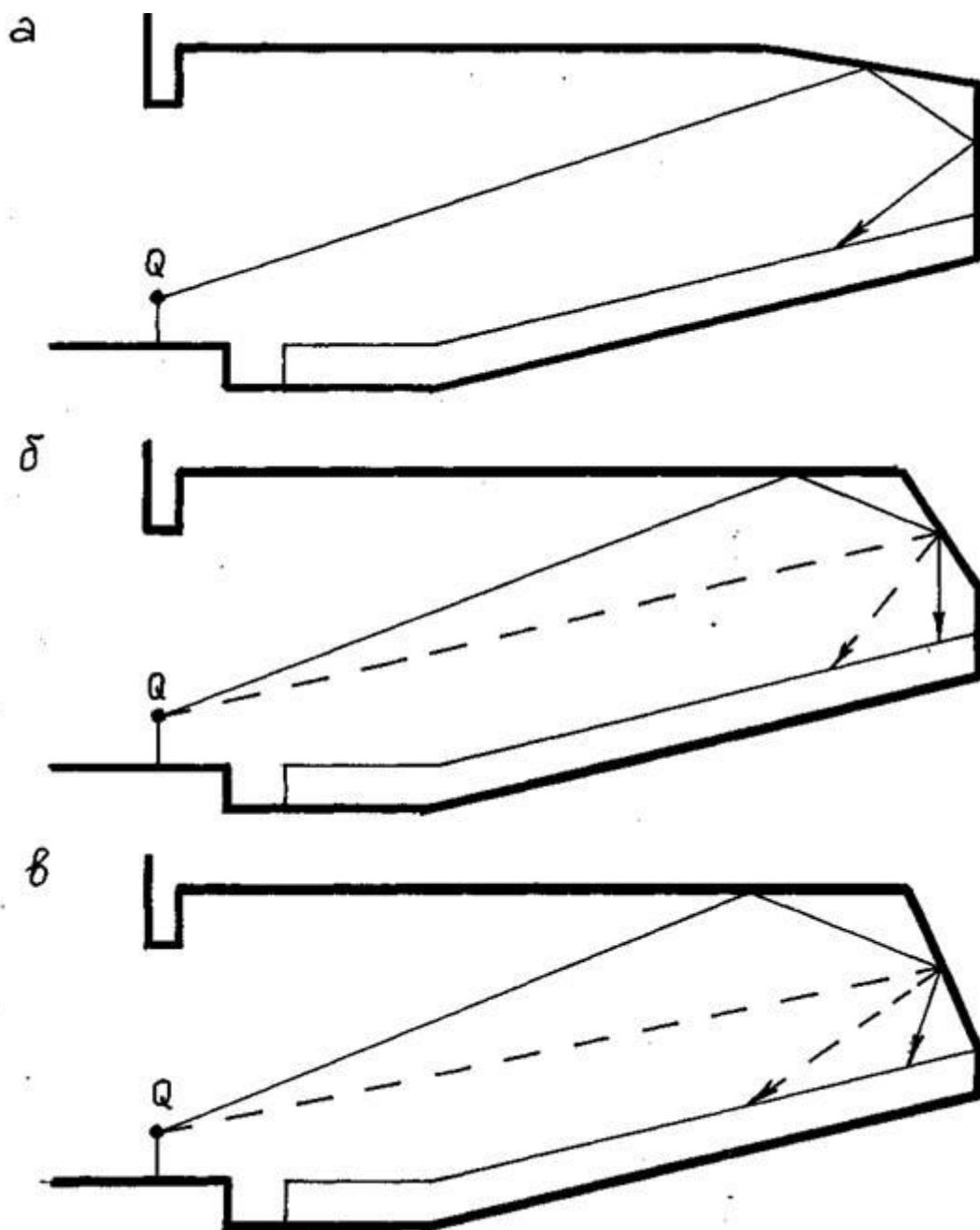


Рис. 16. Рациональные типы примыкания потолка к задней стене:

а, б - наклонный участок потолка; в - наклон задней стены

Секции, изображенные на рис. 17а недостаточно удовлетворительны, так как отражения от смежных секций не перекрывают друг друга, вследствие чего образуются зоны, лишенные геометрических отражений (при построении отражения от края секции точка геометрического отражения берется на расстоянии 0,5 м от края). Секции на рис. 17б, в не имеют этого недостатка: их геометрические отражения перекрывают друг друга. Такого рода секции выпуклого сечения (см. рис. 17, в) предпочтительнее, так как они хорошо распределяют отраженный звук при разных положениях источника и повышают диффузность звукового поля в зале.

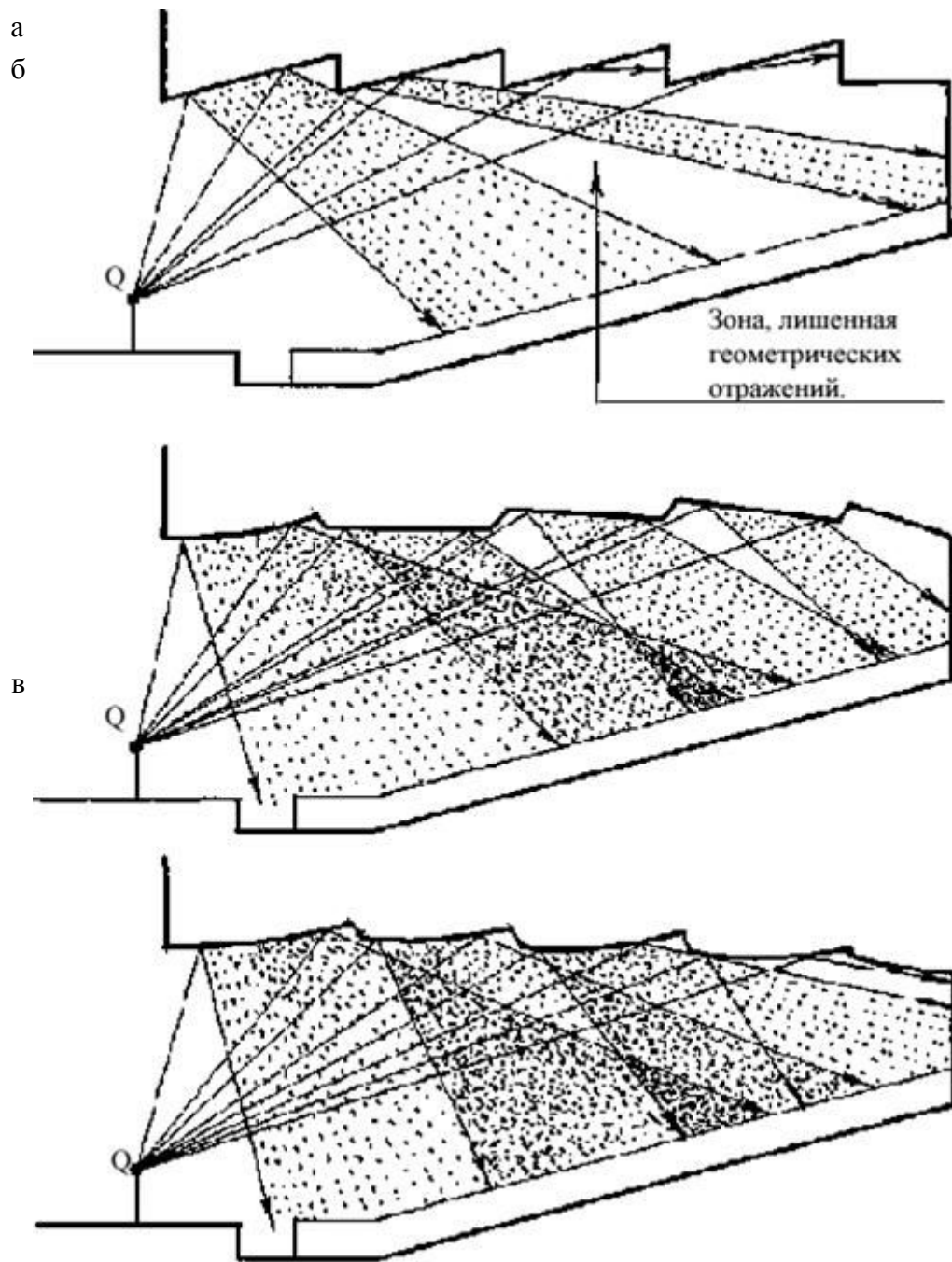


Рис. 17. Расчленение потолка секциями:

а - неудовлетворительные очертания секций; б, в - удовлетворительные

Интенсивные малопаздывающие отражения от боковых стен весьма важны для достижения хорошей акустики зала.

При выборе очертаний стен в плане руководствуются теми же принципами, что и при выборе потолка. Особенно важной является правильная конфигурация стен вблизи эстрада или сцены. При плоских параллельных боковых стенах отражения от их участков, прилегающих к сцене или эстраде, попадают в передние ряды слушателей, где для слышимости достаточен прямой звук источника (рис. 18).

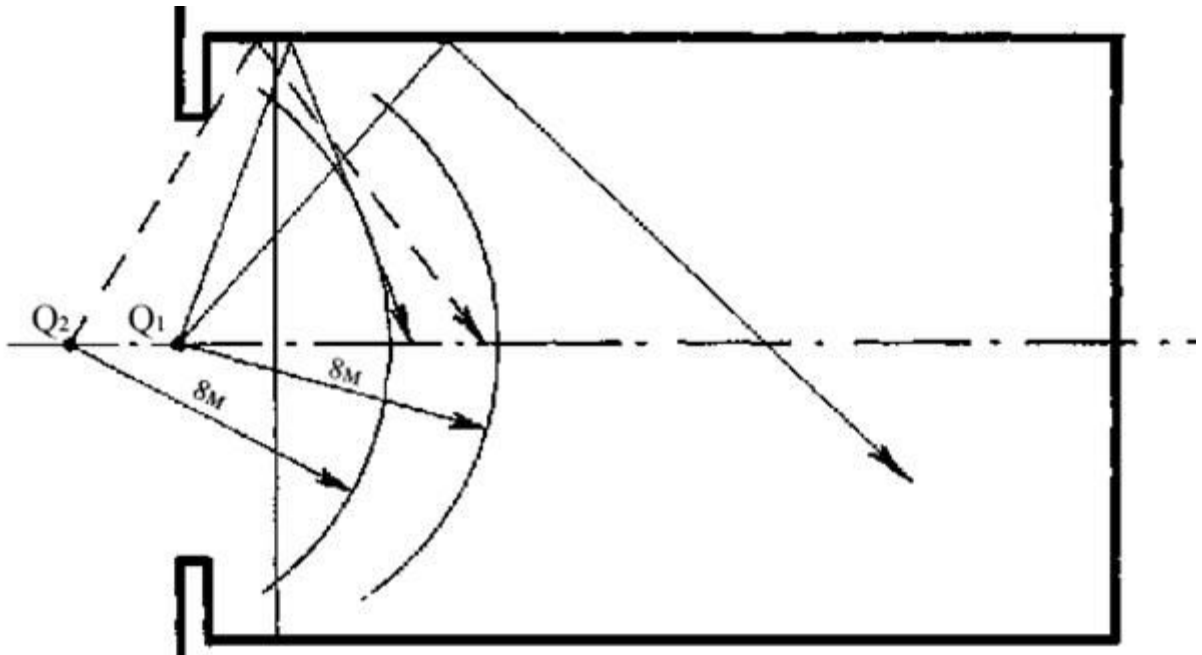


Рис. 18. Распределение отражений при параллельных боковых стенах

Вместе с тем запаздывание этих отражений по отношению к прямому звуку превышает допустимые пределы, если ширина передней части зала сравнительно велика.

Положение улучшается при устройстве передней части боковых стен в виде отражателя (рис. 19), описанного для потолка, и уменьшении ширины зала в передней его части.

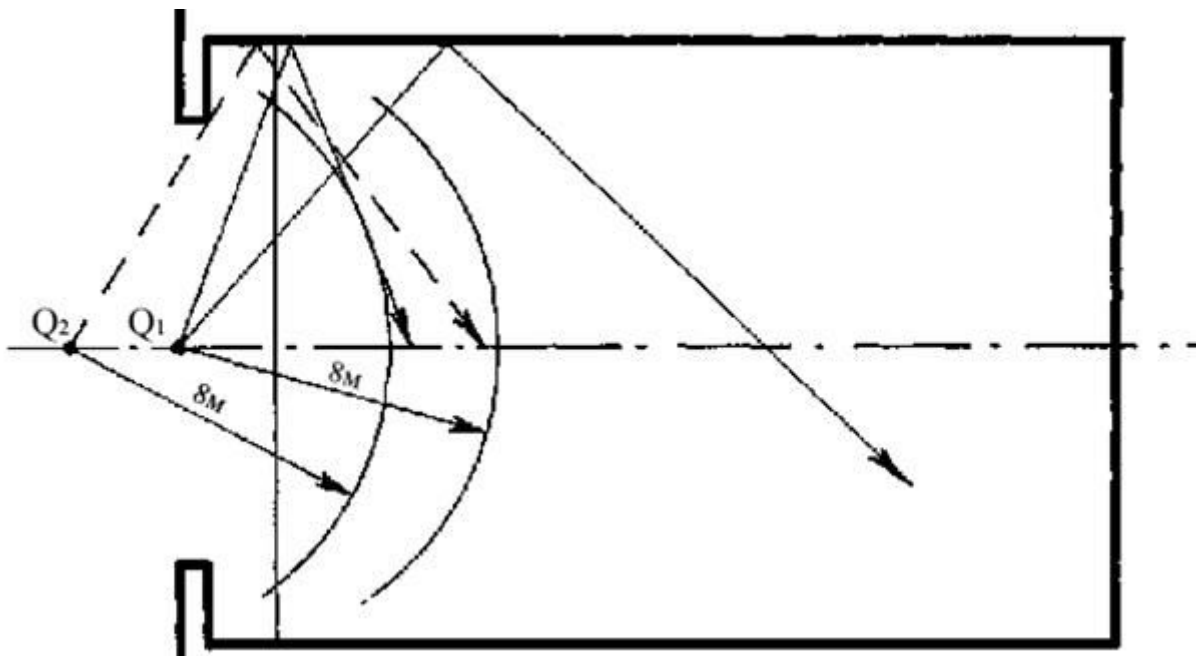


Рис. 19. Расположение звукоотражателей в передней части боковых стен

Эффективно членение стен секциями (как и для потолка). При этом нужно следить за тем, чтобы отражения от смежных секций перекрывали друг друга. Примеры таких секций даны на рис. 20.

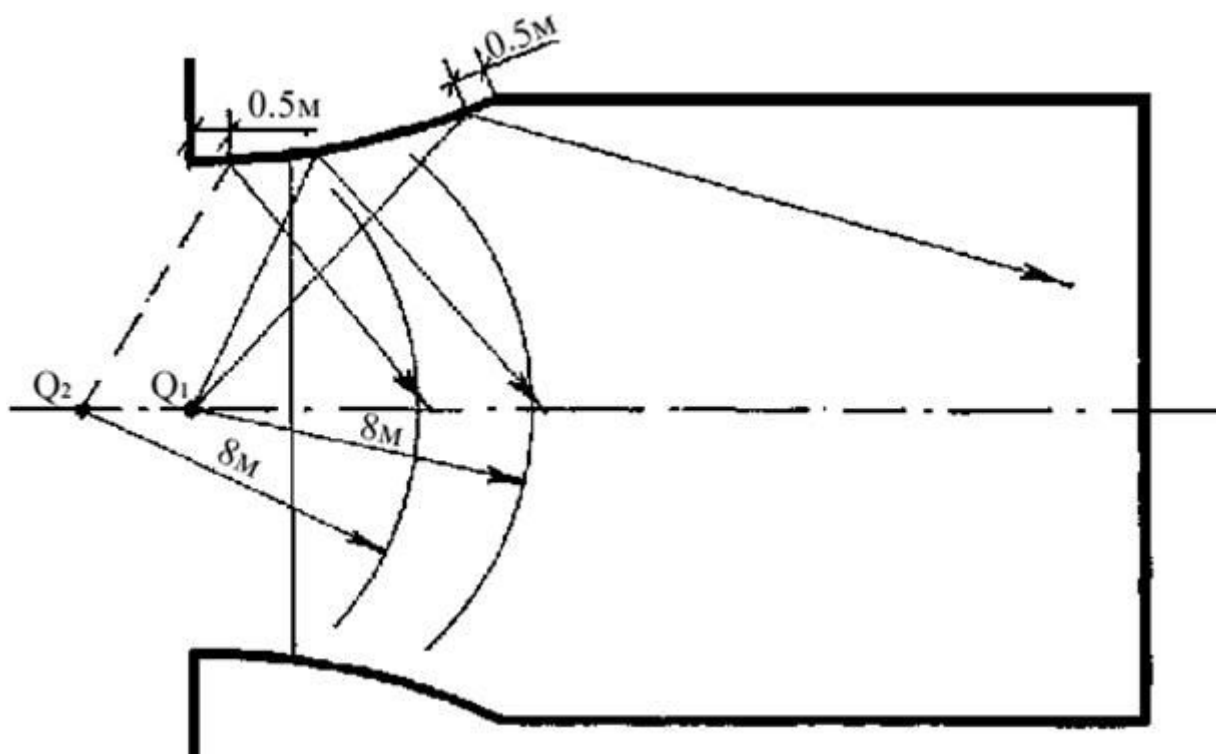


Рис.20. Отражение звука от сложного профиля поверхности стен или потолка

Размеры звукоотражателей, дающих направленные отражения от участков около сцены или эстрады и секций на потолке и стенах, должны быть достаточны для выполнения условий геометрического отражения (в соответствии с п. 5.1 и 5.2). Это же требование необходимо выполнять и для наклонных участков потолка или задней стены (см. рис. 16).

5.4. Предотвращение концентрации отраженного звука

Вогнутые или сводчатые поверхности с малым звукопоглощением способствуют концентрации звуковой энергии, фокусируют звук. Если источник звука располагается в центре кривизны, отражения концентрируются в центре круга. При приближении источника звука к поверхности (до половины радиуса) круговая поверхность отражает как эллиптическая, то есть фокус находится за центром круга. При дальнейшем приближении источника звука к отражающей поверхности величина фокусного расстояния возрастает, достигая бесконечности, когда расстояние до источника звука становится равным половине радиуса. В этом случае данная поверхность отражает как параболическая. Если источник звука расположен еще ближе, то фокус образуется сзади отражающей поверхности и она действует как гиперболическая. Место расположения фокуса, образуемого отраженными звуковыми лучами от вогнутых поверхностей (рис. 21),

определяется по формуле
$$x = \frac{d \cdot r}{2d - r},$$

где F - место нахождения фокуса;

Q - источник звука;

O - центр радиуса кривизны;

r - радиус кривизны поверхности;

X - расстояние от F до поверхности; d - расстояние от Q до поверхности.

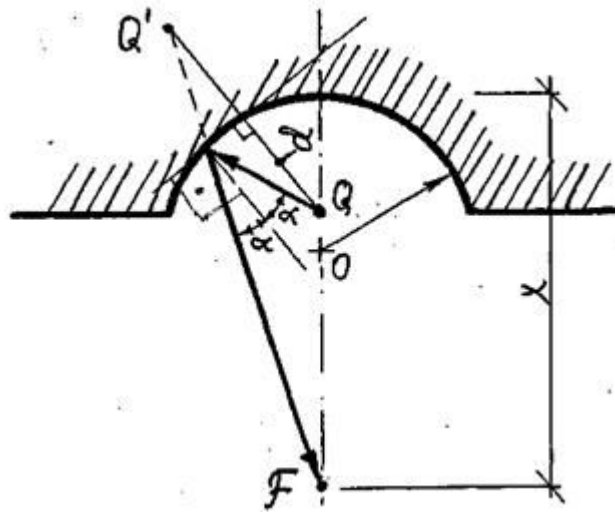


Рис. 21. Определение места расположения фокуса от вогнутой поверхности

На рис.22 показаны схемы залов при различном соотношении радиуса кривизны цилиндрического потолка и высоты.

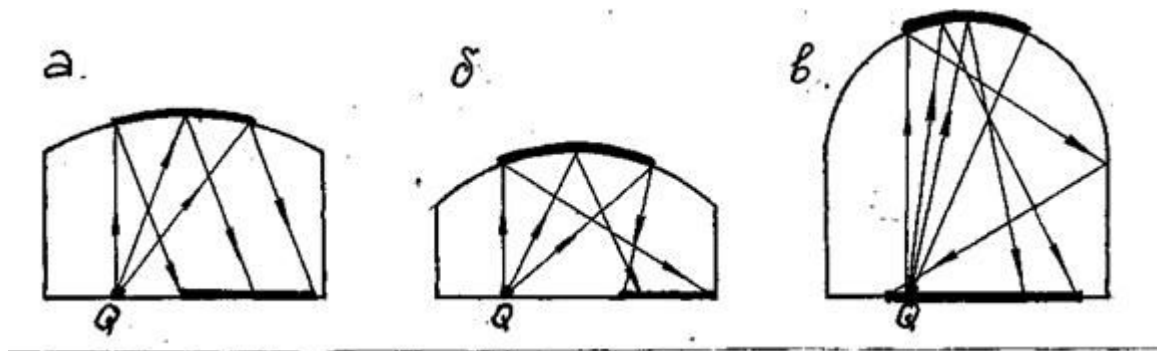


Рис. 22. Влияние радиуса кривизны r на характер отражения при различной высоте: a - $h \leq r/2$; δ - $h \leq r$; β - $h > 2r$

При одинаковой отражающей поверхности потолка площадь пола, охваченная отраженными лучами, неодинакова. Наибольшая концентрация звука имеет место, когда радиус кривизны близок к высоте помещения, поэтому он не должен быть значительно больше или меньше высоты помещения. В этом случае зоны концентрации звука будут расположены далеко от поверхности пола, на которой находятся зрители. Если радиус кривизны меньше длины волны на низких частотах, то концентрация звука будет происходить на средних и высоких частотах, что приведет к искажению тембра звука.

В практике встречаются случаи двойного фокусирования. Например, человек, говорящий тихим голосом в точке A , расположенной недалеко от стены, не слышен в точке B , но очень хорошо воспринимается слушателем в точке $Б$ (рис. 23). Такой эффект можно наблюдать в метро.

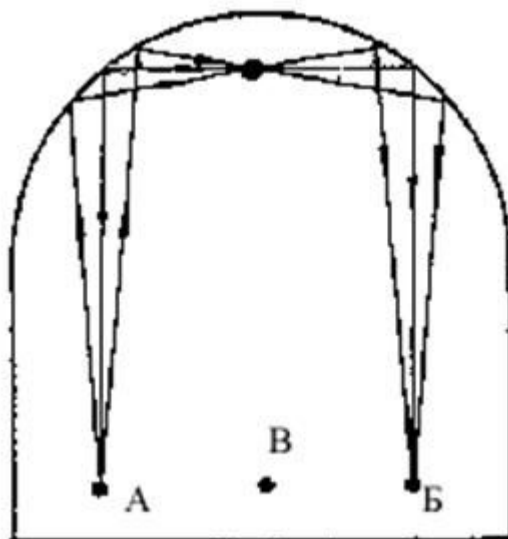


Рис. 23. Схема эффекта двойного фокусирования звука

На рис. 24 показано распространение звуковых лучей из точки А в круглом зале. Несмотря на малые размеры зала (диаметр около 10 м), в нем наблюдаются несколько фокусов, приводящих не только к неравномерному распределению звуковой энергии, но и к появлению в точке Б рядом с источником звука отчетливого эха.

Акустическое качество залов с фокусированием большей частью является неудовлетворительным:

- возможность образования эха (особенно в больших залах);
- неравномерность распределения отраженной звуковой энергии;
- нарушение необходимого соотношения между прямой и отраженной звуковой энергией.

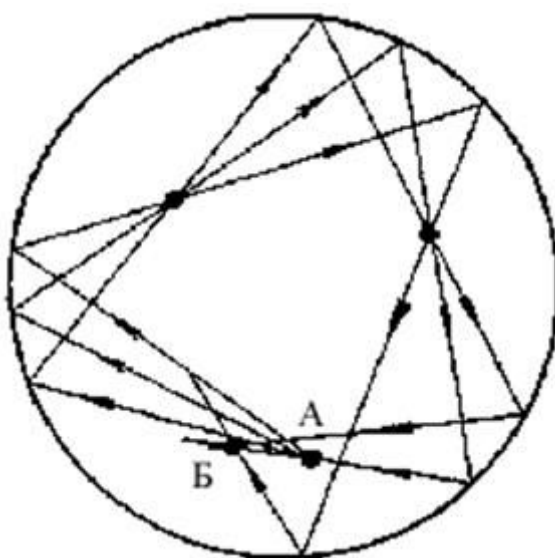


Рис. 24. Схема распространения звука в круглом зале

Следовательно, при выборе формы зала в нем не должно быть вогнутых поверхностей, обладающих свойством концентрировать отражаемый им звук.

