

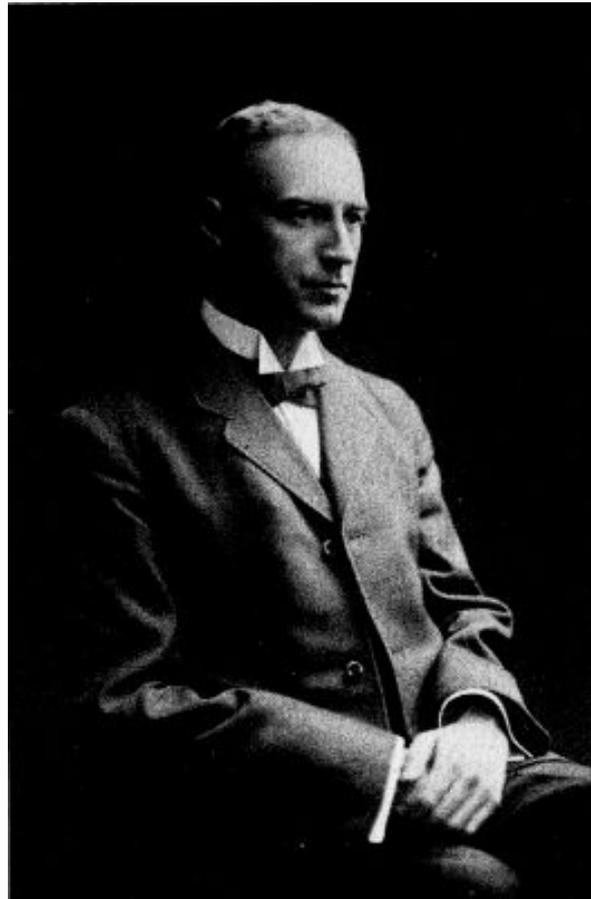
Акустика помещений

- Джон Уильям Стретт (Лорд Рэлей)
«Теория звука» 1877
- Уоллес Клемент Сэбин
реверберация звука
Бостонский симфонический зал 1900
- Эйринг Bell Telephone Lab начало 20 века
статистическая акустика
общая теория реверберации
- Верн Оливер Кнудсен
«Архитектурная акустика» 1932
- Лео Беранек
«Музыка, акустика и архитектура» 1962

Джон Уильям Стретт (Лорд Рэлей)
1842-1919



Уоллес Клемент Сэбин
1868-1919



- **Волновая акустика**

(волновое уравнение для трехмерного пространства)

- **Статистическая акустика**

(методы статистической физики плюс эмпирические поправки)

- **Геометрическая акустика**

(звуковой луч, подчиняющийся законам геометрической оптики)

Волновое уравнение

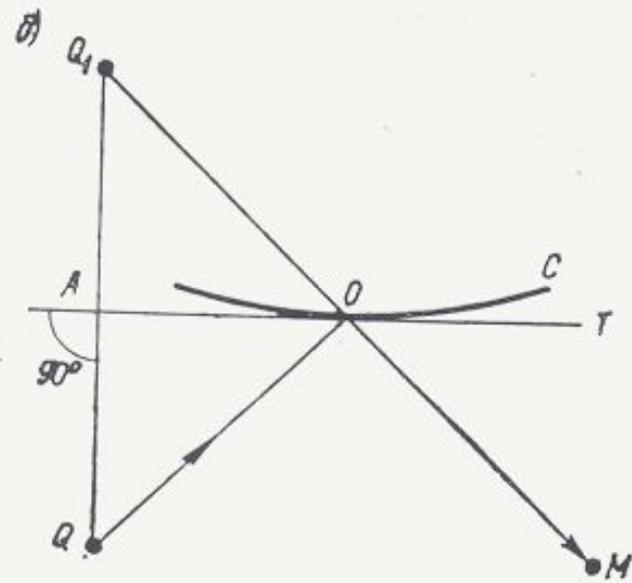
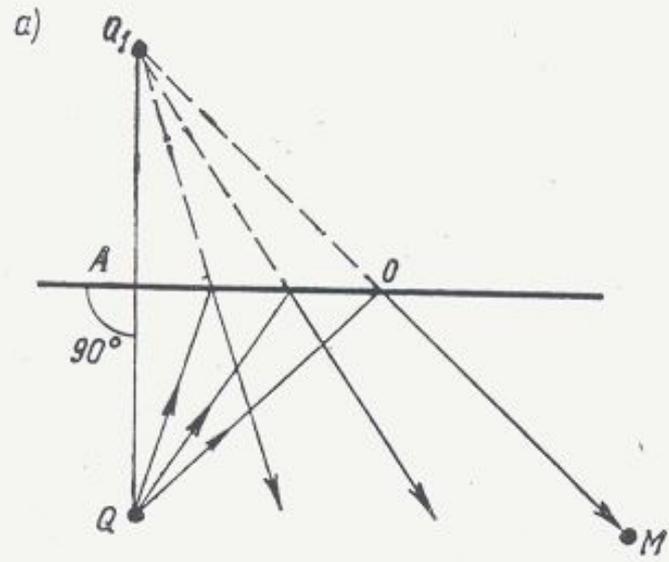
(в общем случае
в однородной изотропной среде)

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{V^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

для плоской волны

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{V^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$



Хорошим акустическим качеством
могут обладать только те помещения,
в которых звуковое поле диффузно

Диффузное звуковое поле

характеризуется тем, что
во всех его точках
усредненные во времени
уровни звукового давления
и потоки звуковой энергии,
приходящие по любому направлению,
постоянны

Постоянство уровней звукового давления – **однородность поля**

Постоянство потоков звуковой энергии по всем направлениям –

изотропность поля

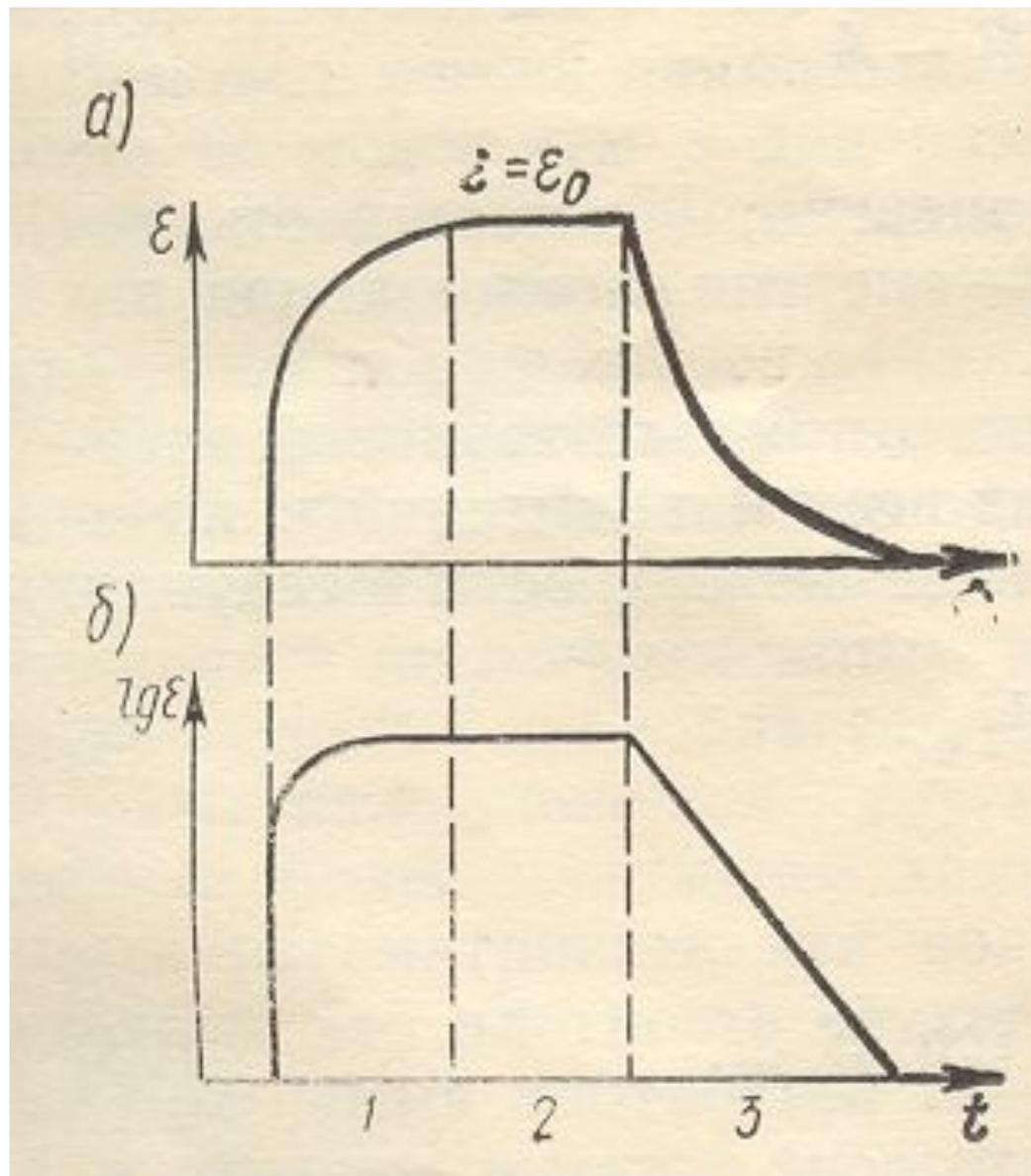
Основные допущения, принятые в статистической теории

- При рассмотрении распространяющихся звуковых волн **не учитывают интерференционные явления**, поэтому в каждой точке звукового поля плотность звуковой энергии есть сумма плотностей энергии каждой волны (энергетическое суммирование)
- Звуковое поле в помещении принимается **диффузным**, т.е. плотность звуковой энергии в любой точке звукового поля принимается одинаковой

Реверберация

– процесс постепенного замирания звука в помещении после выключения источника звука

Изменение плотности звуковой энергии при включении и выключении источника звука



После включения источника плотность звуковой энергии возрастает по закону

$$w(t) = w_0 \left(1 - e^{-\frac{v \cdot S}{4 \cdot V} \ln(1 - \bar{\alpha}) t} \right)$$

$$w_0 = \frac{4 \cdot P}{v \cdot \bar{\alpha} \cdot S}$$

- $\bar{\alpha}$ - средний коэффициент звукопоглощения
- P - звуковая мощность источника, Вт
- S - общая площадь внутренних поверхностей помещения
- V - объем помещения
- v - скорость звука в воздухе

$$w(t) \rightarrow w_0 \quad \text{при} \quad t \rightarrow \infty$$

После выключения источника звуковая энергия затухает по закону

$$w(t) = w_0 \cdot e^{-\frac{v \cdot S}{4 \cdot V} \ln(1 - \bar{\alpha}) t}$$

$$w_0 = \frac{4 \cdot P}{v \cdot \bar{\alpha} \cdot S}$$

Стандартное время реверберации соответствует $\frac{w_0}{w(t)} = 10^6$

$$\frac{w_0}{w(t)} = e^{+\frac{v \cdot S}{4 \cdot V} \ln(1 - \bar{\alpha}) t} = 10^6$$

формула Эйринга

для определения стандартного времени реверберации

$$t = T = \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot (-\ln(1 - \bar{\alpha}))}$$

Форма помещения	k
Крестообразное в плане, с куполообразным потолком	0,177
Близкое к "золотому сечению"	0,164
Трапециевидное в плане, театрального типа	0,160
Кубической формы	0,157
Очень широкое в плане, с низким потолком	0,152

Время реверберации

Формула Эйринга

для прямоугольного помещения

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot (-\ln(1 - \bar{\alpha}))}$$

для помещения произвольной формы

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S \cdot (-\ln(1 - \bar{\alpha}))}$$

Формула Сэбина

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}} = \frac{0,163 \cdot V}{A}$$

Формула, учитывающая поглощение звука в воздухе

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S \cdot (-\ln(1 - \bar{\alpha})) + 4 \cdot \mu \cdot V}$$

V - объем помещения

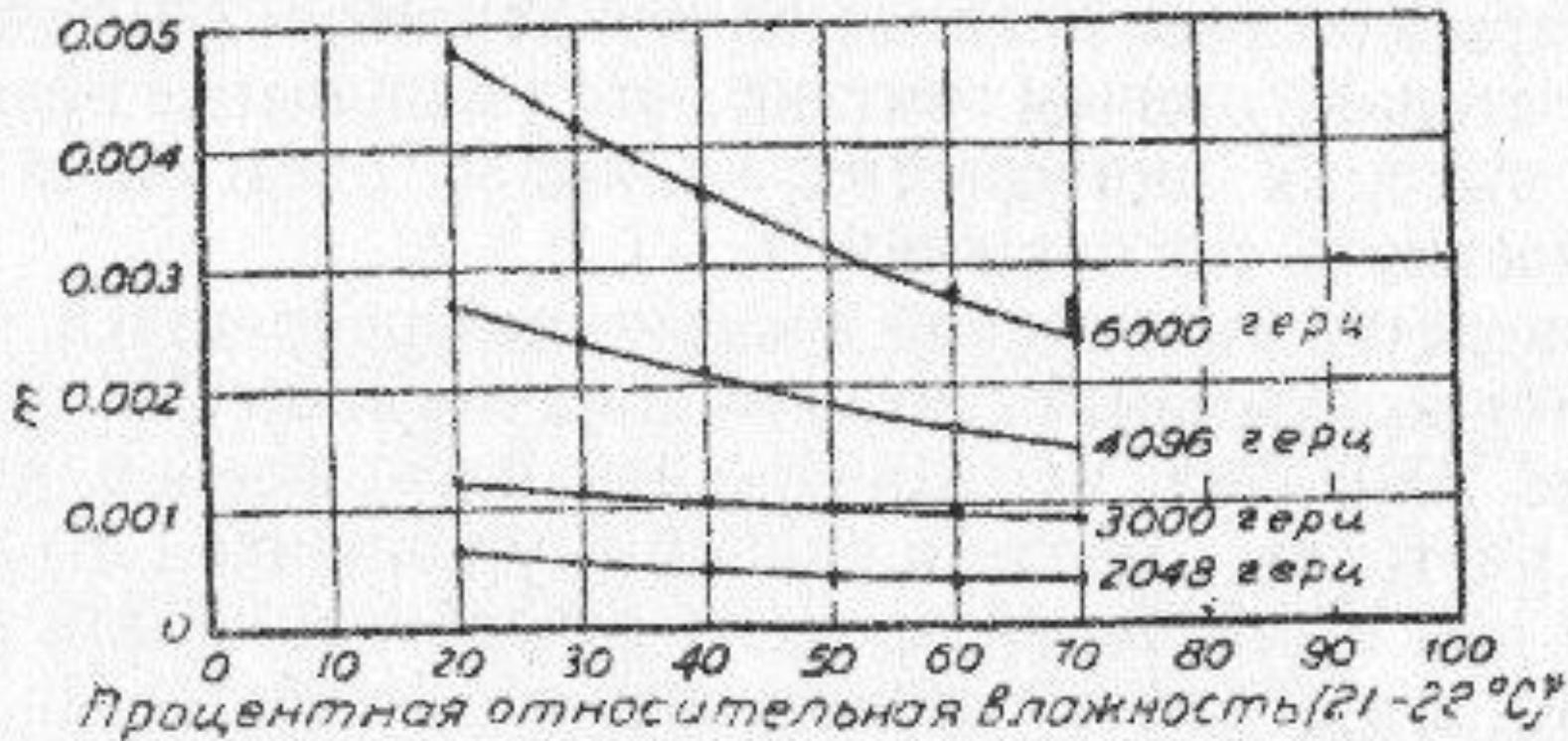
S - общая площадь внутренних поверхностей

