

**МОСКОВСКИЙ АРХИТЕКТУРНЫЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ)**

КАФЕДРА "АРХИТЕКТУРНАЯ ФИЗИКА"

**ДИСЦИПЛИНА
"АРХИТЕКТУРНАЯ
ФИЗИКА"**

**Раздел
"АРХИТЕКТУРНАЯ
АКУСТИКА"**

**УЧЕБНО-
МЕТОДИЧЕСКИЕ
УКАЗАНИЯ**

**ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА
ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ ДЛЯ ЗАЛОВ
РАЗЛИЧНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ**

ЧЕБАНОВ А.Д.

МОСКВА • МАРХИ • 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Московский архитектурный институт
(государственная академия)»

А.Д. Чебанов

**Приближенная оценка времени
реверберации для залов различного
функционального назначения**

Учебно-методические указания

Москва
МАРХИ
2012

УДК 534.2
ББК 38.113
Ч 34

Чебанов А.Д.

Приближенная оценка времени реверберации для залов различного функционального назначения: учебно-методические указания / А.Д. Чебанов.—М.: МАРХИ, 2012. — 36 с.

Учебно-методические указания по разделу «Архитектурная акустика» дисциплины «Архитектурная физика» составлены на основе требований действующих СНиП 23-03-2003 «Защита от шума». Они предназначены для выполнения курсовых расчетно-графических работ (РГР) (5-й курс по ФГОС-2 и 4-й курс по ФГОС-3) или раздела дипломного проекта специалиста, бакалавра или магистра. Индивидуальные задания с исходными расчетными параметрами на РГР выдаются или согласовываются (по данным студента) преподавателем, а в составе дипломного проекта предопределяются принятыми объемно-планировочными решениями. Выполнение РГР или раздела дипломного проекта сопровождается консультациями преподавателей кафедры «Архитектурная физика».

Учебно-методические указания являются актуализированным дополнением к главе «Архитектурная акустика» в учебнике «Архитектурная физика» при подготовке к зачету (ФГОС-2) и экзамену (ФГОС-3), а также вариативным дополнением к учебно-методическим указаниям к курсовой расчетно-графической работе: Климухин А.А., Киселева Е.Г. «Проектирование акустики зрительных залов» (2011г).

© МАРХИ, 2012
© Чебанов А.Д. 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОСТЫЕ ФОРМУЛЫ БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ ДЛЯ РЕЧЕВЫХ И МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗАЛОВ СРЕДНЕЙ ВМЕСТИМОСТИ.....	4
1. Выбор оптимального числа зрителей	4
2. Выбор оптимального значения объема.....	4
3. Определение рациональных геометрических пропорций.....	5
4. Определение среднего времени запаздывания.....	7
5. Оптимальное время реверберации.....	7
6. Оценка степени диффузности в зале.....	9
7. Оценка разборчивости речи.....	10
8. Расчет времени реверберации проектируемого зала.....	12
<u>ПРИМЕР I. Акустическое проектирование зала драмтеатра на 800 зрителей.....</u>	<u>18</u>
<u>ПРИМЕР II. Акустическое проектирование зала театра оперетты на 1200 зрителей.....</u>	<u>26</u>
ЛИТЕРАТУРА.....	35

ПРОСТЫЕ ФОРМУЛЫ БЫСТРОЙ ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ ДЛЯ РЕЧЕВЫХ И МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗАЛОВ СРЕДНЕЙ ВМЕСТИМОСТИ

Практика предварительной оценки акустики речевых и музыкальных залов средней вместимости (курсовое и дипломное проектирование, профессиональное проектирование) зачастую требует использования простых наглядных зависимостей параметров акустического качества от геометрических и конструктивных параметров проектируемых залов.

К таким параметрам акустического качества относятся следующие величины:

- 1) Выбор оптимального числа зрителей в зависимости от функционального назначения зала и его объема.
- 2) Выбор оптимального значения объема в зависимости от функционального назначения зала и числа зрителей.
- 3) Определение рациональных геометрических пропорций зала в зависимости от его объема и функционального назначения.
- 4) Определение среднего времени запаздывания первых полезных звуковых отражений при выбранных пропорциях зала.
- 5) Нахождение приближенного оптимального значения времени реверберации для залов различного назначения.
- 6) Оценка степени диффузности звукового поля и уровня звукового давления для залов различного функционального назначения.
- 7) Оценка разборчивости речевого сигнала для залов различного функционального назначения.

1. Выбор оптимального числа зрителей.

Для речевого зала (аудитория, конференцзал, драматический театр) при заданном объеме V оптимальное число зрителей равно:

$$N_p = 3V^{2/3}, \text{ чел.}, \quad \text{где } V - \text{объем речевого зала, м}^3. \quad (1.1)$$

Для музыкального зала (камерный, оперетты, оперы и балета, симфонический):

$$N_m = 2,5V^{2/3}, \text{ чел.}, \quad \text{где } V - \text{объем музыкального зала, м}^3. \quad (1.2)$$

Допустимая погрешность при определении требуемого числа зрителей не должна превышать 10%.

2. Выбор оптимального значения объема.

Для речевого зала (аудитория, конференцзал, драматический театр) при заданном числе зрителей N_p из формулы (1.1) оптимальное значение объема равно:

$$V_p = 3^{-3/2} N_p^{3/2} = 0,192 N_p^{3/2}, \quad \text{м}^3. \quad (2.1)$$

Для музыкального зала (камерный, оперетты, оперы и балета, симфонический):

$$V_m = 2,5^{-3/2} N_m^{3/2} = 0,253 N_m^{3/2}, \quad \text{м}^3. \quad (2.2)$$

В частном, довольно распространенном случае, когда число зрителей речевого и музыкального зала равны 1000 чел, получим соотношение:

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{0,253}{0,192} = 1,3, \quad \text{т.е.} \quad V_m^{1000} = 1,3 V_p^{1000}, \quad \text{м}^3. \quad (2.3)$$

Допустимые погрешности при определении требуемых объемов не должны превышать 10%.

3. Определение рациональных геометрических пропорций.