На рис. 25 показана в плане вогнутая задняя стена зала, центр кривизны которой "С" лежит недалеко от источника звука Q.

Как видно из рисунка, отраженный от стены звук собирается в небольшой области зала. Такая концентрация отраженного звука является крупным акустическим дефектом. При большом запаздывании отраженного звука по сравнению с прямым в этом случае возникает сильное эхо. Но и при меньшем запаздывании ухудшается разборчивость речи и усиливается местная неравномерность звукового поля, причем с перемещением источника перемещается и область концентрации отраженного звука. Во избежание концентрации центр кривизны стены С должен находиться на расстоянии от нее, превышающем, по крайней мере, в два раза расстояние от стены до источника Q (см. рис. 25б). Это следует иметь в виду и при устройстве куполов и сводов, которых надо избегать, так как они плохо сказываются на акустике залов.

По той же причине, как правило, не должны допускаться залы, имеющие в плане круглую, овальную, подковообразную или другую форму с криволинейными вогнутыми стенами. Залы с такими очертаниями допустимы лишь при специальном расчленении вогнутых, поверхностей, предотвращающем концентрацию отраженного звука, и проектирование их следует вести с обязательным привлечением специалистов-акустиков.

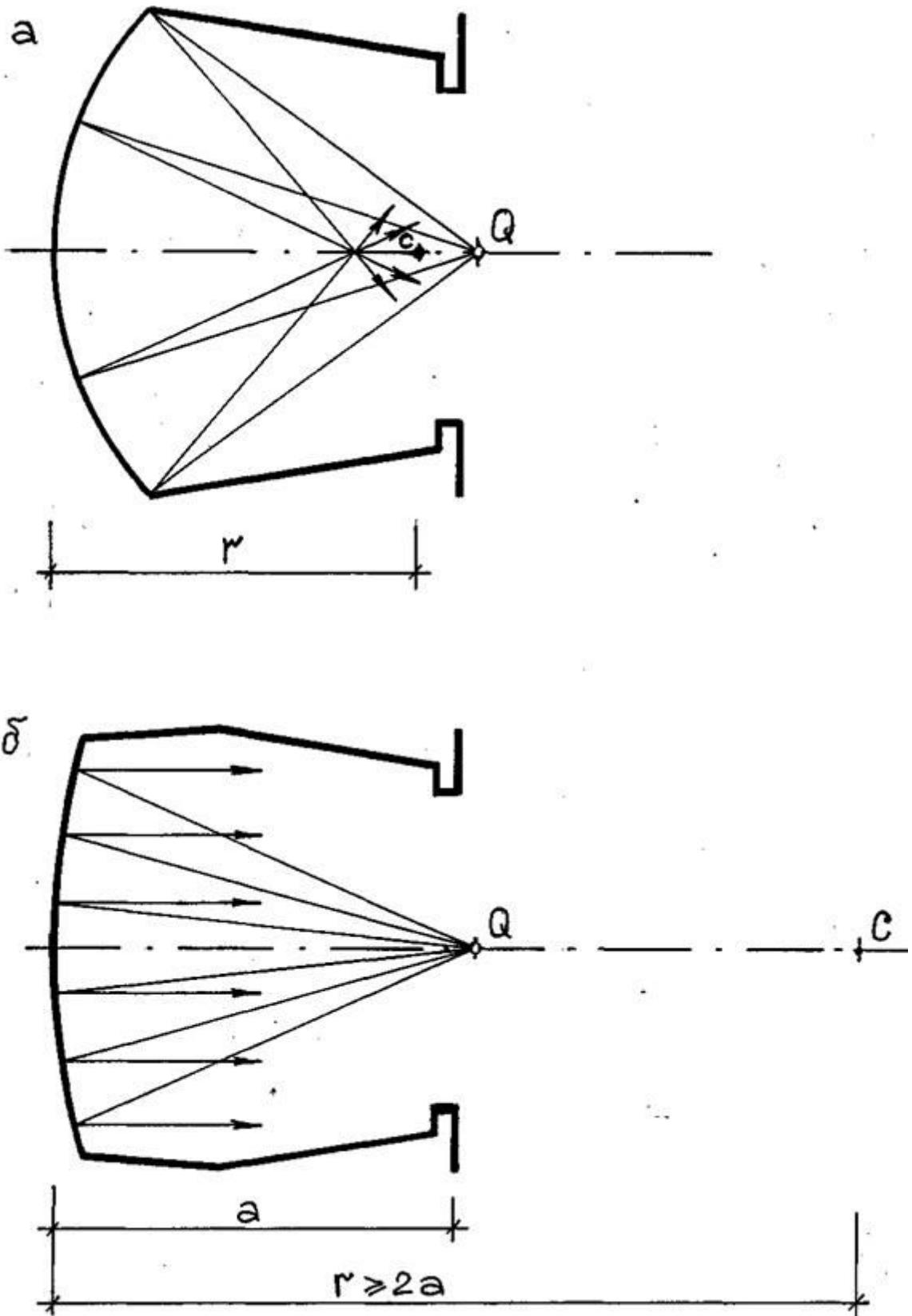


Рис. 25. Отражение звука от вогнутой задней стены: а - недопустимое положение центра кривизны; б - допустимое положение центра кривизны

На рис. 26 показаны геометрические определения мест расположения отражателей в помещении, имеющем эллиптическую поверхность, и приведены способы контроля длины путей.

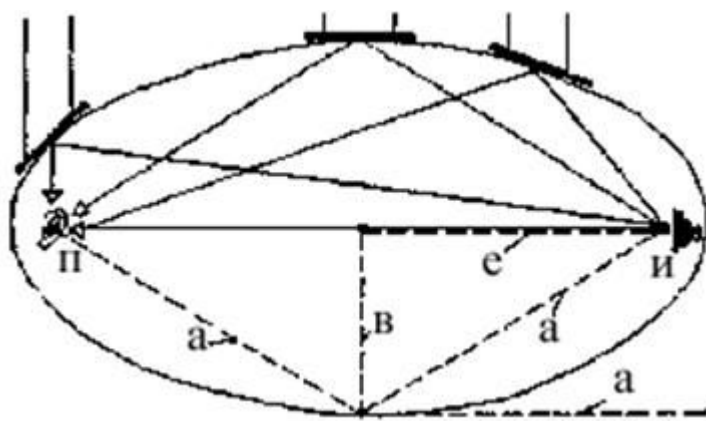


Рис. 26. Эллипс отражения

Основными геометрическими параметрами эллипса являются

a , b и e : ($a^2 = b^2 + e^2$).

Если источник звука Q и приемник $П$ расположены в фокусах эллипса, все звуковые лучи имеют длину l , равную $2a$. Разность длин путей звука во всех случаях составляет $\Delta l = 2a - 2e$.

Выпуклые поверхности (см. рис. 20), наоборот, создают рассеянное отражение звука и повышают диффузность звукового поля в зале.

5. Обеспечение достаточной диффузности звукового поля

В каждой точке звукового поля зала сказывается действие прямых и отраженных звуковых волн, которые приходят в рассматриваемую точку после многократных отражений от внутренних поверхностей с различным временем запаздывания по сравнению с прямыми волнами. В замкнутом помещении звуковые волны, отражаясь от его поверхностей, движутся по разнообразным направлениям. В результате этого в помещении образуется сложное звуковое поле. Важное значение в акустике помещений имеет понятие "диффузное поле", характеризуемое тем, что во всех точках поля усредненные во времени уровень звукового давления и поток приходящей по любому направлению звуковой энергии постоянны. Такое, диффузное поле является идеальным, не достижимым в реальных помещениях, но для создания хорошей акустики помещения следует, по возможности, приблизиться к нему.

Следовательно, одна из важнейших характеристик звукового поля - степень его диффузности - это равномерность распределения потоков звуковой энергии по различным направлениям. Чем больше отражений звуковых волн, тем более однородным становится звуковое поле, тем больше будет у слушателя впечатление, что звуковые волны приходят к нему равномерно со всех направлений. Это качество особенно важно для залов, предназначенных для слушания музыки.

Для повышения диффузности необходимо, чтобы значительная часть внутренних, поверхностей зала создавала рассеянное, направленное отражение звука. Это достигается расчленением поверхностей балконами, пилястрами, нишами, описанными выше секциями и тому подобными неровностями. Вместе с тем требуется и направленность

ранних звуковых отражений. При акустическом проектировании следует сочетать эти несколько противоречащие друг другу требования при помощи разной степени расчленения отдельных поверхностей зала.

Гладкие большие поверхности не способствуют достижению хорошей диффузности. Особенно нежелательны гладкие параллельные друг другу плоскости (обычно это бывают боковые стены зала): они вызывают "порхающее эхо", возникающее в результате многократного отражения звука между ними (рис. 27). Расчленение таких стен ослабляет этот эффект и увеличивает диффузность. Повышает диффузность и небольшое отклонение стен от параллельности (рис. 28).

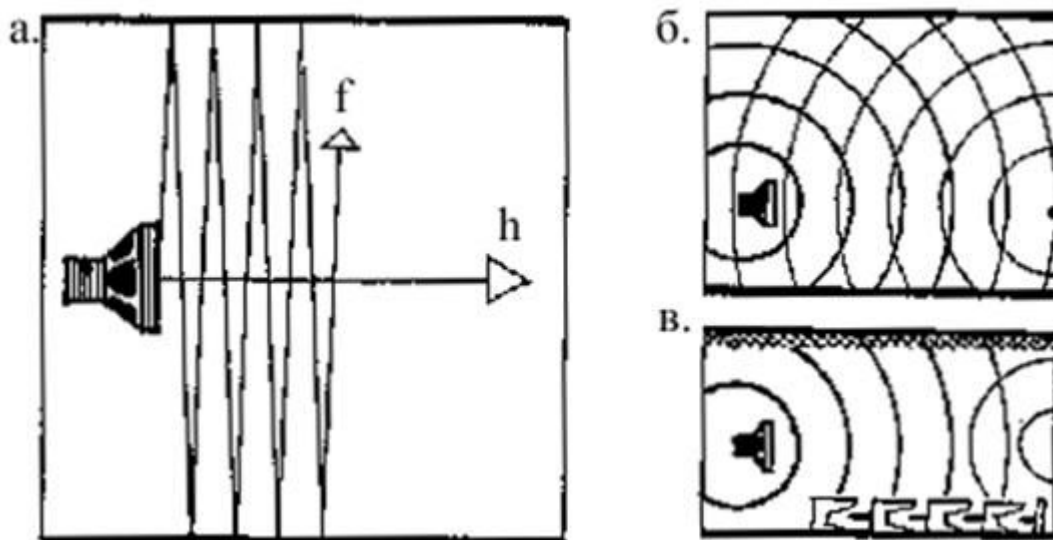


Рис. 27. Возникновение "порхающего" (вибрирующего) эха:

- а - возникновение вибрирующего эха преимущественно в передней зоне помещения;
- б - в высоких помещениях и над отражающими полами (перекрытиями) "порхающее" (вибрирующее) эхо распространяется беспрепятственно;
- в - если полы и перекрытия выполнены как звукопоглощающие, звуковые волны теряют энергию, распространению звука создается препятствие;

где h -главное направление распространения звука;

f -звуковые лучи "порхающего" (вибрирующего) эха

На поверхностях, создающих направленные малозапаздывающие по отношению к прямому звуку отражения, членение может совсем отсутствовать, а если оно имеется, то не должно создавать, сильного рассеивания. Таковы, например, секции, показанные на рис. 17 б, в. Эти секции дают направленные отражения и несколько рассеивают отраженный звук.

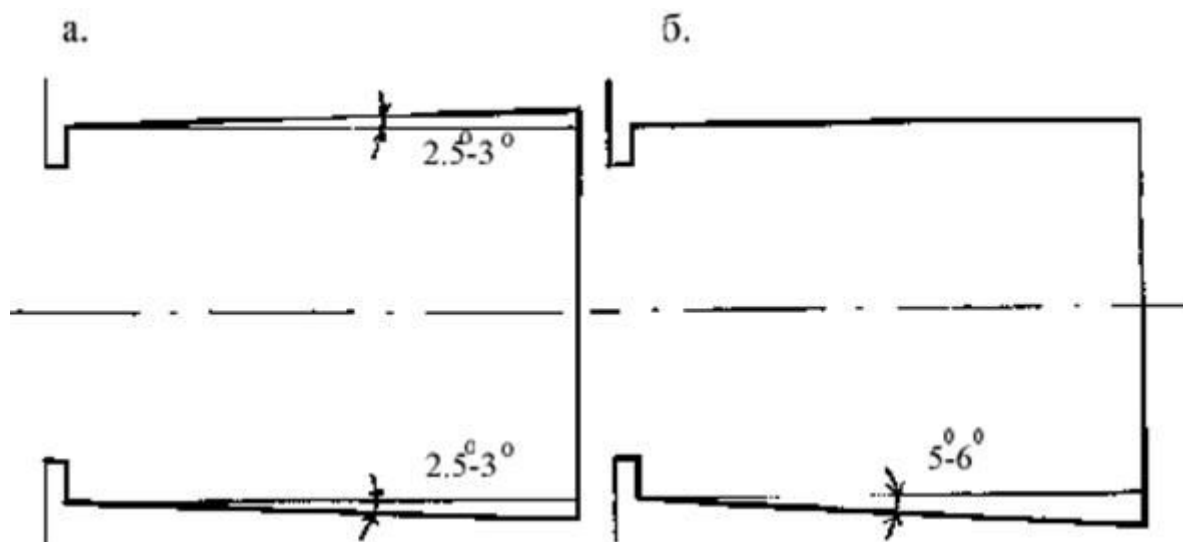


Рис. 28. Непараллельные боковые стены: а - скос обеих стен;

б - скос одной стены

Кроме того, эхо не будет образовываться, если будут соблюдаться условия, рассмотренные на рис. 29, когда разность расстояний $(a + b) - r$ или $(c + d + e) - r$ меньше 17 м.

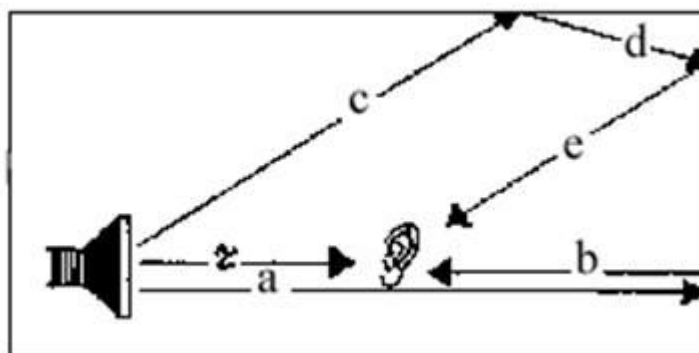


Рис. 29. Схема распространения звука без возникновения эха

На поверхностях, дающих мало запаздывающие отражения, недопустимо устройство поперечных прямоугольных пилястр или ребер по типу рис. 30, а. Такие элементы вызывают обратные отражения звука к источнику, причем возникают показанные на рисунке зоны, лишенные геометрических отражений. Это характерно также для пилястр или ребер любого профиля, имеющего прямой угол со стороны источника (см. рис. 30 б).

Сильно рассеивающие детали целесообразно размещать на поверхностях, не дающих мало запаздывающих отражений, направленных на слушательские места. Хорошо рассеиваются звуковые волны, длина которых близка к размерам детали. Особо выгодны для этой цели элементы, имеющие криволинейное выпуклое сечение (например, по типу на рис. 20 или по типу III на рис. 31), которые рассеивают также и более короткие волны. Обладают этим свойством и треугольные пилястры (тип II на рис. 31).

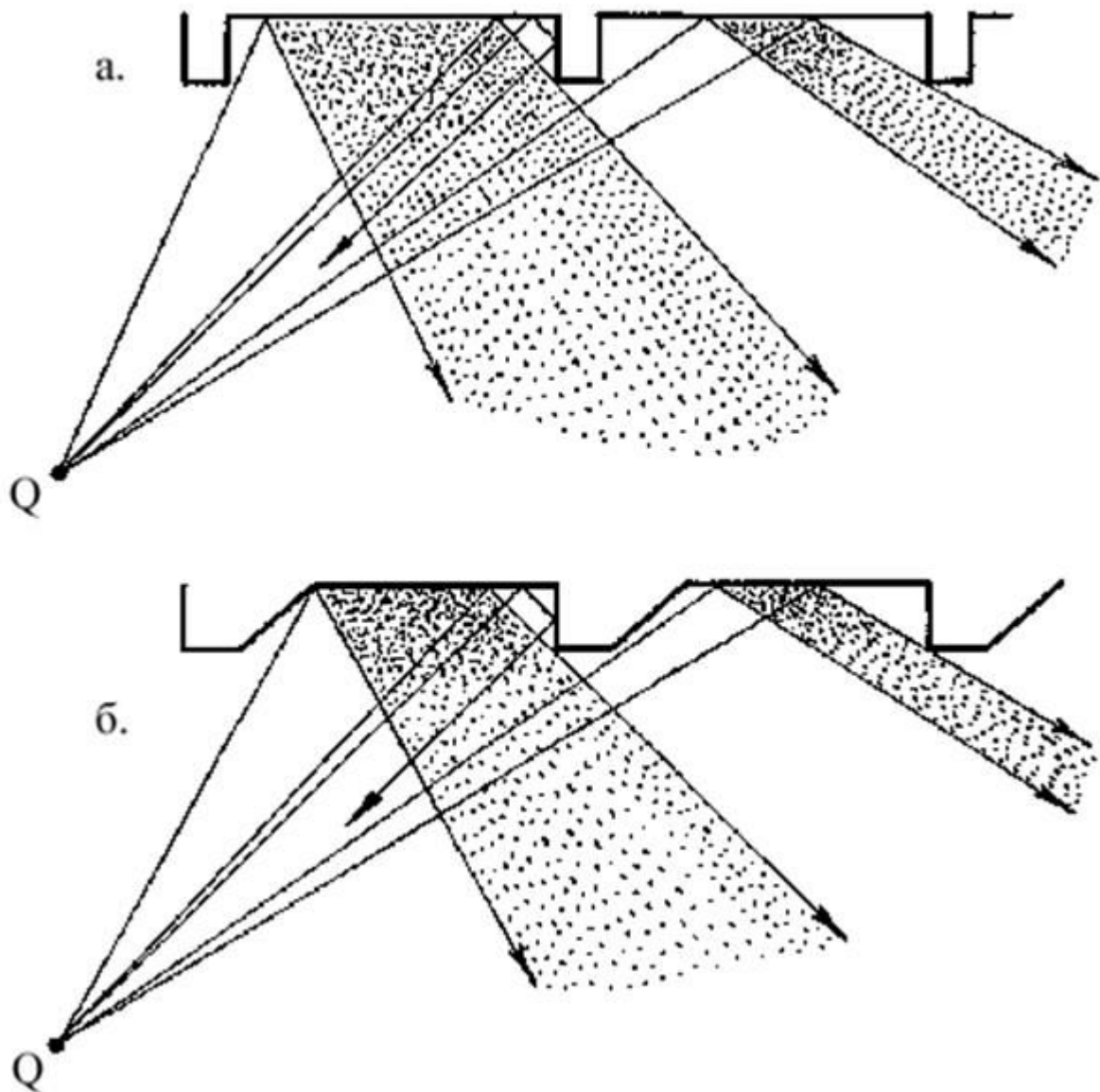


Рис. 30. Отражение от поперечных пилостр и ребер:

а - прямоугольные пилостры или ребра;

б - пилостры или ребра с прямым углом и наклонной гранью

При периодически расположенных пилострах рассеивание звука зависит не только от формы и размеров их сечений, но и от шага пилостр (см. рис. 31). Заштрихованная область на рисунке показывает примерные пределы, в которых лежат размеры пилостр и их шаг, дающие существенное рассеивание отраженного звука в указанных на этом рисунке областях частот.

Пилостры выпуклого и треугольного сечений рассеивают такие и более высокие частоты по сравнению с получающимися из рисунка. Мелкие элементы размером 10,20 см рассеивают лишь частоты выше 1000 Гц.

Эффективное рассеивание в области частот 200,600 Гц дают пилостры с размерами 1,2 м по ширине и 0,5,1 м по глубине при шаге членения 2,4 м. Если их очертание подвергнуть дальнейшему членению, то есть придать крупным элементам дополнительную мелкую

деталировку или сделать их выпуклой формы, то будет достигнуто рассеивание в широком диапазоне звуковых частот. Рассеивающий эффект членений улучшается, если их шаг нерегулярен, то есть расстояния между смежными членениями не одинаковы по всей расчлененной поверхности.

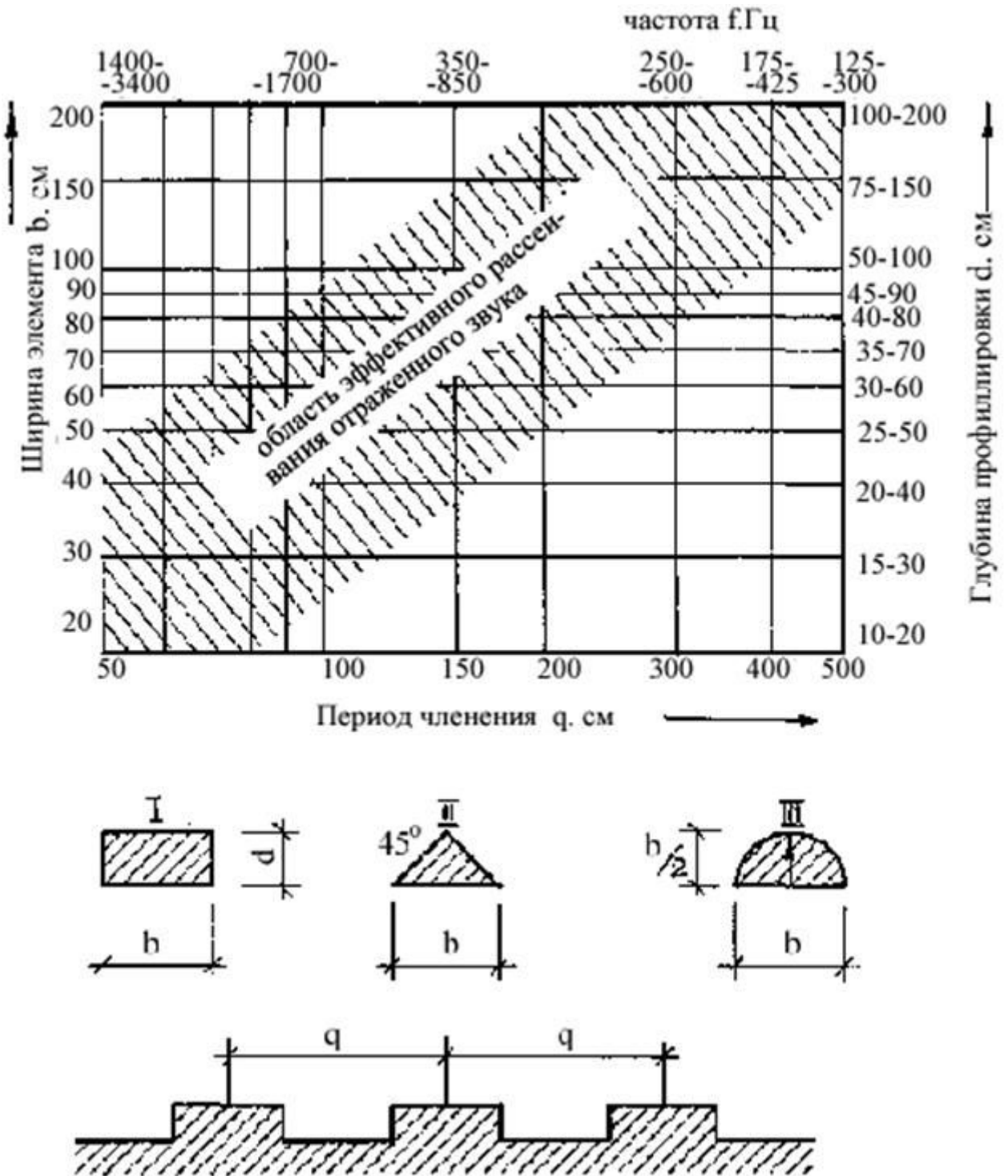


Рис. 31. Размеры периодических членений поверхностей, обеспечивающие рассеянное отражение звука в указанных границах частот

Балконы, лоджии и скошенные стены (см. рис. 28) повышают диффузность звука в зале также и на таких низких частотах, на которых пилястры, применяемые в архитектурной практике, не дают достаточного рассеивания (см. рис. 31).

Членение с мелким регулярным шагом 5,20 см (отделка поверхностей деревянными рейками или волнистой асбофанерой) вызывает периодические отражения коротких звуковых импульсов (ударов, хлопков и т.п.), в результате чего возникает неприятное подсвистывание, искажающее звук. Поэтому отделок с таким членением следует избегать.

Интересным является прием членения плоских или овальных стен с переменными параметрами членения. Размеры элементов членения в каждом горизонтальном разрезе различны и вызывают рассеянное отражение в широком диапазоне частот; различный наклон поверхностей в вертикальном разрезе также способствует эффективному рассеиванию звука (рис. 32).