$\bar{\alpha}$ - средний коэффициент звукопоглощения

A - полное звукопоглощение помещения

μ - показатель затухания звука в воздухе

Зависимость коэффициента затухания звука в воздухе от его влажности



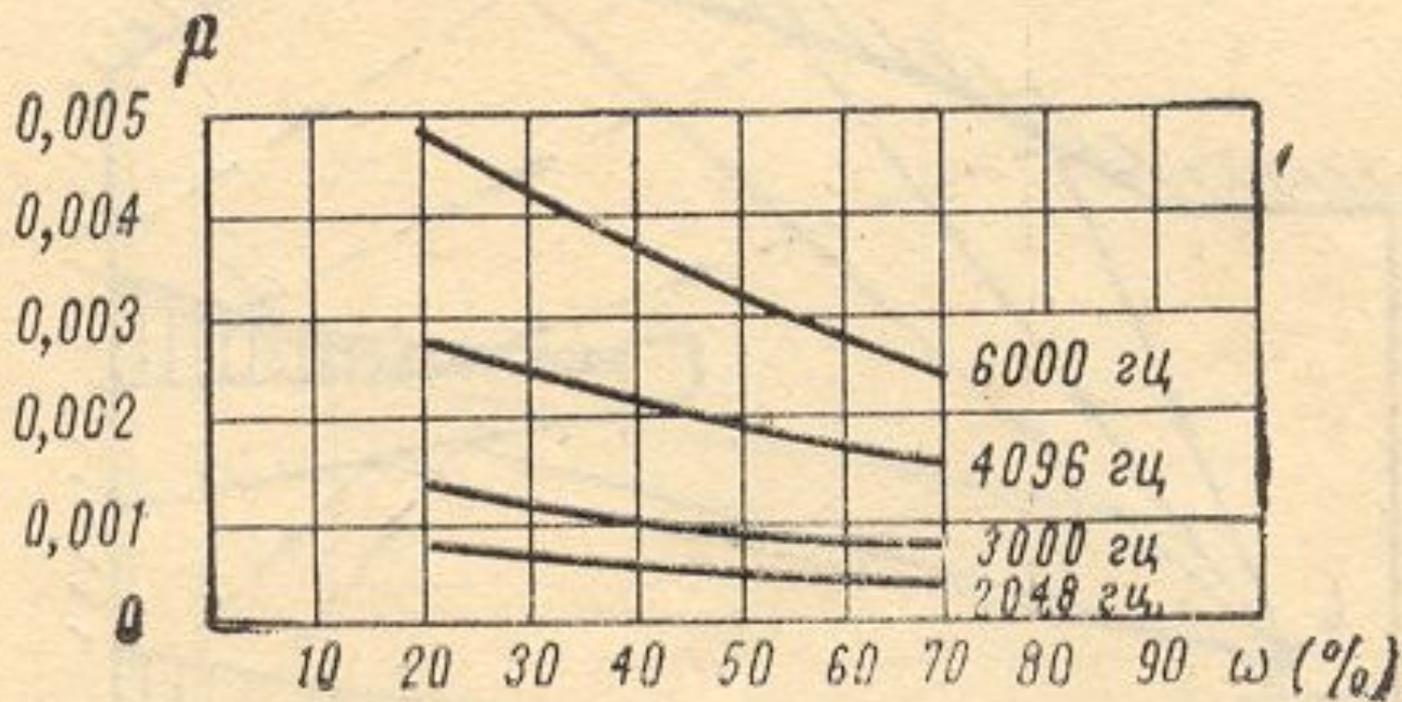


Рис. 26

Время реверберации можно измерить
путем записи процесса спадания уровня
звукового давления

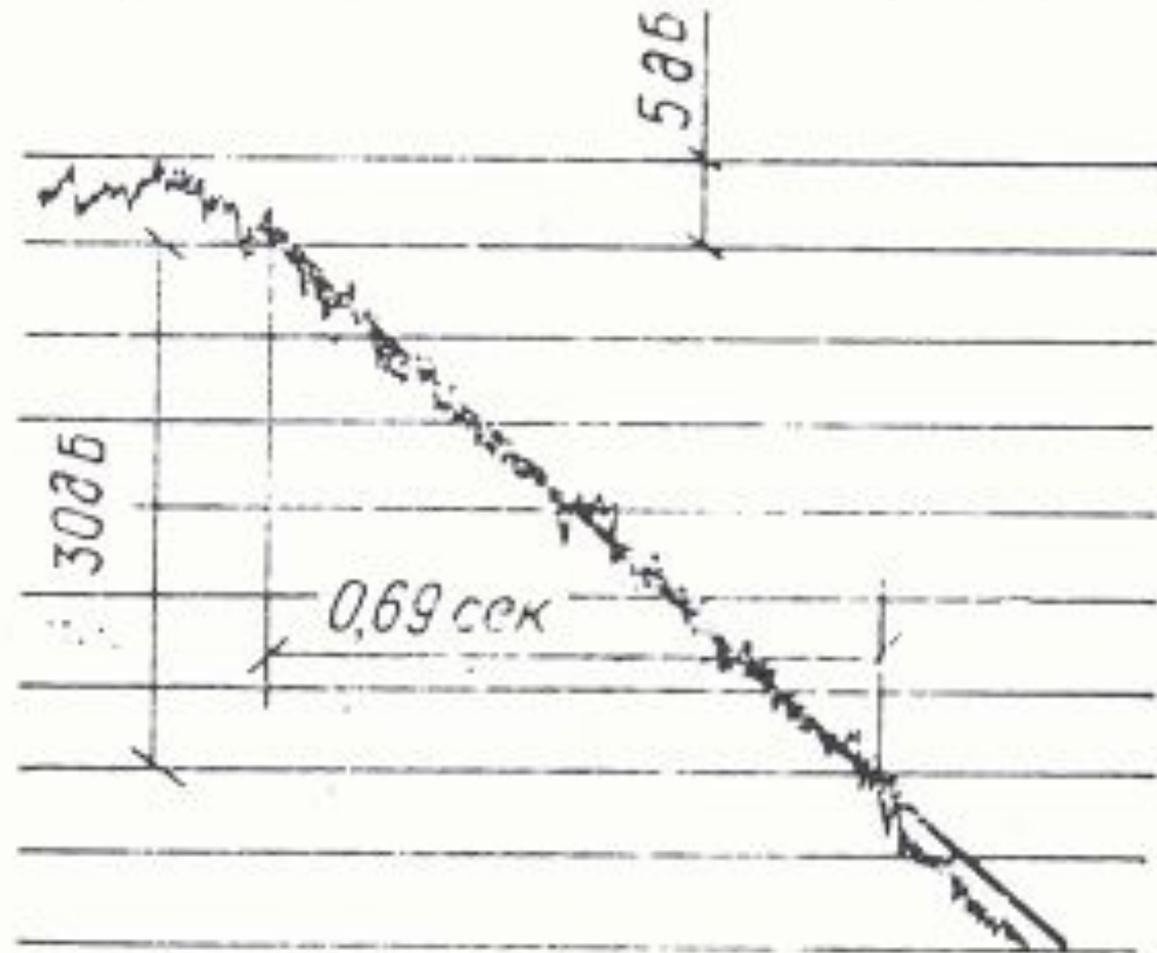


Рис. 9. Пример записи спада-
ния уровня звукового давле-
ния для измерения времени
реверберации помещения

P	D
0	
<	>
<<	>>
+	
-	F



Ориентировочные значения времени реверберации на частоте 500 Гц

	$V=1000 \text{ м}^3$	$V=5000 \text{ м}^3$	$V=10000 \text{ м}^3$
Аудитория	0,83	0,92	0,99
Кинотеатр	0,86	1,08	1,18
Оперный театр	1,21	1,49	1,64

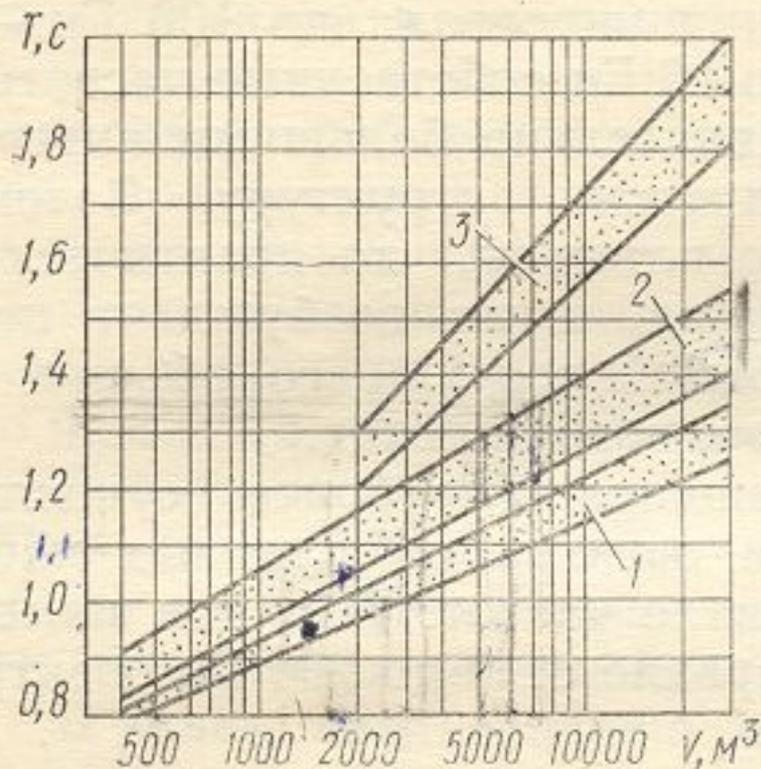


Рис. 11. Рекомендуемое время реверберации для залов различного назначения в зависимости от их объема в диапазоне частот 500—2000 Гц:

1 -- лекционные залы, залы пассажирских помещений вокзалов; 2 — залы драматических театров, залы многоцелевого назначения средней вместимости, кинотеатры; 3 — залы театров оперы и балета, концертные залы

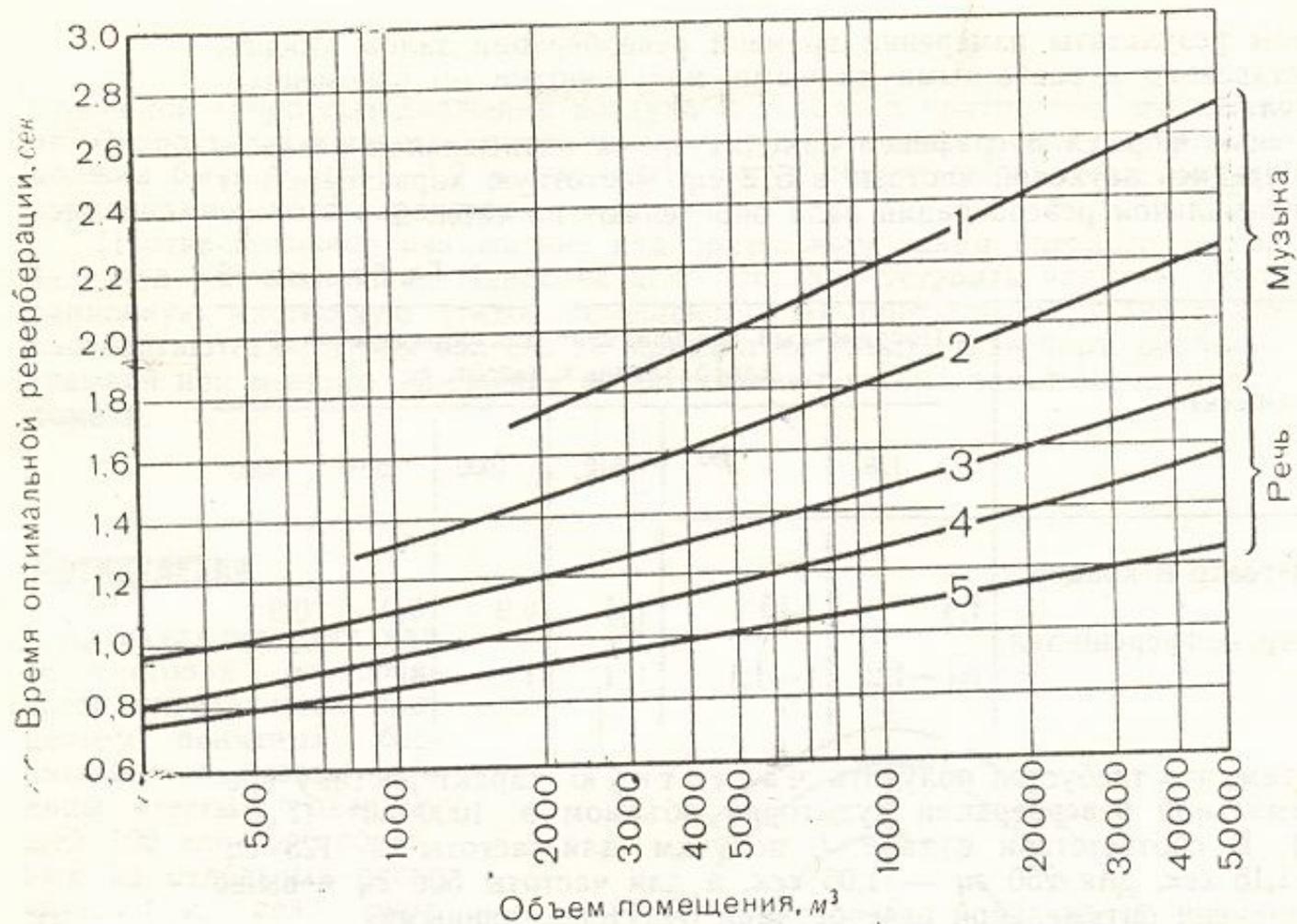


Рис. 4. Зависимость оптимальных значений времени реверберации от объема помещения (для частоты 512 гц):

1 — хоровая и органная музыка; 2 — среднее значение для музыки; 3 — легкая музыка; 4 — среднее значение для речи; 5 — звуковые фильмы.

