

## Что такое время реверберации?

Любой звуковой сигнал создает в замкнутом помещении звуковое поле. Это происходит в результате многократных отражений звуковых волн распространяющихся внутри помещения от граничных поверхностей (потолка, пола и стен).

Упрощенно, **время реверберации** это время, за которое энергия звукового поля уменьшается в один миллион раз, после выключения источника звука в помещении. Или, переходя на научный язык, время, за которое уровень звукового давления в помещении уменьшается на 60 дБ (децибел) по сравнению со своей исходной величиной.

Если в помещении воспроизвести одиночный звуковой сигнал (включить, а затем выключить источник звука), то звуковое поле от этого сигнала «останется» в помещении, даже после того как источник звука будет выключен. Со временем, такое звуковое поле будет постепенно «затухать», в основном, за счет поглощения звуковой энергии материалами, использованными для отделки граничных поверхностей. Скорость угасания звуковой энергии будет определяться звукопоглощающими характеристиками отделочных материалов и объемом помещения.

Для помещений, обладающих недостатками в акустике (вследствие высоких значений времен реверберации), измерение фактического значения **времени реверберации** дает возможность рассчитать количество и тип отделочных звукопоглощающих материалов, с помощью которых возможно снизить время реверберации до желаемых (заданных) значений.

Значение **времени реверберации**, определяется, прежде всего, звукопоглощающими свойствами отделочных материалов, и может составлять для разных помещений от долей секунды до нескольких секунд. Время реверберации является важным параметром, характеризующим акустические свойства помещения. Например, помещения, имеющие высокие значения для **времени реверберации** обладают повышенной «гулкостью» и менее комфортны. Рекомендуемые значения времени реверберации для помещений различного назначения приведены в СНиП 23-03-2003 (Строительные нормы и правила Российской Федерации, «Защита от шума»).

$$|A_{\text{общ}(125,500,2000)} = \sum \alpha_i S_i + \sum A_{\text{крес.слуш.}} + \alpha_{\text{доб}} S_{\text{общ}}$$

$\sum \alpha \cdot S$  - сумма произведений площадей отдельных поверхностей  $S$ ,  $\text{м}^2$ , на их коэффициент звукопоглощения  $\alpha$  для данной частоты

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

$\alpha_{\text{доб}}$  - 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

Коэффициенты звукопоглощения материалов и конструкций (табл. 1) и эквивалентная площадь звукопоглощения слушателей и кресел (табл. 2)

Таблица 1

Материалы или конструкции	Коэффициент звукопоглощения для частоты, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
<b>А. Обычные строительные материалы и конструкции</b>						
1. Стены оштукатуренные, окрашенные клеевой краской	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
2. То же, масляной краской	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
3. Штукатурка по металлической сетке с воздушной полостью позади	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
4. Бетон с железнением поверхности	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
5. Мрамор, гранит и другие каменные породы, шлифованные	0,01	—	0,01	—	0,015	—
6. Панель деревянная толщиной 5—10 мм с воздушной прослойкой 50—150 мм*	0,30	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
7. Плиты древесностружечные неокрашенные толщиной 20 мм с воздушной прослойкой 50—150 мм	0,30	0,25	0,10	0,08	0,05	—
8. Плиты твердые древесноволокнистые толщиной 4 мм, объемной массой 1000 кг/м <sup>3</sup> , с воздушной прослойкой 50—150 мм	0,30	0,16	0,08	0,05	0,04	0,08
9. Штукатурка гипсовая толщиной 10 мм (ГОСТ 6266—67) с воздушной прослойкой 50—150 мм	0,30	0,25	0,10	0,08	0,05	0,04
10. Переплеты оконные, застекленные	0,30	0,20	0,15	0,10	0,06	0,04
11. Пол паркетный	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
12. Пол дощатый на лагах	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,09

\* Здесь и далее имеется в виду воздушная прослойка позади плит.

# Коэффициенты звукопоглощения разных материалов и конструкций, а также ЭПЗ слушателей и кресел

Коэффициенты звукопоглощения материалов и конструкций  
и эквивалентная площадь звукопоглощения слушателей и кресел

Материалы и конструкции	Коэффициент звукопоглощения для частоты, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
<b>Обычные материалы и конструкции</b>						
Стены оштукатуренные, окрашенные клеевой краской	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
То же, окрашенные мас- ляной краской	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Штукатурка по металли- ческой сетке с воздушной полостью позади	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Бетон с железнением по- верхности	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Мрамор, гранит и другие каменные породы шлифо- ванные	0,01	—	0,01	—	0,015	—
Панель деревянная толщи- ной 5—10 мм с воздушной прослойкой 50—150 мм*	0,3	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
Плиты древесностружеч- ные неокрашенные толщиной 20 мм (ГОСТ 10632—77) с воздушной прослойкой 50— 150 мм	0,1	0,08	0,05	0,05	0,08	0,1
Плиты твердые древесно- волокнистые толщиной 4 мм, объемным весом 1000 кг/м <sup>3</sup> , с воздушной прослойкой 50—150 мм	0,3	0,16	0,08	0,05	0,04	0,08
Штукатурка гипсовая су- хая толщиной 10 мм (ГОСТ 6266—67) с воздушной про- слойкой 50—150 мм	0,3	0,25	0,1	0,08	0,05	0,04
Переpleты оконные за- стекленные	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
Пол паркетный	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Пол дощатый на лагах	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,09
Линолеум толщиной 5 мм по твердому основанию	0,02	—	0,03	—	0,04	—
Ковер шерстяной толщи- ной 9 мм по бетону	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
То же, на войлочной под- кладке толщиной 3 мм	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,3

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  $\alpha_{\text{доб}}$  для многоцелевых залов рассматриваемой категории в среднем может быть принят равным 0,09 на частоте 125 Гц и 0,05 на частотах 500 и 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  $A_{\text{ОБЩ}}$  подсчитывается  $\bar{\alpha}$  - средний коэффициент звукопоглощения внутренней поверхности зала на данной частоте:

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

### 6.3. Расчет времени реверберации

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

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

где  $V$  - объем зала, м<sup>3</sup>;

$S_{\text{ОБЩ}}$  - общая площадь внутренних поверхностей зала, м<sup>2</sup>;

$\varphi(\bar{\alpha}) = -\ln(1 - \alpha)$  - функция среднего коэффициента звукопоглощения  $\alpha$ , 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

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

где  $n$  - коэффициент, м<sup>-1</sup>, 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  $n \times V$  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  $\alpha$ ,  $n$  и для других частот.