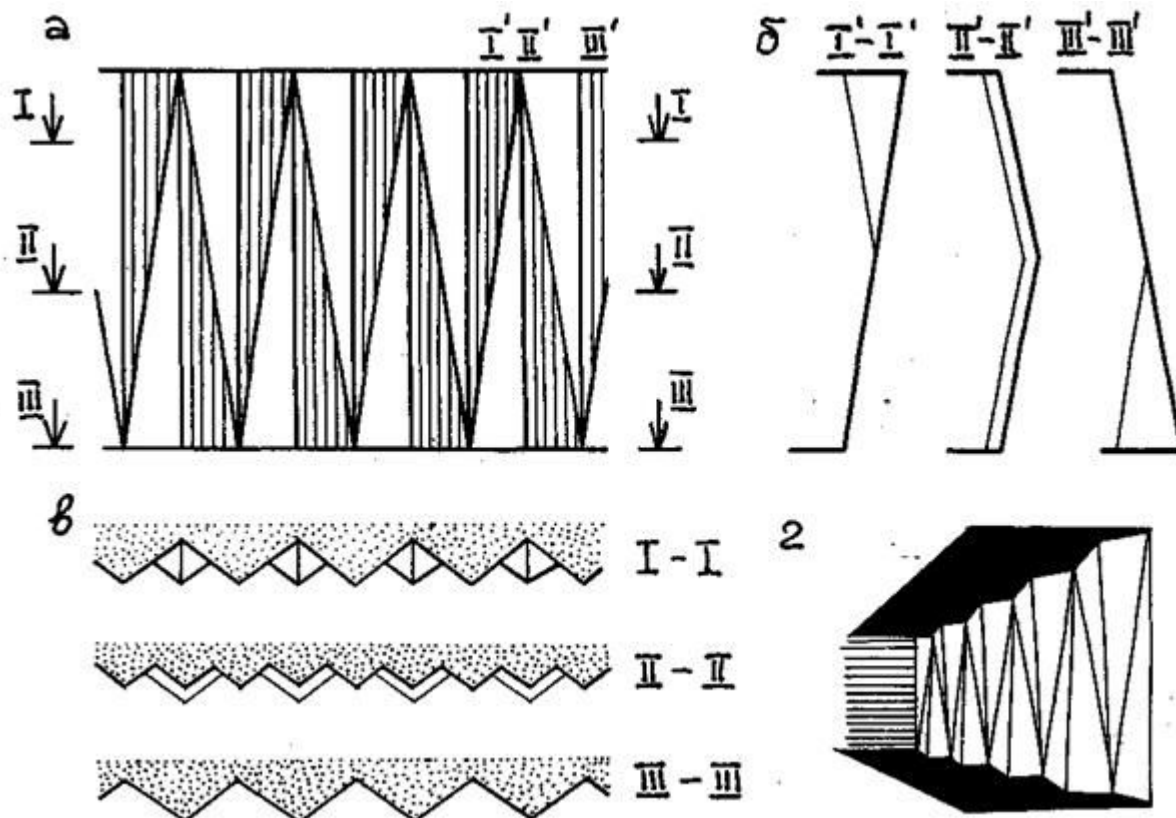


Рис. 32. Схема оформления стены с переменными параметрами членения

Влияние формы отражающей поверхности на расхождение звуковых лучей показано на рис. 33:

а - при одном близко расположенном точечном источнике звука расхождение звуковых лучей после отражения их плоской поверхностью происходит в одной плоскости, положение мнимого источника звука зеркально по отношению к истинному;

б - при одном находящемся на значительном удалении источнике звука звуковые лучи после отражения их плоской поверхностью остаются параллельными в одной плоскости;

в - при выпуклой поверхности отражения расхождение звуковых лучей увеличивается, звук рассеивается;

г - при вогнутой поверхности расхождение звуковых лучей после отражения уменьшается, звук концентрируется.

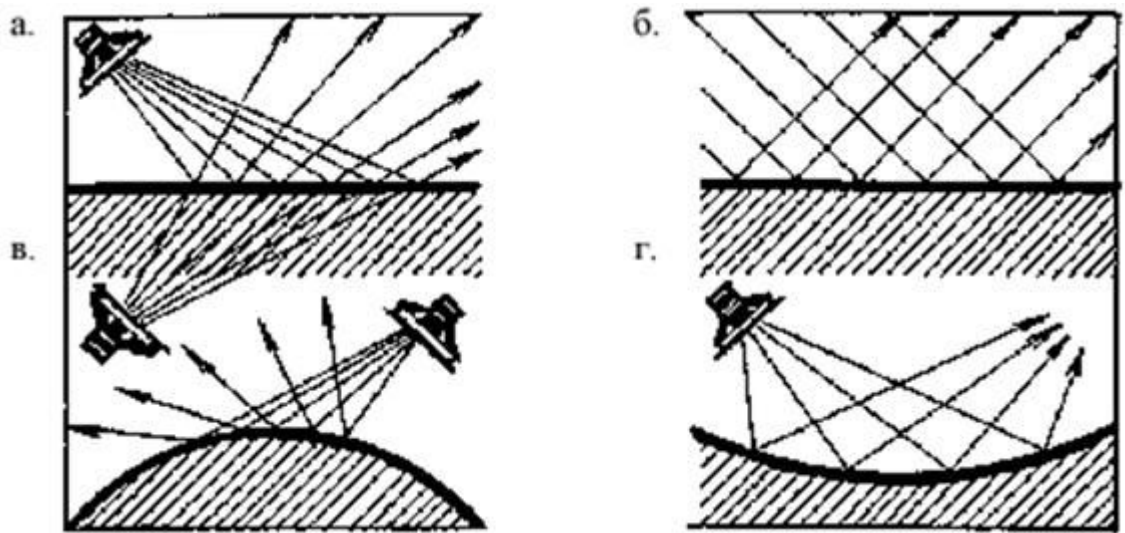


Рис. 33. Геометрические отражения:

а - при одном близкорасположенном точечном источнике звука;

б - при одном находящемся на значительном удалении источнике звука;

в - при выпуклой поверхности отражения;

г - при вогнутой поверхности отражения

В качестве диффузоров могут служить цилиндрические, треугольные, пилообразные и зубчатые поверхности или кессоны (рис. 34-38).

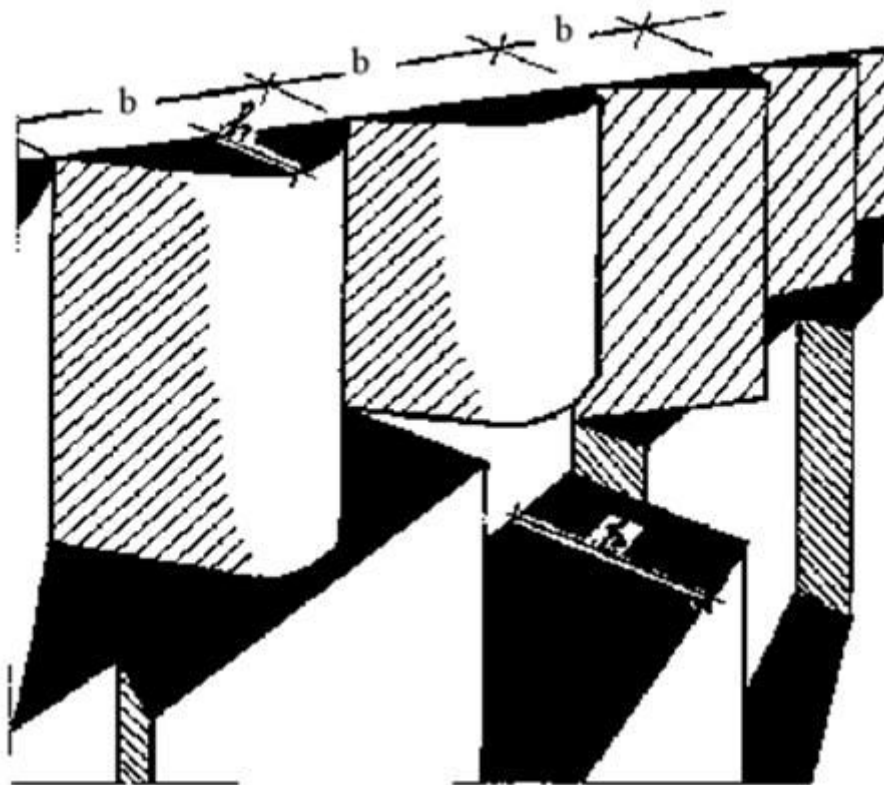


Рис. 34. Диффузоры из цилиндрических поверхностей, треугольных или пилообразных призм и квадратных кессонов, где рекомендуемые: b - от 0,8 до 2,0 м; h - от 0,4 до 0,5 м

Эффективно также пластическое членение стен окнами и простенками, причем откосы окон должны быть глубиной не менее 0,5 м, а оставляемые между ними простенки от 0,5 , 2,0 м. Подобные результаты можно получить устройством по всей поверхности поглощающих и отражающих поверхностей.

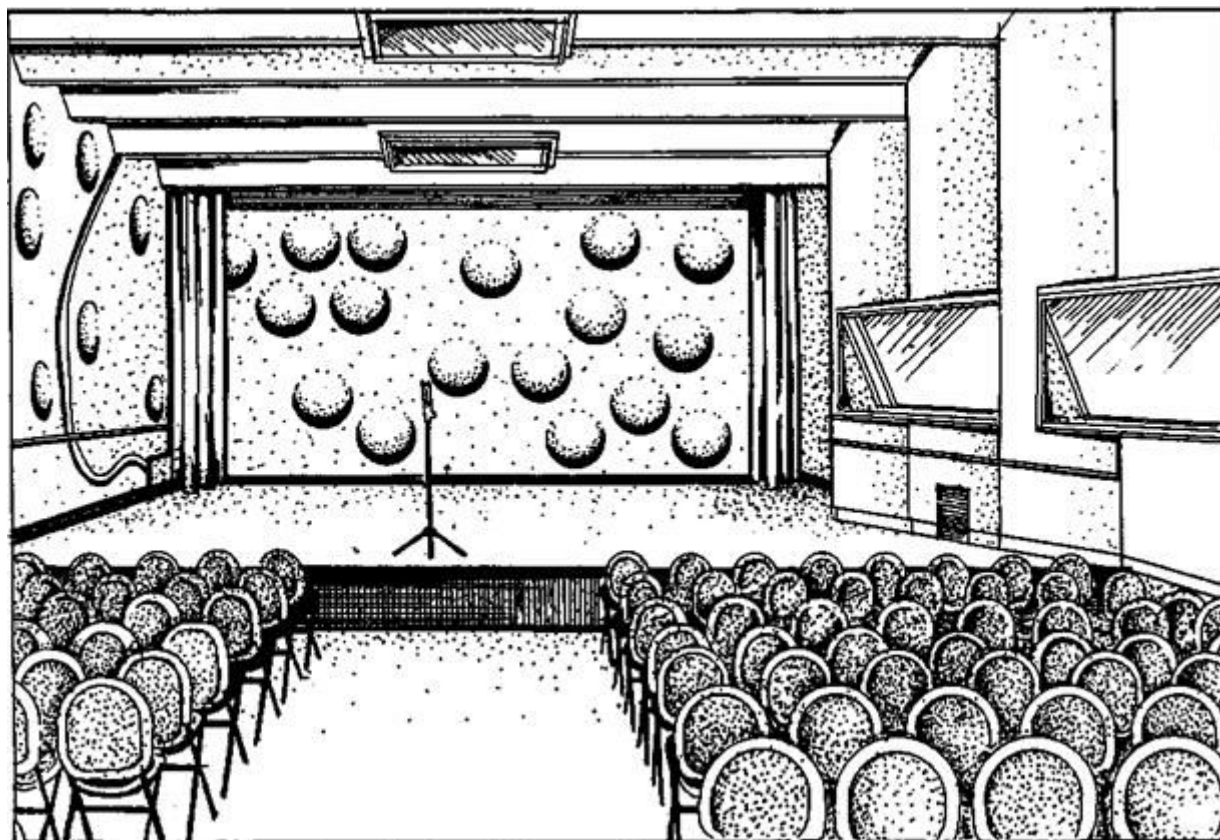


Рис. 35. Диффузоры в студии CBS США

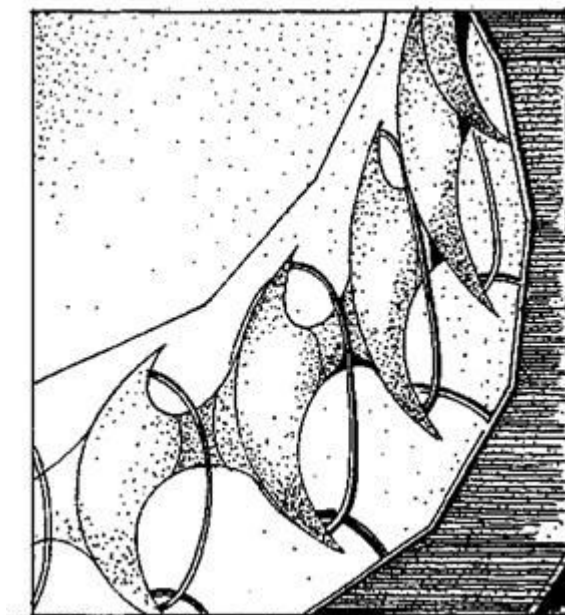


Рис. 36. Зал конгрессов
на Александерплац в Берлине.
Декоративный пояс, вид сбоку

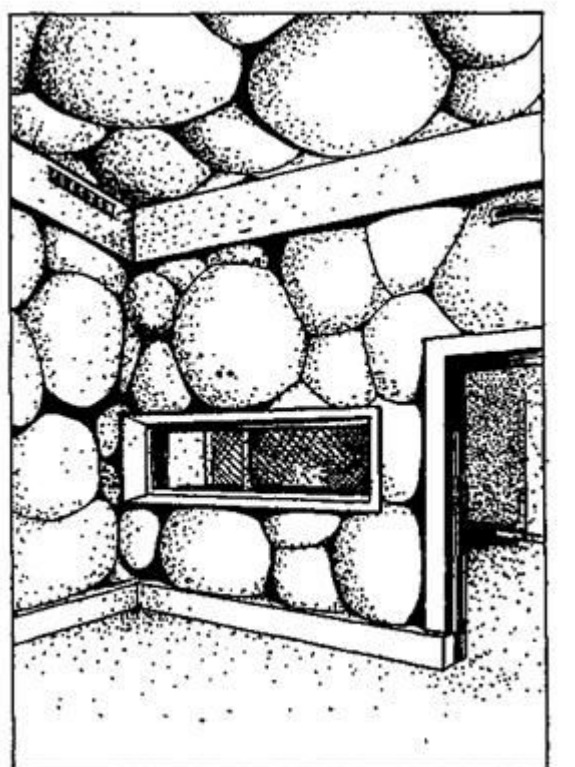


Рис. 37. Диффузоры в радиостудии Центра Родена, Париж

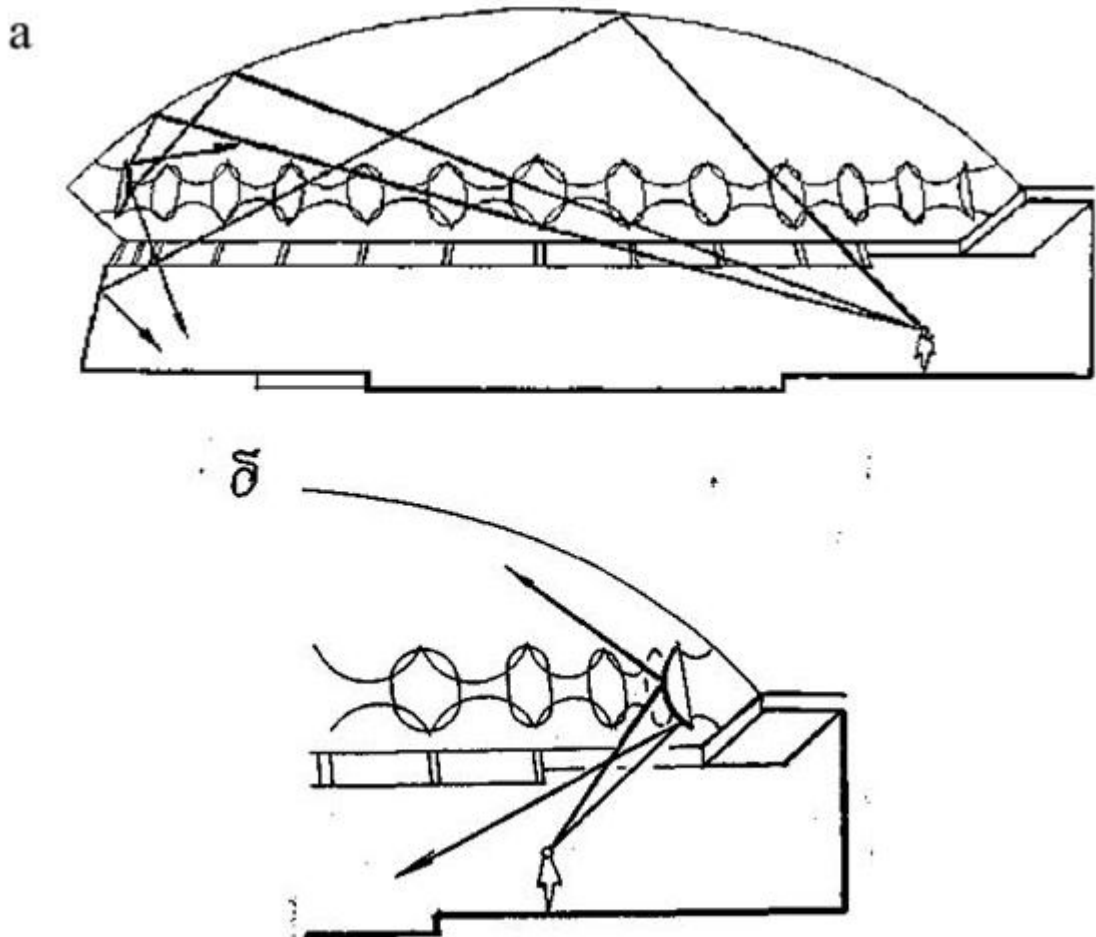


Рис. 38. Зал с куполом (зал конгрессов, Берлин): отраженный от купола звук поглощается сидящими слушателями и направляется к ним слегка наклонными стенами. Отражения от угла между куполом и стенами рассеиваются декоративным поясом на задней стене (а) и вблизи сцены (б)

Следующим фактором, воздействующим на диффузную и прямую составляющие звукового поля, является форма помещения. Упрощенно соотношение сторон прямоугольного помещения может быть определено согласно разд. 3, п. 3.1 и графику (рис. 39).

При этом необходимо отметить, что пределы оптимального соотношения сторон имеют второстепенное значение и поэтому могут сильно колебаться.

Существенным является требование к достаточному озвучиванию слушателей при равномерном уровне прямого и диффузного звука во всех зонах помещения. Это возможно при наименьшем удалении источника звука от слушателя, определенных формах помещения при равном числе слушателей.

На рис. 40 представлены четыре принципиально различных плана помещений с равной полезной площадью поверхности $S_{\text{п}}$ при различных общих площадях поверхности $S_{\text{общ}}$ и средних расстояниях до слушателей d . Оптимальные соотношения приведены в табл. 5.

Прямоугольные помещения вытянутой формы не являются оптимальным решением.

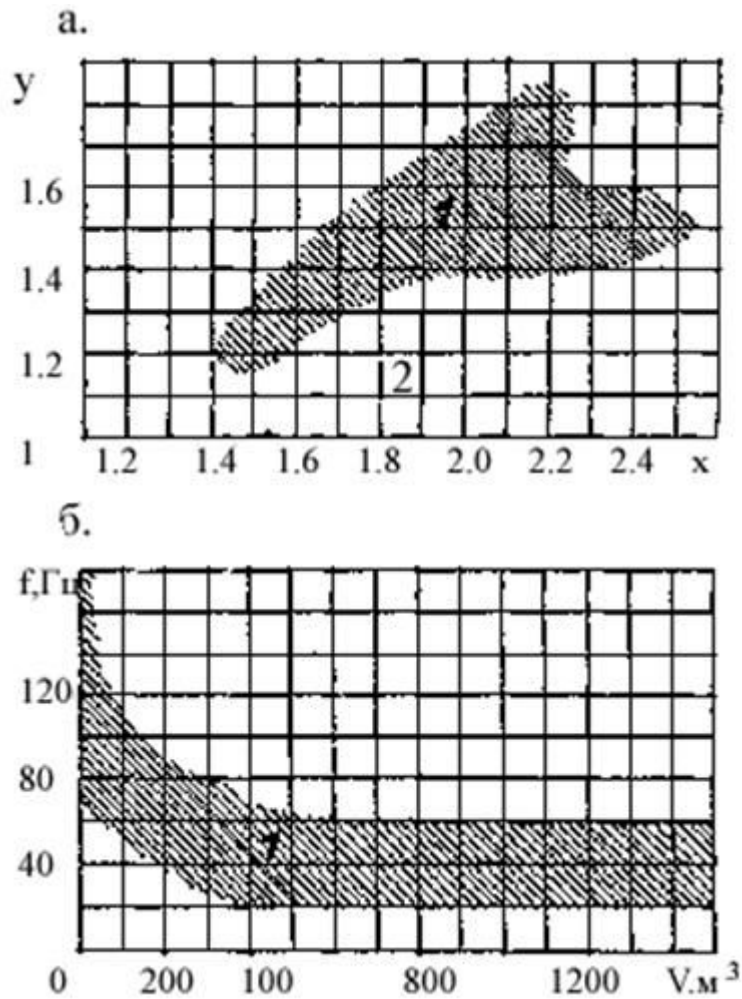


Рис. 39. Оптимальные пропорции помещений: а - распределение собственных частот прямоугольного помещения с параллельными ограничивающими поверхностями с соотношением сторон $I=X:Y$:

1 - благоприятная область, 2 - неблагоприятная область;

б - область применения диаграммы.

Таблица 5

Оптимальные соотношения параметров зала

	Форма помещений в плане, согласно рис. 40			
	а	б	в	г
$S_n/S_{об}$	0,63	0,55	0,68	0,66
d/d_1	1	0,83	0,61	0,64

Однако даже при благоприятных вариантах требуемый уровень обеспечивается лишь для определенной зоны. Поскольку уровень диффузного звука во всех зонах помещения

является равномерным, а уровень прямого звука с расстоянием сокращается, теоретическое требование об одинаковых условиях для обоих уровней в больших помещениях не может быть обеспечено. Его следует заменить на более высокий уровень прямого звука для каждого слушателя. При этом следует иметь в виду, что расстояние до зрителей может быть уменьшено как путем выбора благоприятной формы плана, так и путем повышения уровня пола помещения (см. разд. 4; п. 4.3).

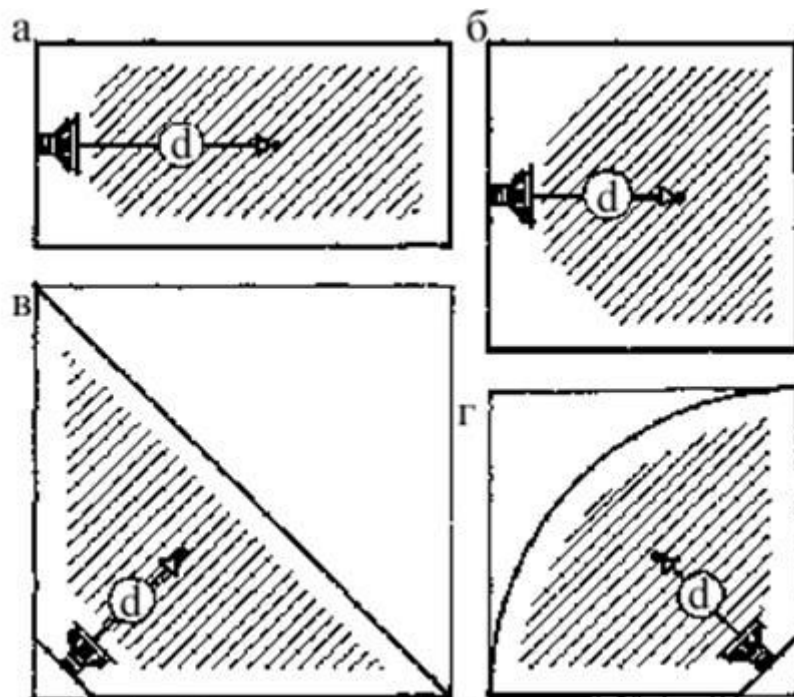


Рис. 40. Форма помещений в плане.

Еще один способ изменения расстояния между слушателями и источником звука в очень больших помещениях - использование балконов и галерей (см. п. 3.2 рис. 1). При этом желательно увеличить высоту расположения источника звука, что способствует улучшению озвучивания прямым звуком (рис. 41 , 43).

6. ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ ЗАЛА

6.1. Рекомендуемое время реверберации

6.2. Расчет среднего коэффициента звукопоглощения

6.3. Расчет времени реверберации

6.1. Рекомендуемое время реверберации

На рис. 44 показаны оптимальные значения времени реверберации для залов различного назначения в зависимости от их объема на частотах от 500 до 2000 Гц.

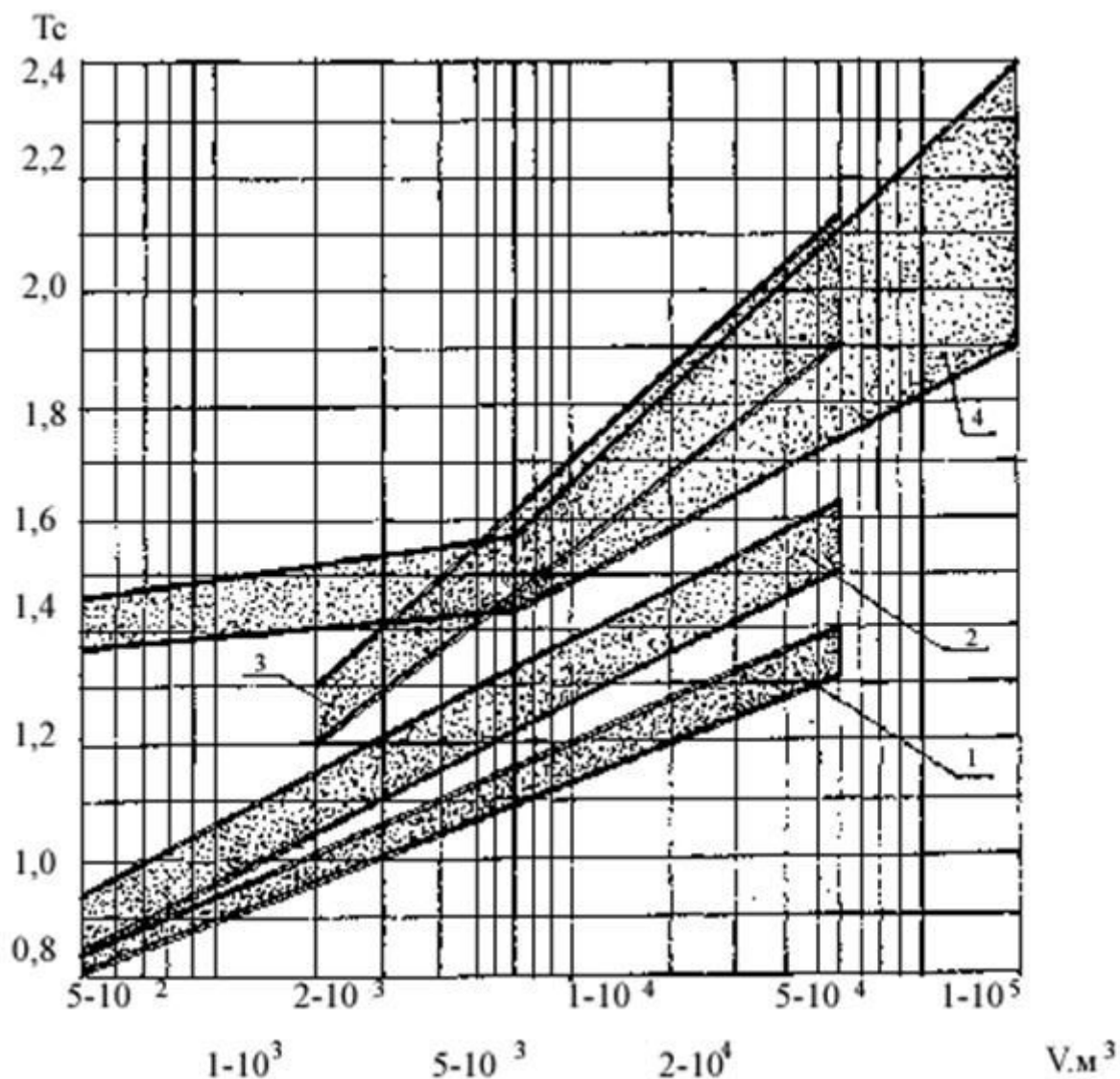


Рис. 44. Рекомендуемое время реверберации для залов различного назначения в зависимости от их объема в диапазоне частот 500...2000 Гц:

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; 4 - спортивные залы

Затушеванная полоса 2 показывает рекомендуемые пределы расчетного времени реверберации для залов многоцелевого назначения. Нижняя граница полосы близка к оптимальному времени реверберации для кинопоказа и звукоусиления речи, а верхняя - для камерной музыки и солистов. Рекомендуется в основном придерживаться средних значений затушеванной полосы, что является компромиссом для залов многоцелевого назначения.

На частотах ниже 500 Гц допустимо (но не обязательно) некоторое увеличение времени реверберации с тем, чтобы на частоте 125 Гц оно возрастало не более чем на 40% по сравнению с временем реверберации на частоте 500 Гц.

6.2. Расчет среднего коэффициента звукопоглощения

Звуковые волны несут с собой механическую энергию, получаемую или от источника звука (звуковую энергию). Падая на какую-либо поверхность, звуковые волны отражаются от нее, теряя часть своей энергии. Этот процесс называется звукопоглощением, а отношение поглощенной при этом энергии к падающей - коэффициентом звукопоглощения α , являющимся безразмерной величиной. При полном поглощении падающей энергии $\alpha = 1$, а при полном ее отражении $\alpha = 0$. Коэффициент звукопоглощения некоторой поверхности зависит от ее материала и расположенной за ней конструкции, от частоты звука и угла падения звуковых волн. При акустических расчетах помещений обычно применяются усредненные для разных углов падения коэффициенты звукопоглощения поверхностей, соответствующие диффузному звуковому полю.

Для расчета времени реверберации зала надо предварительно подсчитать его воздушный объем V , м^3 , общую площадь внутренних поверхностей $S_{\text{общ}}$, $\text{м}^2_{\text{общ}}$, м^2 . и общую ЭПЗ (эквивалентную площадь звукопоглощения) A

Если какая-либо поверхность имеет площадь S и коэффициент звукопоглощения α , то величина $A = \alpha \times S$ называется эквивалентной площадью звукопоглощений (ЭПЗ) этой поверхности.

Из определения звукопоглощения следует, что ЭПЗ есть площадь полностью поглощающей звук поверхности, которая поглощает такое же количество звуковой энергии, как и данная поверхность S . Если S измеряется в квадратных метрах, то такую же размерность имеет и A .

К некоторым объектам сложной формы и сравнительно небольших размеров (например, кресла и слушатель) понятие коэффициент звукопоглощения трудно приложимо, и звукопоглощающие свойства такого объекта характеризуются эквивалентной площадью его звукопоглощения.

Общая ЭПЗ на частоте, для которой ведется расчет, находится по формуле

$$A_{\text{общ}} = \sum \alpha \cdot S + \sum A + \alpha_{\text{доб}} \cdot S_{\text{общ}}, \quad (9)$$

где $\sum \alpha \cdot S$ - сумма произведений площадей отдельных поверхностей S , м^2 , на их коэффициент звукопоглощения α для данной частоты, определяется по формуле (8);

$\sum A$ - сумма ЭПЗ, слушателей и кресел, м^2 ;

$\alpha_{\text{доб}}$ - коэффициент добавочного звукопоглощения, учитывающий добавочное звукопоглощение, вызываемое прониканием звуковых волн в различные щели и отверстия, колебаниями разнообразных гибких элементов и т. п., а также поглощение звука осветительной арматурой и другим оборудованием зала.

Коэффициенты звукопоглощения разных материалов и конструкций, а также ЭПЗ слушателей и кресел даны в прил. II (табл. 1). Приведенные в таблице значения получены путем измерения реверберационным методом, дающим коэффициент звукопоглощения, усредненный для разнообразных направлений падения звуковых волн. Значения эти взяты в среднем по разным данным с округлением.

Коэффициент добавочного звукопоглощения $\alpha_{доб}$ для многоцелевых залов рассматриваемой категории в среднем может быть принят равным 0,09 на частоте 125 Гц и 0,05 на частотах 500 , 2000 Гц. Для залов, в которых сильно выражены условия, вызывающие добавочное звукопоглощение (многочисленные щели и отверстия на внутренних поверхностях зала, многочисленные гибкие элементы - гибкие абажуры и панели светильников и т. п.), эти значения следует увеличить примерно на 30%, а в залах, где эти условия выражены слабо, примерно на 30% уменьшить.

После нахождения $A_{ОБЩ}$ подсчитывается α - средний коэффициент звукопоглощения внутренней поверхности зала на данной частоте:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{ОБЩ}}{S_{ОБЩ}} \quad (10)$$

6.3. Расчет времени реверберации

Время реверберации зала T , с на частотах до 1000 Гц находится по формуле Эйринга

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S_{ОБЩ} \cdot \varphi(\bar{\alpha})} \quad (11)$$

где V - объем зала, м³;

$S_{ОБЩ}$ - общая площадь внутренних поверхностей зала, м²;

$\varphi(\bar{\alpha}) = -\ln(1 - \bar{\alpha})$ - функция среднего коэффициента звукопоглощения α , значения которой приведены в прил. III (табл. 1).

На частотах выше 1000 Гц существенное значение имеет поглощение звука в воздушном объеме зала и время реверберации находится по формуле

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S_{ОБЩ} \cdot \varphi(\bar{\alpha}) + n \cdot V} \quad (12)$$

где n - коэффициент, м⁻¹, учитывающий поглощение звука в воздухе и зависящий от температуры и относительной влажности воздуха в зале. Значения коэффициента n - приведены в прил. II (табл. 4).

Обычно вместо n дается в 4 раза меньший коэффициент m , и тогда $n \cdot V$ принимает вид $4 \times m \times V$.

При расчете времени реверберации следует для частот 125 и 500 Гц вести расчет по формуле (11), а для частоты 2000 Гц - по формуле (12). В прил. II(табл. 1, 4) приведены для справок значения α , n и для других частот.

В расчете времени реверберации зала, как правило, принимается заполнение слушателями 70% общего количества мест, ЭПЗ остальных мест принимается как для пустых кресел. Согласно опытным данным, при дальнейшем заполнении слушателями мест сверх 70% ЭПЗ уже не возрастает. В залах, для которых наиболее вероятно заполнение слушателями менее 70% мест, расчетный процент заполнения следует соответственно уменьшить.

ЭПЗ слушателей в настоящее время часто рассчитывают исходя из коэффициента звукопоглощения площади пола, занятой слушателями, с некоторыми добавками на края этой площади. Рекомендуемый расчет по ЭПЗ, приходящийся на одного слушателя, более прост и для залов рассматриваемого типа с площадью пола около 0,6 м на слушателя дает не менее точный результат.

Чтобы время реверберации менее зависело от процента заполнения мест, целесообразно оборудовать зал мягкими или полумягкими креслами, обитыми воздухопроницаемой тканью. В залах с жесткими креслами, обладающими незначительным звукопоглощением, время реверберации малозаполненного зала сильно возрастает по сравнению с заполненным; в таких случаях следует обращать особое внимание на то, чтобы расчетное время реверберации не было завышенным по сравнению со средней линией, показанной на рис. 44.

При расчете времени реверберации в залах со сценой, оборудованной колосниками, декорациями, задником и кулисами и отдаленной от зала порталом, объем и площади внутренних поверхностей сцены не учитываются, а вводится площадь проема сцены с коэффициентами звукопоглощения, приведенными в прил. II (табл. 1).

Время реверберации следует подсчитывать исходя из предполагаемой отделки зала для частот 125 и 500 Гц по формуле (11), а для частоты 2000 Гц по формуле (12). Если оно окажется меньше рекомендуемого (см. рис. 44), следует увеличить объем зала, если больше - убавить, по возможности, объем и увеличить звукопоглощение. Регулировку объема зала следует производить на ранних стадиях проектирования здания.

Выяснить насколько требуется изменить общую ЭПЗ зала, можно следующим образом. Исходя из требуемого времени реверберации T , вычисляем $f(a)$ для частот 125 и 500 Гц в соответствии с формулой (11):

$$f(\bar{\alpha}) = \frac{0,163 \cdot V}{T \cdot S_{\text{ОБЩ}}}, \quad (13)$$

а для частоты 2000 Гц - в соответствии с формулой (12):

$$f(\bar{\alpha}) = \frac{(0,163 - T \cdot n) \cdot V}{T \cdot S_{\text{ОБЩ}}}. \quad (14)$$

Из прил. III по найденному значению $f(\alpha)$ определяем средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$, после чего подсчитываем требуемую общую ЭПЗ зала:

$$A_{\text{ОБЩ}} = \bar{\alpha} \cdot S_{\text{ОБЩ}}$$

Сравнив это значение с имеющейся при намеченной отделке зала общей ЭПЗ, видим, насколько следует изменить имеющуюся ЭПЗ для достижения нужного времени реверберации.

Окончательный результат должен быть выражен в виде времени реверберации, рассчитанного по формулам (11) и (12) для 125, 500 и 2000 Гц, с точностью до 0,05 с. Пример расчета времени реверберации зала приведен в прил. I.

ПРИМЕЧАНИЕ. Сравнение расчетного и оптимального времени реверберации удобно и наглядно проводить с помощью диаграммы их частотных характеристик (рис. 45).

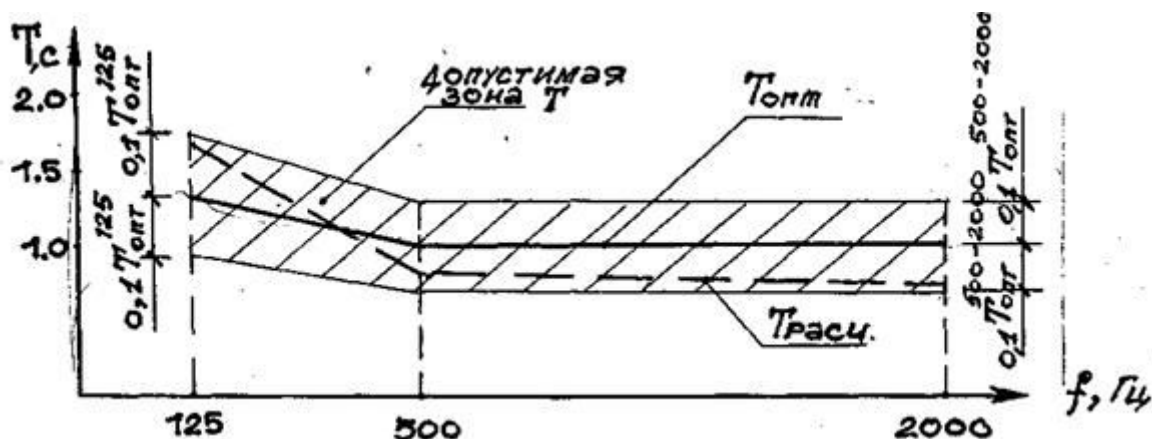


Рис. 45. Частотная характеристика времени реверберации

7. РАЗБОРЧИВОСТЬ РЕЧИ

В помещениях, предназначенных для слушания речи, основное значение имеет ее разборчивость. Разборчивостью речи называют относительное или процентное количество правильно принятых слушателями элементов речи из общего количества произнесенных. Элементы речи - это слоги, звуки, слова, фразы. Соответственно этому различают слоговую, звуковую, словесную, смысловую разборчивость речи.

Определение разборчивости речи осуществляется с помощью специальных артикуляционных таблиц, читаемых диктором в исследуемом помещении. Поэтому данный метод исследования называют артикуляционным. Образцы артикуляционных таблиц слогов приведены в прил. IV (табл. I, 2). Количество слушателей определяется размерами помещения. Обычно в исследовании участвуют не менее 20 слушателей, равномерно распределяемых по всему помещению. Слушатели записывают, в бланки элементы речи так, как они их услышали. Затем слушатели меняются местами и записывают следующие артикуляционные таблицы. Статистическая обработка полученных результатов позволяет оценить разборчивость речи в различных местах помещения.

В помещениях, в которых слоговая разборчивость равна или более 85%, разборчивость речи считается отличной. Неудовлетворительной разборчивости речи (около 40% слоговой разборчивости) соответствует примерно 90% разборчивости фраз.

Разработан ускоренный метод оценки разборчивости речи - метод выбора. Он отличается тем, что сходные по звучанию слова сгруппированы в таблицы (см. прил. IV, табл. 3). Диктор зачитывает из каждой группы сходных слов только одно слово, а слушатели, имея таблицы, отмечают то слово, которое, по их мнению, было зачитано, затем определяют процент правильно принятых слов. Данный метод требует меньшей тренировки слушателей, но он менее точен, чем артикуляционный.

На разборчивость речи оказывают влияние следующие факторы: время реверберации, громкость речи, соотношение уровня постороннего шума (внутри помещения или проникающего снаружи) и уровня громкости речи, а также форма и размеры помещения. На учете данных факторов основан метод расчета разборчивости речи, предложенный Кнудсеном. Так, при времени реверберации около 0,5 с разборчивость речи наибольшая; при увеличении времени реверберации разборчивость речи ухудшается примерно на 10% на каждую секунду времени.

Лучшая разборчивость речи наблюдается при уровне речи 70,80 дБ. Если уровни речи и мешающего шума примерно одинаковы, разборчивость речи снижается до 60%.

Исходя из сказанного, время реверберации T не может увеличиваться неограниченно, так как разборчивость звуковых сигналов ухудшается. Поэтому для помещений в зависимости от источника звука должен быть установлен максимальный объем согласно табл. 2, а в зависимости от этого объема и времени реверберации - максимальная разборчивость речи (рис. 46).

Метод Кнудсена позволяет оценить разборчивость речи, не проводя артикуляционных испытаний, то есть на стадии проектирования.

Точность метода невысокая, и в последнее время предложен ряд более совершенных способов расчета разборчивости речи, авторами которых являются Рейхард, Низе и другие.

Четкость и разборчивость речи в зале, а также качество воспринимаемых музыкальных звуков зависит от силы прямого звука и первых полезных звуковых отражений. Таковыми считаются отражения, поступающие к слушателю с временем запаздывания, по сравнению с прямым звуком, не более 0,05 с для речи и 0,15 , 0,20 с для музыки. Энергия ранних звуковых отражений, как и энергия прямого звука, относится к полезной звуковой энергии. К "бесполезной" относится вся остальная звуковая энергия, представляющая собой ревербирующий фон в помещении.

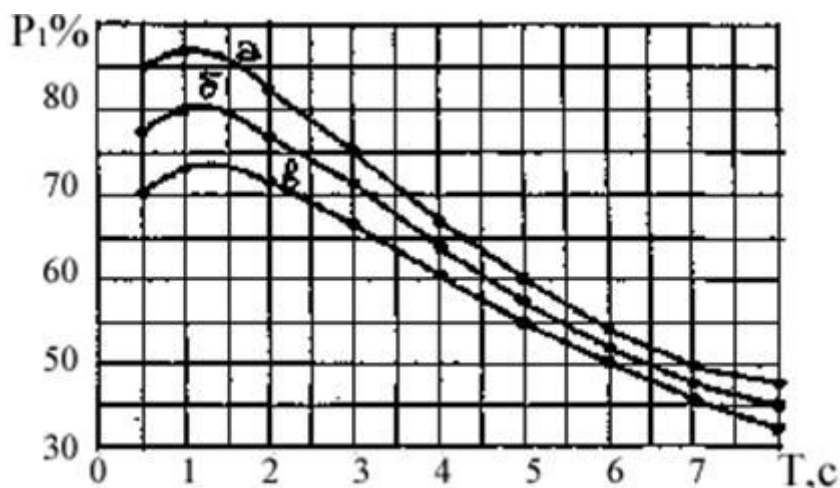


Рис. 46. Влияние времени реверберации T на разборчивость речи P в зависимости от объема помещения, m (по Кнудсену):

а - 707; б - 11300; в - 45200

Результирующий эффект восприятия звука в помещении с точки зрения его разборчивости зависит от величины относительного воздействия на слушателя полезной и "бесполезной" частей звуковой энергии. Это отношение называется коэффициентом разборчивости, величина которого определяется по формуле

$$K_p = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{16\pi \cdot (1 - \bar{\alpha})^2} \left(\frac{1}{r_0^2} + \frac{1 - \alpha_1}{r_1^2} + \frac{1 - \alpha_2}{r_2^2} + \dots + \frac{1 - \alpha_n}{r_n^2} \right), \quad (15)$$

где $\bar{\alpha} \cdot S$ - звукопоглощение при 100%-ном заполнении зала для частот 500-2000 Гц;

α - средний коэффициент звукопоглощения при тех же условиях;

r_1, r_2, \dots, r_n - путь первых отражений от источника звука до точки наблюдения, пришедших в течение первых 0,05 (0,15, 0,20) с;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ - коэффициенты звукопоглощения поверхностей, от которых пришли прямые полезные отражения.

Минимальной величиной K_p следует считать 0,20, что примерно соответствует 80% артикуляции, при которой слушатели правильно слышат 4/5 от общего количества произнесенных звуков, и качество разборчивости удовлетворительное.

Для определения K_p сначала требуется вычислить время запаздывания первых отражении, поступающих в данную точку. В расчете K_p учитываются только первые отражения с временем запаздывания до 0,05 (0,15, 0,20) с.

Время запаздывания первых отражений определяется по формуле

$$t = \frac{(l_1 + l_2) - r_0}{C}, \quad (16)$$

где l_1 - расстояние от источника звука до отражающей поверхности, то есть длина падающего на поверхность луча, м;

l_2 - расстояние от отражающей поверхности до рассчитываемой точки, то есть длина отраженного поверхностью луча, м;

r_0 - длина пути прямого звука, м; $C=340$ м/с - скорость распространения звука в воздухе.

8. ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩАЯ ОТДЕЛКА ЗАЛА

8.1. Определение участков поверхностей потолка и стен для размещения звукопоглотителей

8.2. Звукопоглощающие материалы и конструкции

8.1. Определение участков поверхностей потолка и стен для размещения звукопоглотителей

Если воздушный объем зала не выходит за его пределы, указанные в разд.2, то для достижения нужного времени реверберации обычно не требуется введения специальных звукопоглощающих материалов. В случае, когда расчет времени реверберации показывает необходимость несколько увеличить ЭПЗ зала, этого проще всего достигнуть применением тонких деревянных панелей, увеличивающих звукопоглощение преимущественно на низких частотах (см. прил. II), тканевых портьер и дорожек, поглощающих в основном средние и высокие частоты.

Для исправления возможных акустических дефектов и достижения требуемого времени реверберации используются звукопоглощающие материалы, размещаемые на поверхностях, от которых не попадают к зрителям мало запаздывающие первые отражения. На рис. 47 показаны участки внутренних поверхностей зала (на стенах и потолке), где возможно размещение звукопоглотителей.

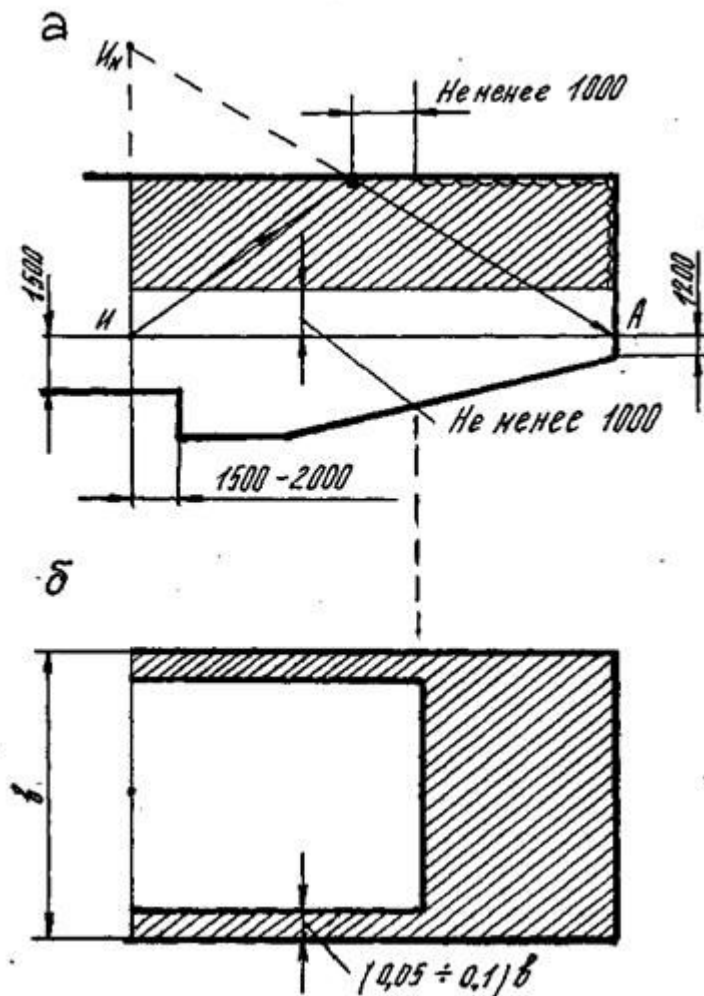


Рис. 47. Рекомендуемые зоны размещения звукопоглотителей в зале (заштрихованы): а - на стенах; б - на потолке

Для этого необходимо определить положение мнимого источника (I_m) и провести прямую в точку А, определяющую зрителя в последнем ряду. Пересечение этой точки с потолком определит зону полезных отражений. Поэтому возможно правее точки пересечения производить обработку потолка звукопоглотителем.