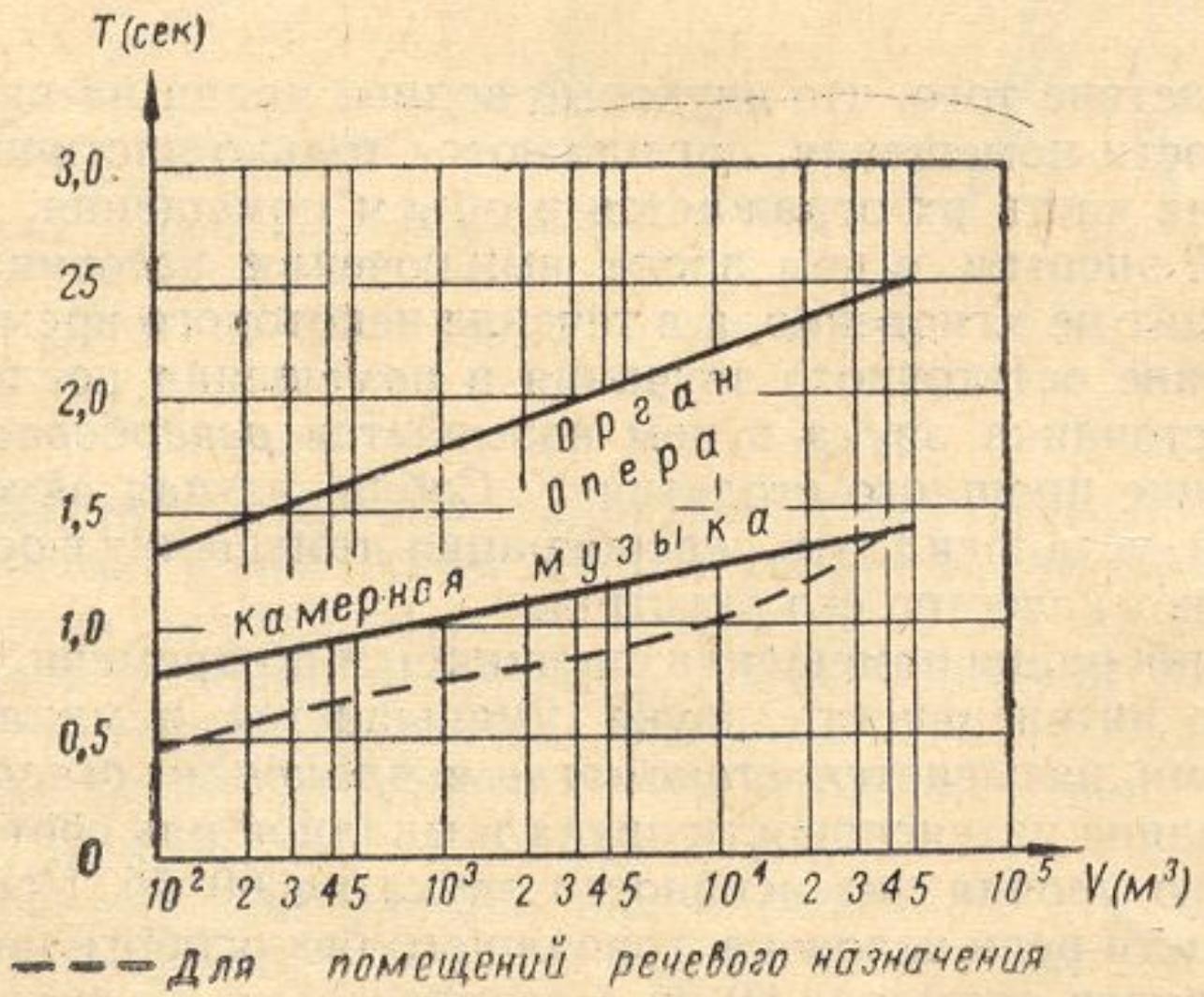
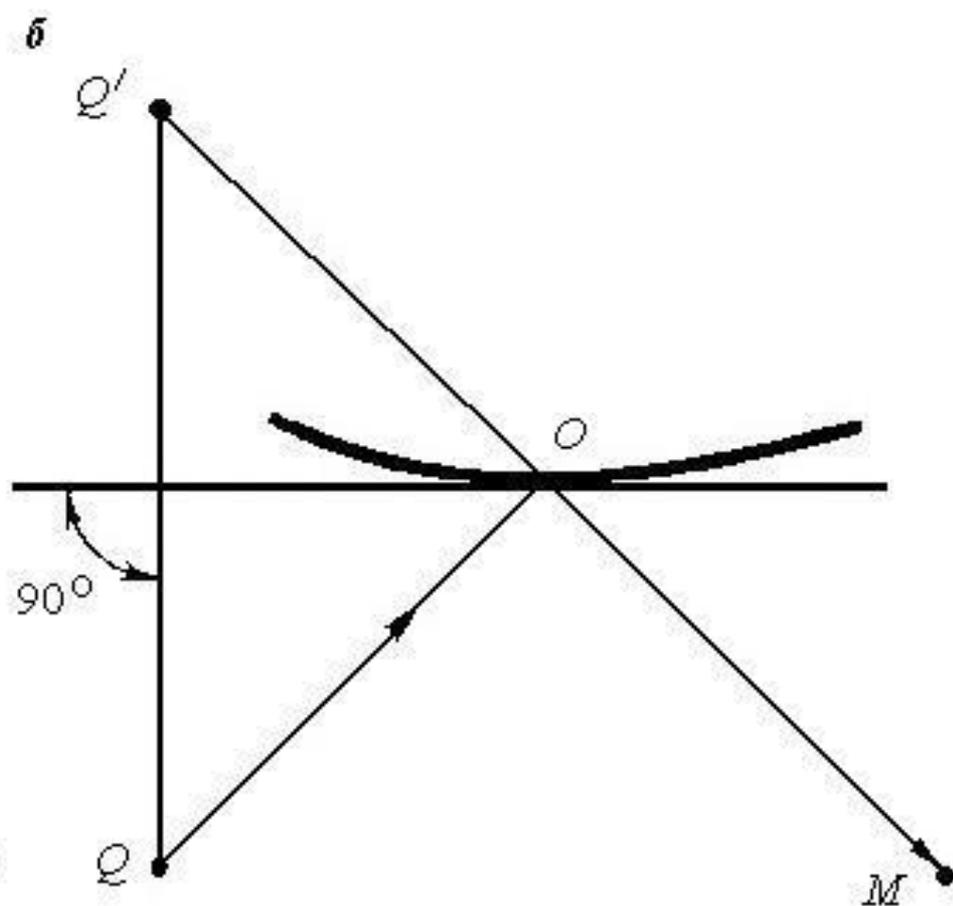
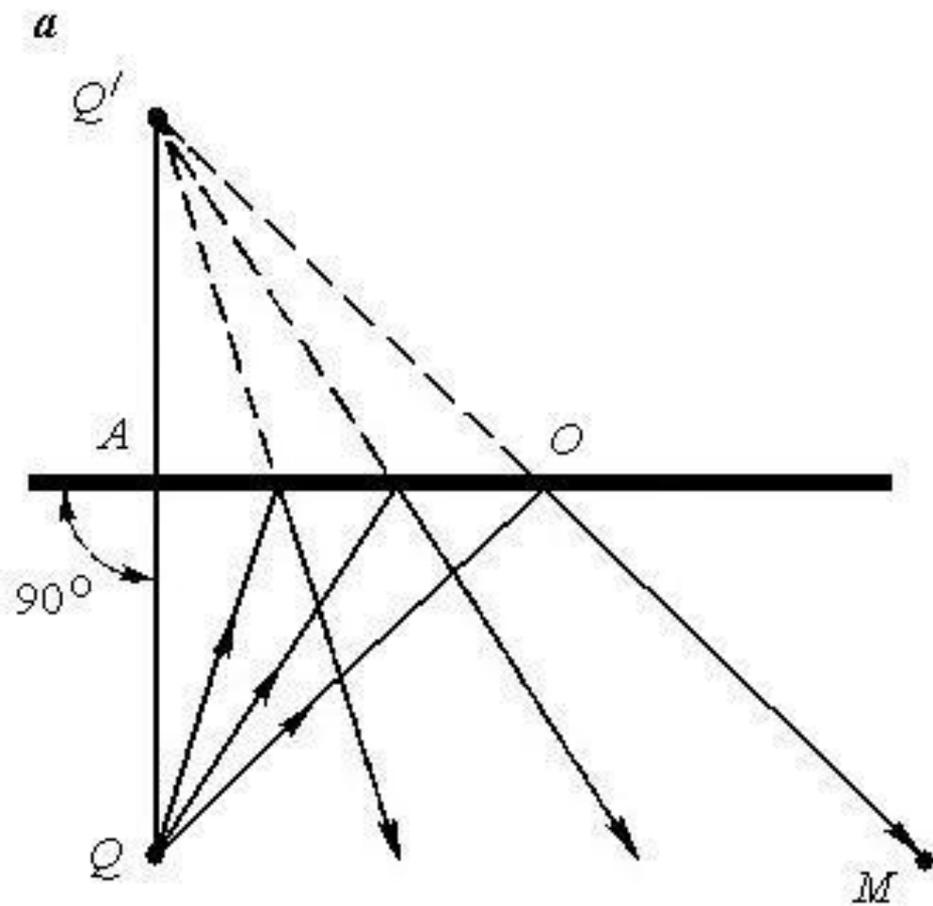


Рис. 24

Структура звуковых отражений

Очертания потолка и стен
должны способствовать
правильному распределению
отраженного звука,
направляя большую долю его
на удаленные от источника
слушательские места

Построение геометрических отражений с помощью мнимого источника

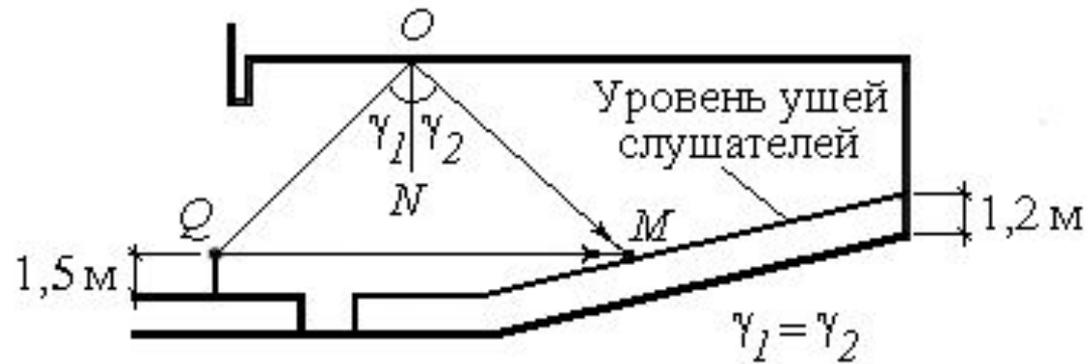


Отражения звуковых волн можно считать направленными, если

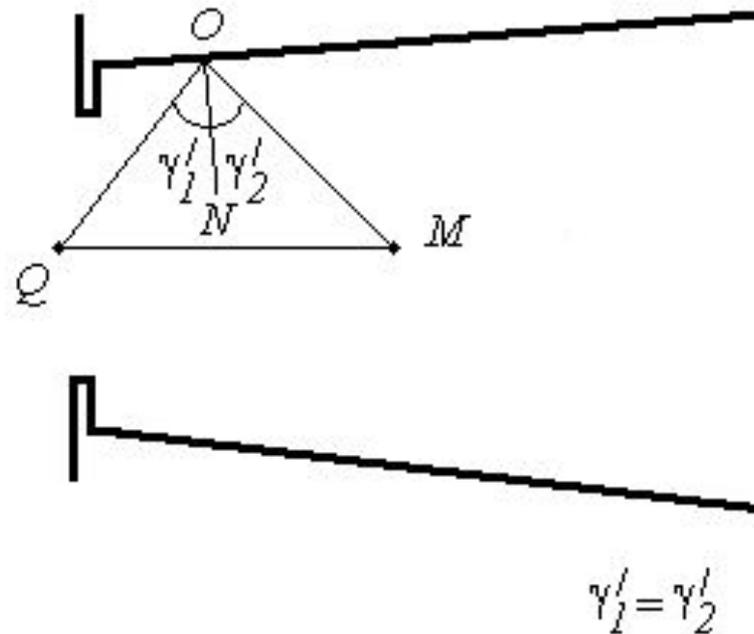
- наименьший размер отражающей поверхности не менее чем в 1,5 раза превышает длину волны
- наименьший радиус кривизны поверхности не менее чем в 2 раза превышает длину волны
- отражения возникают от точек отражателя, удаленных от его краев не менее чем на половину длины волны

Лучевой эскиз

a

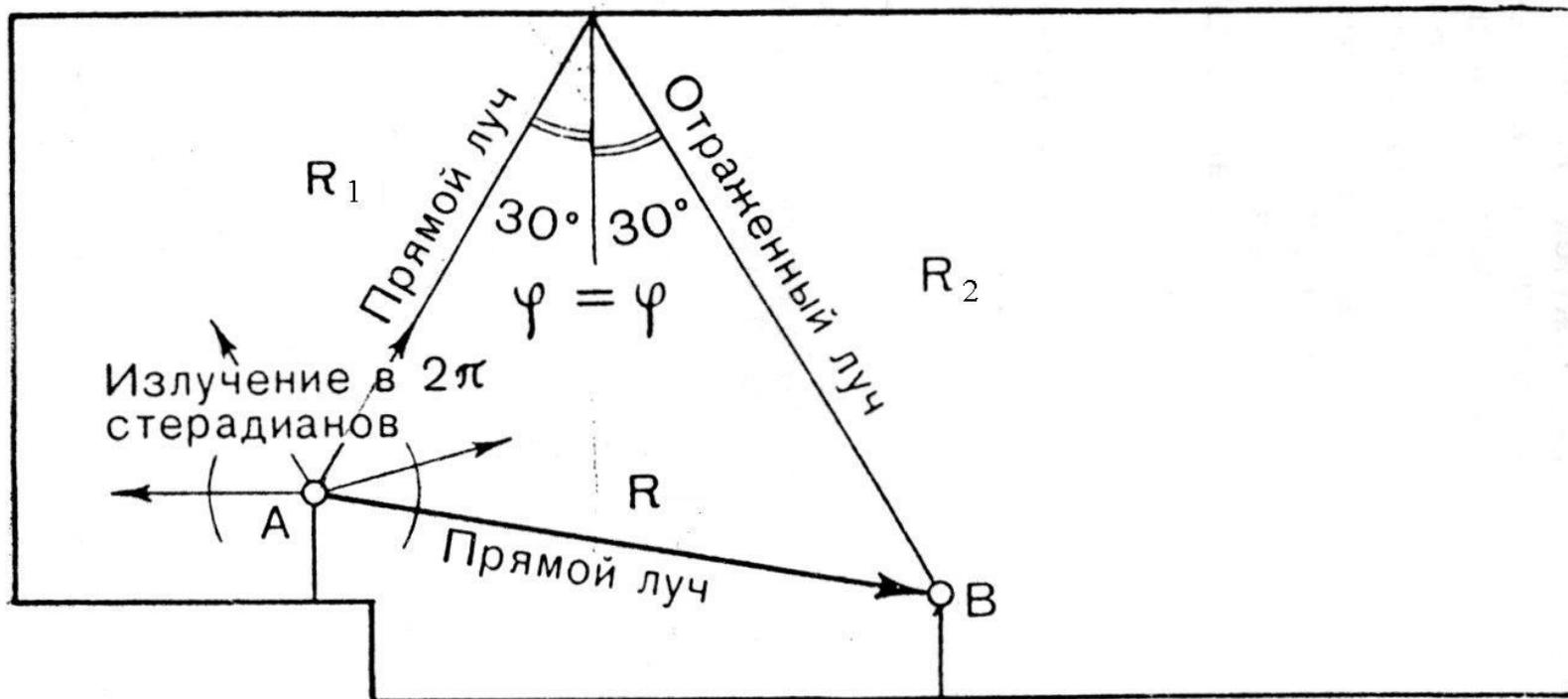


б



Время запаздывания отражений

$$\Delta t = \frac{(R_1 + R_2) - R}{v_{\text{звука}}}$$



ОПТИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

- АУДИТОРИЯ, ЛЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ,
КОНФЕРЕНЦ-ЗАЛ 0,01 – 0,015 С
- ДРАМАТИЧЕСКИЙ ТЕАТР 0,015 – 0,02 С
- ЗАЛ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ 0,02 – 0,03 С
- ОПЕРНЫЙ ТЕАТР 0,07 С
- ФИЛАРМОНИЯ,
КОНЦЕРТНЫЙ ЗАЛ (БЕЗ ОРГАНА) 0,09 С
- КОНЦЕРТНЫЙ ЗАЛ С ОРГАНом И ХОРОМ 0,10 – 0,15 С

ОСЛАБЛЕНИЕ ПРЯМОГО ЗВУКА

$$L = L_0 - 20 \lg R - 8$$

УРОВЕНЬ ОДНОКРАТНО ОТРАЖЕННОГО ЗВУКА

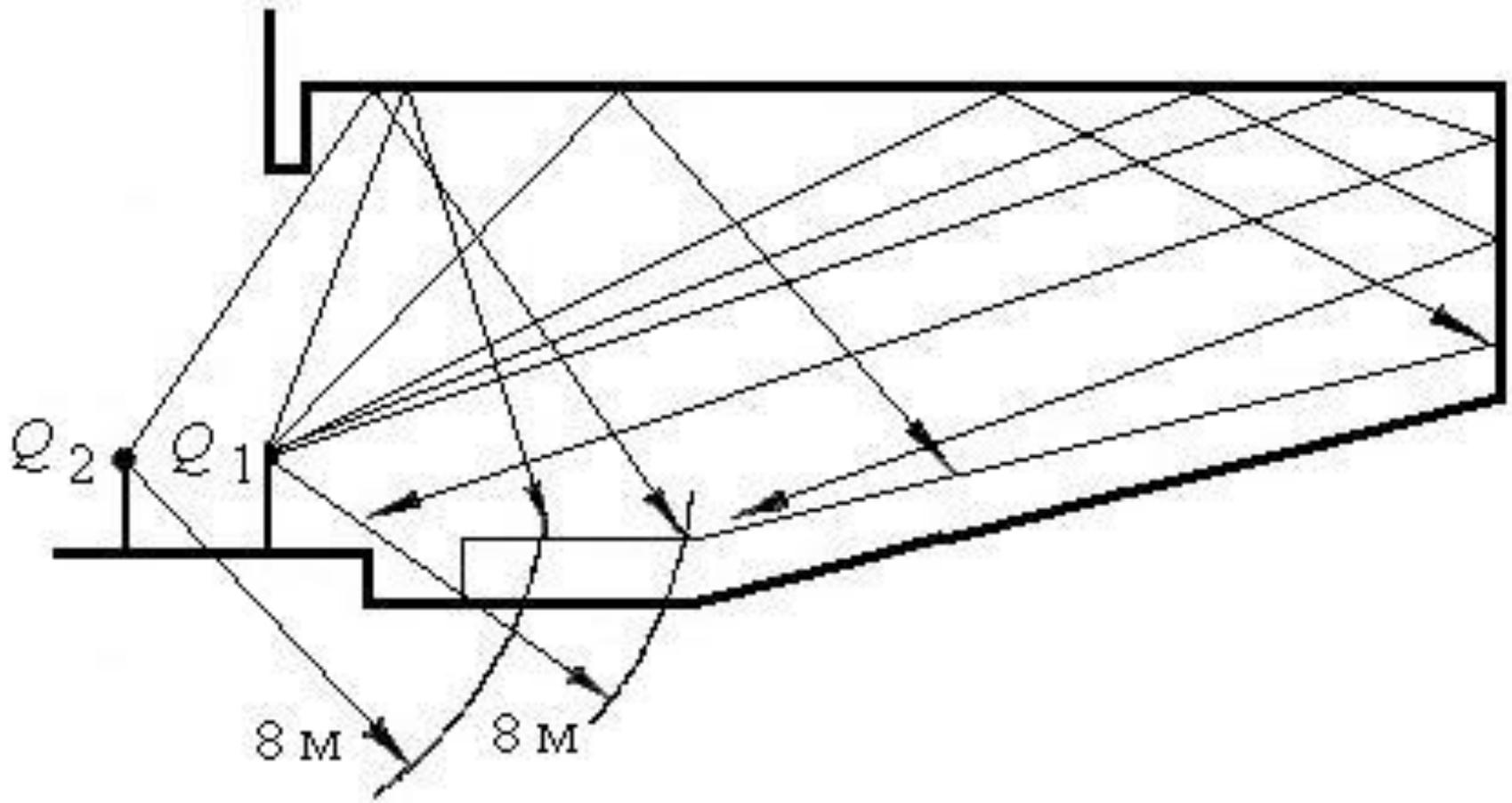
$$L = L_0 - 20 \lg(R_1 + R_2) - 10 \lg(1/(1-\alpha)) - 8$$