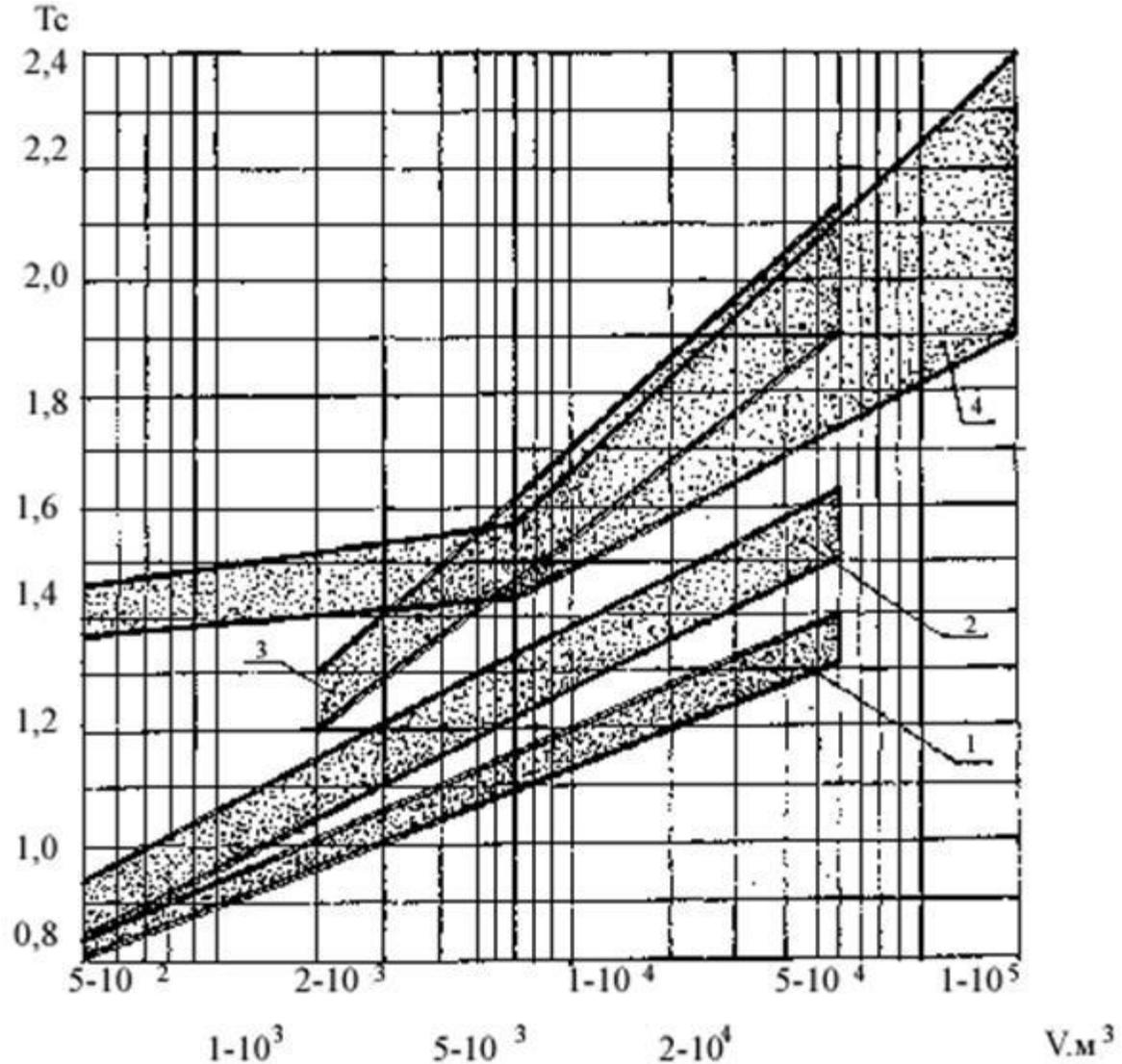
В расчете времени реверберации зала, как правило, принимается заполнение слушателями 70% общего количества мест, ЭПЗ остальных мест принимается как для пустых кресел. Согласно опытным данным, при дальнейшем заполнении слушателями мест сверх 70% ЭПЗ уже не возрастает. В залах, для которых наиболее вероятно 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. (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 (рис), следует увеличить объем зала, если больше - убавить, по возможности, объем и увеличить звукопоглощение. Регулировку объема зала следует производить на ранних стадиях проектирования здания.



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

$$T_H = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (V - V_1)}{(V_2 - V_1)}$$

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

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

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

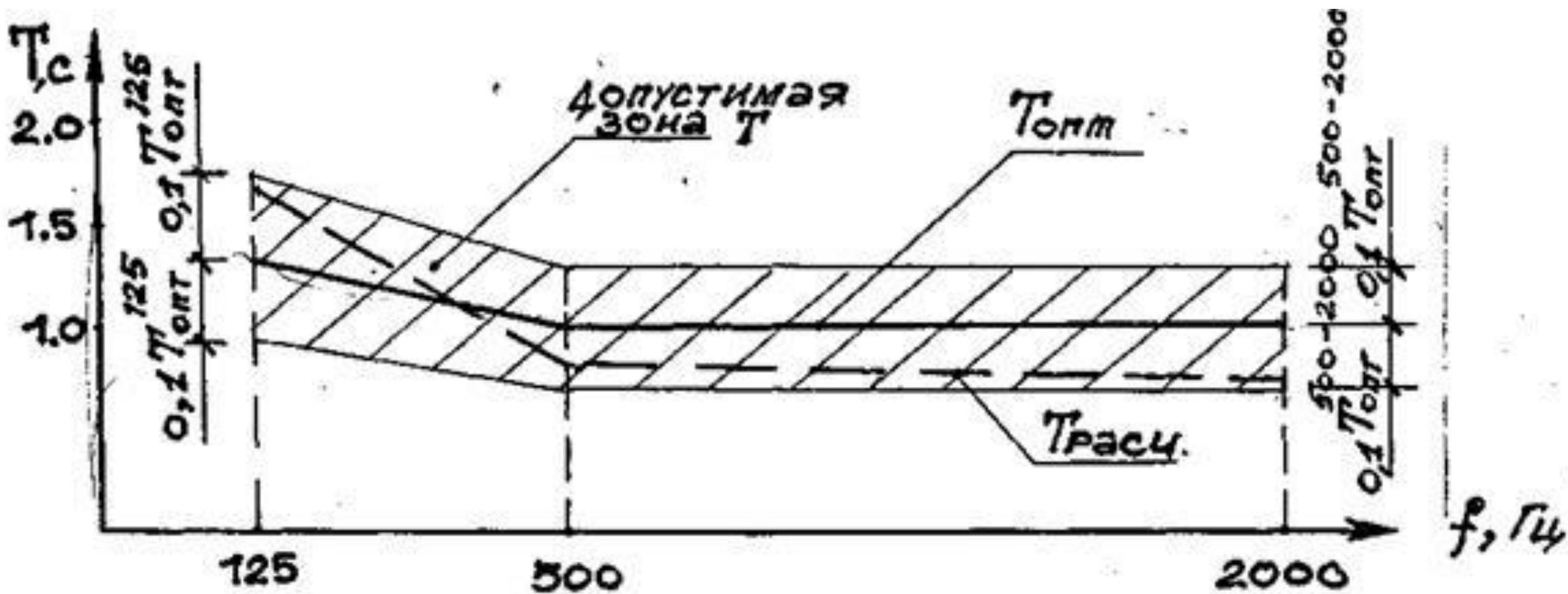
$$\varphi(\bar{\alpha}) = \frac{(0,163 - T \cdot n) \cdot V}{T \cdot S_{\text{ОБЩ}}}. \quad (14)$$

Из прил. III по найденному значению  $f(\alpha)$  определяем средний коэффициент звукопоглощения  $\alpha$ ; 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.)



## 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. 1, 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 Кнудсенем. 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.).