На боковых стенах эта зона находится на высоте не менее 1,0 м над головой зрителя, сидящего в последнем ряду.

Более точное нахождение участков стен и потолка для размещения звукопоглотителей выполняется следующим образом. Специальные звукопоглощающие материалы, обладающие большим коэффициентом звукопоглощения, не следует размещать на поверхностях, дающих звуковые отражения к слушателям, мало запаздывающие по сравнению с прямым звуком источника. В правильно запроектированном зале такими отражениями в основном являются первые отражения от некоторых участков потолка и стен. Эти участки выявляются путем построения геометрических отражений от разных мест потолка и стен при различных возможных положениях источника звука. Построения производятся методами, изложенными в разд. 5. При этом должно проверяться и время запаздывания отражений в соответствии с п. 5.2, 5.3. Как указано в п. 5.5, такие участки не следует сильно расчленять.

Особенно просто, используя метод мнимого источника, определяются участки, дающие первые отражения к слушателям, на более плоских поверхностях. На рис. 48 показано построение такого участка на плоском наклонном потолке.

Здесь q и q' - проекции источника; q_1 и q'_1 - проекции мнимого источника. Источник звука находится на эстраде в боковом положении, при котором искомый участок потолка (при учете также симметричного положения источника S) принимает наибольшие размеры. Участок партера, занятый слушателями, в плане заштрихован. Проведя из мнимого источника луч к вершинам этого участка, находим вертикальные проекции a' , b' , c' , d' точек пересечения этих лучей с потолком; после этого на горизонтальных проекциях лучей получаем горизонтальные проекции a , b , c , d тех же точек. Таким образом, многоугольник с горизонтальной проекцией $abcd$ является искомым участком потолка, дающим первые отражения звука к слушателям.

Учитывая также симметричное положение источника $З$, получим в плане общий участок потолка $aefd$, от которого могут попадать к слушателям первые отражения при этих двух положениях источника. Участок для обеспечения отражений от его краев должен быть увеличен по контуру согласно разд.5 добавлением полосы шириной 0,5 м. Оставшийся заштрихованный в плане участок потолка может использоваться для размещения звукопоглощающих материалов. Часть потолка, находящаяся над эстрадой оставлена без отделки звукопоглотителями, так как окружающие эстраду поверхности следует делать малопоглощающими (это существенно и для того, чтобы ранние отражения приходили к самим исполнителям).

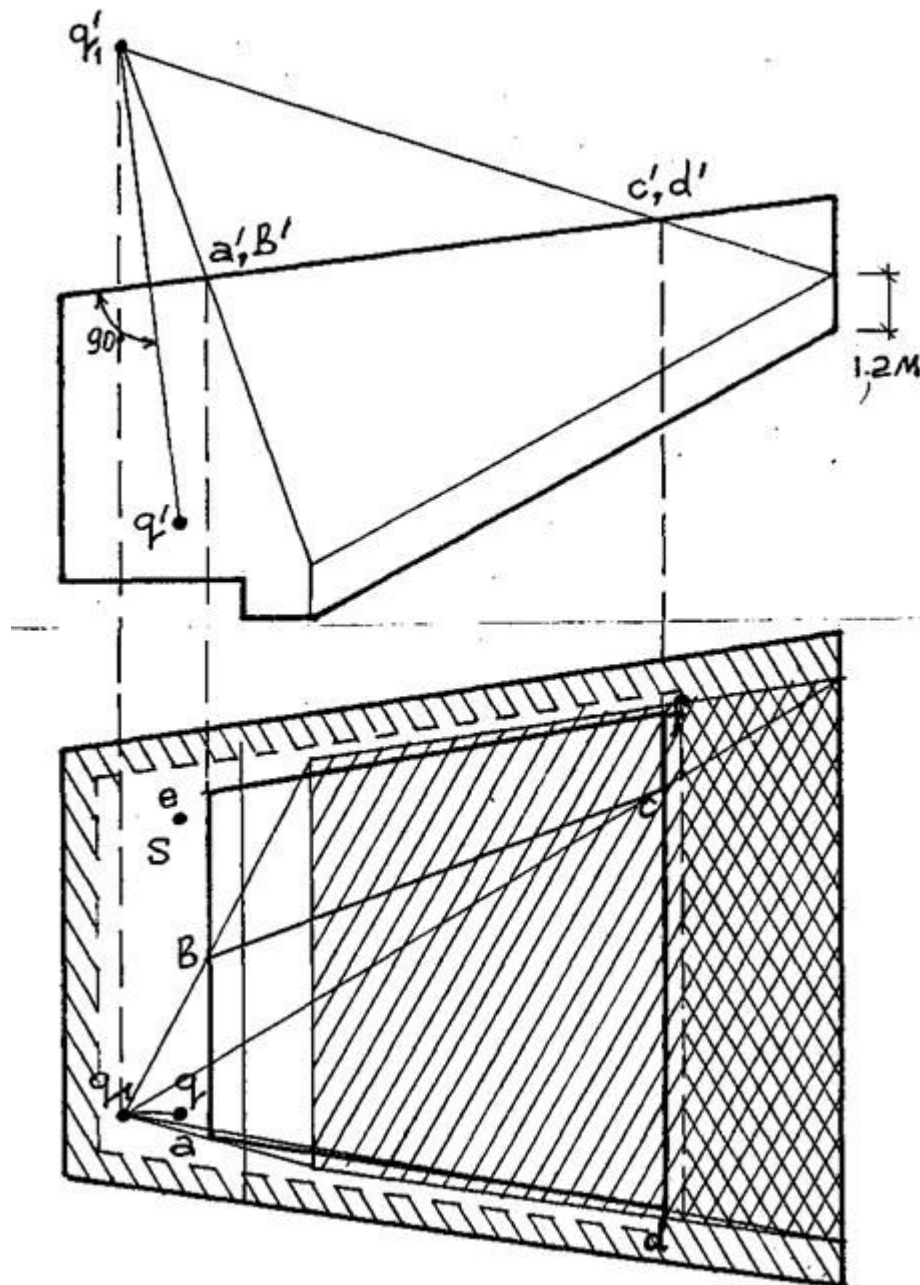


Рис. 48. Нахождение участка потолка, пригодного для размещения звукопоглощающих материалов

На рис. 49 аналогичным образом найден участок плоской боковой стены, дающий первые отражения к слушателям. Здесь q, q' - горизонтальная и вертикальная проекции источника, а q_1, q'_1 - проекции мнимого источника. Теми же приемами, что и для потолка, находим в вертикальной проекции участок боковой стены $da'b'c'd'$, дающий первые отражения к слушателям. На заштрихованном участке в верхней части стены можно размещать звукопоглощающие материалы. В части стены около пола размещение звукопоглотителя нецелесообразно из-за возможности его повреждения. Значительная часть стены около эстрады (как и часть потолка на рис. 48) оставлена без отделки звукопоглотителем.

На задней стене, звукопоглотители следует размещать в тех случаях, когда от нее поступают к слушателям сильно запаздывающие отражения (см. рис. 13). Если же (что

более рационально) примыкание потолка к задней стене выполнено таким образом, что она дает раннее отражение к слушателям (см. рис. 16), то ее не следует отделять звукопоглощающими материалами.

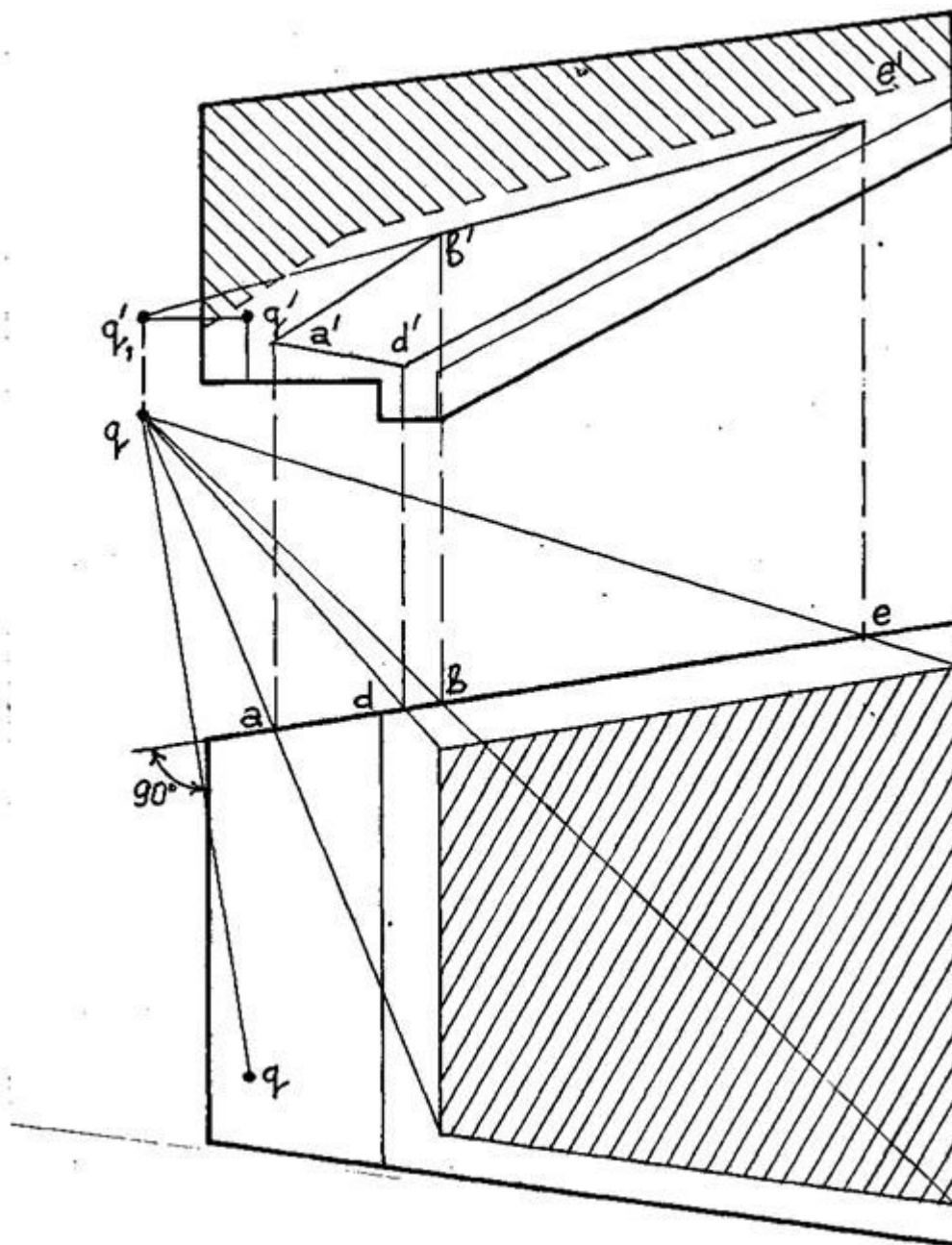


Рис. 49. Нахождение участка стены, пригодного для размещения звукопоглощающих материалов

После нахождения указанными приемами участков, дающих первые отражения, следует проверить достаточность размеров этих участков для получения от них геометрических отражений (пользуясь хотя бы приближенно приемами разд. 5, п. 5.1). Если размеры участков окажутся недостаточными, следует их соответственно увеличить (уменьшив, тем самым участки, на которых можно расположить звукопоглотители).

Сильно поглощающие материалы и конструкции не следует размещать на участках стен и потолка, дающих первые малозапаздывающие отражения звука к слушателям.

На остальной поверхности потолка и стен могут размещаться указанные звукопоглотители. Целесообразно, если это согласуется с интерьером зала, размещать звукопоглотитель отдельными участками площадью 1-5 м² что несколько увеличивает ее фактическую ЭПЗ и дает некоторое рассеивание отраженного звука. Поверхности пазух над и под балконами не следует отделывать звукопоглощающими материалами.

Данные о некоторых специальных звукопоглощающих материалах и конструкциях, имеющих большие коэффициенты звукопоглощения, приведены в прил. II.

На рис. 50 показано исправление акустических дефектов зала.

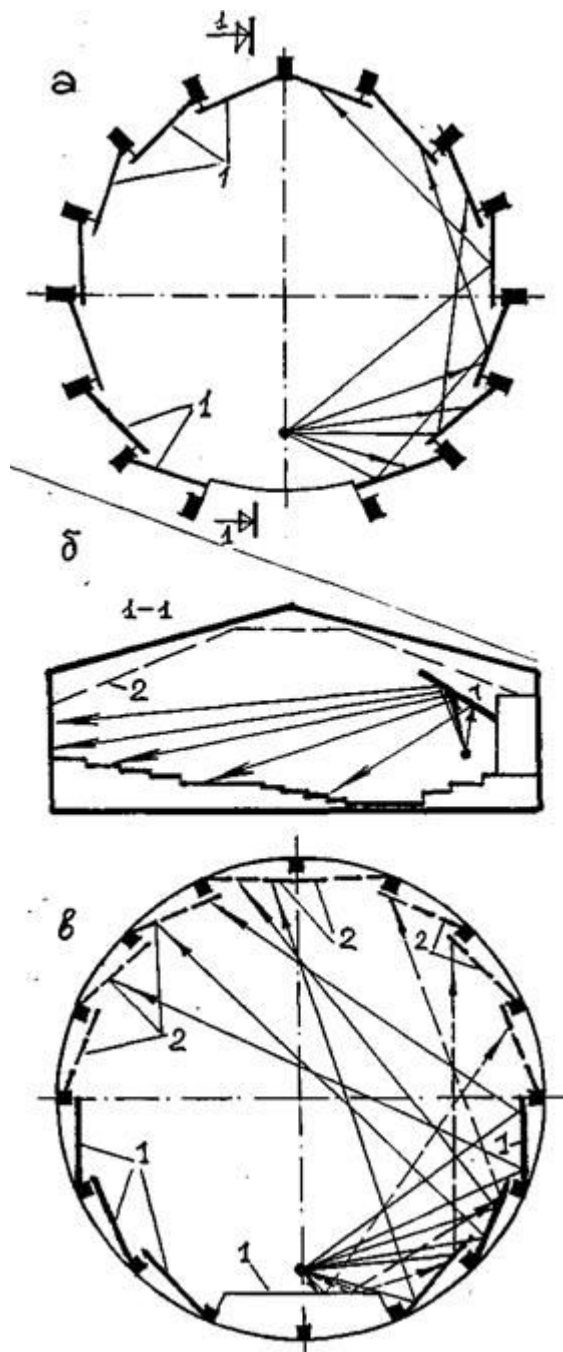


Рис. 50. Исправление акустических дефектов зала:

а - отражение звука вдоль стен;

б - устройство экрана над сценой (1);

в - расположение отражающих (1)

и звукопоглощающих (2)

поверхностей на плане зала

Элементы, стен расположены так неудачно, что отражение звука распределяется лишь вдоль стены, не попадая в среднюю часть зала (рис. 50а). Форма потолка также не обеспечивает необходимого распределение первых отражений звука (рис. 50б). Данный

дефект может быть частично исправлен устройством отражающего звук экрана. Элементы стены располагаются под иными углами по отношению к сцене (рис. 50в). Кроме того, до середины зала они делают отражающими звук, а дальше середины - звукопоглощающими. В результате хорошо отражающие звук поверхности равномерно распределяют отраженный звук по залу, Поверхности, отражения от которых не направлены в сторону зала, обработаны звукопоглотителями. Звукопоглощение, помимо устранения нежелательных отражений звука, уменьшает время реверберации, то есть делает зал менее гулким.

8.2. Звукопоглощающие материалы и конструкции

Звукопоглотители классифицируются по назначению, форме, жесткости, возгораемости, структуре. С акустической точки зрения звукопоглотители могут быть подразделены на следующие группы: пористые материалы; пористые звукопоглотители с перфорированными экранами; резонансные и слоистые конструкции; штучные поглотители [19, 20].

Пористые материалы. У них твердое вещество занимает часть общего объема, а остальной объем приходится на многочисленные малые поры, заполненные воздухом, открытые наружу и сообщающиеся между собой.

Материалы с замкнутыми порами имеют малый коэффициент звукопоглощения и поэтому не являются звукопоглощающими.

Звукопоглощающие пористые материалы и изделия подразделяют на группы:

С гибкой структурой, применяемые в качестве основного элемента в звукопоглощающих конструкциях (маты из холста супертонкого базальтового, маты из холста супертонкого стекловолокна). Эти материалы поглощают звуковую энергию благодаря вязкостному трению воздуха в порах. При этом кинетическая энергия колеблющихся частиц воздуха преобразуется в тепловую.

С полужесткой структурой обычно изготавливают в виде плит полной заводской готовности, которые крепят непосредственно к поверхности или на отnose. Их изготавливают из древесного волокна, асбеста, минеральной и стекловаты, стеклянного и капронового волокна с использованием в качестве вяжущего материала битума, смолы, цемента. Основой зернистого пористого материала служит минеральная крошка, гравий, пемза, каолин; в качестве вяжущего используют цемент или жидкое стекло.

Например: плиты минераловатные акустические стандартные ПА/С на синтетическом связующем, покрыты белой краской с набрызгом под мрамор; плиты ПА/О - акустические отделочные, покрыты краской на основе поливинилацетатной эмульсии с белым пигментом. Лицевая поверхность плит перфорирована круглыми отверстиями диаметром 4 мм с шагом 14 мм и глубиной 5 мм.

Материалы с полужестким скелетом поглощают звуковую энергию помимо трения в порах, еще и за счет деформаций скелета, совершающего вынужденные колебания под воздействием звуковых волн.

С жесткой структурой. Плиты акустические «Силапор» из газосиликатного бетона, поверхность имеет неглубокую перфорацию лицевого слоя по различным рисункам («Лунная поверхность», «Нида»). Плиты минераловатные акустические «Акмигран». Винипор звукопоглощающий (с открытыми порами).

Для пористых материалов характерно увеличение звукопоглощения с повышением частоты звуковых волн (см. прил. II табл. 1). Коэффициенты звукопоглощения для большинства пористых материалов на средних и высоких частотах составляют 0,4-0,6. Их используют в основном для улучшения акустических качеств в кинотеатрах, театрах, концертных залах, студиях, аудиториях. Максимальная эффективная толщина пористого поглощающего материала зависит от специфического аэродинамического сопротивления и фактического уровня шума в помещении (рис. 51, 52).

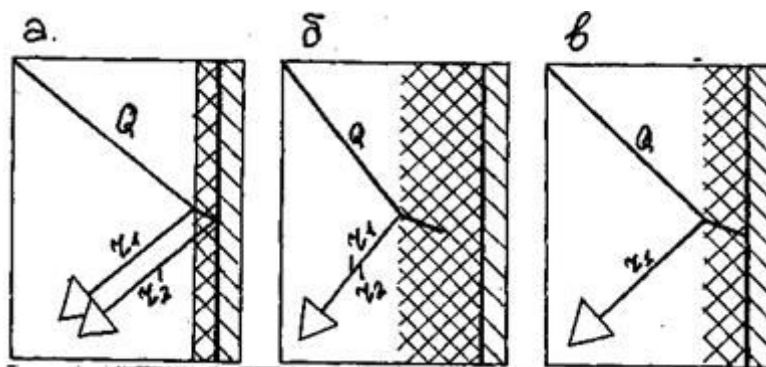


Рис. 51. Эффективная толщина пористых поглотителей:

а - из-за малой толщины слоя звук отражается задней поверхностью;

б - из-за большой толщины часть слоя "не работает";

в - эффективная толщина слоя;

Q - падающий на ограждение звук; r_1 - отраженный пористой поверхностью звуковой луч; r_2 - отраженный от задней стены ограждения звуковой луч

Звукопоглощающие облицовки чаще всего выполняют в виде подвесных потолков из плит Акмигран, акминит или жестких минераловатных плит (см. рис. 53, 54).

Влияние расстояния между пористым поглотителем и стеной, на звукопоглощение видно из рис. 55.

К пористым материалам относятся драпировки и ковры, применяемые для увеличения общего звукопоглощения в зрительных залах на средних и высоких частотах. Для увеличения звукопоглощения на низких частотах необходимо увеличить толщину пористого материала или предусмотреть воздушный промежуток между поглотителем и ограждающей конструкцией. Увеличение звукопоглощения можно достичь перфорированием круглыми пустотами, имеющими глубину до $2/3$ толщины плиты.

Пористые звукопоглотители на основе волокнистых материалов покрываются экранами, защищающими материал от механических повреждений. В качестве экрана используют

перфорированные листы из металла, пластмассы, фанеры, асбестоцемента и др. Между экраном и пористо-волокнистым материалом размещают тонкую защитную пленку (см. рис. 56). Конструкции с перфорированным покрытием материала позволяют получать достаточно большое звукопоглощение в любой области частот и используют для помещений различного назначения.