ЗВУКОВАЯ МОЩНОСТЬ ИСТОЧНИКА

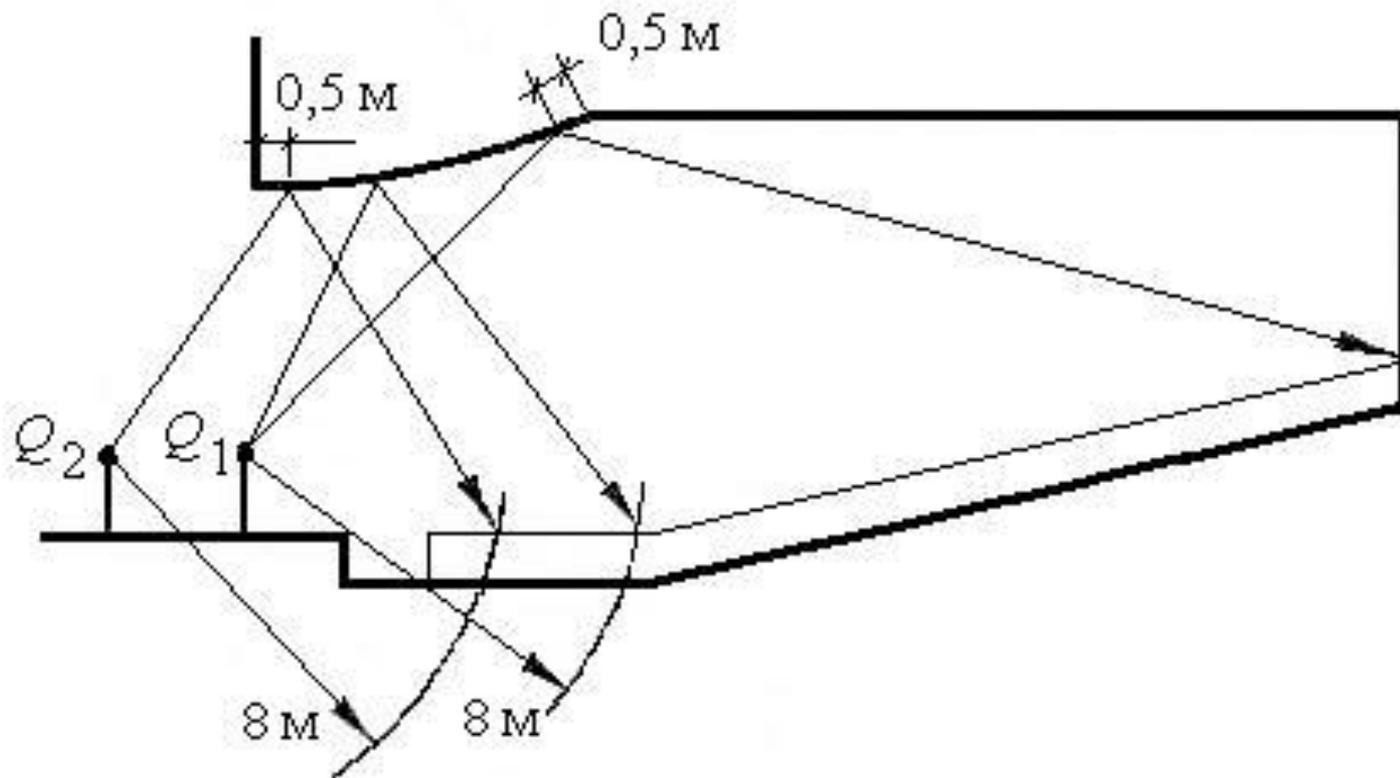
АУДИТОРИЯ, ЛЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ	65 – 70 дБ
ДРАМАТИЧЕСКИЙ ТЕАТР	80 дБ
ОПЕРНЫЙ ТЕАТР	90 дБ
КОНЦЕРТНЫЙ ЗАЛ, ФИЛАРМОНИЯ	100 дБ
КОНЦЕРТНЫЙ ЗАЛ С ОРГАНОМ	110 дБ

Если разница уровней прямого и отраженного звука превышает 8 дБ, то такое отражение не формирует характера звучания, а имеет вредное влияние

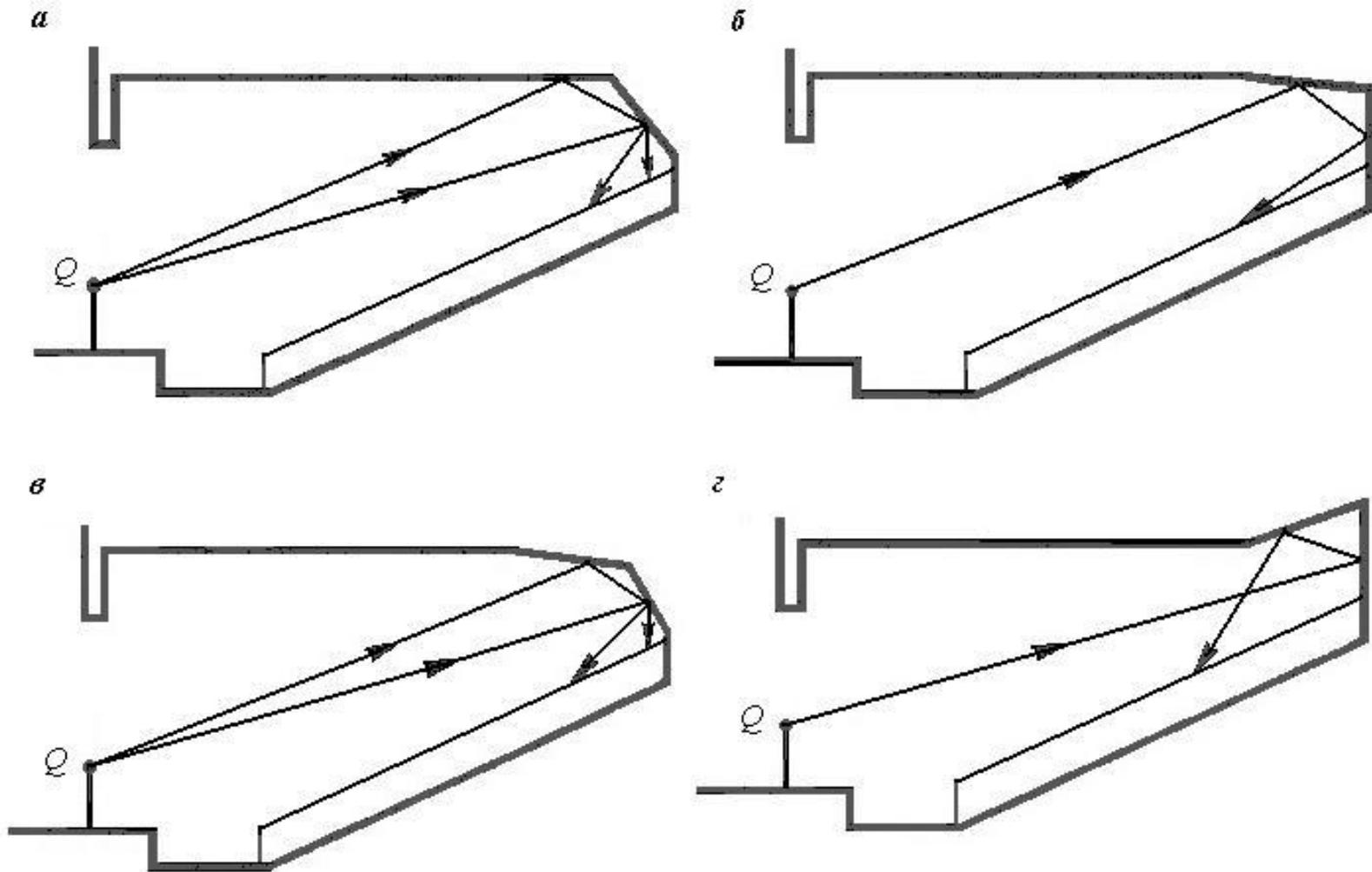
Формирование отражений от плоского горизонтального потолка



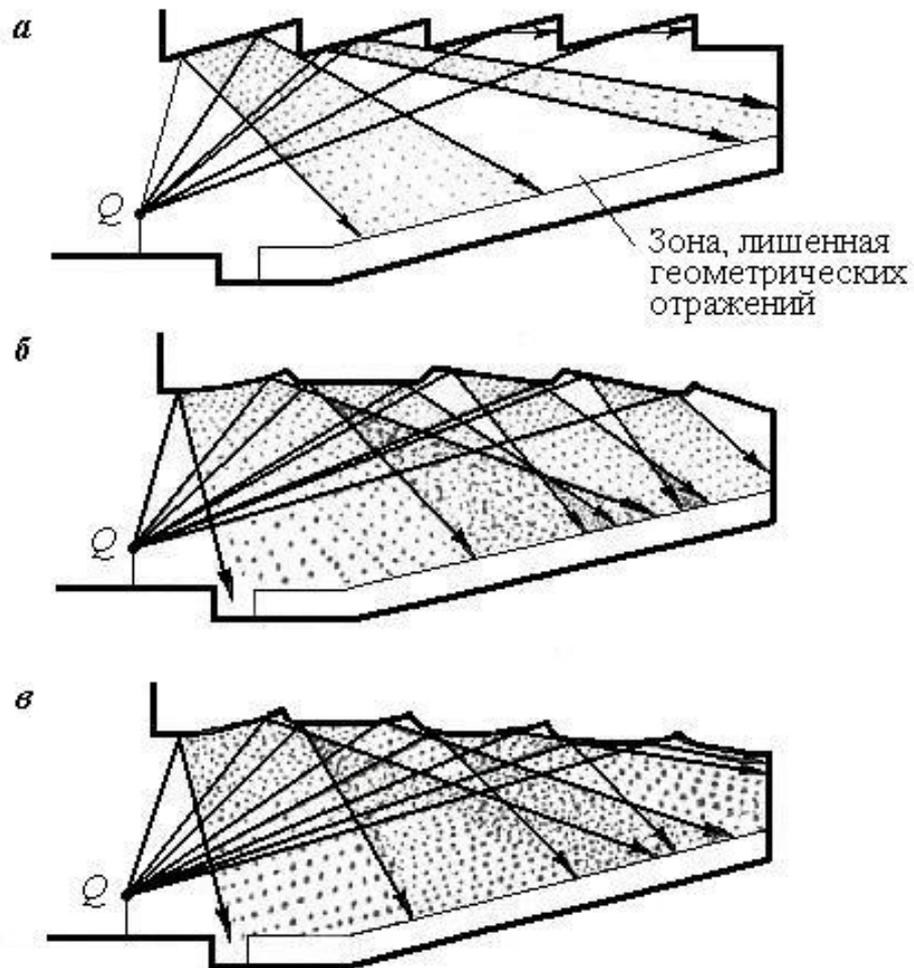
Устройство отражателя над авансценой



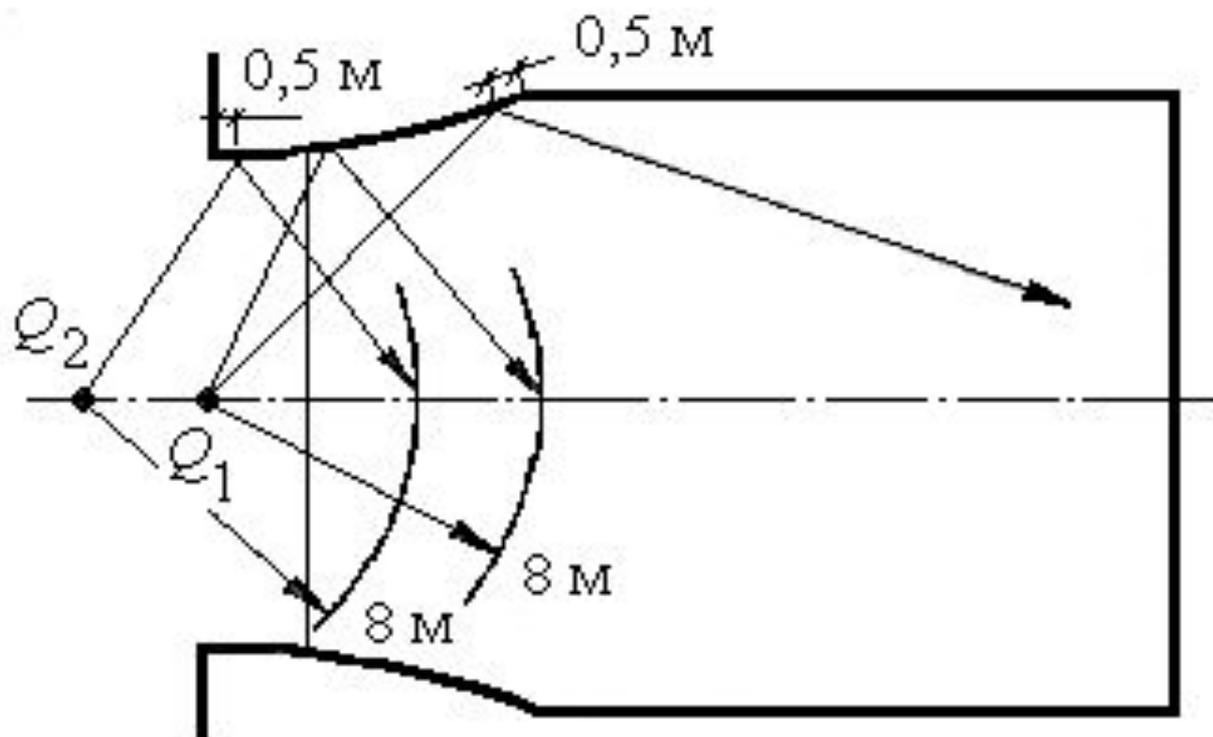
Рациональное примыкание потолка к задней стенке



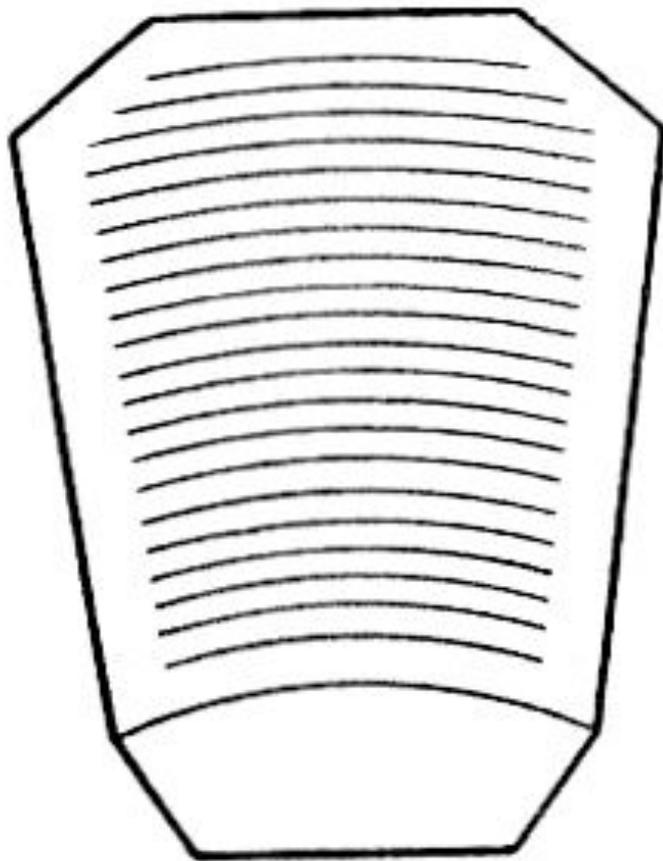
Расчленение потолка секциями



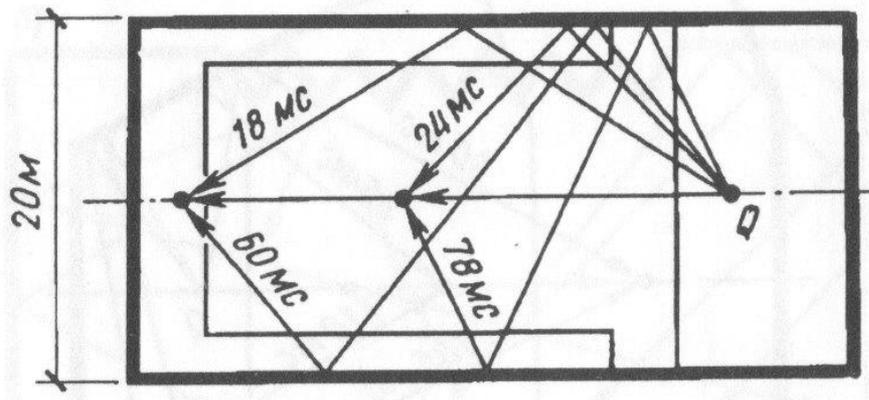
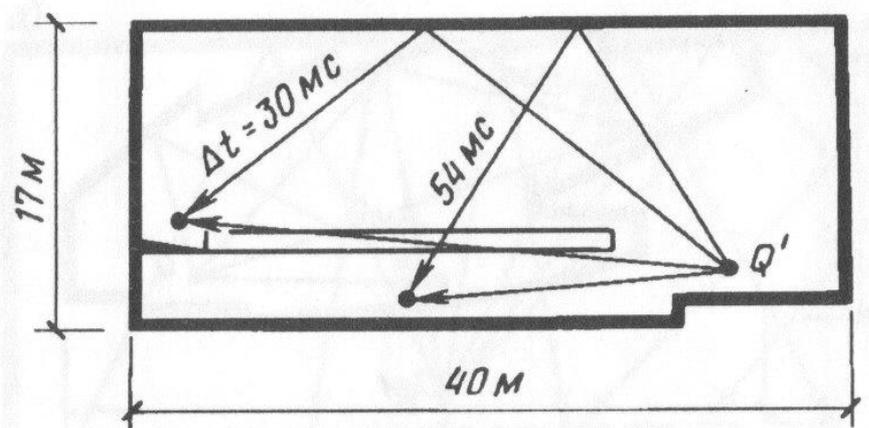
Звукоотражатели в передней части боковых стен