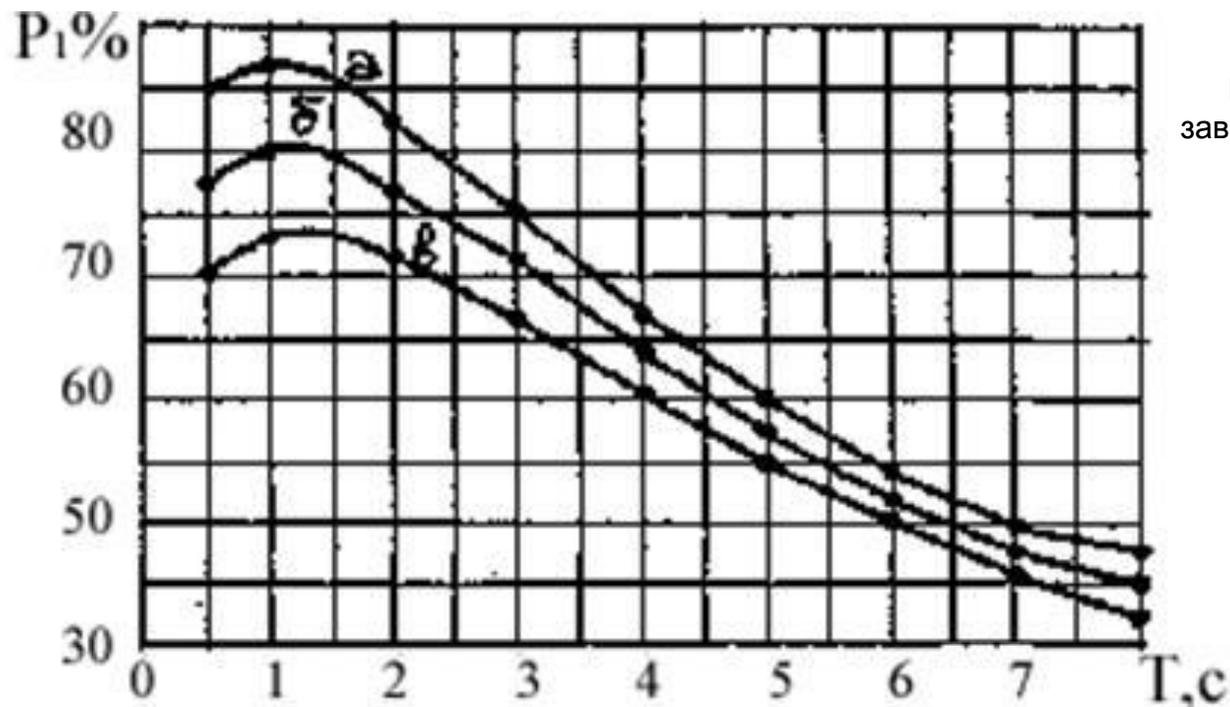


Рис. Влияние времени реверберации  $T$  на разборчивость речи  $P$  в зависимости от объема помещения, м (по Кнудсену):  
а - 707; б - 11300; в - 45200

**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 реверберирующий фон в помещении.

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 (15)

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

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

$\alpha$  - 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 отражений, 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 16

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

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;

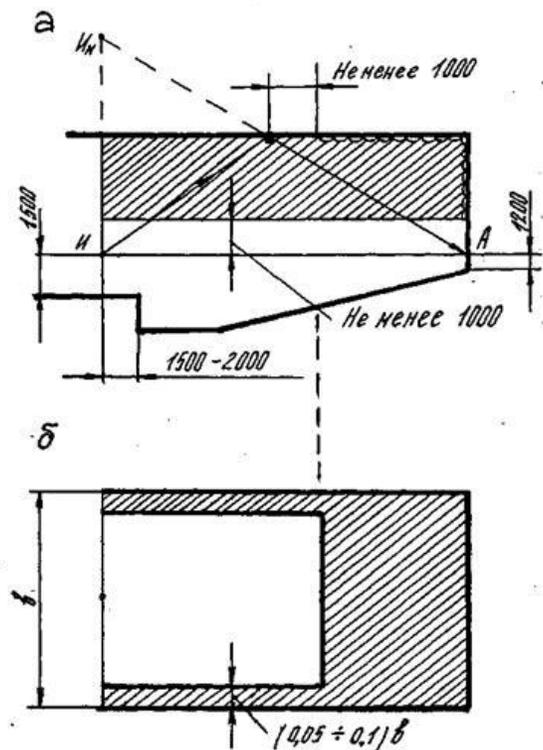
$r_0$  - длина пути прямого звука, м;  $C=340$  м/с - скорость распространения звука в воздухе.

## 8. ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩАЯ ОТДЕЛКА ЗАЛА

### 8.1. Определение участков поверхностей потолка и стен для размещения звукопоглотителей

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.

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



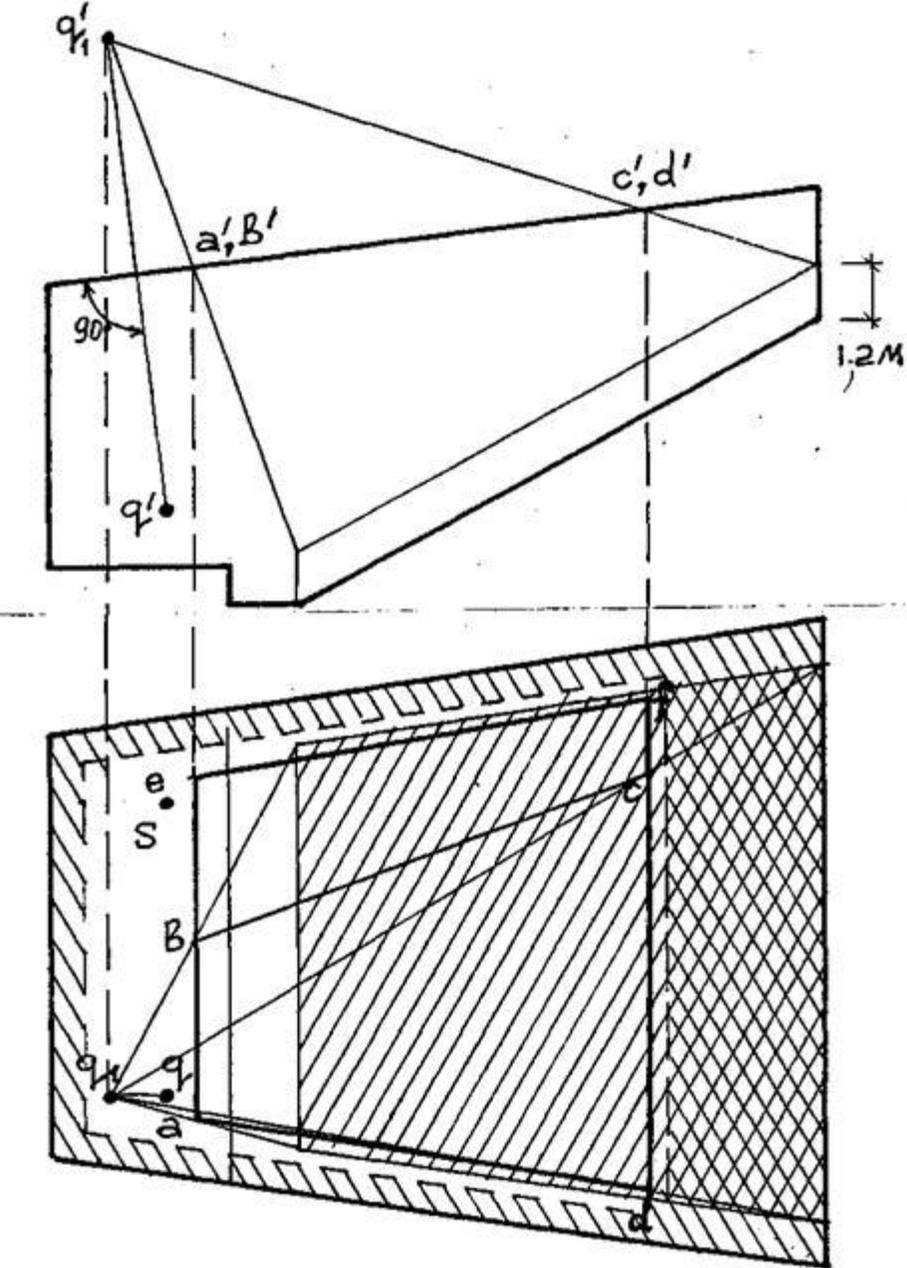
Для этого необходимо определить положение мнимого источника ( $I_M$ ) и провести прямую в точку А, определяющую зрителя в последнем ряду. Пересечение этой точки с потолком определит зону полезных отражений. Поэтому возможно правее точки пересечения производить обработку потолка звукопоглотителем.

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, малозапаздывающие 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.

Особенно просто, используя метод мнимого источника, определяются участки, дающие первые отражения к слушателям, на более плоских поверхностях. **На рис. 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).



Нахождение участка потолка, пригодного для размещения звукопоглощающих материалов

На рис. 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  $S$ , 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).

На рис. 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 предыдущем рис.) оставлена без отделки звукопоглотителем.