Средняя длина свободного пробега звуковых волн в залах примерно равна средней высоте зала:

$$\ell = \frac{4V}{S}, \quad \text{м,} \quad \text{где} \quad V \quad - \quad \text{объем зала,} \quad \text{м}^3; \quad (3.1)$$

S – суммарная площадь ограждающих поверхностей зала, м^2 .

$$\text{Следовательно,} \quad \ell = H = \frac{4V}{S}, \quad \text{где} \quad H \quad - \quad \text{высота зала,} \quad \text{м.} \quad (3.2)$$

Теория и практика проектирования речевых залов указывает на желательность формирования геометрических пропорций зала на основе формантного речевого «золотого сечения»:

$$H:B:L = 2:3:5 \quad (3.3)$$

Из соотношения (3.3) для любого объема V можно получить масштабный параметр $\overline{X}_p$:

$$\overline{X}_p = 0,3218 V^{1/3}, \quad \text{м,} \quad \text{а затем и геометрические параметры} \quad (3.4)$$

речевого зала:

$$H = 0,64 V^{1/3}, \quad \text{м;} \quad (3.5)$$

$$(3.6) \quad B = 0,97 V^{1/3}, \quad \text{м};$$

$$(3.7) \quad L = 1,61 V^{1/3}, \quad \text{м}.$$

Суммарная площадь внутренних ограждающих поверхностей речевого зала с учетом соотношения (3.2) есть:

$$(3.8) \quad S_p = \frac{4V}{H} = 6,25V^{2/3}, \quad \text{м}^2.$$

Теория и практика проектирования музыкальных залов указывают на желательность формирования геометрических пропорций зала на основе формантного музыкального «золотого сечения»:

$$H:B:L = 3:5:8 \quad (3.9)$$

Из соотношения (3.9) для любого объема V можно получить масштабный параметр $\overline{X}_m$:

$\overline{X}_m = 0,2027 V^{1/3}$, м, а затем и геометрические параметры музыкального зала:

$$(3.10) \quad H = 0,61 V^{1/3}, \quad \text{м};$$

$$(3.11) \quad B = 1,01 V^{1/3}, \quad \text{м};$$

$$(3.12) \quad L = 1,62 V^{1/3}, \quad \text{м}.$$

Суммарная площадь внутренних ограждающих поверхностей музыкального зала с учетом соотношения (3.2) есть:

$$(3.13) \quad S_m = \frac{4V}{H} = 6,55V^{2/3}, \quad \text{м}^2.$$

Следует отметить, что как формантное речевое «золотое сечение» - $H:B:L = 2:3:5$, так и формантное музыкальное «золотое сечение» - $H:B:L = 3:5:8$ являются необходимыми, но недостаточными требованиями при формировании рациональных геометрических пропорций залов. Достаточными требованиями, очевидно, являются макро- и микроформообразующие структуры планов и разрезов залов, обеспечивающие равномерное распределение отраженных и рассеянных звуковых волн по всему объему зала. Теория и практика акустического проектирования указывают на то, что для оптимального восприятия речевого и, особенно, музыкального сигнала равномерное распределение боковых отражений имеет преимущество перед верхними (потолочными) по всему

объему зала. Это приводит к усилению бинаурального эффекта слухового восприятия речевого и музыкального сигнала, придавая ему большую легкость, пластичность и теплоту тембра.

Принцип формообразующей трансформации параллелепипедного объема зала с учетом формантного речевого и музыкального «золотого сечения» может быть, предположительно, использован в следующем виде:

а) Простые залы: аудитории, конференцзалы, кинотеатры – число макроструктурных отражающих элементов в плане и разрезе зала - $3 \div 5$;

б) Речевые и средние музыкальные залы: драмтеатры, камерные залы, киноконцертные залы, музыкальные залы (оперы, оперетты) - число макроструктурных отражающих элементов в плане и разрезе зала - $5 \div 8$;

в) Музыкальные залы: консерватории, филармонии, залы симфонической и органной музыки - число макроструктурных отражающих элементов в плане и разрезе зала - $8 \div 12$.

При этом средняя длина макроструктурных потолочных отражающих элементов для речевых залов составляет 2м – ($125\text{Гц} < f < 250\text{Гц}$) и 3м – для музыкальных залов ($63\text{Гц} < f < 125\text{Гц}$), где f – частота звука, Гц. При построении плана зала наиболее простой и в то же время рациональной является комбинированная трапециевидальная структурная форма, состоящая из передней криволинейной трапеции, средней прямой трапеции с углом раскрытия боковых стен не более $10\text{--}12^\circ$ (речевые и музыкальные залы) и задней обратной трапеции с примерно теми же углами закрытия сторон. Радиус действия прямого звука составляет 8-9м для речи и 10-12м для музыки, поэтому в этих зонах зала усиление прямого звука с помощью отраженного звука не рекомендуется. Во всех остальных зонах зала интенсивные первые полезные звуковые отражения должны охватывать все пространство зрительных мест, включая ложи, балконы, галереи.

4. Определение среднего времени запаздывания.

Время запаздывания первых полезных звуковых отражений от потолка (в продольном разрезе) и стен (по плану) определяется по известной формуле:

$$\Delta t_3 = \frac{\ell_{\text{п}}^i + \ell_{\text{о}}^i - r_{\text{о}}^i}{c}, \quad \text{сек,} \quad \text{где}$$

(4.1)

$\ell_{\text{п}}^i$ - длина луча, падающего на отражающую поверхность от источника звука;

$\ell_{\text{о}}^i$ - длина луча, отражающегося от поверхности, до i -й расчетной точки;

$r_{\text{о}}^i$ - длина пути прямого звукового луча от источника звука до i -й расчетной точки.

Контрольные точки $i = 1, 2, 3$ выбираются в начале партера, середине и в конце, а при наличии балкона выбирается контрольная точка $i = 4$ посередине балкона.

Контрольные точки $i = 1, 2, 3$ и 4 выбираются на высоте 1,2м от уровня пола (на уровне уха сидящего в кресле зрителя).

Допустимое время запаздывания согласно нормам проектирования составляет 0,020 – 0,025 сек (20-25 миллисекунд) для речевых залов и 0,025 – 0,03 сек (25-30 миллисекунд) для многофункциональных залов.

При построении профиля пола в продольном разрезе зала с учетом поглощения прямого звука зрителями, составляющего примерно 0,5 дБ/м, подъем ряда над рядом в партере составляет 12-15 см/ряд (шаг рядов 0,9÷1,0 м), на балконе – 25-30 см/ряд, с тем же шагом рядов.

Обеспечение нормативного времени запаздывания с помощью выбора рациональной формы зала в плане и разрезе должно способствовать отсутствию эхообразования по всему объему, а также хорошей разборчивости речевого и музыкального сигнала.

5. Оптимальное время реверберации.