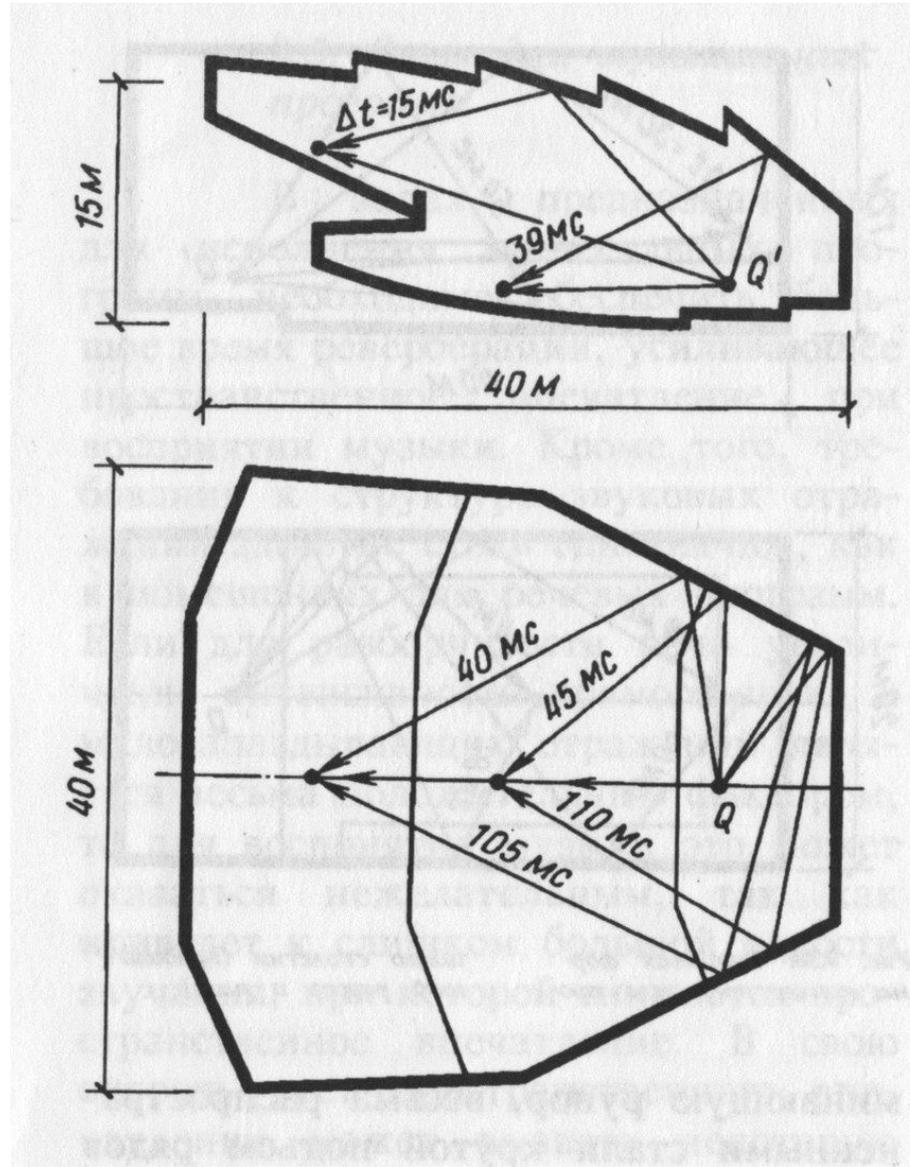
Наиболее рациональная форма зала в плане



ТИПИЧНАЯ ФОРМА КОНЦЕРТНОГО ЗАЛА 19 СТОЛЕТИЯ



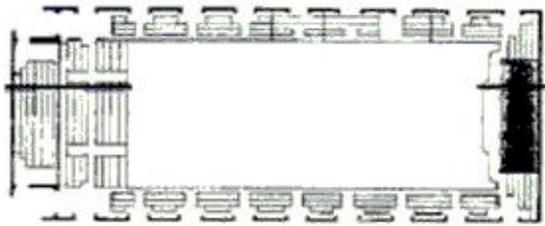
ТИПИЧНАЯ ФОРМА СОВРЕМЕННОГО КОНЦЕРТНОГО ЗАЛА



по ряду объективных и субъективных критериев в число 5-х лучших театров мира **входят** (см. L.L.Beranek, Subjective Rank-Orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls, Acta Acustica, 2003, vol.89, 494-509)

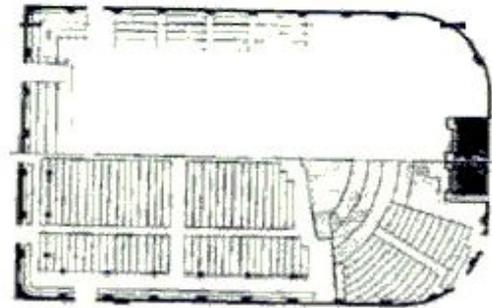
венский Grosser Musikvereinssaal (Австрия) - концертный зал Музикферайн (венская филармония),

амстердамский Concertgebouw (Голландия) - Концертный зал Концертгебау,
бостонский Symphony Hall (США).



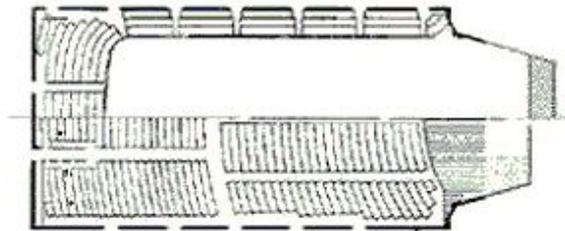
Vienna (Austria), Grosser Musikvereinssaal:

1870 г., 1700 зрителей, RT=2.0 с.



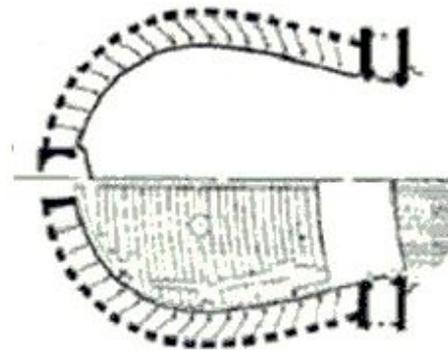
Amsterdam (Netherlands), Concertgebouw:

1888 г., 2000 зрителей, RT=2.0 с.



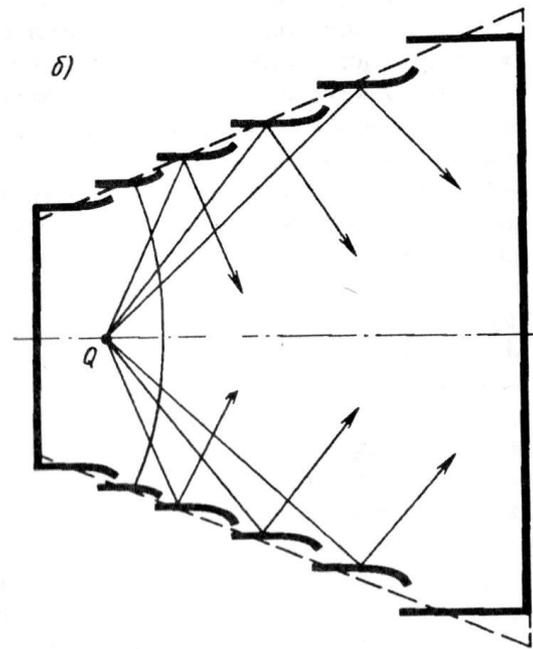
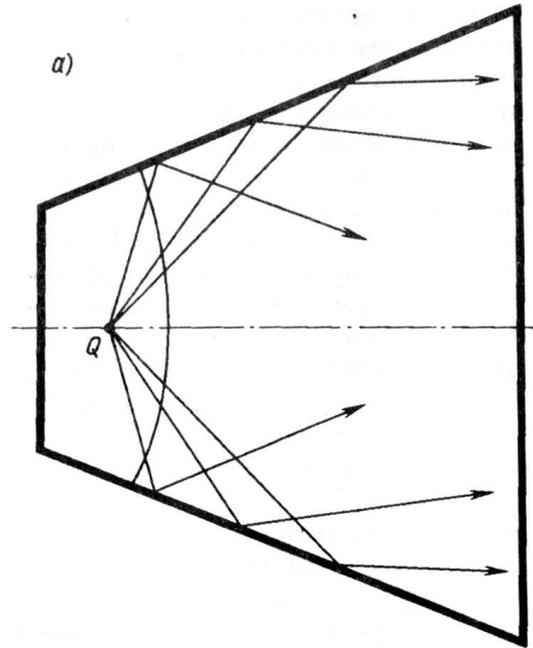
Boston (USA), Symphony Hall:

1900 г., 2600 зрителей, RT=1.85 с.

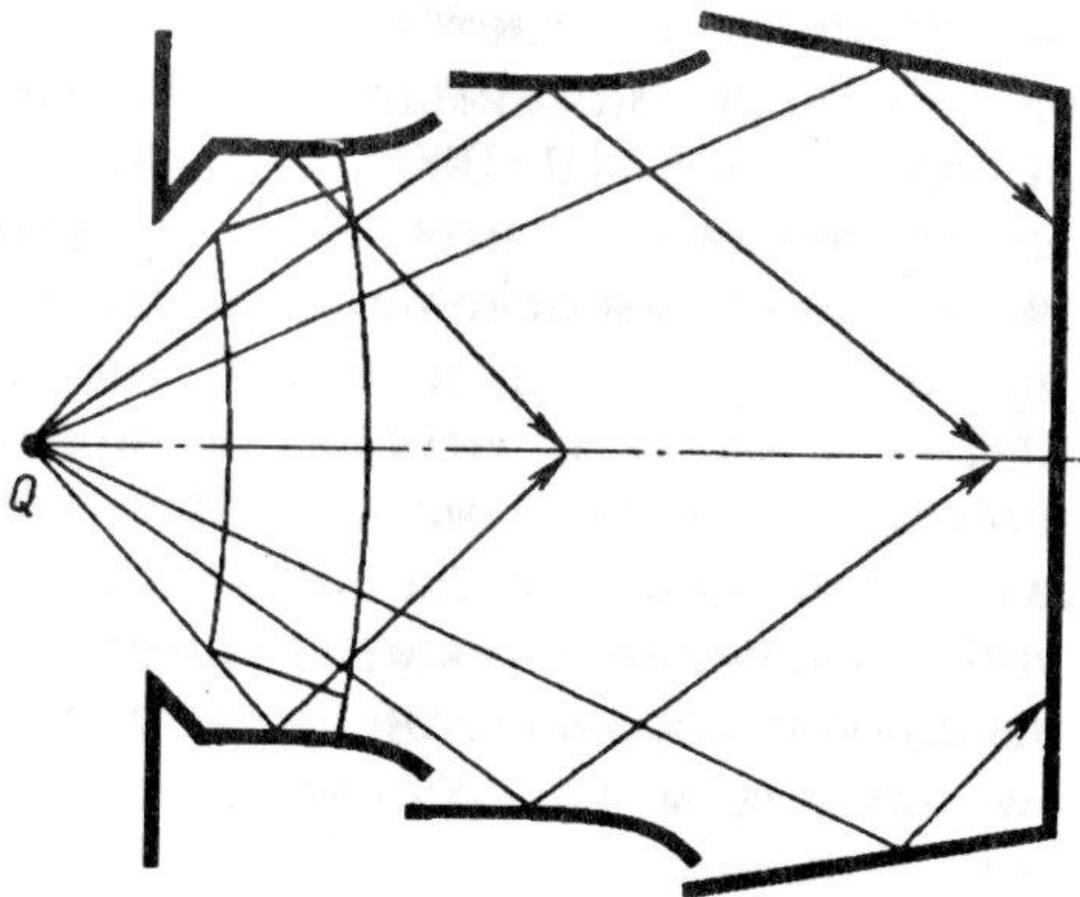


Milan (Italy), Teatro Alla Scala:

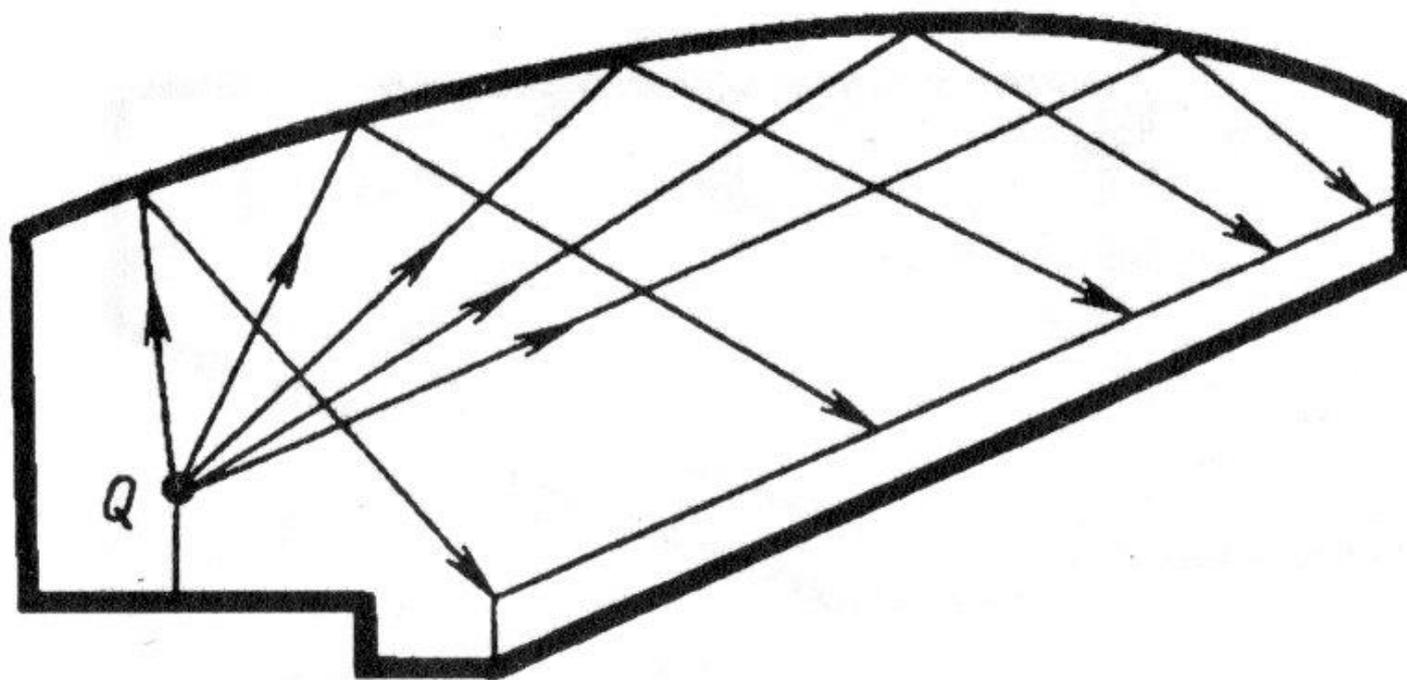
1778 г., 3000 зрителей, RT=1.45 с.