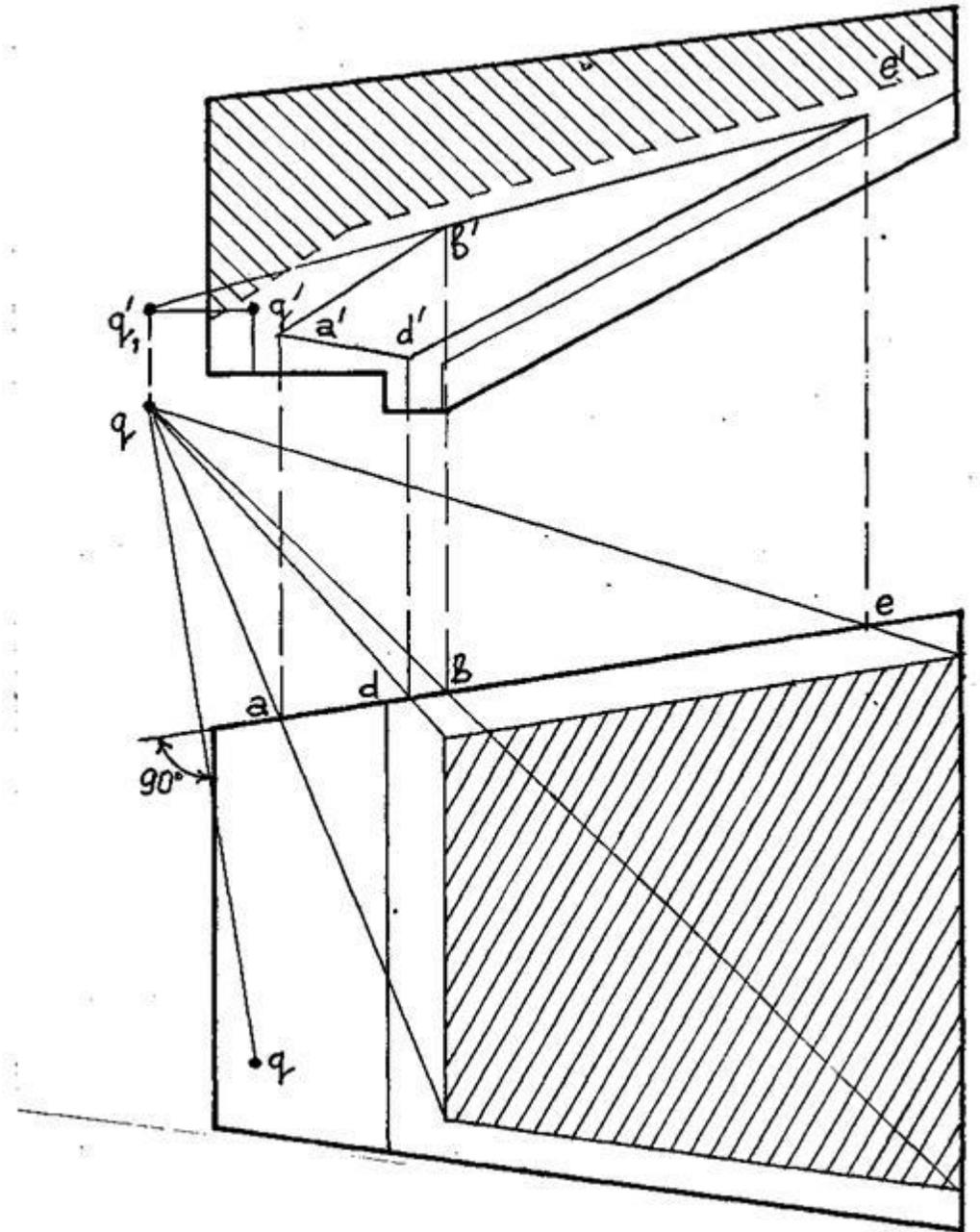


Рис. Нахождение участка стены, пригодного для размещения звукопоглощающих материалов

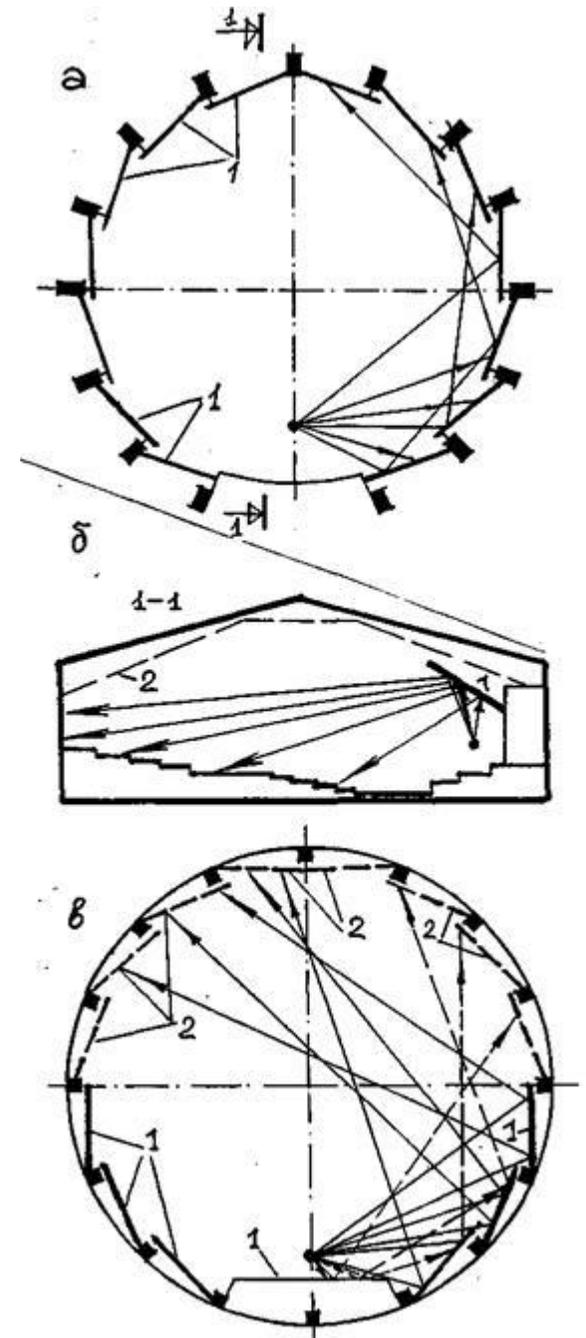
Сильно поглощающие материалы и конструкции не следует размещать на участках стен и потолка, дающих первые малозапаздывающие отражения звука к слушателям.

На остальной поверхности потолка и стен могут размещаться указанные звукопоглотители. Целесообразно, если это согласуется с интерьером зала, размещать звукопоглотитель отдельными участками площадью 1-5 м<sup>2</sup> 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. показано исправление акустических дефектов зала.

Рис. 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. а). Форма потолка также не обеспечивает необходимое распределение первых отражений звука (рис. б). Данный дефект может быть частично исправлен устройством отражающего звук экрана. Элементы стены располагаются под иными углами по отношению к сцене (рис. в). Кроме того, до середины зала они делаются 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.

**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 «Силакпор» 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.). 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. 1, 2).