Оптимальное (нормативное) время реверберации может быть рассчитано по различным приближенным формулам:

$$T = 0,29 \lg V_p, \text{ сек} - \text{аудитории, конференцзалы, драмтеатры,} \quad (5.1)$$

кинотеатры

$$T = 0,39 \lg V_m, \text{ сек} - \text{камерные, театры оперы и балета,} \quad (5.2)$$

оперетты, многофункциональные залы.

$$T = 0,45 \lg V_m, \text{ сек} - \text{залы симфонической музыки, филармонии,} \quad (5.3)$$

консерватории (без органа).

$$T = 0,54 \lg V_m, \text{ сек} - \text{залы органной музыки.} \quad (5.4)$$

Существуют еще более простые оценки времени реверберации для залов различного функционального назначения:

$$T = 0,065 V_p^{1/3}, \text{ сек} - \text{речевые залы;} \quad (5.5)$$

$$T = 0,075 V_m^{1/3}, \text{ сек} - \text{музыкальные залы,} \quad (5.6)$$

где V – расчетный объем зала, м^3 .

$$T = 0,45 V_p^{0,102}, \quad \text{сек} \quad - \quad \text{речевые залы;} \quad (5.7)$$

$$T = 0,58 V_m^{0,108}, \quad \text{сек} \quad - \quad \text{музыкальные залы,} \quad (5.8)$$

где $V_{p, m}$ - расчетный объем речевого или музыкального зала, м^3 .

$$T = 0,214 \frac{V_p}{N_p}, \quad \text{сек} \quad - \quad \text{речевые залы;} \quad (5.9)$$

$$T = 0,198 \frac{V_m}{N_m}, \quad \text{сек} \quad - \quad \text{музыкальные залы,} \quad (5.10)$$

где N_p , N_m - число зрителей речевого и музыкального залов.

$$T = 0,01V_p^{0,559}, \quad \text{сек} \quad - \quad \text{речевые залы;} \quad (5.11)$$

$$T = 0,011V_m^{0,545}, \quad \text{сек} \quad - \quad \text{музыкальные залы.} \quad (5.12)$$

Полученные значения времен реверберации по формулам (5.5)÷(5.12) должны с 10% погрешностью соответствовать значениям оптимального (нормативного) времени реверберации, полученных по формулам (5.1)÷(5.4).

В качестве контроля предложенных формул для расчета времени реверберации может быть использована классическая формула Эйринга:

$$T = \frac{0,163V_{p,m}}{\overline{\varphi(\alpha)}S_{\text{общ } p,m} + n \cdot V_{p,m}}, \quad \text{сек,} \quad (5.13)$$

где средний коэффициент звукопоглощения $\overline{\alpha}$ и функция поглощения по прежнему определяются по формулам (6.6)÷(6.7), $V_{p,m}$ – расчетный объем структурированного речевого и музыкального зала, n – коэффициент поглощения звука в воздухе согласно таблице 1. Полученные приближенные значения времени реверберации должны иметь 10% погрешность по сравнению с классическим временем, полученным по формуле (5.13).

6. Оценка степени диффузности в зале.

Степень диффузности звукового поля в зале определяется по формуле:

$$R = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_n} = \left(\frac{r}{r_n} \right)^2, \quad \text{где} \quad (6.1)$$

ϵ_d , ϵ_n - средние плотности диффузного и прямого звука; r – расстояние от источника звука до контрольной точки в партере, м; r_n – «радиус гулкости» зала, м.

«Радиус гулкости» для большинства речевых залов находится в пределах $3 < r_n < 4$ м, а для большинства музыкальных – в пределах $3,5 < r_n < 4,5$ м.

Для речевого зала - $r = V_p/2 = 0,48V_p^{1/3}$, м; для музыкального зала - $r = V_m/2 = 0,5V_m^{1/3}$, м, поэтому:

$$R_p = \frac{0,23V_p^{2/3}}{r_n^2} \quad - \quad \text{степень диффузности речевого зала;} \quad (6.2)$$

$$R_m = \frac{0,25V_m^{2/3}}{r_n^2} \quad - \quad \text{степень диффузности музыкального зала.} \quad (6.3)$$

С другой стороны, степень диффузности звукового поля является не только функцией линейных размеров зала, но и функцией от общего звукопоглощения в зале, т.е. зависит от среднего коэффициента звукопоглощения:

$$R_p = \frac{\overline{\alpha_p}}{[-\ln(1 - \overline{\alpha_p}) - \overline{\alpha_p}]}, \quad (6.4)$$

где $\overline{\alpha_p}$ - средний коэффициент звукопоглощения в речевом зале;

$$R_m = \frac{\overline{\alpha_m}}{[-\ln(1 - \overline{\alpha_m}) - \overline{\alpha_m}]}, \quad (6.5)$$

где $\overline{\alpha_m}$ - средний коэффициент звукопоглощения в музыкальном зале.

Средний коэффициент звукопоглощения для речевых залов средней вместимости с традиционной отделкой интерьера равен:

$$\overline{\alpha_p} = 1 - e^{-2,5V_p^{-0,226}}, \quad (6.6)$$

где V_p – расчетный объем речевого зала, м³.

Средний коэффициент звукопоглощения для музыкальных залов средней вместимости с традиционной отделкой интерьера равен:

$$\overline{\alpha}_m = 1 - e^{-2,17V_m^{-0,212}},$$

(6.7)

где V_m – расчетный объем музыкального зала, m^3 .

Нормативное значение степени диффузности речевых залов составляет: $1 < R_p < 5$, а для музыкальных – $2 < R_m < 10$.

Обеспечение нормативного значения степени диффузности (равномерного распределения) звуковых волн в зале обеспечивает хорошую разборчивость речевого и музыкального сигнала, расширяет пространственную ориентацию на источник (источники) звука, обеспечивает более мягкое тембральное звучание.

7. Оценка разборчивости речи.

Оценка разборчивости речи по Пойтцу, определяемая потерей артикуляции произносимых согласных, в процентах может быть найдена по простой формуле:

$$K_p = 0,625 \left(\frac{r_c}{r_n} \right)^2 \cdot T, \%,$$

(7.1)

где T – расчетное время реверберации в зале, сек; r_c – расстояние от источника звука до зрителя, м; $r_n = \sqrt{A/50}$ – радиус гулкости зала, м; $A = \overline{\alpha}S$ – общее эквивалентное звукопоглощение в зале, m^2 ; $\overline{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения в зале; S – суммарная площадь ограждающих поверхностей в зале, m^2 .

Суммарную площадь ограждающих поверхностей в зале можно с достаточной точностью найти по формулам:

а) речевые залы средней вместимости с традиционной акустической отделкой интерьера:

$$S_p = 2N_p, \quad m^2,$$

(7.2)

где N_p – число зрителей речевого зала;

б) музыкальные залы средней вместимости с традиционной акустической отделкой интерьера:

$$S_m = 2,8N_m, \quad m^2,$$

(7.3)

где N_m – число зрителей музыкального зала.