БЛАГОПРИЯТНЫЕ ОЧЕРТАНИЯ БОКОВЫХ СТЕН ЗАЛА ОПЕРНОГО ТЕАТРА

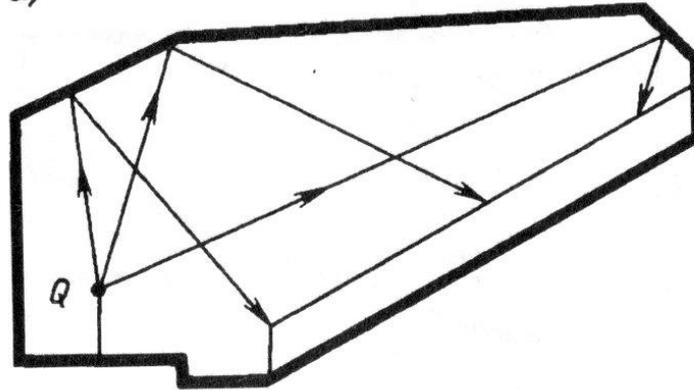


ЦЕЛЕСООБРАЗНАЯ ФОРМА ПОТОЛКА ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЕ ЛЕКЦИОННОГО ЗАЛА

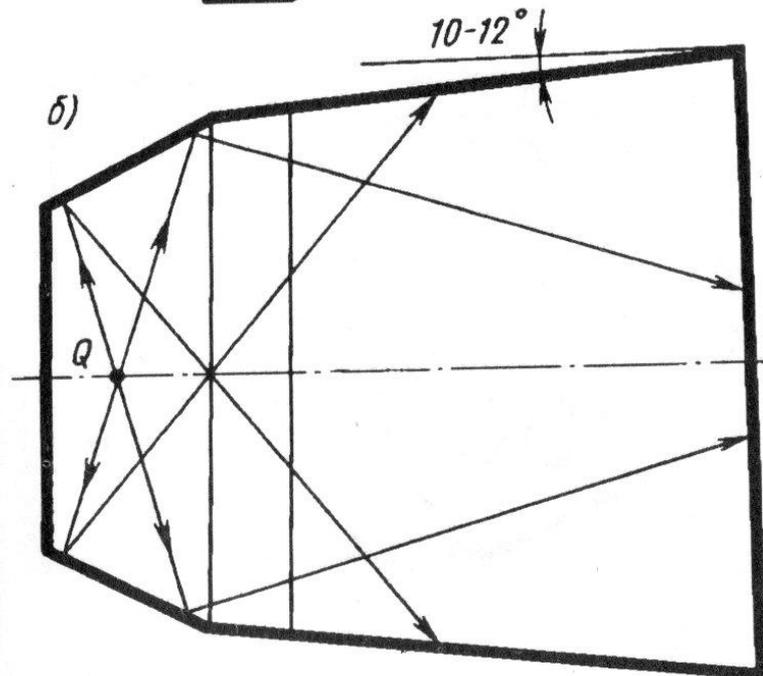


РЕКОМЕНДУЕМАЯ ФОРМА ЛЕКЦИОННОГО ЗАЛА

a)



b)



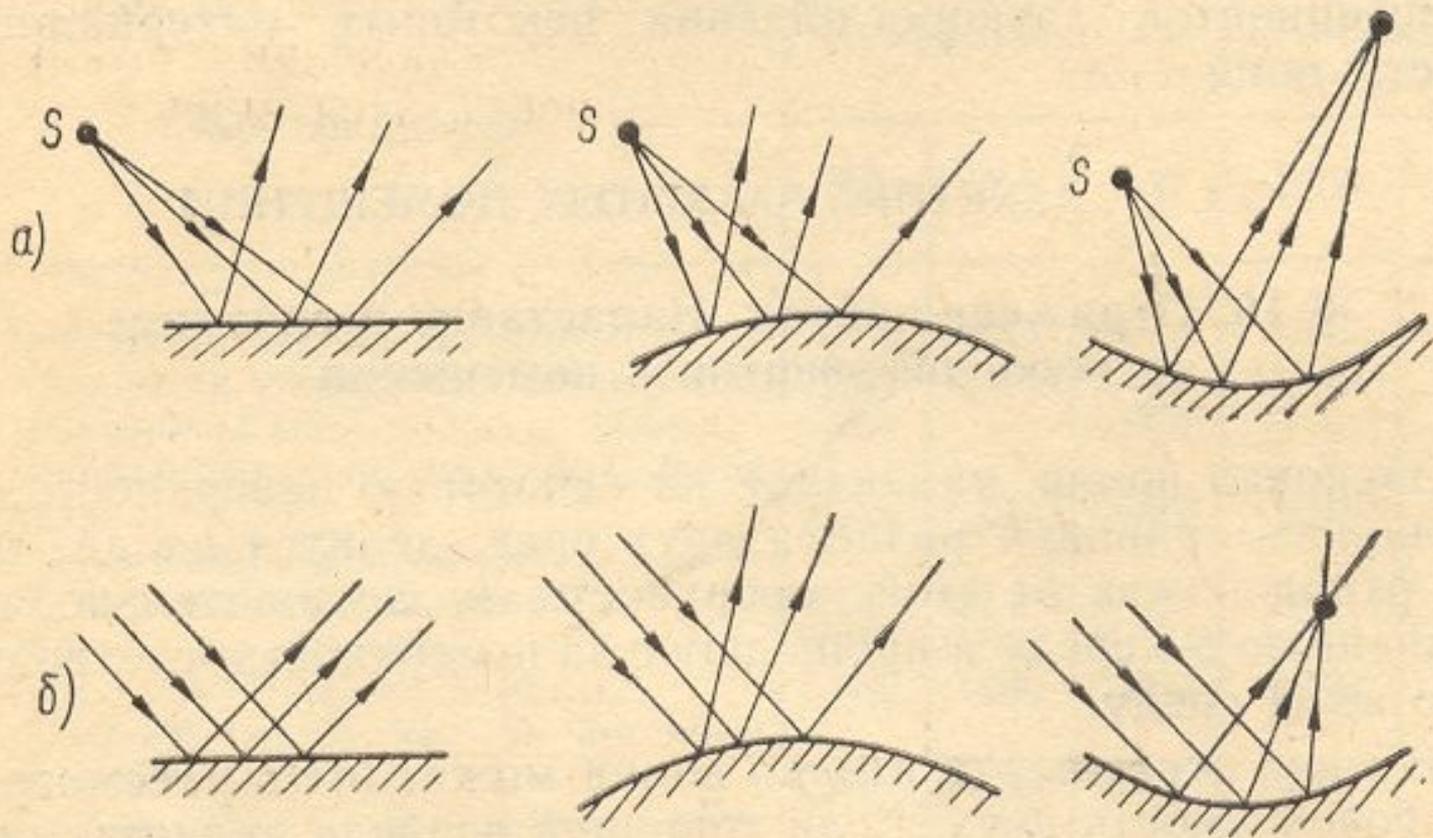
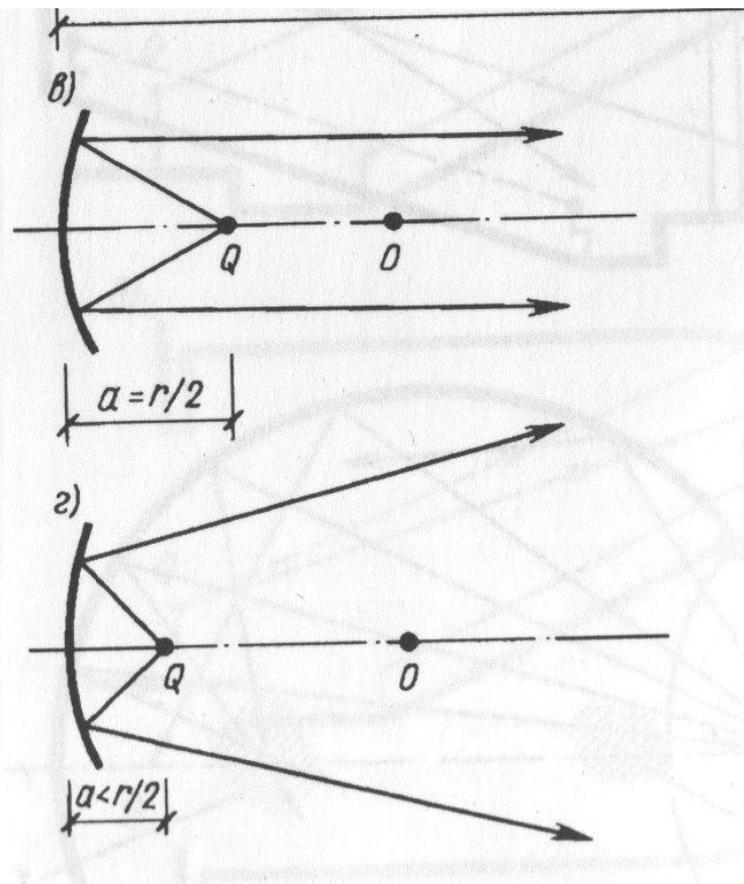
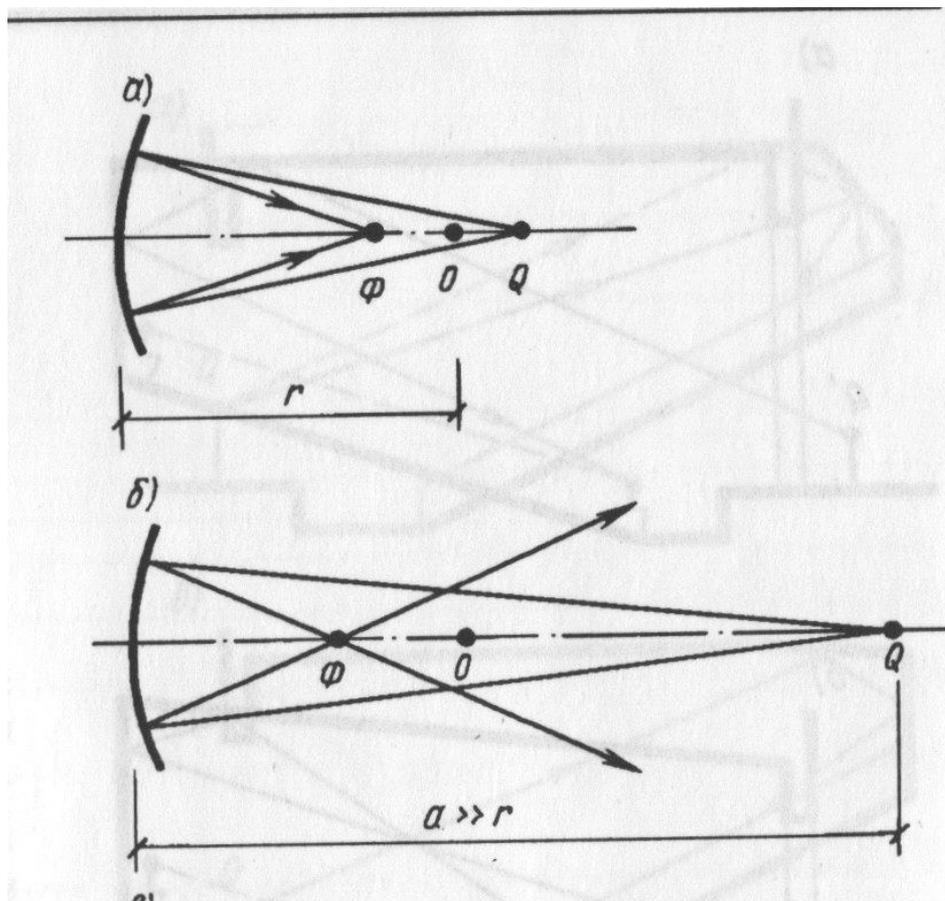


Рис. 18

ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА ОТ ВОГНУТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Q - ИСТОЧНИК ЗВУКА, O - ЦЕНТР КРИВИЗНЫ, Ф - ФОКУС



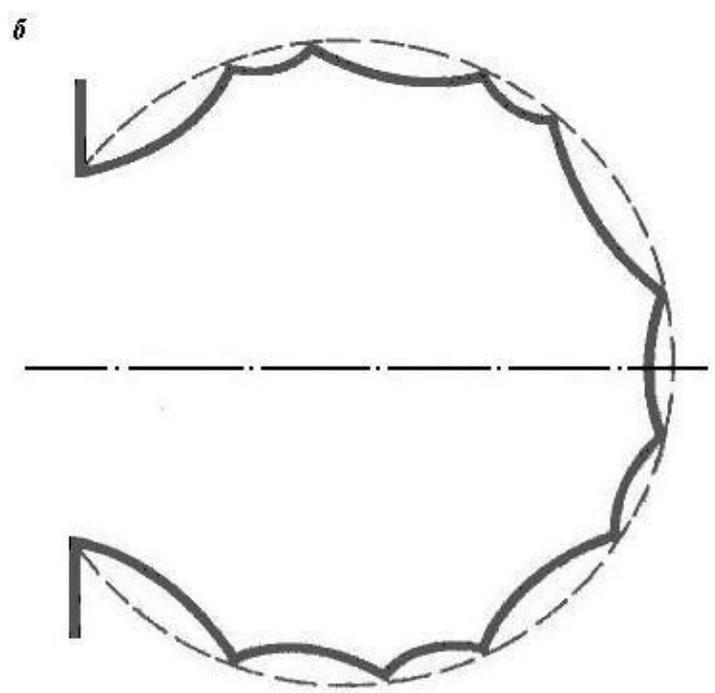
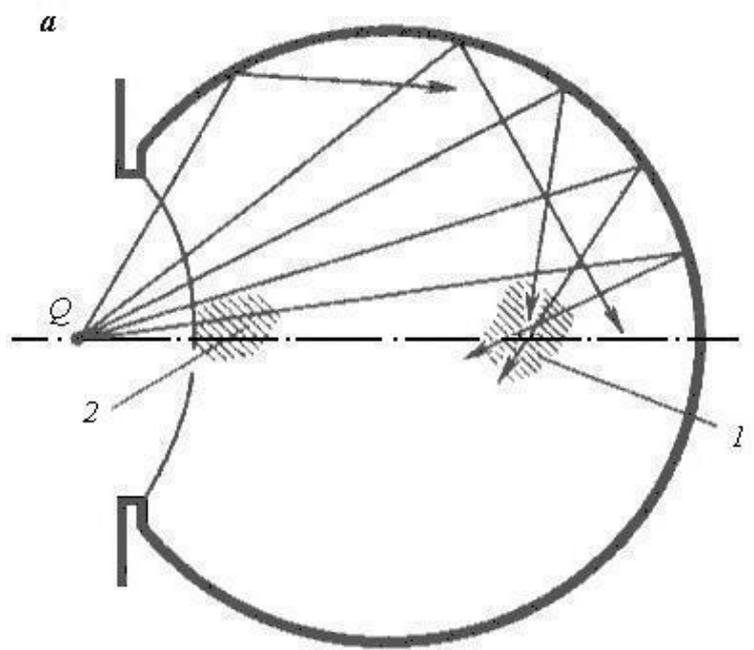
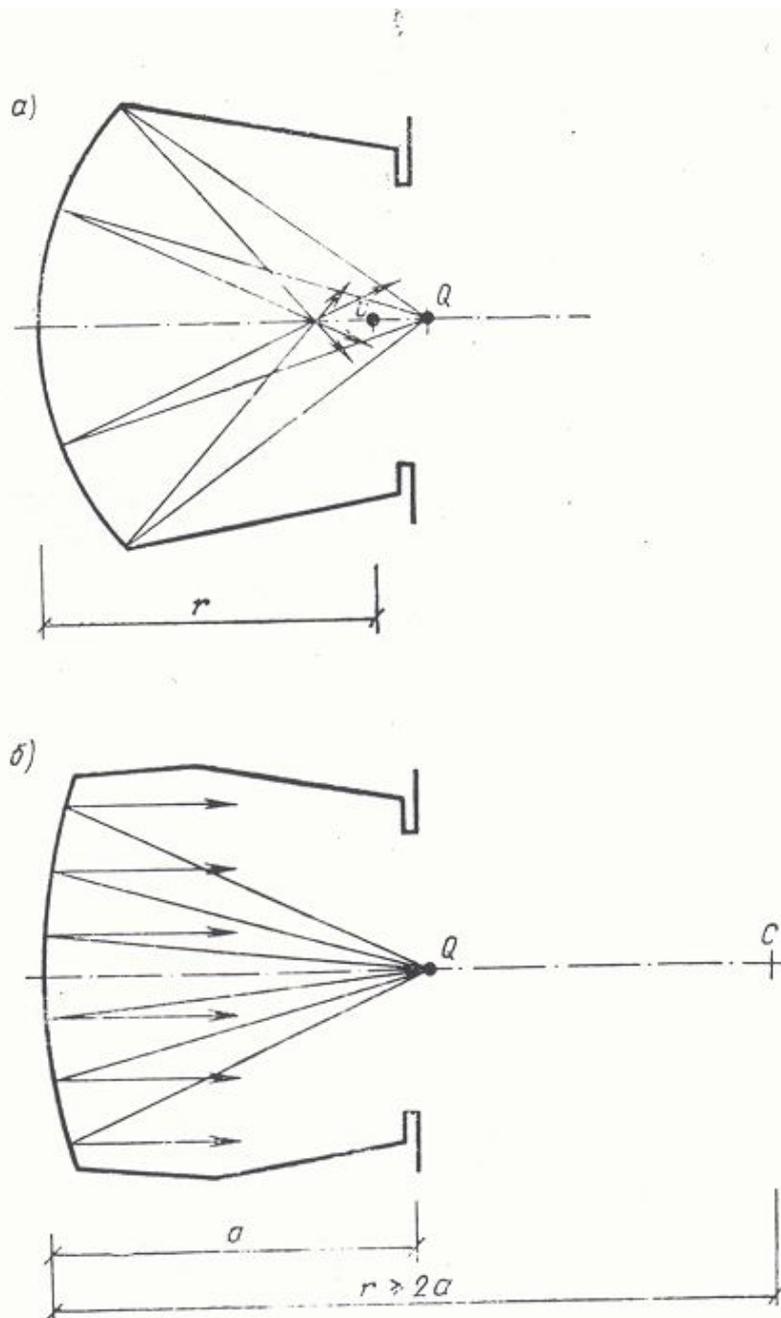
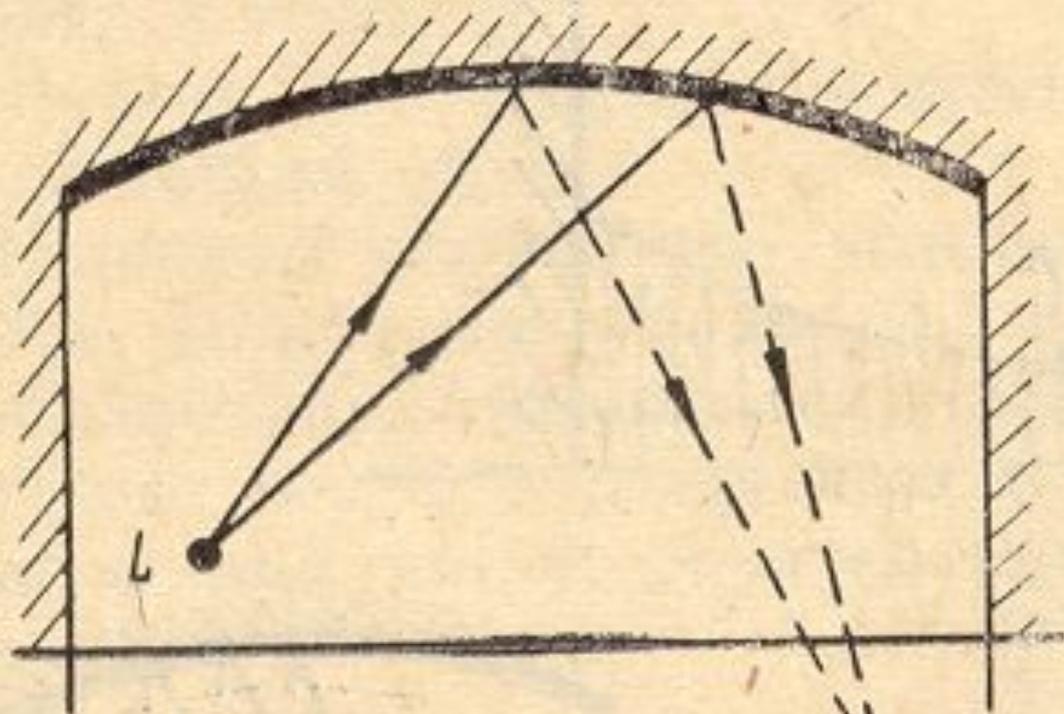