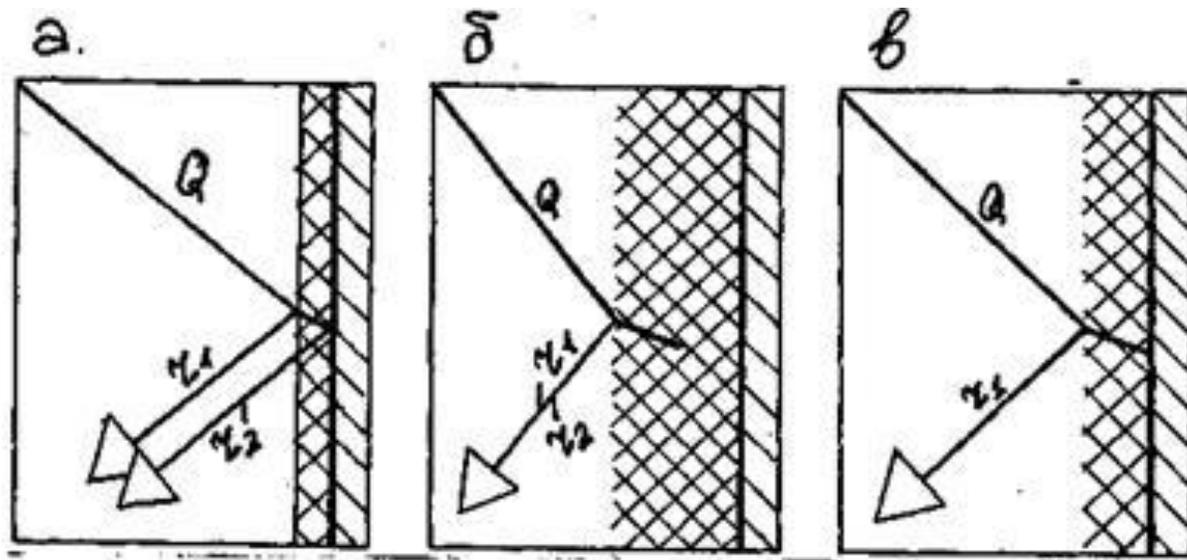


Рис. 1. Эффективная толщина пористых поглотителей:  
 а - из-за малой толщины слоя звук отражается задней поверхностью;  
 б - из-за большой толщины часть слоя "не работает";  
 в - эффективная толщина слоя;  
 Q - падающий на ограждение звук;  $r_1$  - отраженный пористой поверхностью звуковой луч;  $r_2$  - отраженный от задней стены ограждения звуковой луч

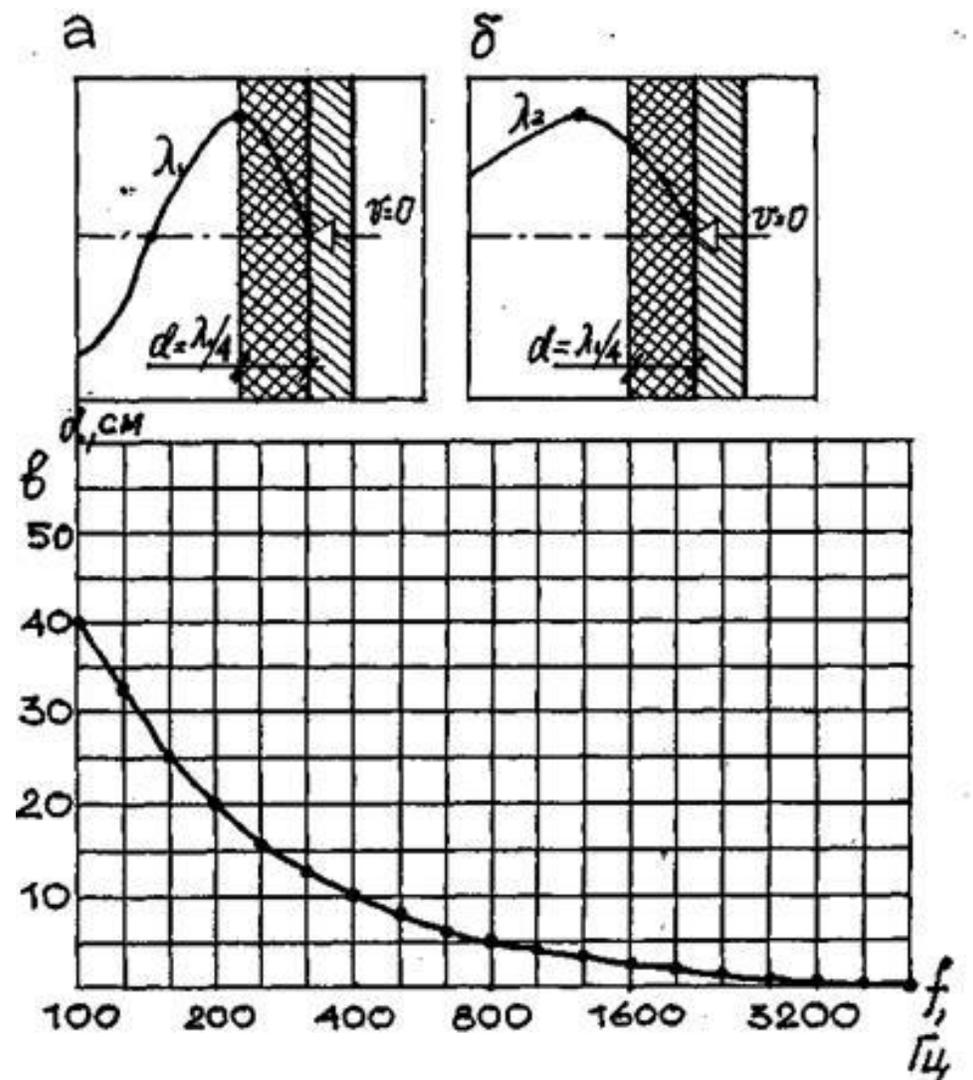


Рис. 2. Влияние толщины слоя пористого поглотителя:  
 а - толщина слоя  $d = \lambda/4$  (максимум скорости звуковых волн длиной  $\lambda$  расположен в слое пористого материала);  
 б - толщина слоя  $d < \lambda/4$  (максимум скорости звуковых волн длиной  $\lambda$  расположен вне слоя пористого материала, эффективность слоя уменьшается);  
 в - требуемая толщина слоя изоляции  $d$  для  $\alpha = 0,8$  в зависимости от частоты  $f$

Звукопоглощающие облицовки чаще всего выполняют в виде подвесных потолков из плит Акмигран, акминит или жестких минераловатных плит (см. рис. 3, 4).