Время реверберации можно приближенно рассчитать по одной из приведенных формул раздела 5, в соответствии с заданными значениями

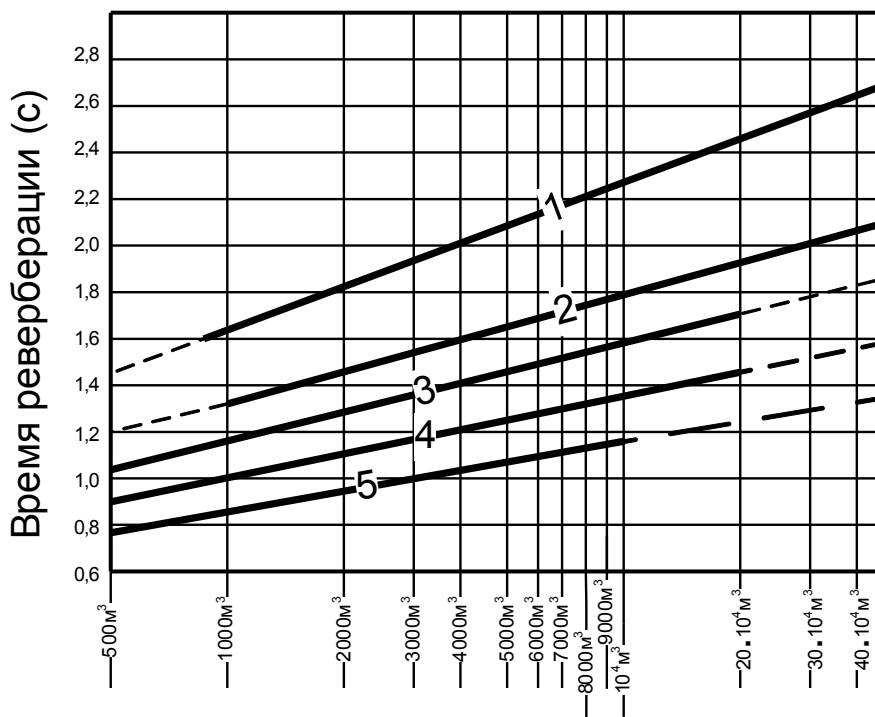
расчетного объема зала и числа зрителей, а также с учетом функционального назначения проектируемого зала. Формулы для средних коэффициентов звукопоглощения для рассматриваемых залов представлены в разделе 6.

Количественные значения коэффициента разборчивости речи по Пойтцу, определяемого потерей артикуляции произносимых согласных, следующие:

- 1) $K_p < 10\%$ - идеальная разборчивость;
- 2) $K_p = 10 \div 15\%$ - удовлетворительная разборчивость;
- 3) $K_p > 15\%$ - неудовлетворительная разборчивость;
- 4) $K_p > 30\%$ - неприемлемая разборчивость.

Таблица 1.

Коэффициент затухания звука в воздухе			
Октавные полосы (Гц)	125 - 1000	2000	4000
Коэффициент затухания α	0	0,009	0,022



- 1 – залы для ораторий и органной музыки;
 2 – залы для симфонической музыки;

- 3 – залы для камерной музыки, залы оперных театров;
- 4 – залы многоцелевого назначения,
- 5 – лекционные залы, залы заседаний, залы драматических театров, кинозалы, пассажирские залы.

Допускается отклонение от оптимальной величины:

- на средних частотах (500-2000 Гц) не более, чем на 10%;
- на низких частотах (125 Гц) допускается увеличение времени реверберации на 20%.

Рис. 1. Рекомендуемое время реверберации на средних частотах (500-1000 Гц) для залов различного назначения в зависимости от их объема.

После того, как определено время реверберации на средних частотах (500-1000 Гц) по рис.1 или по ранее приведенным формулам, необходимо его скорректировать по частотному спектру воспроизводимых в зале сигналов. Здесь могут быть предложены следующие рекомендации:

а) для лекционных аудиторий, конференцзалов рекомендуется не изменять время реверберации на всех частотах, кроме частоты 125 Гц (уменьшить на 15%);

б) залы, в которых исполняемые музыкальные произведения характеризуются быстрыми ритмами и особенно с применением средств электроакустики, время реверберации по частотам не изменяется, но его рекомендуется уменьшить на 10-20%;

в) залы, которые используются как для музыкальных постановок, так и для проведения собраний, спектаклей (многоцелевые залы), должны иметь разное время реверберации на разных частотах: для частоты 2000 Гц берется такое же время реверберации, как и на частоте 500 Гц, а на частоте 125 Гц допускается увеличение на 20% (процентный состав зависит от годового соотношения представлений и концертов с музыкальным исполнением: чем их больше, тем больший процент следует брать).

8. Расчет времени реверберации проектируемого зала

1) Расчет времени реверберации начинается с расчета общей эквивалентной площади звукопоглощения (ЭПЗ).

Общая ЭПЗ на частоте, для которой ведется расчет, находится по формуле (1):

$$A_{\text{общ}(125,50 \dots 2000)} = \sum \alpha_i S_i + \sum A_{\text{крес. слуш.}} + \alpha_{\text{доб}} S_{\text{общ}}, \quad (8.1)$$

где $\sum \alpha_i S_i$ — сумма произведений площадей отдельных поверхностей S , м² на их коэффициент звукопоглощения α для данной частоты.

$\sum A_{\text{крес. слуш.}}$ - сумма ЭПЗ, м² слушателей и кресел, которая рассчитывается по формуле (2):

$$\sum A_{\text{крес. слух.}} = (0,7 \cdot N \cdot A_{\text{слух. в.кр.}} + 0,3 \cdot N \cdot A_{\text{кр. без. слух.}}) \quad (8.2)$$

где $0,7 \cdot N \cdot A_{\text{слух. в.кр.}}$ - 70 % кресел зала заполнены слушателями; N – общее число кресел в зале;

$0,3 \cdot N \cdot A_{\text{кр. без. слух.}}$ - 30 % кресел в зале пусты, т.к. в расчете времени реверберации зала, как правило, принимается заполнение слушателями 70% общего количества мест, ЭПЗ остальных мест принимается как для пустых кресел. В залах, для которых наиболее вероятно заполнение слушателями менее 70% мест, следует расчетный процент заполнения соответственно уменьшать.

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.

$A_{\text{крес. слух.}}$ - коэффициенты звукопоглощения разных материалов и конструкций, а также ЭПЗ слушателей и кресел даны в таблицах 2 и 3.