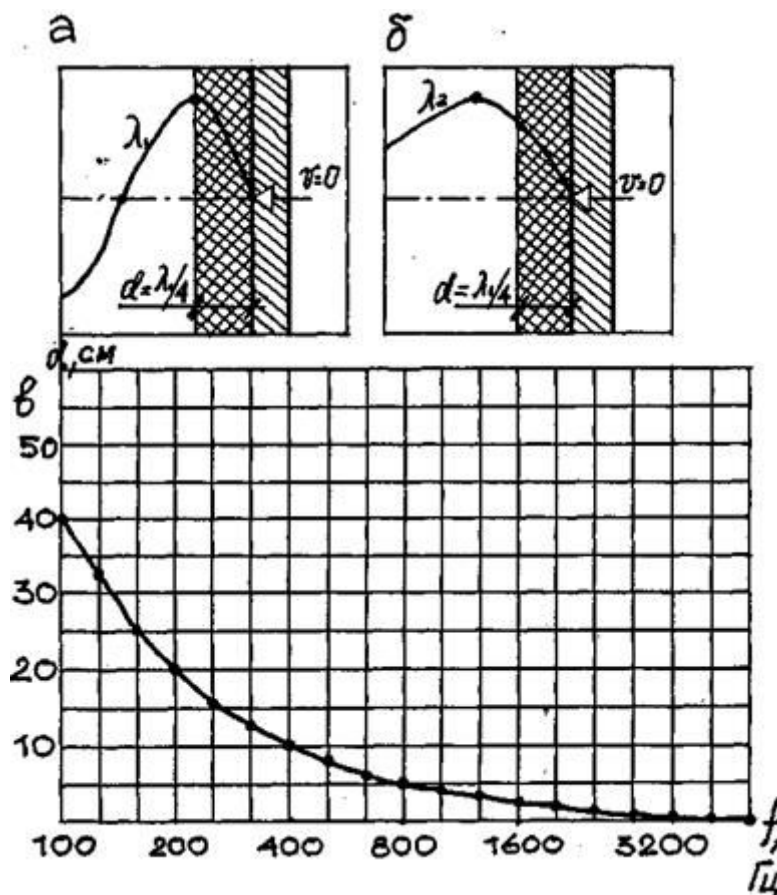


Рис. 52. Влияние толщины слоя пористого поглотителя:

а - толщина слоя $d = \lambda_1/4$ (максимум скорости звуковых волн длиной λ_1 расположен в слое пористого материала);

б - толщина слоя $d < \lambda_2/4$ (максимум скорости звуковых волн длиной λ_2 расположен вне слоя пористого материала, эффективность слоя уменьшается);

в - требуемая толщина слоя изоляции d для $\alpha = 0,8$ в зависимости от частоты f

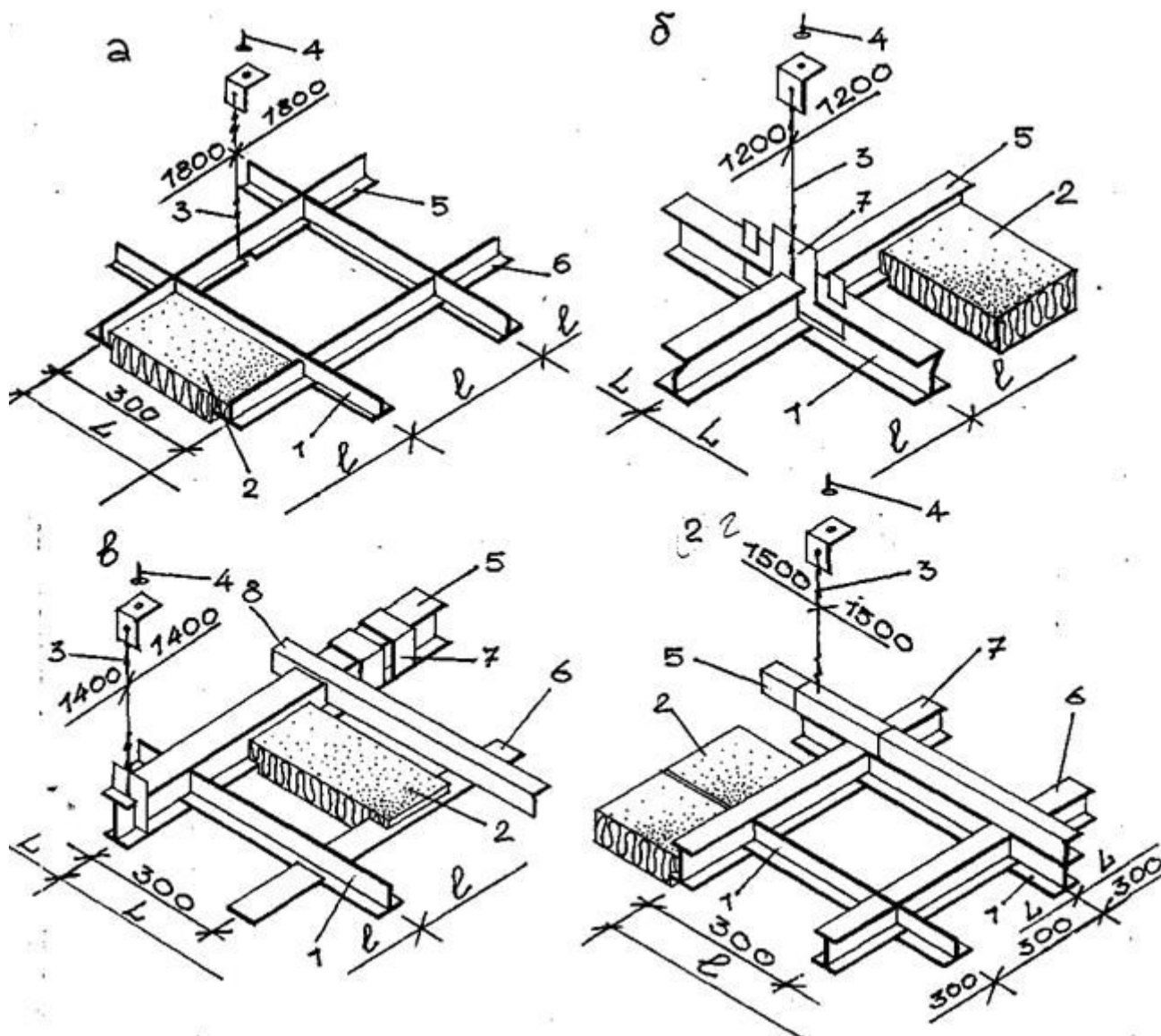


Рис. 53. Подвесные потолки из плит "Акмигран", акминит или плит МВД:

- а - с каркасом их П-образных стальных, профилей;
- б - с каркасом из тавровых стальных профилей;
- в - с каркасом из двутавровых алюминиевых профилей;
- г - со стальным каркасом в двух уровнях;
- 1 - направляющий или второстепенный профиль каркаса;
- 2 - лицевые элементы (звукопоглощающий материал);
- 3 - проволочная подвеска; 4 - дюбель;
- 5 - главный профиль каркаса; 6 - профиль шпонка;
- 7 - соединительный элемент профилей каркаса; 8 - гребенка

Частотная характеристика звукопоглощения регулируется подбором материала, его толщиной, толщиной экрана, размером и формой отверстий, шагом отверстий. Большое преимущество перфорированных конструкций заключается в простоте их изготовления и монтажа, а также в широких возможностях архитектурно-декоративного решения интерьеров помещений.

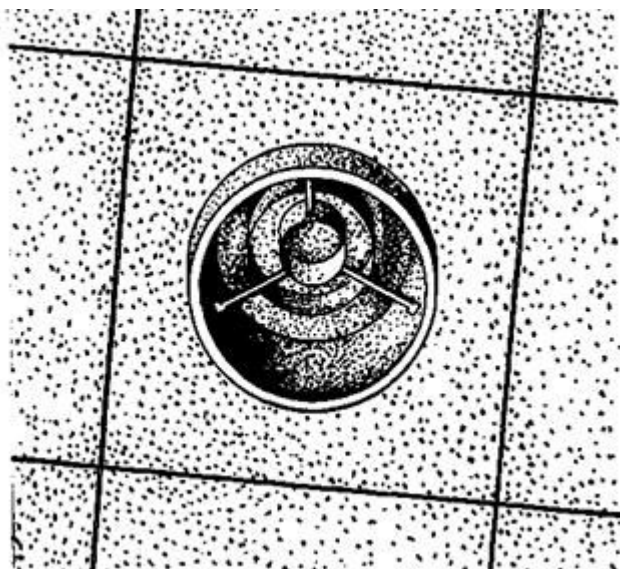


Рис. 54. Общий вид подвесного потолка, выполненного из декоративно-акустических плит "Акмигран"

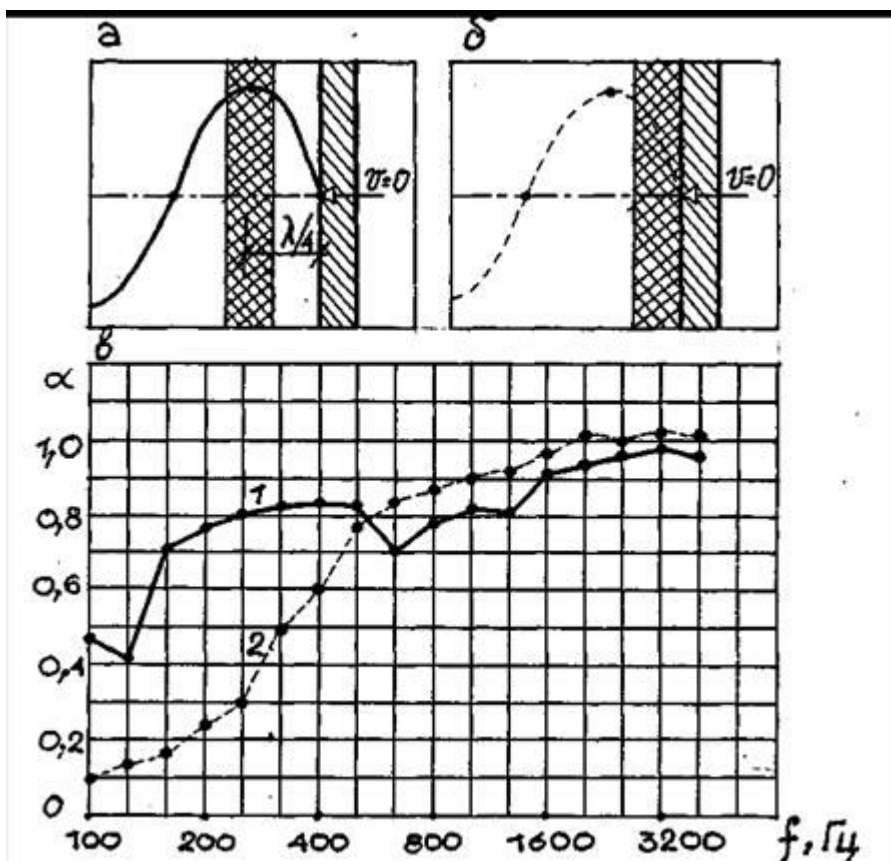


Рис. 55. Влияние расстояния между пористым поглотителем и стеной:

а - звукопоглощающий слой расположен на расстоянии от стены, равном $1/4$, максимум скоростей звуковых волн находится в толще слоя;

б - звукопоглощающий слой нанесен непосредственно на стену, максимум скорости находится вне слоя, его эффективность уменьшается;

в - коэффициент звукопоглощения α плиты из минерального волокна толщиной 40 мм;

1 - расстояние между звукопоглощающим слоем и стеной 27 см;

2 - звукопоглощающий слой прикреплен непосредственно к стене

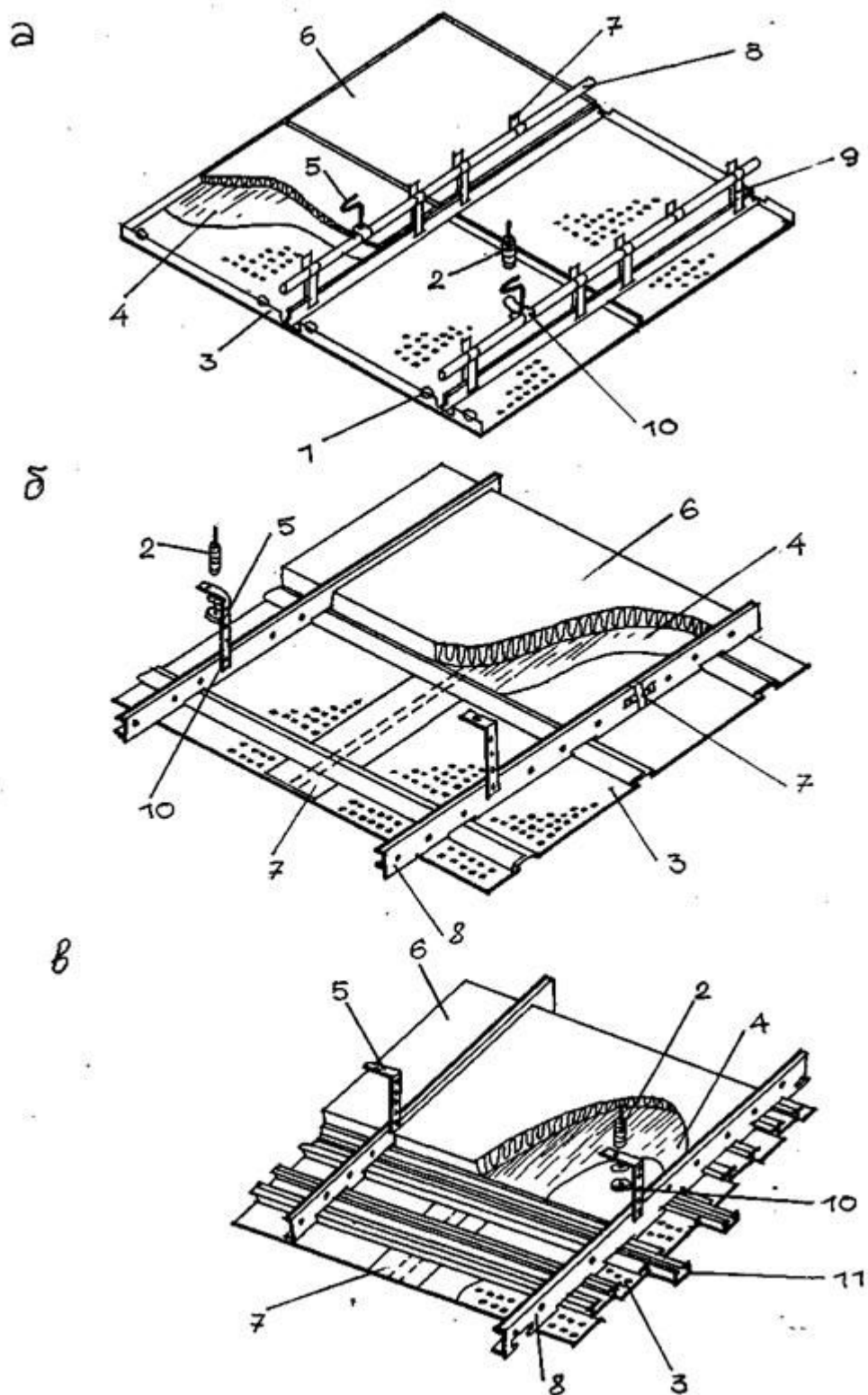


Рис. 56. Подвесные потолки с перфорированными алюминиевыми экранами:

а - с панелями 600´600 мм; б - с рейками 300´600 мм; в - с рейками 100´150´4500 мм с нащельниками; 1 - пружина уплотнения; 2 - дюбель-винт; 3 - лицевой элемент; 4 - прокладочный слой; 5 - подвеска; 6 - пористый (волокнистый) звукопоглощающий материал; 7 - соединительная накладка, 8 - несущий профиль; 9 - пружина крепления; 10 - деталь регулировки уровня потолка по высоте; 11 - нащельник

В строительной акустике часто применяется простейшая колебательная система, образуемая из элементов: масса - пружина - масса. Их колебания могут вызывать явление резонанса. Резонансная или собственная частота снижается при увеличении массы поверхности и снижении жесткости пружины. В состоянии резонанса необходим лишь незначительный импульс энергии, чтобы сохранить колебание системы. С другой стороны, перенос звука через такую систему при резонансе значительно увеличивается и потери звуковой энергии, то есть поглощение ее из помещения, становится высоким. Масса и пружина интерпретируются произвольно.

Различают два типа резонаторов (или резонансных поглотителей): плитный и Гельмгольца (рис. 57).

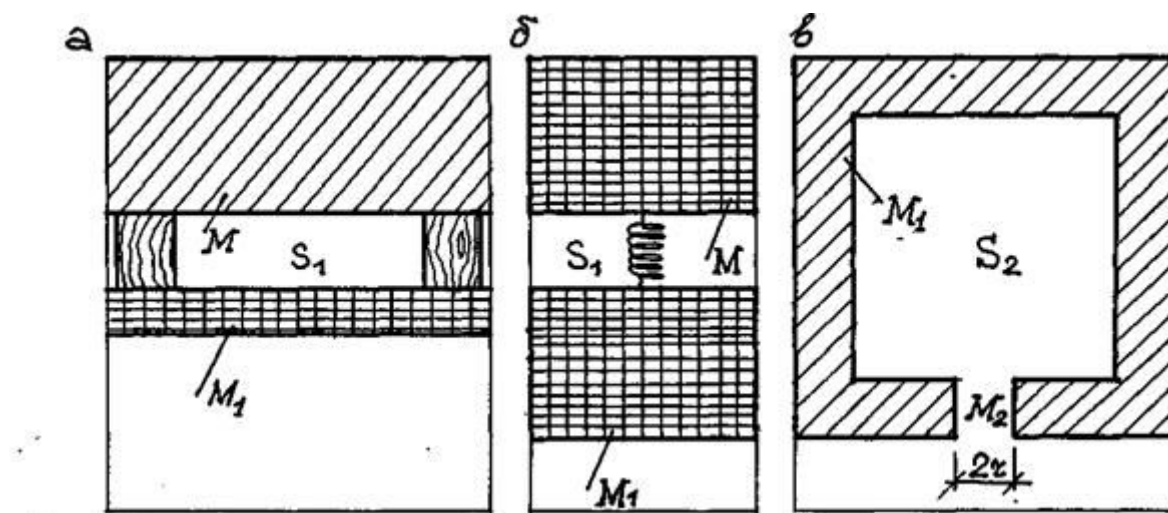


Рис. 57. Типы резонансных звукопоглотителей: а - плитный; б - система масса-пружина-масса; в - резонатор Гельмгольца; M - масса (стена или плита перекрытия); S_1 - пружина (воздушный промежуток);

S_2 - пружина (объем воздуха); M_1 - масса корпуса (фанера, гипсокартон);

M_2 - масса воздуха в объеме горловины резонатора $l \cdot \pi \cdot r^2$.

Плитные резонансные неперфорированные звукопоглощающие конструкции. Это жесткие колебательные системы или мембранные звукопоглотители, у которых колеблющаяся масса (тонкая, но плотная плита, например, панель из ДСП, фанеры или гипсокартона) укреплена на некотором расстоянии от стены и совершает вынужденные колебания, сжимая находящийся позади нее объем воздуха (выполняющий функцию пружины), рис. 57 а.

Звуковая энергия затрачивается на преодоление упругого сопротивления (реакции) воздуха за панелью и сил трения, возникающих при изгибных деформациях панели.

Плитные резонаторы используются при звуковых колебаниях в полосе частот от низких до средних, при этом по сравнению с пористыми поглотителями они перекрывают лишь узкую полосу частот.

Принципиальное устройство **резонатора Гельмгольца** показано на рис. 57 в. Как и в перфорированных плитных резонаторах, масса резонаторов Гельмгольца образуется горловиной резонатора, пружина - находящимся в камере объемом воздуха. При этом полоса резонансных частот может быть увеличена путем установки пористых материалов в горловине резонатора.

Плитные резонансные перфорированные звукопоглощающие конструкции, представляют собой параллельное соединение большого числа резонаторов, что увеличивает звукопоглощение конструкции. Они изготавливаются из перфорированных облицовок (перфорированы листы из металла, гипса, асбестоцемента) с подклеенной к ним пористой тканью. Такая конструкция имеет поглощение в узкой полосе, обусловленное резонансными свойствами. Для получения более равномерной частотной характеристики коэффициента звукопоглощения на внутреннюю сторону перфорированной панели укладывают слой пористого материала. Рост коэффициента перфорации (площади отверстий) увеличивает коэффициент звукопоглощения в области высоких частот.

Для борьбы с шумом в зале используют также **подвесные или штучные звукопоглотители** из пористого звукопоглощающего материала, заключенного в перфорированный футляр конической или кубической формы (рис. 58), выполняемый из пластмассы, фанеры или металла (рис. 59).

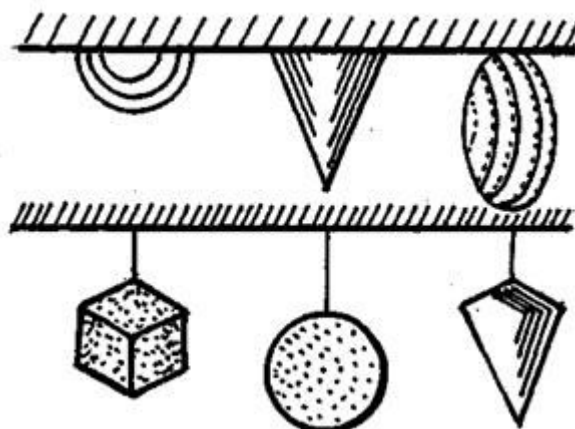


Рис. 58. Общий вид штучных звукопоглотителей

Звукопоглотитель подвешиваются как можно ближе к источникам шума и в зонах концентрации звуковой энергии. Эффективность штучных поглотителей оценивают не коэффициентом звукопоглощения, а эквивалентной площадью звукопоглощения A , m^2 (см. рис. 60).

В практике строительства общественных зданий широкое применение нашли архитектурно-акустические конструкции, состоящие из эффективного звукопоглотителя и декоративной решетки из металла или дерева. При небольшой ширине деревянных реек (до 4 см) и ширине пролетов между ними (до 5 см) такая решетка действует лишь как декоративное покрытие, не оказывая практически никакого влияния на поглощение звука, осуществляемое находящимся за ней звукопоглотителем. Следует иметь в виду, что в помещениях большого объема, а также в помещениях, где имеется достаточно большое звукопоглощение, эффективность снижения времени реверберации или уровня шума за

счет внесения добавочного звукопоглощения уменьшается. Поэтому мероприятия, связанные с применением звукопоглощающих материалов и конструкций, требуют тщательного технического и экономического обоснования.

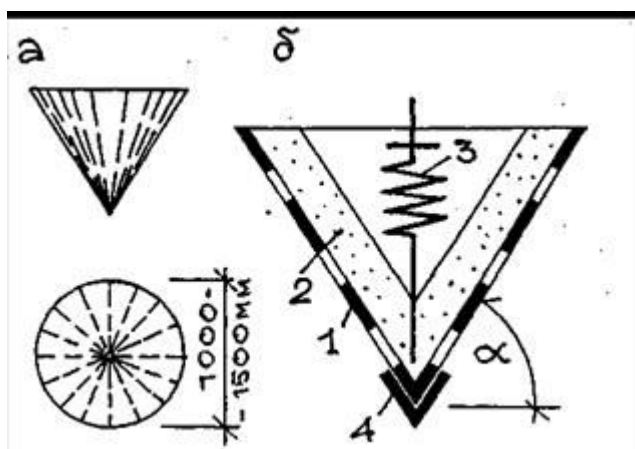


Рис. 59. Подвесной штучный поглотитель дифракционного типа:

а - общий вид, б - разрез;

1 - кожух из перфорированного металла (фольга, жель, латунь 1,5-0,4 мм; диаметр перфорации 1 мм, шаг перфорации 3 мм);

2 - мат из минерального волокна в обертке из грубой ткани или мешковины);

3 - крепежная пружина;

4 - металлический колпачок, угол α выбирается по архитектурным соображениям

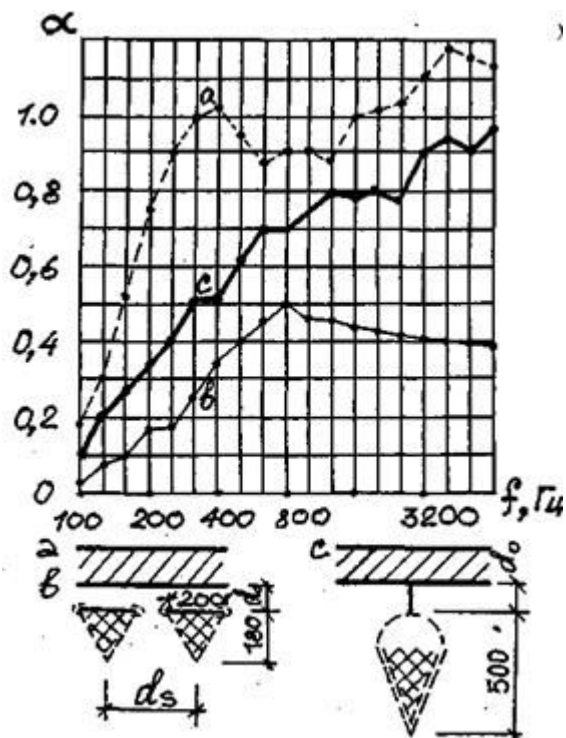


Рис. 60. Коэффициенты звукопоглощения подвесных звукопоглотителей:

а - минеральное волокно в металлической сетке, $\rho=50$ кг/м³, $d_0=100$ мм, $d_s=230$ мм;

в - то же, $d_0 = 80$ мм, $d_s= 1000$ мм,

с - конус, 400 мм, расстояние между конусами 750 мм, карбонидо-формальдегидная пеномасса в ткани, нижняя часть конуса покрыта поливинилхлоридной перфорированной пленкой $d_0 = 500$ мм

9. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ЗАЛА

При проектировании зала нужно обратить серьезное внимание на его звукоизоляцию. Мероприятия для звукоизоляции и снижения шума следует разрабатывать в соответствии с положениями СНиП по защите от шума.

Располагать здание, в котором имеется зал, на шумной магистрали крайне нежелательно. Если такое расположение неизбежно, то здание должно отступать от красной линии, и участок между ней и зданием следует озеленить деревьями, что несколько изолирует здание от уличного шума. Внутренняя планировка здания должна быть такова, чтобы зал находился возможно дальше от шумных проездов и других сильных источников шума, а между залом и улицами размещались вспомогательные помещения (фойе, вестибюли и т.п.), защищающие зал от непосредственного проникания уличного шума.

Если зал имеет окна, то они не должны быть обращены в сторону шумных проездов и их следует устраивать с двойными плотными переплетами .

Для повышения звукоизоляции между залом и фойе входа в зал должны иметь плотно закрывающиеся двери, прикрываемые портьерами с обеих сторон; лучшая звукоизоляция достигается устройством тамбуров с двумя дверями. Устройство тамбуров или коридоров, отделяющих зал от фойе, особенно рекомендуется, если предполагается использование фойе (например, для оркестра) одновременно с залом.

Допускаемый уровень проникающих в зал шумов и требуемая звукоизоляция ограждающих конструкций зала должны приниматься в соответствии с Нормами проектирования СНиП П-12-77. Если окружающие зал помещения нуждаются по своему характеру в защите от шумов, то должна быть обеспечена изоляция этих помещений от проникающего из зала звука.

При разработке внутренней планировки здания надо, строго следить за тем, чтобы помещения с шумным оборудованием (вентиляционные камеры с вентиляторами, насосные, холодильные установки, шахты лифтов и их машинные помещения, трансформаторные, котельные и т.п.) не примыкали к залу и другим помещениям, требующим защиты от шума.

При проектировании установок вентиляции или кондиционирования воздуха для изоляции зала от их шума должны быть разработаны следующие основные мероприятия:

- монтаж вентиляторов, насосов и компрессоров совместно с их двигателями на амортизаторах для изоляции колебаний, передающихся строительными конструкциями здания;
- устройство вставок из прорезиненной ткани в местах присоединения воздуховодов к вентиляторам и вставок из резинового шланга в местах присоединения трубопроводов к насосам;
- устройство глушителей для заглушения аэродинамических шумов, распространяющихся по воздуховодам;
- ограничение скорости воздуха для снижения шумообразования в воздуховодах и решетках;
- надлежащая звукоизоляция ограждающих конструкций помещений, в которых расположены вентиляторы и насосы.