Рис. 9. Отражения звука от вогнутой задней стены

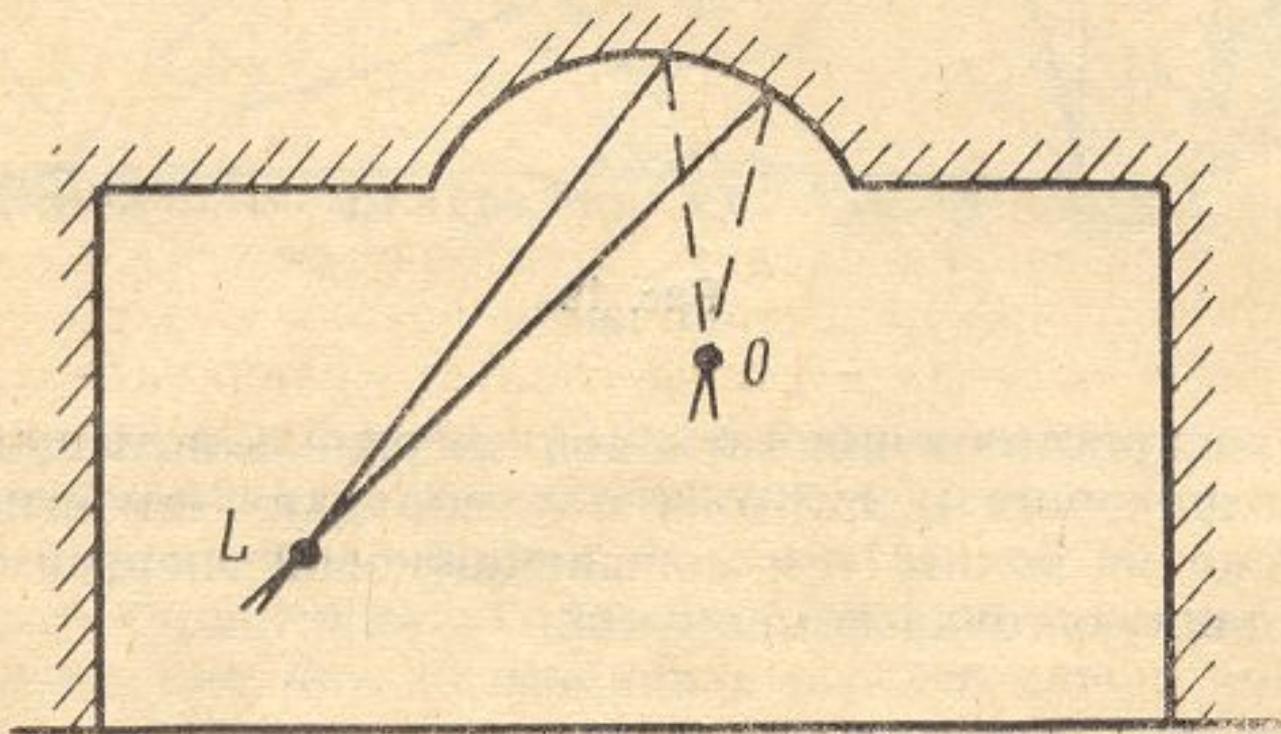
a — недопустимое положение центра кривизны; *б* — допустимое положение центра кривизны





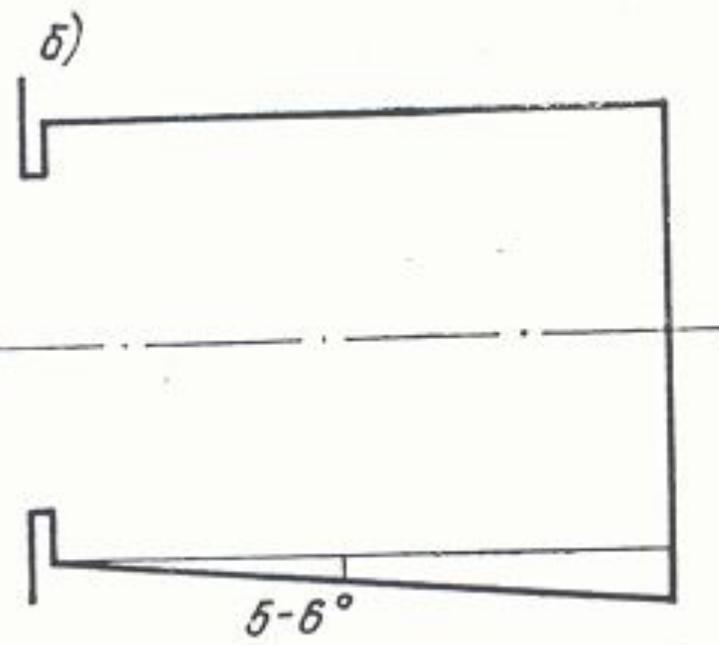
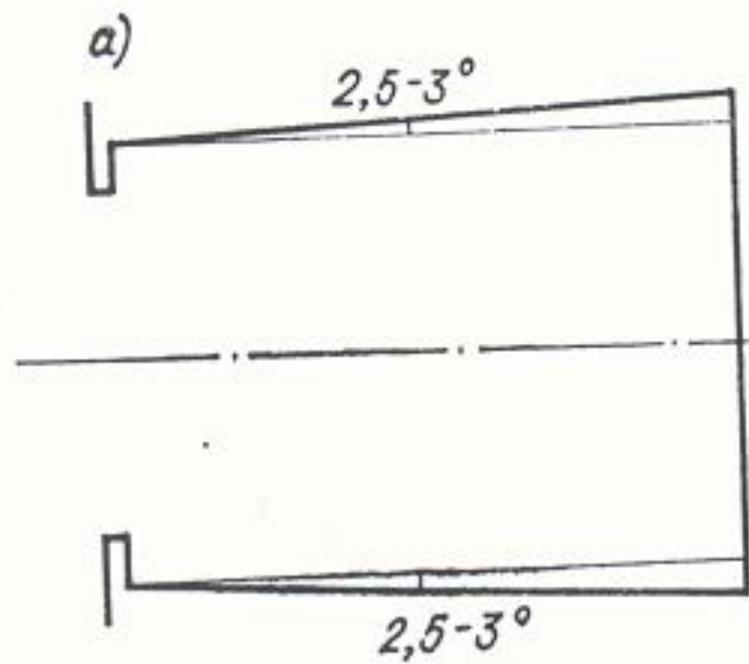
L - ист. звука
O - фокус

Рис. 21



L — источник звука
O — фокус

Рис. 20



«Полезные» отражения

- Отражения от плоских и выпуклых поверхностей, находящихся вблизи источника
- Отражения от потолка, направленные в зону расположения слушателей
- Отражения от боковых поверхностей стен, расположенных на уровне голов слушателей

«Вредные» отражения

- Отражения от удаленных поверхностей
- Отражения от вогнутых поверхностей
- Отражения от параллельных поверхностей
- Отражения от верхней части стен
- Отражения, приходящие к слушателю сзади

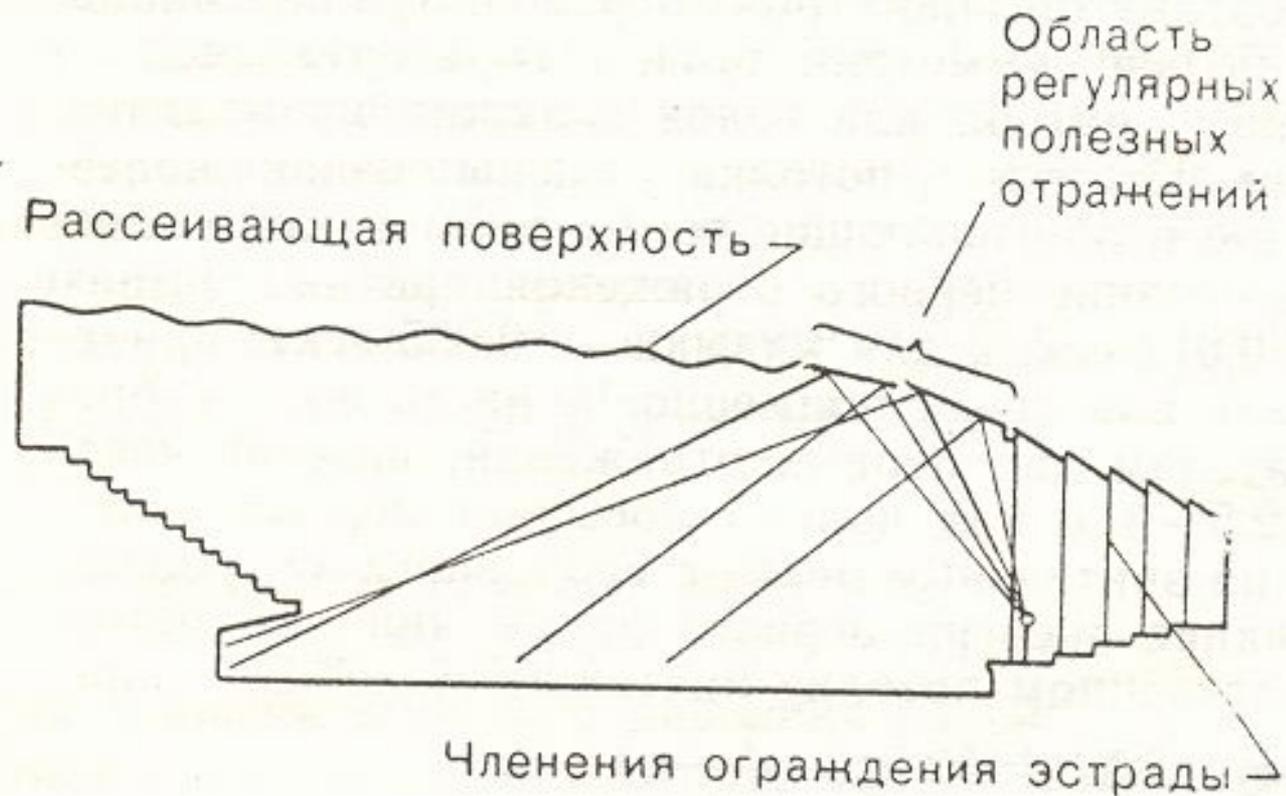
Расчет первых отражений – основной способ контроля правильности выбора формы зала и очертания его внутренних поверхностей.