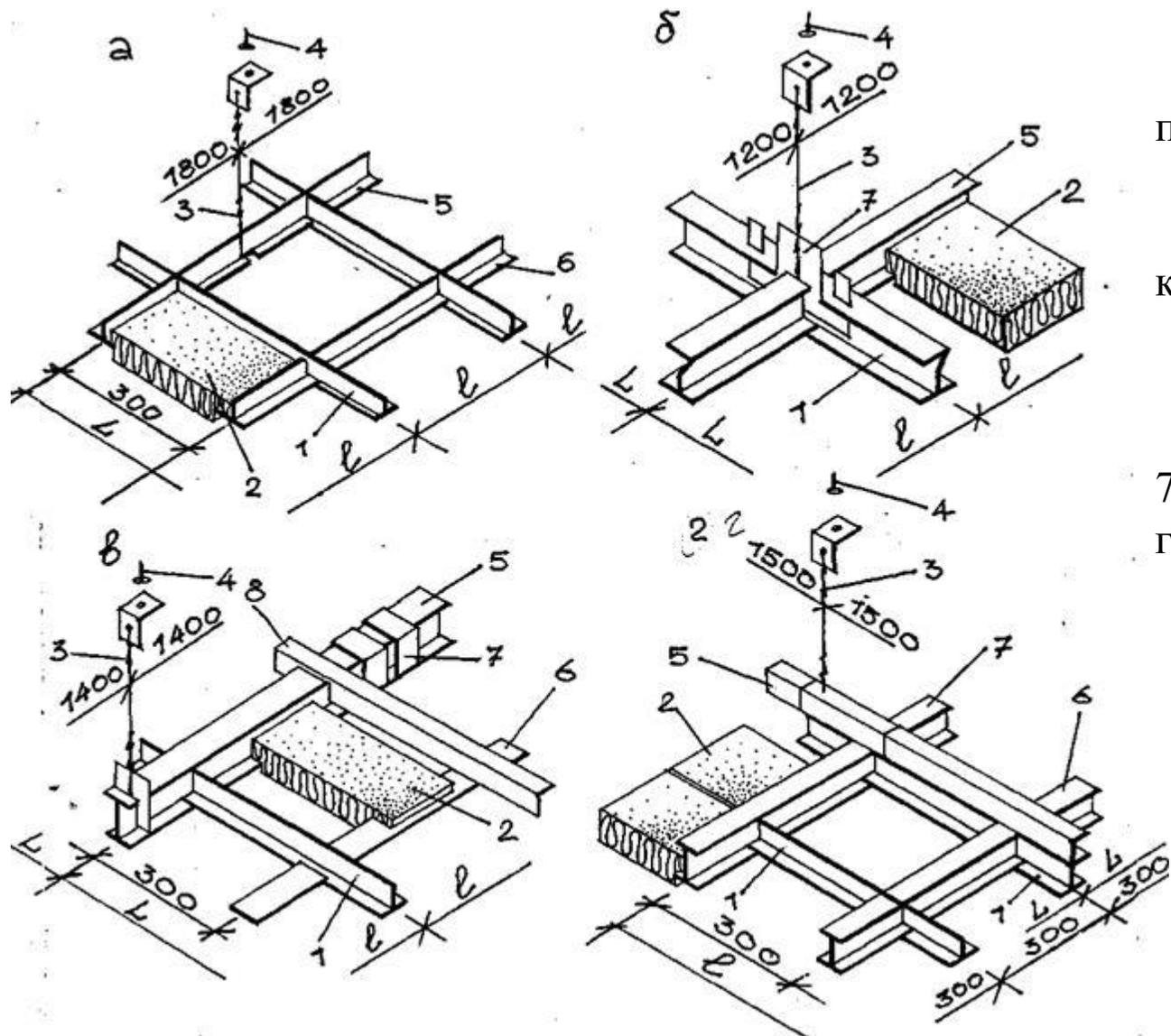


Рис. 3. Подвесные потолки из плит "Акмигран", акминит или плит МВД:

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

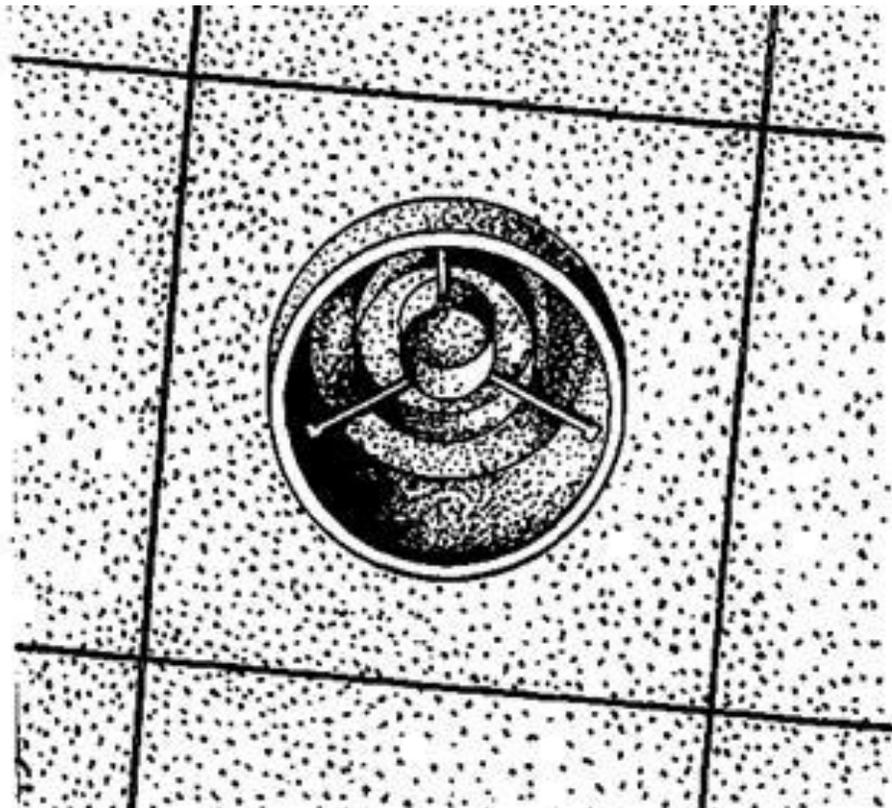


Рис. 4. Общий вид подвесного потолка,  
выполненного из декоративно-  
акустических плит "Акмигран"

Влияние расстояния между пористым поглотителем и стеной, на звукопоглощение видно из рис. 5.

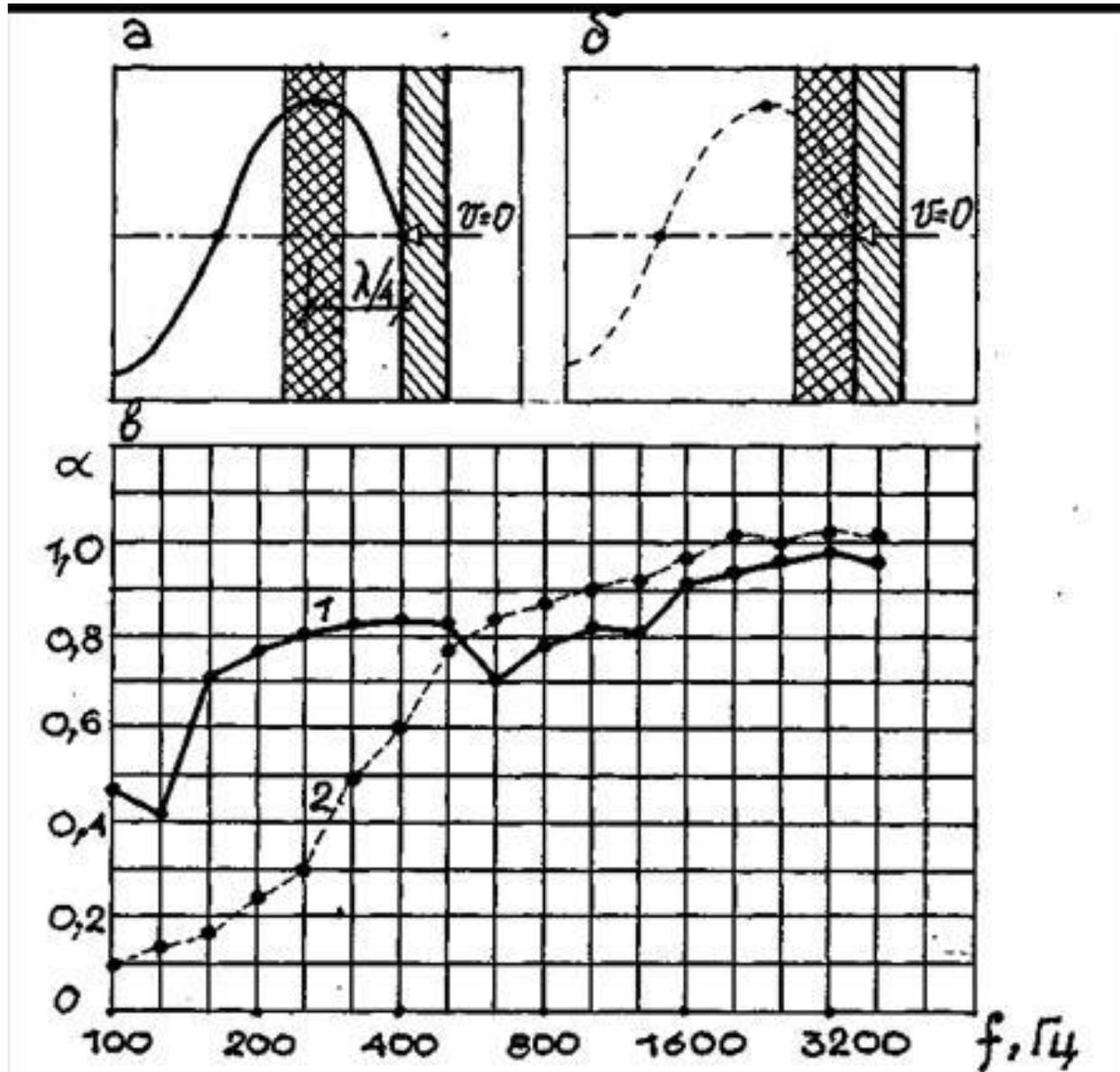


Рис. 5. Влияние расстояния между пористым поглотителем и стеной:

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  $\alpha$  плиты из минерального волокна толщиной 40 мм;

1 - расстояние между звукопоглощающим слоем и стеной 27 см;

2 - звукопоглощающий слой прикреплен непосредственно к стене

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. 6). Конструкции с перфорированным покрытием материала позволяют получать достаточно большое звукопоглощение в любой области частот и используют для помещений различного назначения.