При проектировании этих мероприятий следует пользоваться указанными нормами СНиП П-12-77.

Для изоляции зала от шума кинопроекторов проекционные окна должны иметь стекла толщиной не менее 6 мм, герметически закрывающие оконный проем при помощи резинового уплотнения по контуру. Смотровые окна должны иметь два таких стекла. В оконном проеме торцы стены между этими стеклами рекомендуется отделывать звукопоглощающим материалом. Проекторы следует устанавливать на резиновых амортизаторах, ослабляющих звуковые колебания, передающиеся полу. Потолок кинопроекторной для снижения шума рекомендуется отделывать звукопоглощающими плитами одного из типов, приведенных в прил. II, табл. 1.

10. СИСТЕМЫ ЗВУКОУСИЛЕНИЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АКУСТИЧЕСКОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЗАЛА

Деление залов на залы с естественной акустикой и залы, оборудованные электроакустическими системами, условно, так как все современные залы должны иметь системы звукоусиления.

Залы, оборудованные электроакустическими системами делятся на две группы: 1. залы, в которых зрители воспринимают звук непосредственно со сцены и при помощи системы звуковоспроизведения. Это залы со звукоусилением (лекционные, концертные, залы многоцелевого назначения); 2. залы, в которых зрители воспринимают звук только при помощи звуковоспроизводящей системы (кинотеатры).

Целесообразность использования систем звукоусиления в залах первой группы (для залов второй группы это очевидно) определяется прежде всего их большими размерами. В залах многоцелевого назначения большого объема помимо усиления звука специальные электроакустические системы могут выполнять еще и функции регулирования времени реверберации. Такие системы называются амбиофоническими.

Качество передачи звука при работе в зале системы звукоусиления определяется классом используемой аппаратуры, правильностью и взаимосвязкой электроакустического и акустического проектов. Чтобы обеспечить качество звукопередачи и повысить надежность работы системы звукоусиления при акустическом проектировании зала необходимо выполнить ряд дополнительных требований.

Для устойчивой работы системы звукоусиления время реверберации зала должно быть небольшим. Рекомендуемые в разд. 6 (см. рис. 43) значения времени реверберации соответствуют оптимальным для залов, оборудованных системами звукоусиления. Если зал имеет жесткие кресла, то рекомендуется при выборе оптимального значения времени реверберации ориентироваться на нижнюю границу полосы, указанной на рис. 43.

При разработке архитектурно-акустического решения околосценического пространства (устройство порталов, козырьков, боковых звукоотражателей и других поверхностей) необходимо учитывать размещение в нем основной централизованной группы громкоговорителей. Они должны размещаться таким образом, чтобы прямой звук от них не попадал в возможные места расположения микрофонов, а разность хода между прямым звуком громкоговорителей и естественных источников со сцены не превышала величин, указанных в п. 5.2.

Средний коэффициент звукопоглощения поверхностей зала, примыкающих к местам расположения микрофонов, должен быть не ниже (целесообразно несколько выше), чем в целом по залу. В залах с выделенным сценическим объемом это условие выполняется, если имеются кулисы, занавеси и декорации. В случае, когда сцена составляет с залом единый объем, необходимо предусмотреть звукопоглощающую отделку примыкающих к стене поверхностей стен и потолка. Поверхности эти следует расчленять, а звукопоглотитель на них размещать в соответствии с п. 8.1.

В проектах залов следует избегать решений, в которых непосредственно за зоной установки микрофонов находится плоская или вогнутая отражающая стена или поверхность. Часть пола и мебель, на которых крепятся микрофоны, желательно подглушить, используя для этой цели на полу ковровые дорожки или ковер, стол президиума, покрытый скатертью или сукном, трибуну с мягкой обивкой внутренних поверхностей.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПРИМЕР АКУСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ЗАЛА МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА 600 ЗРИТЕЛЬСКИХ МЕСТ

I. Основные размеры и форма зала

Схема плана и продольного разреза зала показана на рис. 1. Воздушный объем зала (без учета объема сцены) $V = 3060 \text{ м}^3$. Объем, приходящийся на одно место (удельный объем) - $5,3 \text{ м}^3$. Площадь, приходящаяся на одно место (удельная площадь) - $0,57 \text{ м}^2$. Длина зала от занавеса до задней стены $z = 23,5 \text{ м}$. Ширина в центральной части зала (средняя ширина) $B = 16,5 \text{ м}$. Высота в центральной части зала (средняя высота) $H = 8,8 \text{ м}$. Общая площадь внутренних поверхностей $S_{\text{общ}} = 1340 \text{ м}^2$.

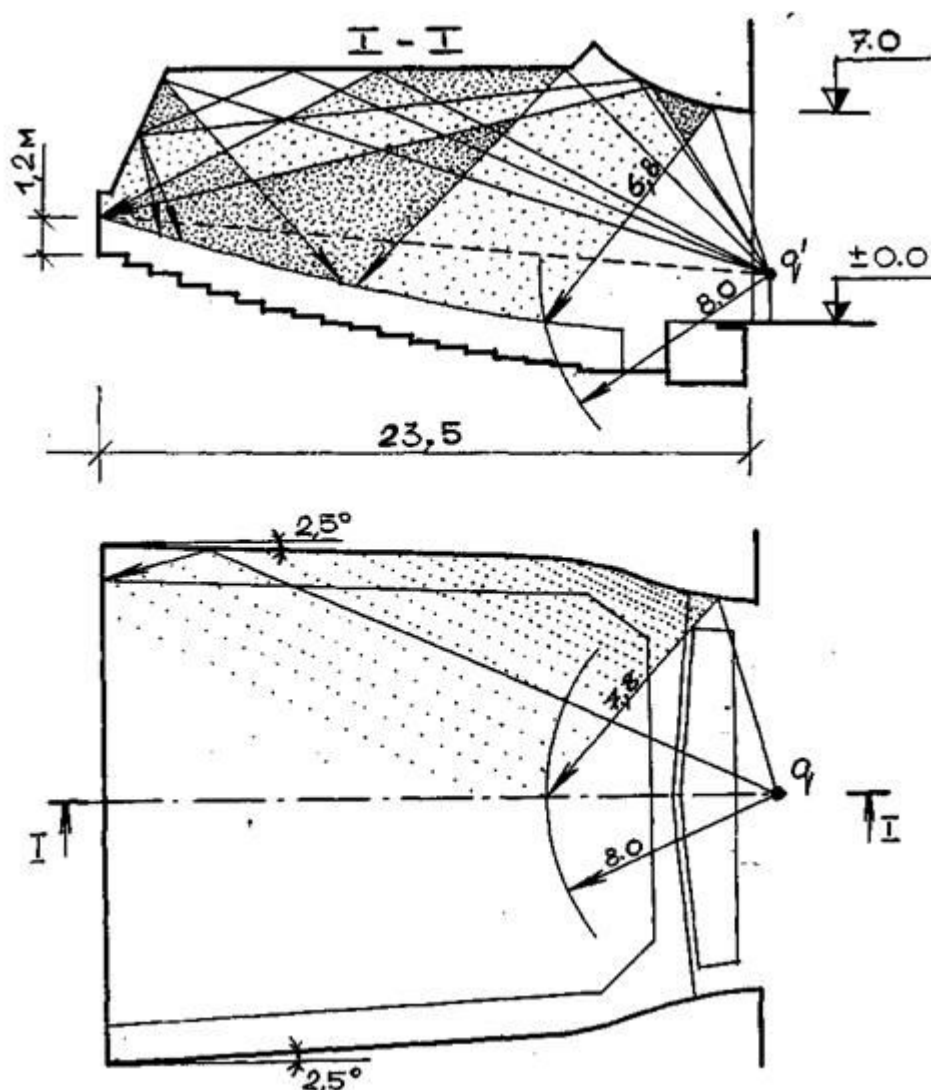


Рис. 1. Зал многоцелевого назначения на 600 мест с построением звуковых отражений от источника звука, находящегося на авансцене (размеры даны в метрах)

Форма зала в плане и продольном разрезе выбрана исходя из рекомендаций разделов 2, 3 и следующих требований:

1. Обеспечить слушателей в партере достаточно интенсивным прямым звуком и мало запаздывающими отражениями. Для залов многоцелевого назначения необходимо, чтобы при удалении слушателей от источника звука более чем на 8 м, разность ходов отраженного и прямого звуков не превышала 10 м (желательно до 7 м), что соответствует времени 0,02, 0,03 с.

2. Достигнуть возможно большей диффузности звукового поля. Чтобы выполнить первое требование, пол в зале должен иметь значительный уклон (согласно п. 4.3), тем самым обеспечено превышение слушателей последующего ряда над слушателями предыдущего, дающего меньшие потери звука за счет экранирования впереди сидящими зрителями.

Над порталом участок потолка сделан наклонным для равномерного распределения первых отражений (согласно п.5.3, рис. 14, 15). Для этих целей ширина начальной части зала сужается до ширины портала (см. п. 5.3, рис. 18, 19). Отражатель и примыкающие к portalу боковые стены при расположении источника звука на авансцене (точка q, q' , см. рис. 1) обеспечивают на расстоянии 8 м от источника достаточно малое запаздывание первых интенсивных отражений (на отраженных лучах показана разность ходов отраженного прямого звука в метрах).

Отражателю на потолке и прилегающим к portalу частям боковых стен придана слегка выпуклая форма. При такой форме, в отличие от плоской, вся передняя часть зала остается в поле отражений от этих поверхностей и при перемещении источника звука в глубину сцены (точка q, q' , см. рис. 2). Наклонный участок потолка, примыкающий к задней стене, направляет дополнительные мало запаздывающие отражения к слушателям последних рядов и предотвращает неблагоприятное обратное отражение на авансцену (в зону расположения микрофона) от угла между потолком и задней стеной (см. рис.1, 2).

Второе требование выполняется путем расчленения верхних частей боковых стен. Участки для такого расчленения могут быть найдены методами, изложенными в п. 8.1. Но так как в данном случае угол расхождения боковых стен зала невелик, можно, проведя плоскость через источник звука и положение слушателей у задней стены (на рис. 1 эта плоскость показана пунктиром), считать приближенно, что первые отражения от боковых стен создаются их участками, лежащими ниже этого пунктира. Поэтому части боковых стен, лежащие на 0,5, 1 м выше указанного пунктира, можно использовать для размещения членений стен. Сами членения на рис. 1 и 2 не показаны, так как они выбираются с учетом архитектурных соображений. При выборе членений используются данные п. 5.5.

Нижние гладкие части боковых стен не параллельны друг другу (каждая стена составляет угол $2,5^\circ$ с продольной осью плана зала), что также способствует повышению диффузности звукового поля и значительно ослабляет неприятный эффект "порхающего эха" (см. п. 5.5, рис. 27, 28).

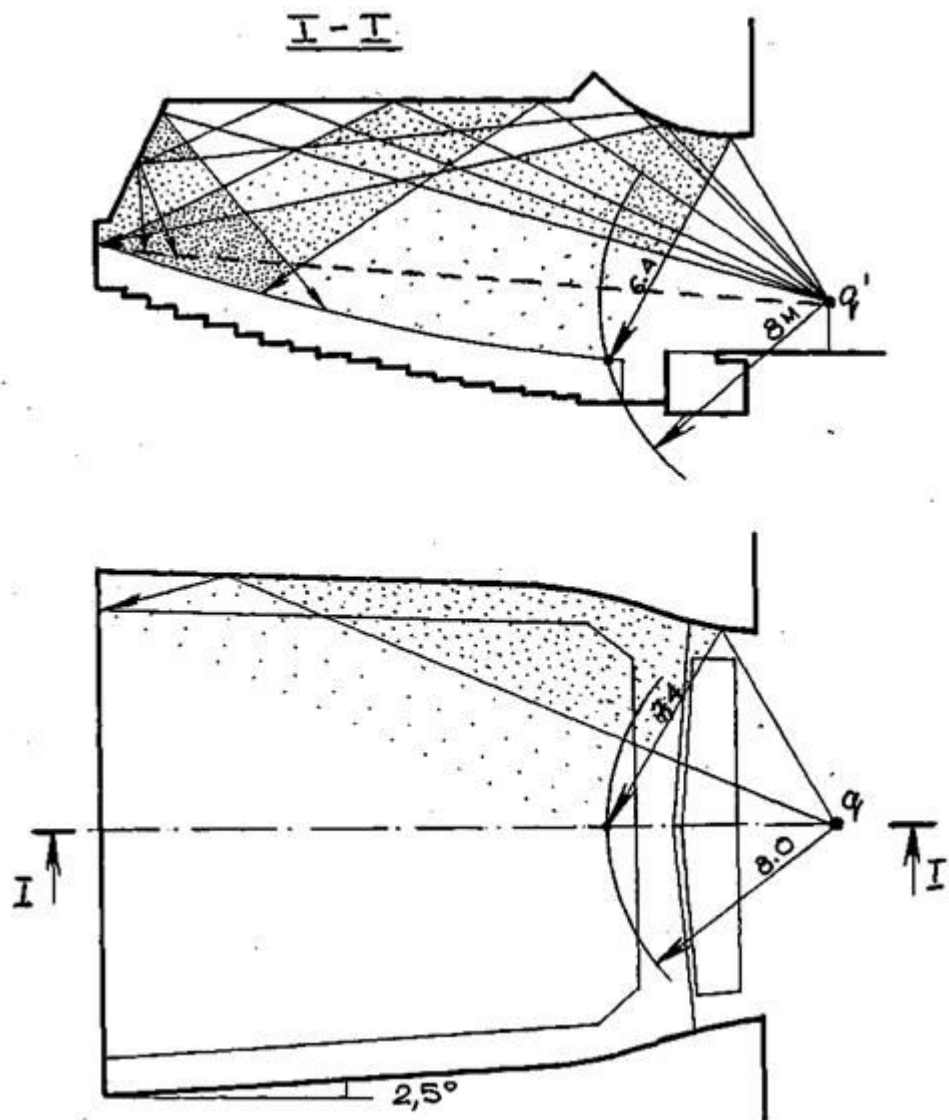


Рис. 2. Зал многоцелевого назначения на 600 мест с построением звуковых отражений от источника звука, находящегося на сцене

В принятом очертании потолка основная его часть плоская горизонтальная. Возможны и другие очертания потолка, например, в виде выпуклых поперечных секций (см. рис. 17). Такие секции, давая направленные отражения на удаленные места зала, в то же время создают некоторое желательное рассеяние звука. Эти секции могут переходить и на верхние части боковых стен.

2. Проверка допустимости применения геометрических отражений

Пользуясь методами, описанными в разделе 5, проверяется допустимость применения геометрических отражений от наименьших по размерам поверхностей, дающих первые звуковые отражения: выпуклого отражателя над авансценой и наклонного участка потолка (рис. 3).

Радиус кривизны отражателя над авансценой более чем в 2 раза превосходит принимаемую для расчета звуковой волны $l=1$ м, а наименьшая сторона отражателя $2a = 6,4$ м значительно превышает l , вследствие чего методы п 5.1 здесь вполне применимы.

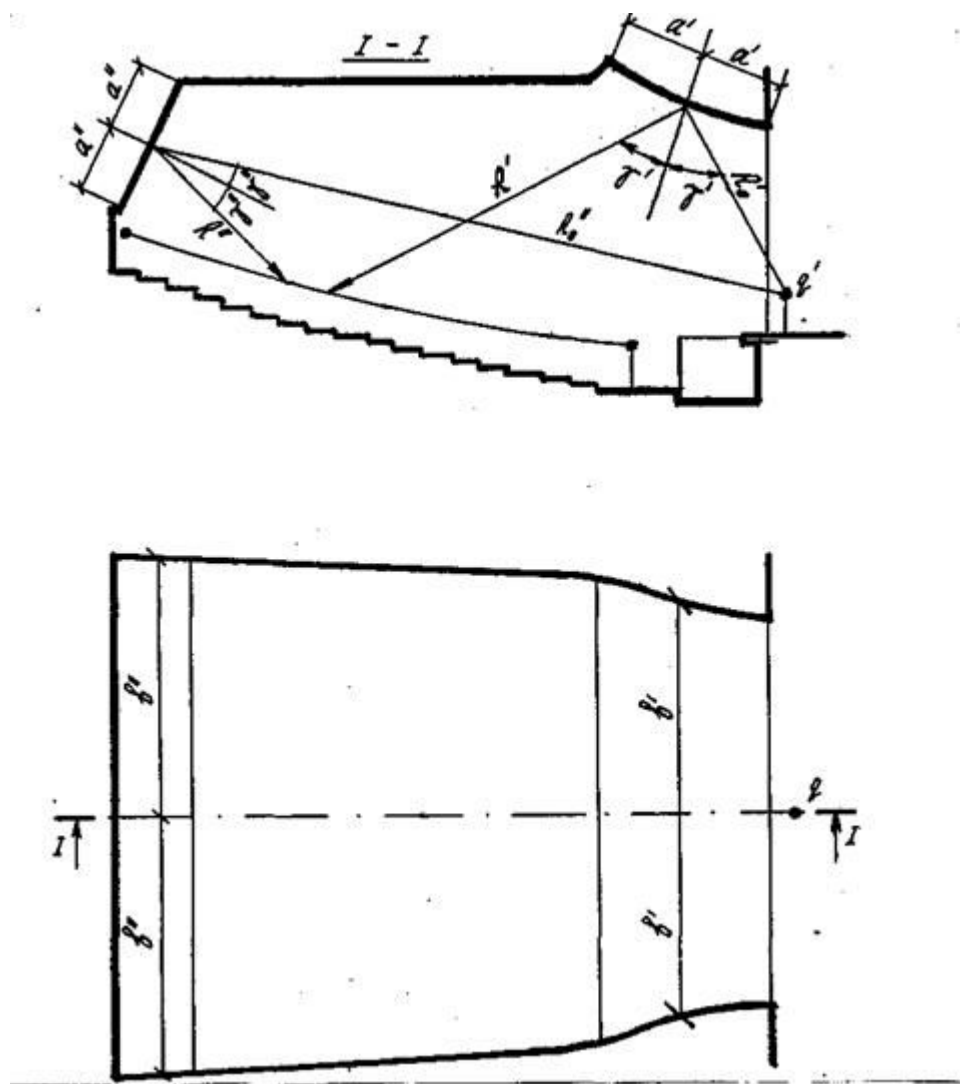


Рис. 3. Схема к расчету допустимости применения геометрических отражений

Исходные данные для нашего случая будут: $R_0 = 7,3 \text{ м}$; $R' = 16 \text{ м}$;

$g = 46^\circ$; $a' = 3,2 \text{ м}$; $b' = 7 \text{ м}$; $l = 1 \text{ м}$.

По формулам (6) п. 5. I находим:

$$u' = a' \cdot \cos g \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R'} \right)} = 1,43$$

$$v' = b' \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R'} \right)} = 4,42.$$

Отклонение от геометрического отражения не превышает по формуле (7)

$$\Delta L = 4,4 \cdot \left(\frac{1}{u'} + \frac{1}{v'} \right) = 4,1$$

Для наклонного заднего участка потолка $R_0'' = 23,1$ м; $R'' = 3,1$ м; $g'' = 20,5^\circ$; $a'' = 2,5$ м; $b'' = 8,9$ м; $l = 1$. Длина участка $2 \cdot a'' = 5$ м значительно превышает l . Как и выше, находим $u'' = 2,02$; $v'' = 7,67$.

Отклонение от геометрической акустики не превышает

$$\Delta L = 4,4 \cdot \left(\frac{1}{u''} + \frac{1}{v''} \right) = 2,8$$

Таким образом, как и для отражателя над авансеной, так и для заднего участка потолка DL не превышает 5дБ и применение геометрических отражений допустимо.

3. Расчет времени реверберации и его регулировка

Время реверберации рассчитывается следующим образом:

а) по графику рис. 43 находим рекомендуемое для объема $V = 3060$ м³ на частотах 500-2000 Гц время реверберации $T = 1,2$ с. На частоте 125 Гц принимаем время реверберации не более 1,5 с, для того чтобы не ухудшать слышимость речи и кинопоказа.

В соответствии с разд. 6 рассчитываем время реверберации на трех частотах 125, 500 и 2000 Гц. Для этих частот находим требуемые средний коэффициент звукопоглощения α и общую ЭПЗ зала $A_{\text{общ}}$, пользуясь формулой (13) для частот 125 и 500 Гц и формулой (14) для частоты 2000 Гц. Для последней частоты учитываем поглощение звука в воздухе с помощью коэффициента $n = 0,009^{-1}$, соответствующего относительной влажности 60% (прил. II, табл. 4).

$$\varphi(\bar{\alpha}) = \frac{0,163 \cdot V}{T \cdot S_{\text{общ}}} = \frac{0,163 \cdot 3060}{1,5 \cdot 1240} = 0,25;$$

На частоте 125 Гц

$$\bar{\alpha} = 0,22 \text{ (по прил. III); } A_{\text{общ}} = \alpha \cdot S_{\text{общ}} = 0,22 \cdot 1340 = 295 \text{ м}^2.$$

$$\varphi(\bar{\alpha}) = \frac{0,163 \cdot V}{T \cdot S_{\text{общ}}} = \frac{0,163 \cdot 3060}{1,2 \cdot 1340} = 0,31;$$

На частоте 500 Гц

$$\bar{\alpha} = 0,26 \text{ (по прил. III); } A_{\text{общ}} = 0,26 \cdot 1340 = 350 \text{ м}^2.$$

$$\varphi(\bar{\alpha}) = \frac{(0,163 - T \cdot n) \cdot V}{T \cdot S_{\text{общ}}} = \frac{(0,163 - 1,2 \cdot 0,0090) \cdot 3060}{1,2 \cdot 1340} = 0,29;$$

На частоте 2000 Гц

$$\bar{\alpha} = 0,25 \text{ (см. прил. III); } A_{\text{общ}} = 0,25 \cdot 1340 = 335 \text{ м}^2.$$

б) предварительно намечаем материалы для отделки зала и тип кресел.

Исходя из намеченной отделки и типа кресел, вычисляем согласно п. 6.2 общую ЭПЗ зала $A'_{\text{общ}}$. Расчет производим для 70%-ного заполнения зала слушателями. Коэффициенты добавочного звукопоглощения $\alpha_{\text{доб}}$ несколько уменьшаем по сравнению со средними значениями, указанными в п. 6.2, так как особенности, вызывающие добавочное звукопоглощение, выражены в зале сравнительно слабо, (табл. 1, 2).

Таблица 1

Определение эквивалентной площади звукопоглощения $\alpha \times n$ (м^2)

в зависимости от заполнения зала зрителями

Кресла	n, шт.	Частота, Гц					
		125		500		2000	
	α	$\alpha \times n$	α	$\alpha \times n$	α	$\alpha \times n$	
Со слушателями (70% общего количества)	420	0,25	105	0,4	168	0,45	189
Свободные (полумягкие с тканевой обивкой)	180	0,8	14	0,15	27	0,2	36
ИТОГО	-	-	119	-	195	-	225

Примечание. В соответствии с п. 6.2 для кресла со слушателем и свободного кресла в таблице вместо площади и коэффициента звукопоглощения показано их количество и ЭПЗ одного кресла (свободного или со слушателем).

Таблица 2

Определение эквивалентной площади звукопоглощения $A = \alpha \times n$ (м^2)

в зависимости от площади помещения S (м^2)

Поверхности и материалы	Площадь S , м^2	Частота, Гц					
		125		500		2000	
	α	$\alpha \times n$	α	$\alpha \times n$	α	$\alpha \times n$	
Потолок (штукатурка по металлической сетке)	438	0,04	17	0,06	26	0,04	17
Стены (штукатурка по кирпичу)	418	0,02	8	0,02	8	0,04	16
Пол паркетный, не занятый слушателями	106	0,04	4	0,06	6	0,06	6
Проем сцены	91	0,2	18	0,3	27	0,3	27
Внутренние поверхности оркестровой ямы, отделанные деревом	66	0,1	7	0,1	7	0,08	5

Добавочное	1340	0,06	80	0,04	54	0,04	54
звукопоглощение							
ИТОГО	-	-	134	-	128	-	125

Коэффициенты звукопоглощения взяты из прил. II, табл. 1, 2. Коэффициенты добавочного звукопоглощения несколько уменьшены по сравнению со значениями, приведенными в п. 6.2.

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна на частотах:

$$125 \text{ Гц} - A_{\text{общ}} = 17 - 8 - 4 - 18 - 7 - 80 - 105 - 14 = 253 \text{ м}^2;$$

$$500 \text{ Гц} - A_{\text{общ}} = 323 \text{ м}^2;$$

$$2000 \text{ Гц} - A_{\text{общ}} = 350 \text{ м}^2;$$

в) сравнивая имеющуюся $A_{\text{общ}}$ с требуемой $A_{\text{общ}}$, видим, что необходимо некоторое увеличение ЭПЗ на частотах 125 и 500 Гц. Для этого нужно ввести в зал звукопоглотитель для низких частот. С этой целью покрываем нижние части стен (на отnose от них) деревянной панелью толщиной 5-10 мм (см. рис. 6) площадью 200 м^2 , имеющей на частотах 125, 500 и 2000 Гц соответственно коэффициент звукопоглощения α , равный 0,25; 0,06 и 0,04.