Приведенные в таблицах 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.

$\alpha_{\text{доб}}$ — коэффициент добавочного звукопоглощения, учитывающий эффект, вызываемый прониканием звуковых волн в различные щели и отверстия, колебаниями разнообразных гибких элементов и т. п. Коэффициент этот учитывает также поглощение звука осветительной арматурой и другим оборудованием зала.

Коэффициент добавочного звукопоглощения $\alpha_{\text{доб}}$ залов 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 (например, многочисленные щели и отверстия на внутренних поверхностях зала, многочисленные гибкие элементы — гибкие абажуры и панели светильников и т.п.), следует эти значения 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:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{\text{общ}}}{S_{\text{общ}}}, \quad (8.3)$$

где: $A_{\text{общ}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения (ЭПЗ), м²;
 $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения (КЗП);
 $S_{\text{общ}}$ – площадь всех внутренних поверхностей помещения (стены, потолок, пол, авансцена и т.д.), м².

2) Расчет времени реверберации.

Для определения времени реверберации достаточно произвести расчет на трех частотах: 125, 500 и 2000 Гц.

Подсчет времени реверберации ведется по формуле Эйринга:

$$T = \frac{0,163 V}{\varphi(\bar{\alpha}) S_{\text{общ}} + nV}, \quad \text{с,}$$

(8.4)

где V – объем зала, м³; $S_{\text{общ}}$ – суммарная площадь всех ограждающих поверхностей зала, м²; $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения в зале;
 $\varphi(\bar{\alpha}) = -\ln(1 - \bar{\alpha})$ – функция среднего коэффициента звукопоглощения $\bar{\alpha}$, значения которой приведены в таблице 4; n – коэффициент, учитывающий затухание звука в воздухе. В октавных полосах 125-1000 Гц $n = 0$, в октаве 2000 Гц $n = 0,009$, в октаве 4000 Гц $n = 0,022$.

Формула (4) позволяет получить расчетное время реверберации, которое будет соответствовать реальному только в том случае, если звуковое поле в помещении можно считать достаточно диффузным. Условиями его обеспечения являются отсутствие заметной разницы в основных размерах помещения (соразмерность помещения), непараллельность стен, равномерное распределение поглотителей и членение значительной части внутренних поверхностей. Если соотношение Н:В:Л, рекомендованное для соответствующего помещения, выдержано, потолки и стены зала представляют многоэлементную систему, то это еще не является полной гарантией диффузности. Наиболее частой причиной отсутствия диффузности является ошибочная сплошная звукопоглощающая отделка потолка или двух противоположных стен. При такой отделке звуковые волны распространяющиеся между потолком и полом (или между противоположными боковыми стенами), затухают заметно быстрее и реальное время реверберации оказывается меньше расчетного по формуле Эйринга. Если же потолок поглощающий, а стены сильно отражающие и слабо расчленены, то расчетное время реверберации также окажется меньше истинного.

Чтобы процесс затухания звука в вертикальной плоскости (пол – потолок) и в горизонтальной плоскости (противоположные боковые стены) не слишком отличались друг от друга, необходимо, чтобы средний коэффициент звукопоглощения – $\bar{\alpha}$ (К.З.П.) этих поверхностей не очень сильно отличались друг от друга, т.е.

$$\frac{A_{пот} + A_{пол}}{S_{пот} + S_{пол}} = \frac{A_{стен}}{S_{стен}}.$$

(8.5)

Подсчитанное по формуле (8.4) время реверберации даже при выполнении рекомендаций по удельному объему на одного зрителя, но при нерациональном выборе средств звукопоглощения, не гарантирует того, что реверберационный процесс обеспечивает наилучшие условия восприятия звуковых сигналов. Для этого необходимо скорректировать полученное время реверберации с его оптимальным значением (выполнить условие оптимума реверберации).

Таблица 2

Эквивалентная площадь звукопоглощения для слушательских кресел (м²)

Зрители и кресла	Эквивалентная площадь поглощения, $A_{крес. слух.}$ (м²)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Зритель на кресле мягком и полумягком	0,2 5	0,3	0,4	0,45	0,45	0,4
На жестком кресле	0,2	0,25	0,3	0,35	0,35	0,35
Кресло мягкое	0,1 5	0,2	0,2	0,25	0,3	0,3
Кресло полумягкое	0,0 8	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2
Кресло обитое искусственной кожей	0,0 8	0,1	0,12	0,1	0,1	0,08
Кресло жесткое с фанерной спинкой и сиденьем	0,0 2	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05

Таблица 3

Коэффициент звукопоглощения материалов и конструкций, эквивалентная площадь поглощения зрителей

Материалы и конструкции	Коэффициенты звукопоглощения для октавных полос, α (Гц)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Стена оштукатуренная окрашенная клеевой краской	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04

Материалы и конструкции	Коэффициенты звукопоглощения для октавных полос, α (Гц)					
	125	250	500	1000	2000	4000
То же окрашенная масляной краской	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Бетон окрашенный	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Мрамор, гранит	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Штукатурка по металлической сетке с воздушной полостью позади	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Панель деревянная толщиной 5-10 мм с воздушной полостью 50-100 мм	0,3	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
Переплеты оконные застекленные	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	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Ковер шерстяной толщиной 9 мм по бетону	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
То же, на войлочной подкладке толщиной 3мм	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,37
Портьеры плюшевые со складками плотностью ткани 0,65 кг/м ²	0,15	0,35	0,55	0,7	0,7	0,65
Проем сцены, оборудованный декорациями	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Киноэкран	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Плиты «Акмигран» 300х300х20 мм						
Вплотную	0,05	0,15	0,5	0,65	0,65	0,7
С воздушным промежутком 50 мм	0,15	0,55	0,55	0,65	0,65	0,7
С воздушным промежутком 100 мм	0,25	0,55	0,55	0,65	0,65	0,7
Плиты «Москва» вплотную	0,1	0,25	0,8	0,6	0,5	0,35
То же с воздушным промежутком 100 мм	0,2	0,6	0,8	0,6	0,5	0,35
Плиты «Мелодия» вплотную	0,15	0,25	0,8	0,4	0,2	0,2
То же с воздушным промежутком 100 мм	0,25	0,5	0,8	0,45	0,3	0,3