Расчет включает:

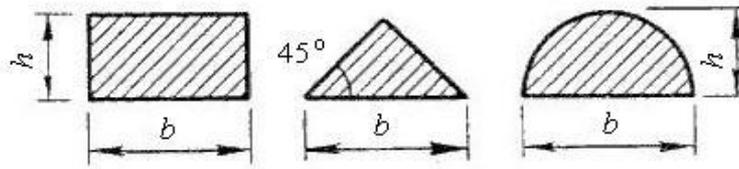
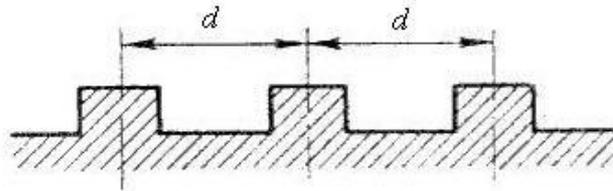
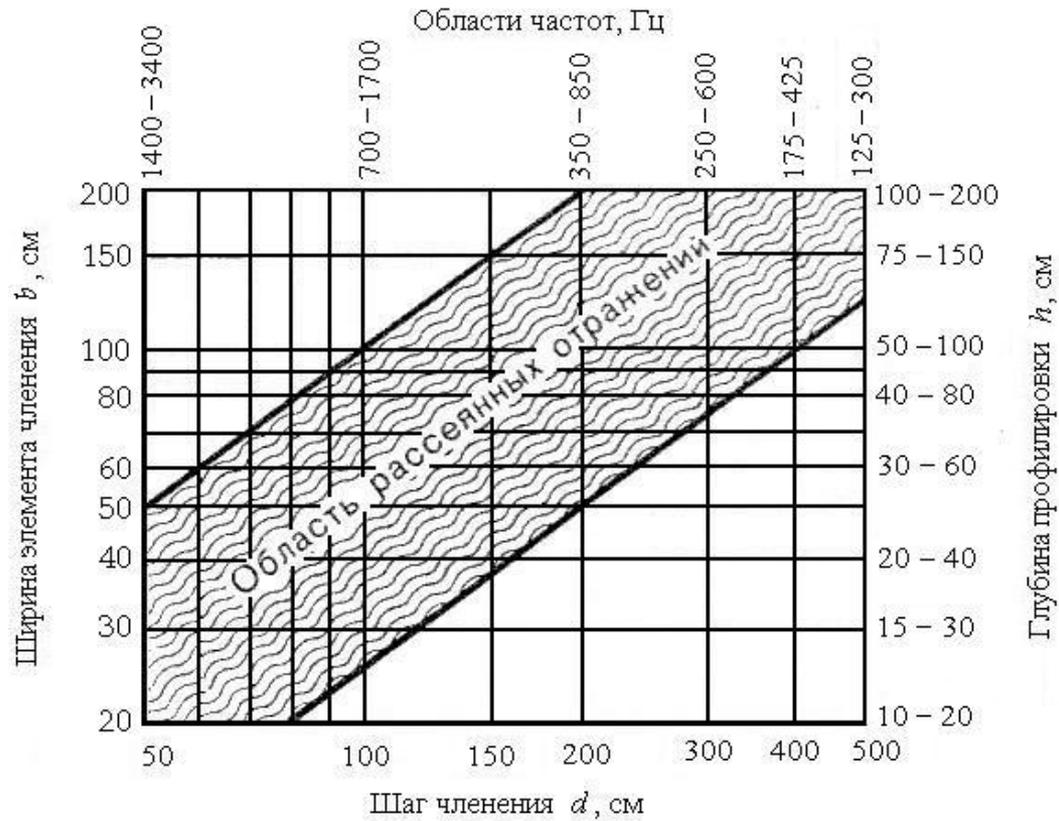
- Проверку допустимости применения геометрических отражений
- Построение лучевых эскизов
- Определение времени запаздывания отражений
- Определение уровней отраженного звука

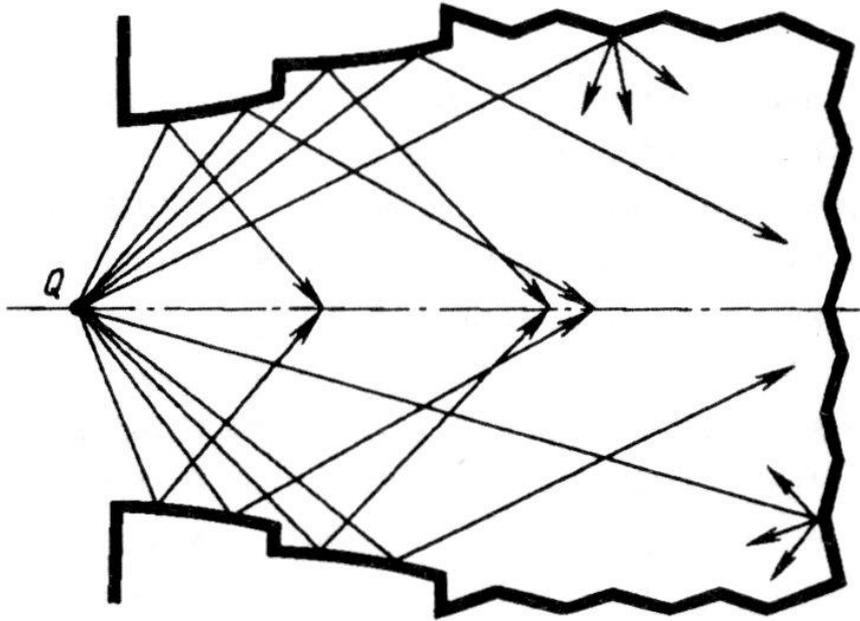
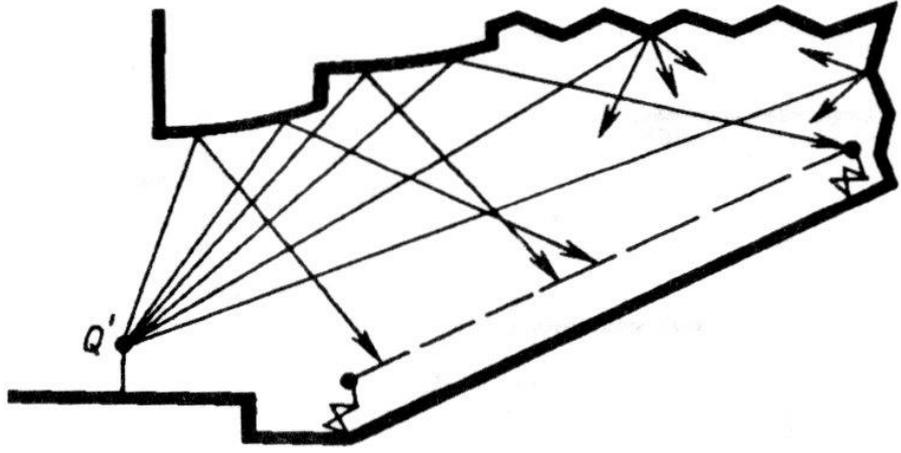
Для обеспечения достаточной степени
диффузности звукового поля
необходимо,
чтобы значительная часть
внутренних поверхностей помещения
создавала рассеянные отражения

Обеспечение достаточной степени диффузности звукового поля.



Р и с. 14. Продольный разрез концертного зала.

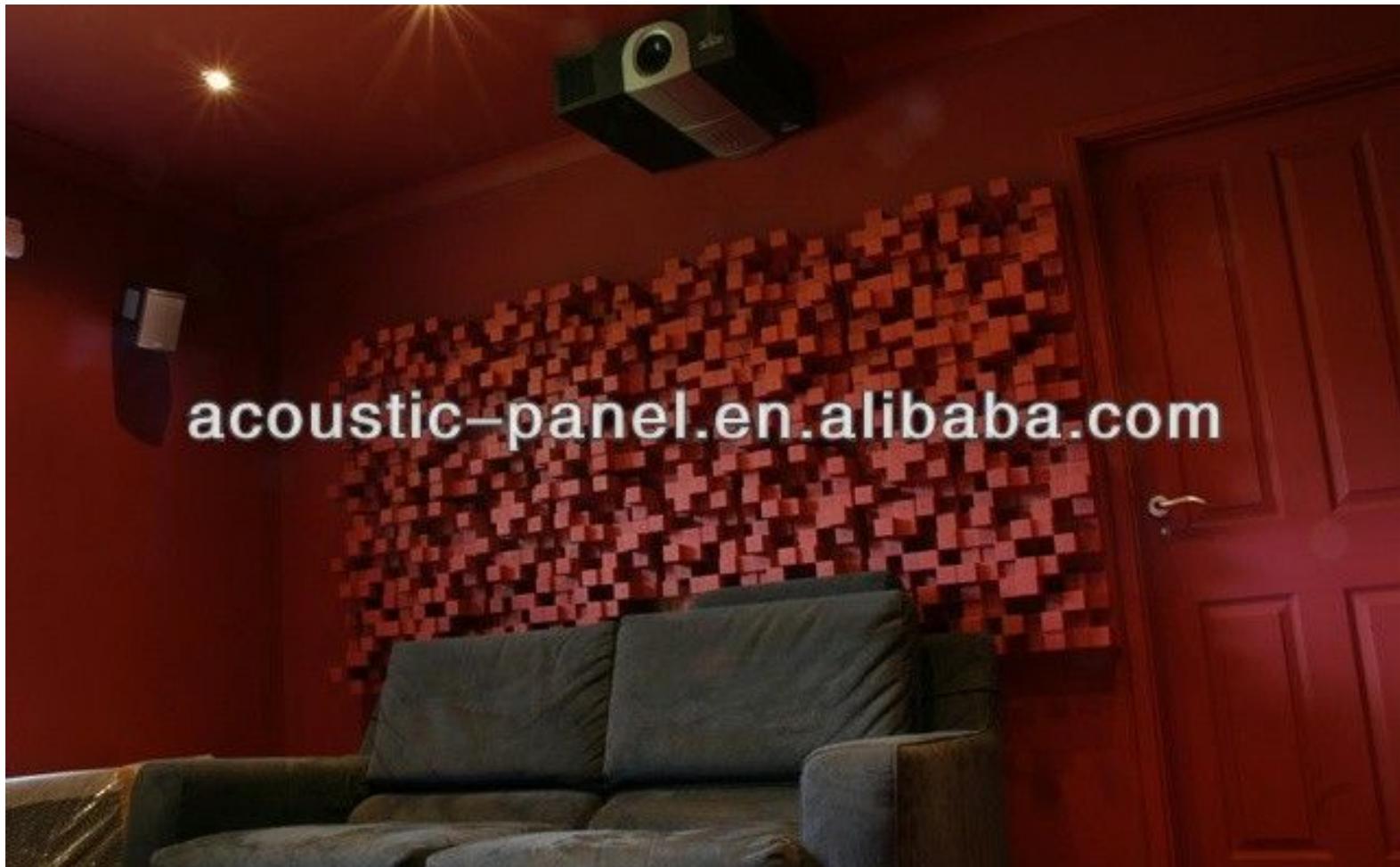
a**б****в**



3D панели диффузные







acoustic-panel.en.alibaba.com

A professional recording studio with walls covered in acoustic panels. The room is dimly lit with warm, ambient lighting. In the center, there is a desk with a large mixing console, a computer monitor, and a chair. Two large speakers are positioned on either side of the desk. The ceiling features exposed wooden beams and several spotlights. The overall atmosphere is that of a high-quality, modern recording environment.

acoustic-panel.en.alibaba.com

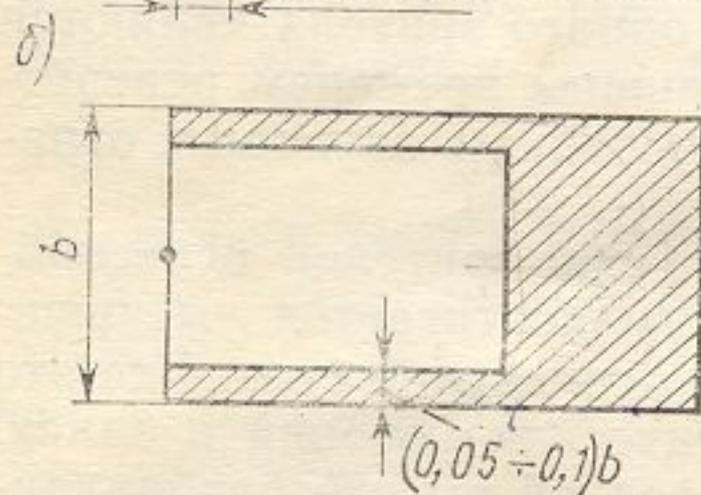
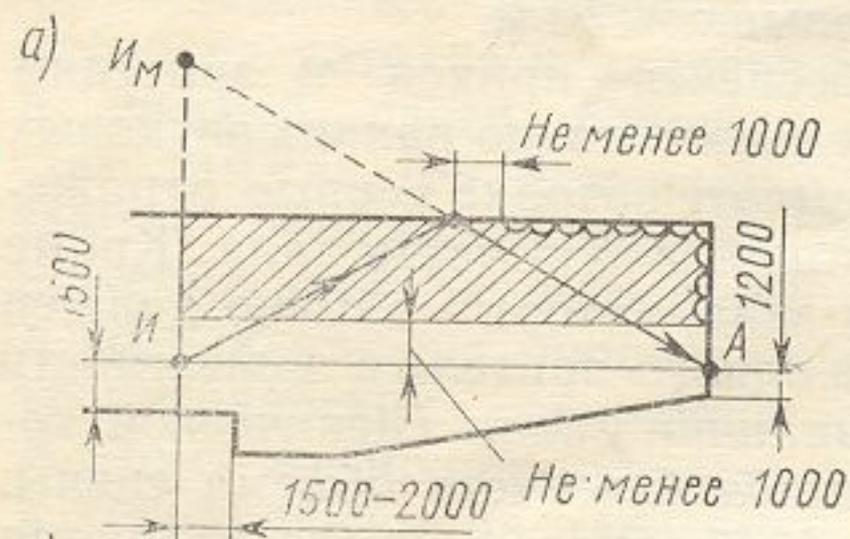


Рис. 23. Рекомендуемые зоны размещения звукопоглотителей в зале (заштрихованы):

a — на стенах; б — на потолке

ОПТИМАЛЬНЫЙ ОБЪЕМ ВОЗДУХА НА ОДНОГО СЛУШАТЕЛЯ

- АУДИТОРИЯ, ЛЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ,
КОНФЕРЕНЦ-ЗАЛ 4 КУБ.М
- ДРАМАТИЧЕСКИЙ ТЕАТР 5 КУБ. М
- ЗАЛ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ 4—6 КУБ. М
- ЗАЛ КАМЕРНОЙ МУЗЫКИ И ОПЕРЕТТЫ 6 КУБ. М
- ОПЕРНЫЙ ТЕАТР 6—7 КУБ. М
- ФИЛАРМОНИЯ,
КОНЦЕРТНЫЙ ЗАЛ (БЕЗ ОРГАНА) 8—9 КУБ. М
- КОНЦЕРТНЫЙ ЗАЛ С ОРГАНОМ И ХОРОМ 10—12 КУБ. М

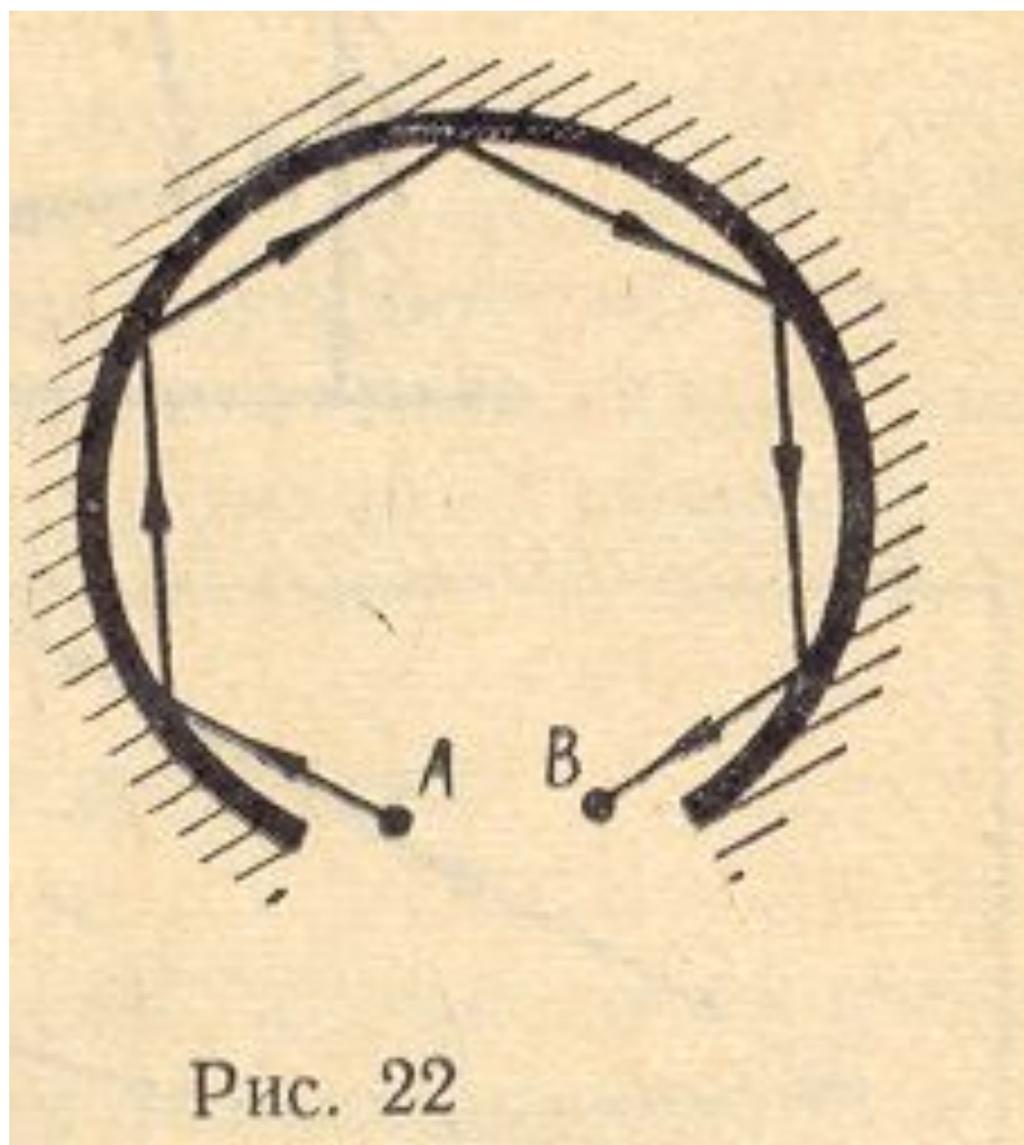


Рис. 22