В результате $A_{\text{общ}}$ увеличится для частоты 125 Гц на $200 \cdot (0,25 - 0,02) = 46 \text{ м}^2$ и для частоты 500 Гц на $200 \cdot (0,06 - 0,02) = 8 \text{ м}^2$ (здесь из коэффициента звукопоглощения панели вычтен ранее учтенный коэффициент звукопоглощения покрываемой стены). Для частоты 2000 Гц увеличение ЭПЗ $200 \cdot (0,04 - 0,04) = 0$;

г) находим окончательную ЭПЗ зала $A_{\text{общ}}$ с отделкой панелью и по формулам (11) и (12) расчетное время реверберации T зала.

$$\text{На частоте } 125 \text{ Гц } A_{\text{ОБЩ}}^* = 253 + 46 = 299 \text{ м}^2 ;$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{\text{ОБЩ}}^*}{S_{\text{ОБЩ}}} = \frac{299}{1340} = 0,22 ; \quad \varphi(\bar{\alpha}) = 0,25 \text{ (см. прил. III табл. 1);}$$

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S_{\text{ОБЩ}} \cdot \varphi(\bar{\alpha})} = \frac{0,163 \cdot 3060}{1340 \cdot 0,25} = 1,5 \text{ с.}$$

$$\text{На частоте } 500 \text{ Гц } A_{\text{ОБЩ}}^* = 323 + 8 = 331 \text{ м}^2;$$

$$\bar{\alpha} = \frac{331}{1340} = 0,25 ; \quad \varphi(\bar{\alpha}) = 0,29 ;$$

$$T = \frac{0,163 \cdot 3060}{1340 \cdot 0,29} = 1,3 \text{ с.}$$

На частоте 2000 Гц $A_{\text{ОБЩ}}^* = 350 + 0 = 350 \text{ м}^2$;

$$\bar{\alpha} = \frac{350}{1340} = 0,26; \quad \varphi(\bar{\alpha}) = 0,3;$$

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S_{\text{ОБЩ}} \cdot \varphi(\bar{\alpha}) + n \cdot V} = \frac{0,163 \cdot 3060}{1340 \cdot 0,3 - 0,009 \cdot 3060} = 1,15 \text{ с.}$$

Расчетные значения времени реверберации вполне удовлетворительны, так как отклонение их от заданных менее 10%.

Для сравнения значений расчетного и оптимального времени реверберации строим график (согласно п. 6.3 и рис. 44) частотной характеристики времени реверберации (рис. 4).

На рис. 5 и 6 показаны возможное размещение звукопоглощающих материалов на стенах (см. рис. 5) и узлы крепления этих материалов (см. рис. 6).

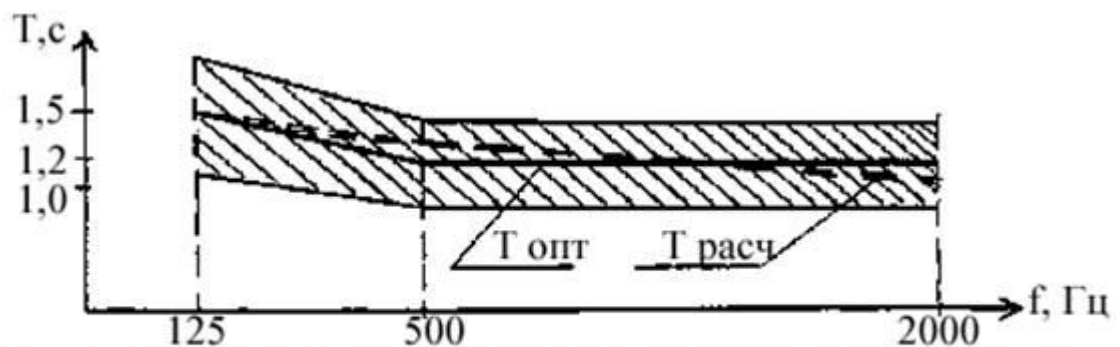


Рис. 4. Частотные характеристики времени реверберации:
 1 — зона оптимального значения времени реверберации;
 2 — расчетно значение времени реверберации

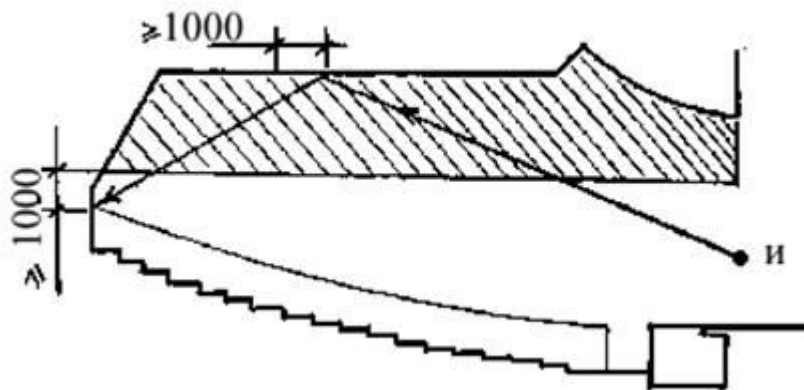


Рис. 5. Размещение звукопоглотителей в зале многоцелевого назначения

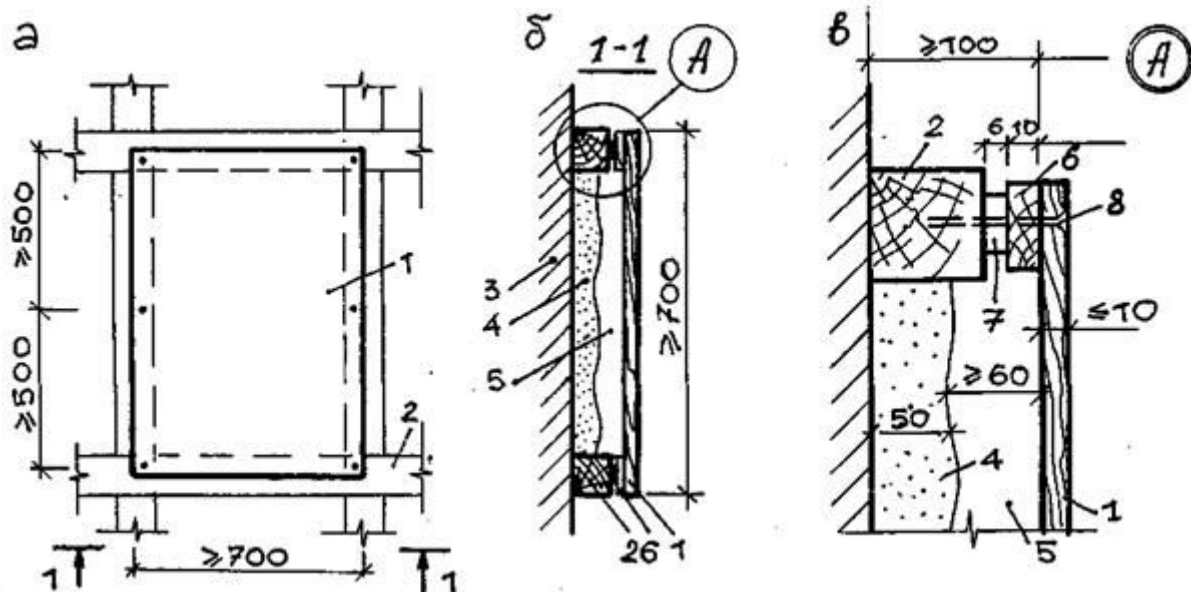


Рис. 6. Звукопоглощающая конструкция отделки стены.

Деревянная резонирующая панель на отnose:

а - общий вид; б - разрез; в - узел крепления к стене;

1. деревянная панель (фанера) толщиной 5-10 мм;
2. деревянный каркас крепления;
3. стена;
4. звукопоглощающий материал толщиной 40-50 мм;
5. воздушный промежуток не менее 60 мм;
6. обвязка;
7. шайба;
8. болт крепления

Коэффициенты звукопоглощения α материалами и конструкциями
при среднегеометрических частотах октавных полос

Материалы или конструкции	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
ПОЛЫ						
Пол дощатый на деревянных лагах	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,09
Паркет по асфальту	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Паркет по деревянному основанию	0,10	0,10	0,10	0,08	0,06	0,06
Резина толщиной 5 мм на полу	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Ковер шерстяной толщиной 9 мм, на бетоне	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,27
То же, с полшерстяным ворсом толщиной 8 мм	0,02	0,05	0,26	0,47	0,57	0,70
То же, на латексной основе толщиной 4 мм	-	0,04	0,15	0,31	0,63	0,72
Ковер толщиной 4 мм с ворсом, на бетоне	0,09	0,08	0,21	0,27	0,27	0,37
То же, толщиной 3 мм на войлочной подкладке	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,25
Ковровая дорожка без ворса толщиной 5 мм	0,02	0,05	0,07	0,11	0,29	0,48
Линолеум по твердому основанию	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Искусственное покрытие полов залов спортивных сооружений	0,02	0,03	0,06	0,10	0,18	0,17
Искусственная трава	0,07	0,07	0,08	0,10	0,39	0,52
Лед, вода в бассейне	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
СТЕНЫ И ПОТОЛКИ						
Бетон	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Бетон окрашенный	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Стена кирпичная неоштукатуренная	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Стена кирпичная оштукатуренная и окрашенная масляной краской	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Мрамор, гранит шлифованный	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Пористые акустические плиты "Акмигран" размером 300´300 (ГОСТ 17918-72*), выпускаемые Павшинским комбинатом гипсовых и термоизоляционных изделий (Москва), без воздушного промежутка	0,11	0,30	0,85	0,90	0,78	0,72
То же, с воздушным промежутком 50 мм	0,20	0,71	0,88	0,81	0,71	0,79
Минераловатные маты толщиной 100 мм (ТУ 21-24-51-73) или супертонкое стекловолокно толщиной 100 мм (ТУ 21 РСФСР 224-75).	0,40	0,70	0,80	0,80	0,75	0,65

Облицовка: стеклоткань ЭЗ-100 (ГОСТ 19907-74*) и деревянные рейки шириной 20,25 мм, толщиной 10,12 мм, расстояние между ребрами 15,20 мм						
Плиты "Винипор" полужесткие с огнестойкой пропиткой, толщина 30 мм (ТУ В-66-70)	0,15	0,25	0,56	0,85	1,0	1,0
Маты из супертонкого стекловолокна толщиной 50 мм (ТУ 21-01-224-69). Облицовка - стеклоткань ЭЗ-100 (ГОСТ 19907-74*)	0,4	0,85	0,98	1,0	0,93	0,97
Маты из супертонкого базальтового волокна (РСТ УССР 50.13-76) толщиной 50 мм. Облицовка - декоративная стеклоткань (ТУ 6-11-54-74).	0,2	0,9	1,0	1,0	0,95	0,90
Плиты "Силакпор" (ОСТ 21-22-76) толщиной 45 мм	0,25	0,45	0,60	0,70	0,80	0,90
Минераловатная плита толщиной 70 мм (ГОСТ 9573-82). Облицовка - гипсовая плита размером 500'500 мм (ТУ 400-1-283-73), подклееная бязью, перфорация диаметром 10 мм - 13%	0,42	0,95	1,0	0,75	0,60	0,51
Супертонкое стекловолокно толщиной 100 мм (ТУ 21 РСФСР 224-75). Облицовка: стеклоткань ЭЗ-100 (ГОСТ 19907-74), гипсовая плита размером 500'500 мм (ТУ 400-1-283-73), перфорация диаметром 7,9 мм - 13%	0,66	1,0	1,0	1,0	0,96	0,7
Супертонкое стекловолокно толщиной 50 мм (ТУ 21 РСФСР 224-75). Облицовка: стеклоткань ЭЗ-100 (ГОСТ 19907-74), просечно-вытяжной лист толщиной 2 мм (ГОСТ 8706-78*), перфорация 74%	0,25	0,7	0,95	1,0	1,0	1,0
То же, с воздушным промежутком 200 мм	0,63	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Маты из супертонкого базальтового волокна толщиной 40 мм (РСТ УССР 5013-76). Облицовка: стеклотканью ЭЗ-100 (ГОСТ 19907-74*), перфорированная алюминиевая панель (ТТУ 36-1974-76)	0,23	0,9	1,0	1,0	0,97	0,97
Панели из листов сухой гипсовой штукатурки (СГШ) толщиной 10 мм ($\gamma=1100 \text{ кг/м}^3$)	0,02	0,05	0,06	0,08	0,05	0,05
То же, с воздушным промежутком 50 мм	0,23	0,31	0,13	0,09	0,06	0,13
То же, с воздушным промежутком 100 мм	0,41	0,28	0,15	0,06	0,05	0,02
То же, с заполнением промежутка плитами	0,56	0,42	0,24	0,11	0,04	0,04

минераловатными полужесткими ПП-80 ($\rho=80 \text{ кг/м}^3$) толщиной 50 мм						
То же, с заполнением промежутка плитами ПП-80 толщиной 100 мм	0,65	0,34	0,23	0,17	0,11	0,11
Панели из листов СГШ, обтянутые декоративной тканью с воздушным промежутком 50 мм	0,32	0,10	0,09	0,10	0,23	0,25
То же, с воздушным промежутком 100 мм	0,25	0,16	0,12	0,14	0,16	0,22
То же, с воздушным промежутком 550 мм	0,30	0,12	0,14	0,19	0,23	0,24
Панели из фанеры толщиной 3 мм ($\rho=600 \text{ кг/м}^3$) с воздушным промежутком 100 мм	0,32	0,35	0,19	0,13	0,11	0,10
Панели из фанеры толщиной 4,6 мм ($\rho=600 \text{ кг/м}^3$) с воздушным промежутком 50 мм	0,17	0,26	0,14	0,10	0,09	0,04
Панели из фанеры толщиной 8,10 мм ($\rho=600 \text{ кг/м}^3$) с воздушным промежутком 50 мм	0,13	0,28	0,17	0,14	0,03	0,09
То же, с воздушным промежутком 100 мм	0,34	0,19	0,09	0,10	0,09	0,10
То же, с воздушным промежутком 150 мм	0,37	0,18	0,10	0,10	0,05	0,08
То же, с воздушным промежутком 200 мм	0,35	0,16	0,10	0,08	0,04	0,10
То же, с заполнением промежутка толщиной 50 мм плитами ПП-80	0,44	0,45	0,22	0,12	0,04	0,10
То же, с заполнением промежутка толщиной 100 мм плитами ПП-80	0,53	0,35	0,21	0,12	0,06	0,12
Панели из древесностружечных плит (ДСП) толщиной 20 мм ($\rho=800 \text{ кг/м}^3$) вплотную к ограждению	0,01	0,09	0,09	0,08	0,09	0,14
То же, с воздушным промежутком 50 мм	0,32	0,13	0,05	0,05	0,06	0,14
То же, с воздушным промежутком 100 мм	0,27	0,08	0,04	0,02	0,08	0,13
То же, с воздушным промежутком 150 мм	0,10	0,03	0,02	0,03	0,09	0,10
То же, с воздушным промежутком 200 мм	0,12	0,05	0,05	0,03	0,09	0,10
То же, с заполнением промежутка плитами ПП-80 толщиной 50 мм	0,32	0,14	0,07	0,04	0,08	0,13
То же, с заполнением промежутка плитами ПП-80 толщиной 100 мм	0,30	0,24	0,08	0,07	0,10	0,13
Панели из ДСП, оклеенные пластиком с воздушным промежутком 50 мм	0,23	0,15	0,07	0,10	0,09	0,09
То же, с воздушным промежутком 100 мм	0,29	0,12	0,10	0,08	0,11	0,06
То же, с заполнением промежутка плитами ПП-80 толщиной 50 мм	0,28	0,17	0,16	0,11	0,08	0,12
То же, с заполнением промежутка плитами ПП-80 толщиной 100 мм	0,34	0,28	0,22	0,11	0,11	0,12
Панели деревянные толщиной 10 мм ($\rho=600 \text{ кг/м}^3$), отделанные шпоном с воздушным промежутком 100 мм	0,25	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
Панели из твердой древесноволокнистой плиты (ДВП) толщиной 4 мм ($\rho=800 \text{ кг/м}^3$) с воздушным промежутком 100 мм	0,50	0,15	0,08	0,05	0,04	0,08
То же, с заполнением стекловолокном	0,48	0,25	0,15	0,07	0,10	0,11

($\gamma=80 \text{ кг/м}^3$) толщиной 50 мм + воздушный промежуток 50 мм						
Деревянная обшивка, сосна толщиной 19 мм	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,11
Перфорированные конструкции из фанеры толщиной 3 мм по деревянным рамкам 600'600 мм, заполненные асбестовой ватой в мешковине, толщиной 50 мм; диаметр отверстий 6 мм, шаг отверстий 25 мм	0,20	0,46	0,58	0,52	0,42	0,31
Гипсовые перфорированные плиты размером 810'810 мм с пористым наполнителем, выпускаемые Беличским комбинатом строительных материалов (УССР) (ОСТ 21-26-76), без воздушного промежутка	0,09	0,26	0,54	0,94	0,67	0,40
То же, с воздушным промежутком 50 мм	0,09	0,49	0,91	0,88	0,69	0,34
Плиты минераловатные акустические размером 500'500 мм (ТУ 21-24-6-74), выпускаемые комбинатом "Красный строитель" перфорированные (ПА/О), без воздушного промежутка	0,03	0,17	0,68	0,98	0,86	0,45
То же, с воздушным промежутком 50 мм	0,05	0,42	0,98	0,90	0,79	0,45
То же, отделочные с набрызгом (ПА/СЭ), без воздушного промежутка	0,05	0,21	0,66	0,91	0,95	0,89
То же, с воздушным промежутком 50 мм	0,12	0,36	0,88	0,94	0,84	0,80
ЗАНАВЕСИ И ДРАПИРОВКИ						
Свободно висящая ткань в виде драпировки при Р, кг/м^2 : 0,35	0,04	0,04	0,11	0,17	0,30	0,35
0,60 (бархат)	0,10	0,30	0,50	0,65	0,72	0,65
0,65 (портьеры плюшевые складками)	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Портьеры хлопчатобумажные на подкладке со складками, поверхностная масса ткани $0,5 \text{ кг/м}^2$	0,05	0,3	0,45	0,7	0,65	0,5
Портьеры плюшевые со складками, поверхностная масса ткани $0,65 \text{ кг/м}^2$	0,15	0,35	0,55	0,7	0,7	0,65
ОТВЕРСТИЯ						
Проем стены	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Отверстия оркестровой ямы	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Вентиляционные решетки	0,3	0,42	0,50	0,50	0,50	0,51
Остекление	0,30	0,20	0,15	0,10	0,06	0,04

Таблица 2

Эквивалентная площадь звукопоглощения зрителями и креслами

Зрители и кресла	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Зрители на мягком кресле	0,25	0,30	0,40	0,45	0,45	0,40
Зрители 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

Таблица 3

Показатель затухания звука в воздухе при температуре 18-20 °С

Относительная влажность воздуха, %	Значения m_v , m^{-1} , на среднегеометрических частотах, Гц				
	125	500	2000	4000	8000
30	0,00015	0,00064	0,0032	0,0095	0,0340
40	0,00015	0,00060	0,0027	0,0075	0,0270
50	0,00014	0,00058	0,0024	0,0061	0,0215
60	0,00014	0,00056	0,0022	0,0055	0,0182
70	0,00014	0,00055	0,0020	0,0051	0,0156

Таблица 4

Значения коэффициента n , m^{-1} для учета поглощения звука в воздухе при температуре 20 °С (по измерениям Харриса)

Относительная влажность воздуха, %	Частота Гц	
	2000	4000
30	0,0119	0,0379
40	0,0104	0,0287
50	0,0096	0,0244
60	0,0090	0,0224
70	0,0085	0,0213
80	0,0081	0,0204
90	0,0080	0,0200

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Значения функции $\varphi(\alpha) = -h \cdot (1-\alpha)$ в зависимости от $\alpha_{\text{ср}}$ для расчета времени реверберации

Десятые доли $\alpha_{\text{ср}}$	Сотые доли 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	1,08	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 IV

Таблицы слогов (ГОСТ 7153-68*)

Таблица 1

НЯК	ПУЛЬ	БУЩ	МЯТ	СВУМ	СОСЬ	ПИЦ	ЧТАЛ	ДЮРЬ	ХАЧ
МЮФ	ЗОШ	ПЛИСЬ	РЫЦ	ДУМ	МЫСЬ	ЛУТ	СИУ	ВОСТЬ	ДЫС
ФСЕН	РЯЙ	БЕР	ЧАТЬ	ВЫС	ГУМ	ПРЮХ	ЩЕТЬ	ТЮТ	ЕФЬ
ЕЕК	СТЯЛ	ТЫПЬ	ГЕФ	БАЦ	ТРИТ	ШИСЬ	ДЕП	ЗДЕС	ГОРЬ
ВОХ	ЖОХ	ТЭФ	ТРУХ	ФЕК	ЛЕФЬ	ВИК	ЩЕХ	КАСЬ	ЗЕХ

Таблица 2

ЛИР	НЕТ	ТРЕН	РАСЬ	СКУМ	ЦАТЬ	ДЯН	СТОЦ	ПРЫЛ	КРОМ
ДУЧ	СВАР	ПОРЬ	НАР	ЗУНЬ	СУЛ	ПЯФ	ЗОЛЬ	СЕЛЬ	ХИЛ
ЧТЕЛ	ЛАСЬ	ХУФ	ПЕСТЬ	ВЫЙ	КАСТЬ	РЕТЬ	РЯС	ФЫЛ	РУТ
ЖАСЬ	КЕШ	ПЫЦ	ГУТЬ	МЕШ	ВЯС	ГУЩ	ДЕС	СЫХ	ЯС
ЛЕНЬ	МАФ	ЗЮС	ЧЕФ	ВУФ	ШЕП	ДЛАФ	ТЕР	НЕПЬ	ШОЛЬ

Таблица 3

Образец для оценки разборчивости речи по методу выбора

пробить	пилить	повод	омут	помыть	побыть
пылить	белить	довод	голод	поплыть	обуть

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости/ НИИСФ Госстроя СССР. -М.: Стройиздат, 1981.
2. Архитектура гражданских и промышленных зданий. т. II Основы проектирования /Под общей ред. В.М.Предтеченского. - М.: Стройиздат, 1976.
3. Архитектурная физика: Учеб. для вузов по спец. «Архитектура»/ Под ред. Н.В.Оболенского.- М.: Стройиздат, 1997.- 442 с.
4. Ковригин С.Д., Крышов С.И. Архитектурно-строительная акустика. - М.: Высш. шк., 1986.
5. Ганус К. Архитектурная акустика. - М.: Стройиздат, 1963.
6. Качерович А.Н. Акустика зрительного зала. - М.: Стройиздат, 1968.
7. Гусев Н.М. Основы строительной физики. - М.: Стройиздат, 1975.
8. Шильд Е., Киссельман Х.-Ф., Дамен Г., Поленц Р. Строительная физика: Пер. с нем. В.Г.Бердичевского /Под ред. Э.Л.Дешко.- М.: Стройиздат, 1982.
9. Рейхардт В. Акустика общественных зданий: Пер. с нем. Л.И.Макриненко.- М.: Стройиздат, 1983.
10. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы.- М.: Стройиздат, 1986.
11. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. - М.: Стройиздат, 2004.
12. Пособие по расчету и проектированию многослойных звукопоглощающих систем (конструкций). (к СНиП II-12-.77), НИИСФ Госстроя СССР.- М.: Стройиздат, 1987.
13. Рекомендации по расчету и проектированию звукопоглощающих облицовок/ НИИСФ Госстроя СССР. - М.: Стройиздат, 1984.
14. Ефимов А.П. Три взгляда на акустику помещений. - М.: МТУСИ, 1997.
15. Акустика: Справочник/ Под ред. М.А. Сапожкова.- М.: Радио и связь, 1989.
16. Качерович А.М. Акустическое проектирование киностудий и театров. -М.: Искусство, 1980.
17. Макриненко Л.И. Акустика помещений общественных зданий. - М.: Стройиздат, 1986.
18. Ефимов А.П. Особенности акустики телевизионных студий. - М.: ВЭИС, 1984.
19. Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий/ В.И.Заборов, М.И.Могилевский, В.Н.Мякшин и др. /Под общ. ред. В.И.Забова.- Киев: Будивэльник, 1989.
20. Новак С.М., Логвинец А.С. Защита от вибрации и шума в строительстве: Справочник.- Киев: Будивэльник, 1990.
21. Акустика студий звукового и телевизионного вещания. Системы озвучивания: учебно-методическое пособие/ Л.Г. Стаценко, Ю.В. Паскаль. - Владивосток: ДВГТУ, 2006.