Материалы и конструкции	Коэффициенты звукопоглощения для октавных полос, α (Гц)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Штукатурка гипсовая толщиной 20 мм с воздушной прослойкой 50-150 мм	0,3	0,25	0,1	0,08	0,05	0,04
Фибролит толщиной 50 мм с воздушной прослойкой 50-160 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,6	0,65
Плиты гипсовые перфорированные с пористым заполнителем	0,05	0,2	0,4	0,75	0,55	0,35
то же с воздушной прослойкой 50 мм	0,05	0,4	0,75	0,55	0,55	0,3
100мм	0,15	0,6	0,75	0,55	0,5	0,3
200 мм	0,25	0,65	0,65	0,6	0,55	0,3
Плиты гладкие декоративные с пористым заполнителем без воздушной прослойки	0,05	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2
то же с воздушной прослойкой 50 мм	0,15	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1
100 мм	0,25	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1
Плиты "Силапор" без воздушной прослойки	0,2	0,5	0,65	0,6	0,6	0,6
с воздушной прослойкой 100 мм	0,5	0,7	0,6	0,55	0,55	0,6
Панели по каркасу из брусков 3 x 10 см, обитые фанерой с шагом ячеек 0,5 x 0,7 и воздушной прослойкой 10см	0,32	0,35	0,19	0,13	0,11	0,1
Перфорированные конструкции из фанеры толщиной 3 мм по деревянным рамкам 60 x 60 с асбестовой ватой в мешковине 50, диаметр отверстия 6 мм, шаг 25 мм	0,2	0,46	0,58	0,52	0,42	0,3
Плиты ПА/С с набрызгом без воздушной прослойки	0,05	0,15	0,6	0,8	0,85	0,8
с воздушной прослойкой 50 мм	0,1	0,3	0,8	0,85	0,8	0,7
с воздушной прослойкой 100	0,15	0,5	0,85	0,8	0,8	0,7

Материалы и конструкции	Коэффициенты звукопоглощения для октавных полос, α (Гц)					
	125	250	500	1000	2000	4000
мм						
Фанера толщиной 6 мм и слоем минер. ваты толщиной 100 мм	0,6	0,23	0,14	0,09	0,08	0,02

Таблица 4

Значения функции $-\ln(1-\bar{\alpha})$ в зависимости от величины среднего
коэффициента звукопоглощения $\bar{\alpha}$ в зале

$\bar{\alpha}$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,1	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,19	0,2	0,21
0,2	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,29	0,3	0,32	0,33	0,34
0,3	0,36	0,37	0,39	0,4	0,42	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49
0,4	0,51	0,53	0,54	0,56	0,58	0,6	0,62	0,64	0,65	0,67
0,5	0,69	0,71	0,73	0,76	0,78	0,8	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

Пример: Для $\bar{\alpha} = 0,24$ находим по таблице $-\ln(1-\bar{\alpha}) = 0,27$; для $\bar{\alpha} = 0,32$ по таблице определяем $-\ln(1-\bar{\alpha}) = 0,39$.

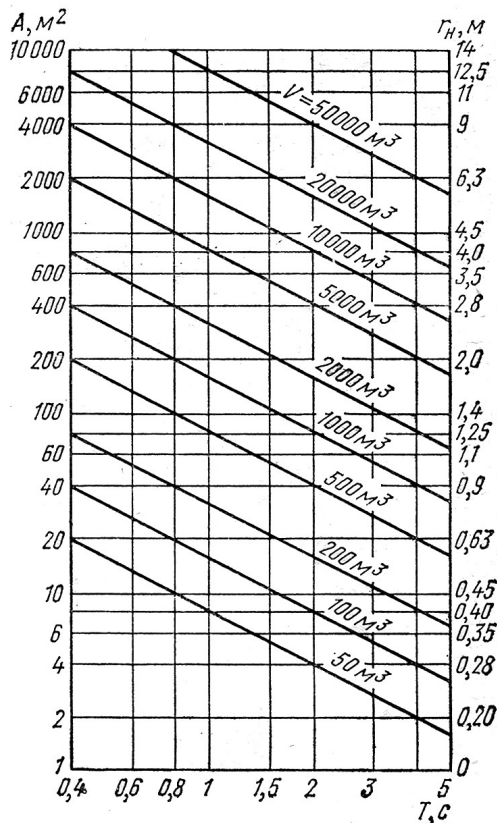


Рис. 2. Зависимость радиуса гулкості Γ_n от эквивалентной поглощающей поверхности A , объема V и времени реверберации T помещения.

ПРИМЕР I. Акустическое проектирование зала драмтеатра на 800 зрителей.

1. Исходный расчетный объем зала V_p найдем по формуле (2.1):

$$V_p = 0,192(800)^{3/2} = 4345 \text{ м}^3, \quad (\text{I.1})$$

что соответствует удельному объему на одного зрителя, равному:

$$V_p^1 = 4345/800 = 5,43 \text{ м}^3/\text{чел.}$$

2. Рациональные геометрические параметры зала – высоту, ширину и длину найдем по формулам формантного речевого «золотого сечения» – (3.5÷3.7).

$$(I.2) \quad H = 0,64 \sqrt[3]{V} = 0,64 \cdot 16,317 = 10,44 \quad \text{м};$$

$$(I.3) \quad B = 0,97 \sqrt[3]{V} = 0,97 \cdot 16,317 = 15,83 \quad \text{м};$$

$$(I.4) \quad L = 1,61 \sqrt[3]{V} = 1,61 \cdot 16,317 = 26,27 \quad \text{м}.$$

Проверка: $H \cdot B \cdot L = V = 4341,5 \text{ м}^3$ (4345 м^3 – исходный объем).

Суммарная площадь внутренних ограждающих поверхностей зала драмтеатра равна:

$$S_p = 6,25 V^{2/3} = 6,25 \cdot 266,2577 = 1664 \text{ м}^2. \quad (I.5)$$

3. Для построенного по методу мнимых источников пятизвенного профиля потолка в разрезе зала драматического театра и трехзвенной трапециевидальной формы плана, получим по формуле (4.1) времена запаздывания первых полезных звуковых отражений для всех четырех контрольных точек – (начало партера, середина, конец партера и середина балкона):

Разрез:

$$1) \Delta t_1 = 0,025 \text{ с}, \quad (I.6)$$

$$2) \Delta t_2 = 0,02 \text{ с}, \quad (I.7)$$

$$3) \Delta t_3 = 0,018 \text{ с}, \quad (I.8)$$

$$4) \Delta t_4 = 0,017 \text{ с}. \quad (I.9)$$

План:

$$1) \Delta t_1 = 0,026 \text{ с}, \quad (I.10)$$

$$2) \Delta t_2 = 0,022 \text{ с}, \quad (I.11)$$

$$3) \Delta t_3 = 0,019 \text{ с}, \quad (I.12)$$

$$4) \Delta t_4 = 0,018 \text{ с}. \quad (I.13)$$

4. Предположив, что коэффициент акустической трансформации параллелепипедного объема зала находится в пределах $0,8 < K_\phi < 1,0$ и выбрав среднее значение - $\overline{K_\phi} = 0,9$, получим расчетный объем зала:

$$(I.14) \quad \overline{V_p} = 0,9 \sqrt[3]{V_p} = 0,9 \cdot 4345 = 3910 \quad \text{м}^3,$$

при этом удельный объем на одного зрителя составит:

$$(I.15) \quad \overline{V_p}^{(1)} = 3910/800 = 4,88 \quad \text{м}^3,$$

что хорошо согласуется с нормативными требованиями.