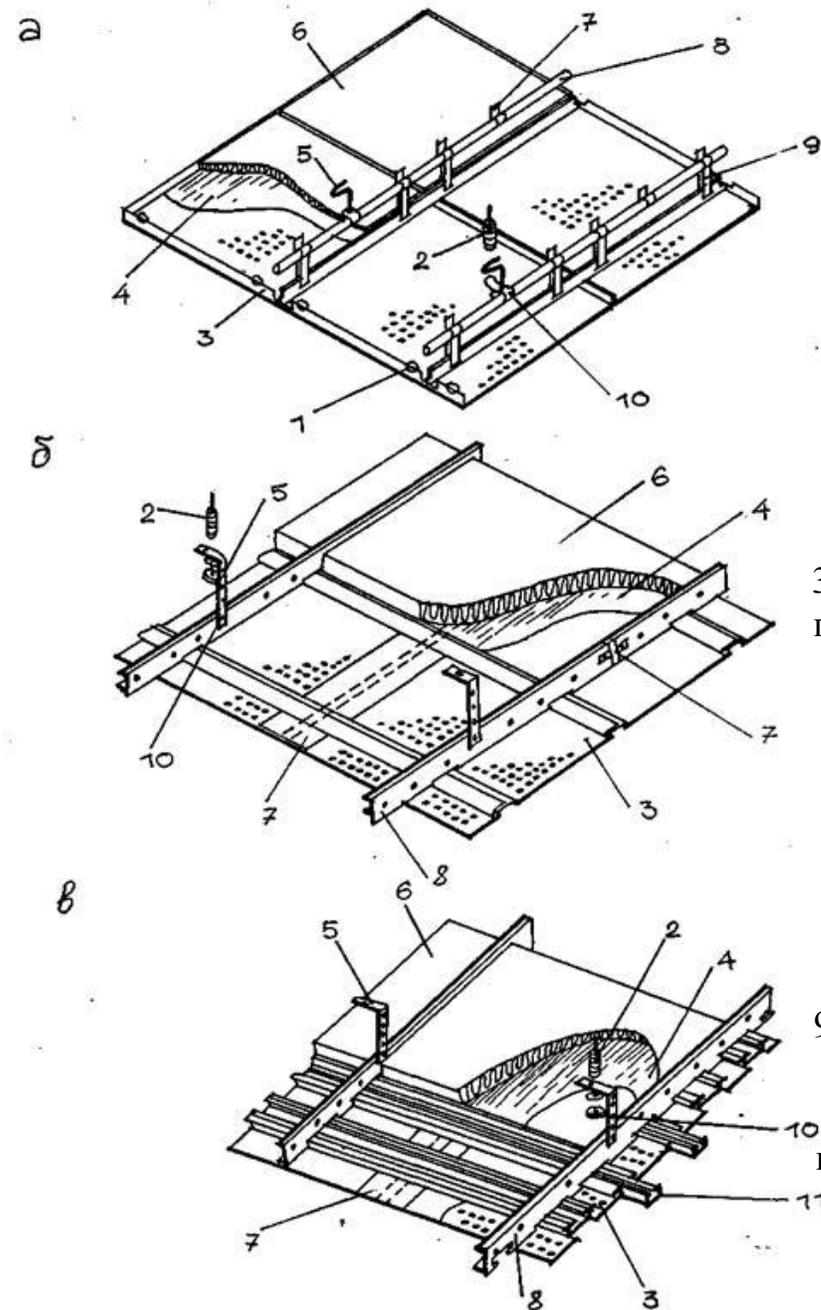


Рис. 6. Подвесные потолки с перфорированными алюминиевыми экранами:  
 а - с панелями 600'600 мм; б - с рейками 300'600 мм; в - с рейками 100'150'4500 мм с нащельниками;  
 1 - пружина уплотнения;  
 2 - дюбель-винт;  
 3 - лицевой элемент; 4 - прокладочный слой; 5 - подвеска;  
 6 - пористый (волокнистый) 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. 7).

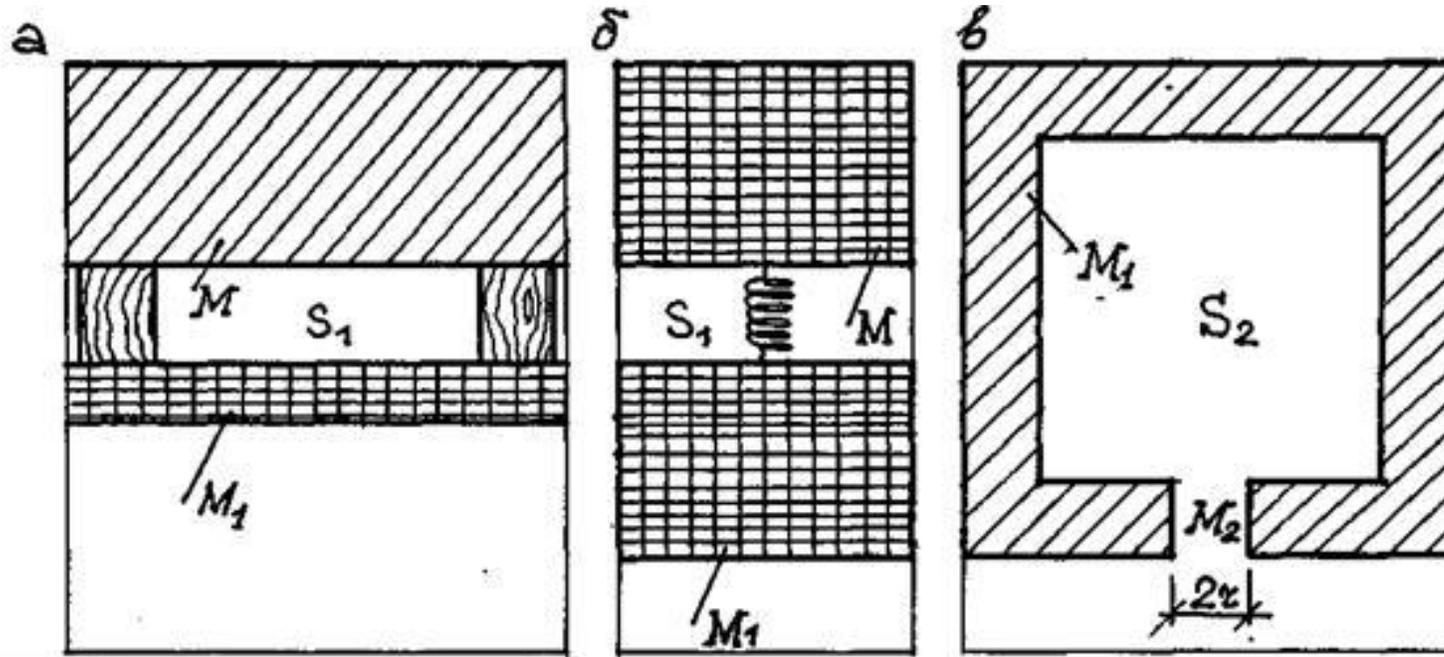


Рис. 7. Типы резонансных звукопоглотителей: а - плитный; б - система масса-пружина-масса; в - резонатор Гельмгольца;  $M$  - масса (стена или плита перекрытия);  $S_1$  - пружина (воздушный промежуток);

$S_2$  - пружина (объем воздуха);  $M_1$  - масса корпуса (фанера, гипсокартон);  $M_2$  - масса воздуха в объеме горловины резонатора  $l \cdot \pi \times r^2$ .

**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. 7 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. 7 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. 8), выполняемый из пластмассы, фанеры или металла (рис. 9).