Для полученного значения расчетного объема $\overline{V_p}$ находим оптимальное время реверберации на средних частотах в соответствии с формулами (5.1), (5.5), (5.7), (5.9), (5.11) и (5.13):

$$1) T = 0,29 \lg 3910 = 1,04 \text{ сек}; \quad (I.16)$$

$$2) T = 0,065 \cdot (3910)^{1/3} = 1,02 \text{ сек}; \quad (I.17)$$

$$3) T = 0,45 \cdot (3910)^{0,102} = 1,046 \text{ сек}; \quad (I.18)$$

$$4) T = 0,214 \cdot (3910/800) = 1,045 \text{ сек}; \quad (I.19)$$

$$5) T = 0,01 \cdot (3910)^{0,559} = 1,018 \text{ сек}; \quad (I.20)$$

$$6) T = \frac{0,163 \cdot 3919}{2,5(3910)^{-0,226} \cdot 2 \cdot 800 \cdot 0,93} = 1,03 \text{ сек.} \quad (I.21)$$

Полученные значения времен реверберации по предложенным приближенным формулам отличаются друг от друга не более чем на 10%, что позволяет использовать любую из них для быстрой оценки акустического качества зала драмтеатра.

5. Диффузность звукового поля в зале.

Степень диффузности звукового поля в речевом зале находим по формулам (6.2) и (6.4), предварительно определив средний коэффициент звукопоглощения и функцию звукопоглощения:

$$\overline{\alpha_p} = 1 - e^{-2,5V_p^{-0,226}} = 1 - e^{-2,5(3910)^{-0,226}} = 0,32, \quad (I.22)$$

$$\varphi(\overline{\alpha_p}) = -\ln(1 - \overline{\alpha_p}) = 2,5V_p^{-0,226} = 2,5(3910)^{-0,226} = 0,38.$$

Тогда при радиусе гулкости $r_H = 3,2$ м, получим:

$$R_p = \frac{0,23(3910)^{2/3}}{3,2^2} = 4,6 \text{ и} \quad (I.23)$$

$$R_p = \frac{0,32}{0,38 - 0,32} = 5,3. \quad (I.24)$$

Полученные значения степени диффузности звукового поля в речевом зале с 10% точностью соответствуют нормативным требованиям:

$$1 < R_p < 5, \quad (I.25)$$

что позволяет надеяться на улучшение разборчивости речевого сигнала, расширение пространственной ориентации на источник звука, обеспечение более мягкого тембрального звучания.

6. Разборчивость речи в речевом зале.

Разборчивость речи по Пойтцу, определяемое потерей артикуляции произносимых согласных в процентах, находим по формуле (7.1), приняв во внимание полученные ранее значения времени реверберации и радиуса гулкости:

$$1) T = 1,04 \text{ сек, } r_n = 3,2 \text{ м, } r_c = 15 \text{ м: } (r_c < 5r_n):$$

$$K_p = 0,652 \cdot (15^2/3,2^2) \cdot 1,04 = 14,8\% \quad (I.26)$$

$$2) T = 1,02 \text{ сек, } r_n = 3,2 \text{ м, } r_c = 15 \text{ м:}$$

$$K_p = 0,652 \cdot (225/10,24) \cdot 1,02 = 14,4\% \quad (I.27)$$

$$3) T = 1,046 \text{ сек, } r_n = 3,2 \text{ м, } r_c = 15 \text{ м:}$$

$$K_p = 0,652 \cdot (225/10,24) \cdot 1,046 = 14,9\% \quad (I.28)$$

$$4) T = 1,045 \text{ сек, } r_n = 3,2 \text{ м, } r_c = 15 \text{ м:}$$

$$K_p = 0,652 \cdot (225/10,24) \cdot 1,045 = 14,3\% \quad (I.29)$$

$$5) T = 1,03 \text{ сек, } r_n = 3,2 \text{ м, } r_c = 15 \text{ м:}$$

$$K_p = 0,652 \cdot (225/10,24) \cdot 1,03 = 14,7\% \quad (I.30)$$

Полученные значения коэффициента разборчивости речи по Пойтцу в процентах находятся в диапазоне $10\% < K_p < 15\%$, что соответствует удовлетворительной разборчивости в зале драмтеатра на 800 зрителей.

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ И ПЛАН ЗАЛА ДРАМТЕАТРА НА 800 ЗРИТЕЛЕЙ

Для расчетного объема зала драмтеатра, равного $\overline{V}_p = 3910 \text{ м}^3$, рациональные геометрические параметры – высота, ширина и длина равны:

$$H = 0,64 \cdot \overline{V}_p^{1/3} = 0,64 \cdot 15,75 = 10,08 \text{ м;}$$

$$B = 0,97 \cdot \overline{V}_p^{1/3} = 0,97 \cdot 15,75 = 15,27 \text{ м;}$$

$$L = 0,61 \cdot \overline{V}_p^{1/3} = 0,61 \cdot 15,75 = 25,35 \text{ м.}$$

При известных расчетных геометрических пропорциях зала, продольный вертикальный разрез и форма плана формируются на основе известного метода мнимых источников, позволяющего получить нормативное время запаздывания и равномерное распределение первых полезных звуковых отражений по зрительским местам, включая балкон (рис. 1.1 – 1.2).

Увеличение степени диффузности звукового поля происходит за счет полученной построением пятизвенной структуры потолка, а также за счет трехзвенной структуры плана зала и приемлемого (в пределах 10°) углового раскрытия боковых стен.

Передний акустический козырек имеет двойную плоскую или

одинарную криволинейную форму, особенность которой состоит в том, что она позволяет равномерно распределить первые полезные звуковые отражения как в зал, так и на сцену, обеспечивая при этом улучшение акустического взаимопонимания актерского ансамбля.

В партере, при наличии двухметрового переднего прохода и двух полутораметровых боковых, располагаются 24 ряда по 25 кресел в ряду, что составляет 600 зрителей. На балконе, с метровым передним проходом и центральным двухметровым, располагается 8 рядов по 25 кресел в ряду, что составляет 200 зрителей.