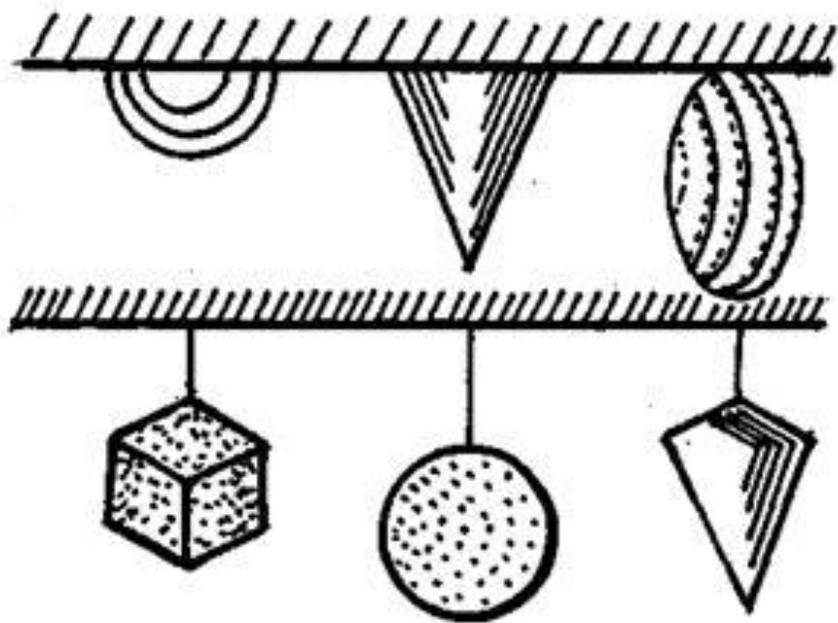


Рис. 8. Общий вид штучных звукопоглотителей

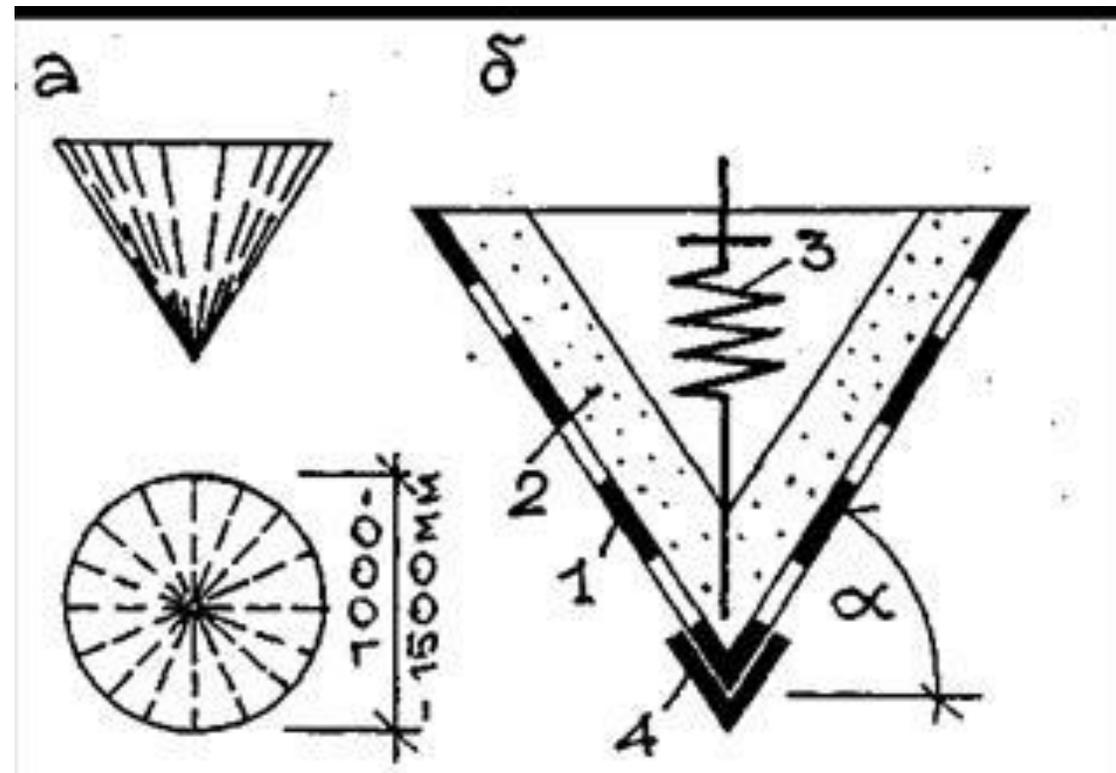


Рис. 9. Подвесной штучный поглотитель дифракционного типа:  
а - общий вид, б - разрез;

1 - кожух из перфорированного металла (фольга, жесть, 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  $\alpha$  выбирается по архитектурным соображениям

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  $A$ ,  $\text{м}^2$  (рис. 10).

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.

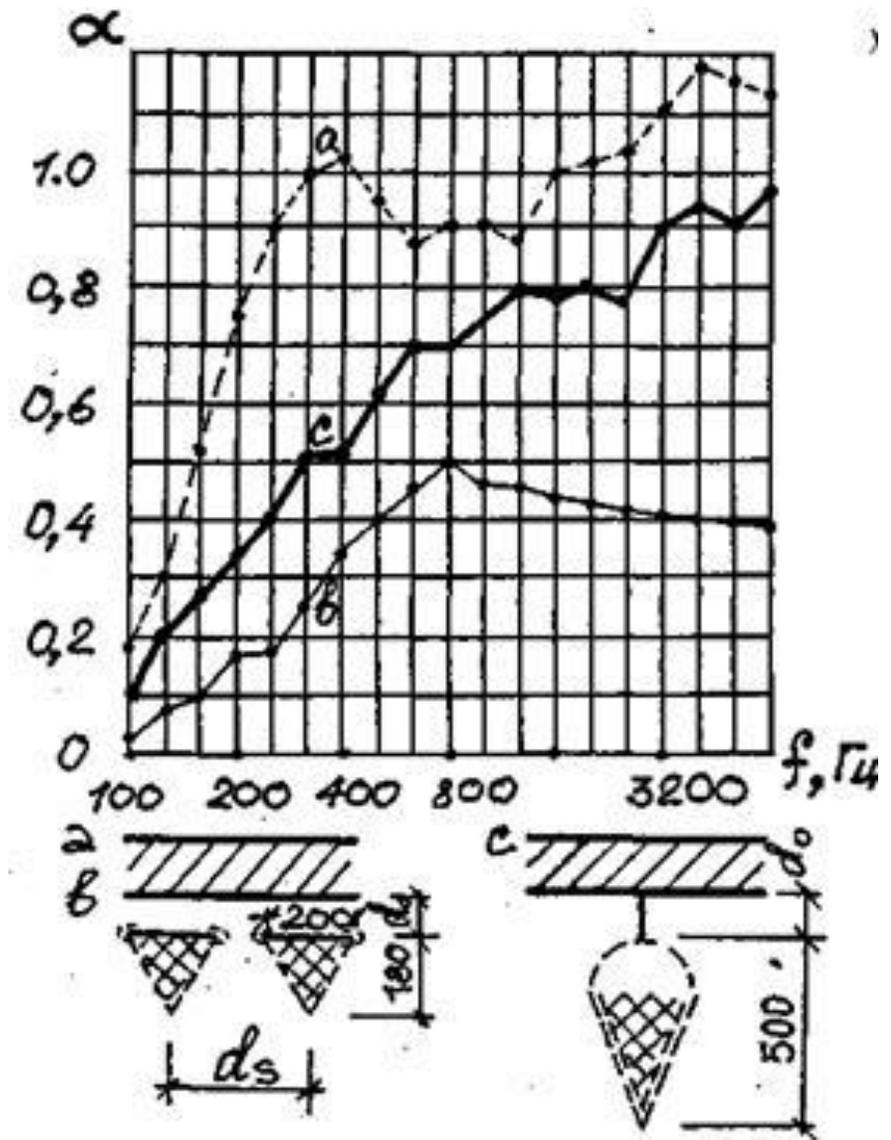


Рис. 10. Коэффициенты звукопоглощения подвесных звукопоглотителей:

а - минеральное волокно в металлической сетке,  $\gamma=50$  кг/м<sup>3</sup>,  $d_0=100$ 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, карбомидо-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 взаимоувязкой 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 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.

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.

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.

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.