Время запаздывания первых полезных звуковых отражений определяется по формуле (4.1) соответственно для вертикального разреза и плана:

1) Продольный вертикальный разрез:

Контрольная точка  : $\Delta t_1 = 0,025$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_2 = 0,02$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_3 = 0,018$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_4 = 0,017$ сек.

2) Горизонтальный план:

Контрольная точка  : $\Delta t_1 = 0,026$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_2 = 0,022$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_3 = 0,019$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_4 = 0,018$ сек.

Для увеличения степени диффузности звукового поля на боковых стенах можно рекомендовать расположить с шагом четыре метра равносторонние ($a = 1\text{м}$) треугольные пирамидальные диффузоры – рассеиватели с переменной высотой, обращаемой в ноль на уровне полтора метра от пола партера. Увеличение степени диффузности звукового поля с помощью предложенной конструкции треугольных пирамидальных диффузоров-рассеивателей приведет к улучшению разборчивости речевого сигнала, усилению пространственной ориентации на источник (источники) звука, обеспечит более мягкую тембральную окраску речи.

Возможные варианты формирования вертикального продольного

разреза и горизонтального плана зала драматического театра на 800 зрителей показаны на рис. 1.1 – 1.8. Предполагается, что внутренняя облицовка ограждающих поверхностей зала драмтеатра традиционная: потолок – сухая штукатурка, боковые стены – две трети по высоте от потолка – древесно-стружечные плиты, одна треть по высоте от пола – сухая штукатурка; кресла мягкие или полумягкие, пол – паркет, линолеум, ковер шерстяной, толщиной 0,009м по бетону.

Практика акустического проектирования залов драматических театров показывает, что лучшие акустические характеристики достигаются для оптимального числа зрителей, равного 800 чел, при обязательном формировании рациональной формы зала в плане и разрезе, правильного выбора отделочных материалов, обеспечения нормативного времени запаздывания звука и времени реверберации, увеличения степени диффузности звукового поля.

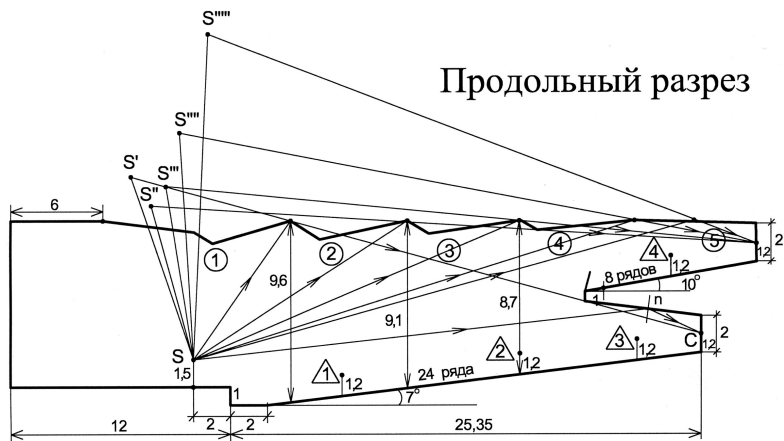


Рис. 1.1. Первый возможный вариант продольного разреза зала драматического театра на 800 зрителей (плоский передний акустический

1 лрек);

.... 4 – контрольные точки.

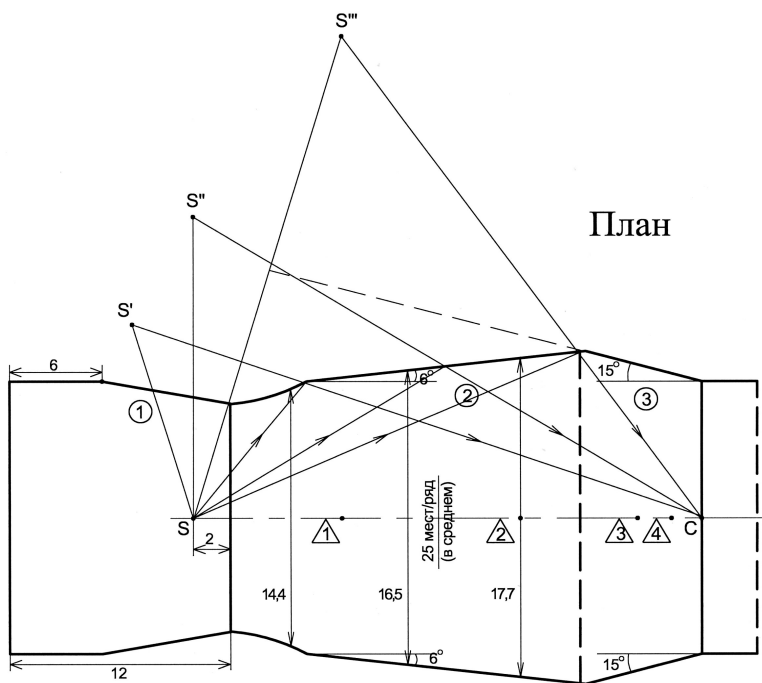


Рис. 1.2. Первый возможный вариант плана зала драматического театра на 800 зрителей (плоские скошенные поверхности сцены и авансцены);
 1 ... 4 – контрольные точки.

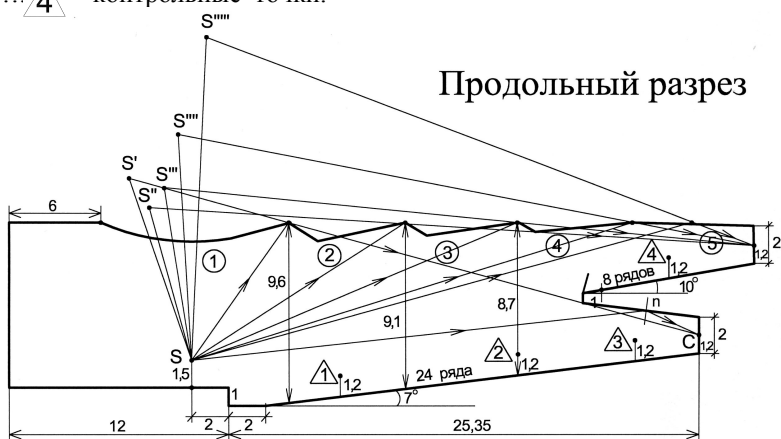


Рис. 1.3. Второй возможный вариант продольного разреза зала драматического театра на 800 зрителей (криволинейный передний акустический козырек).

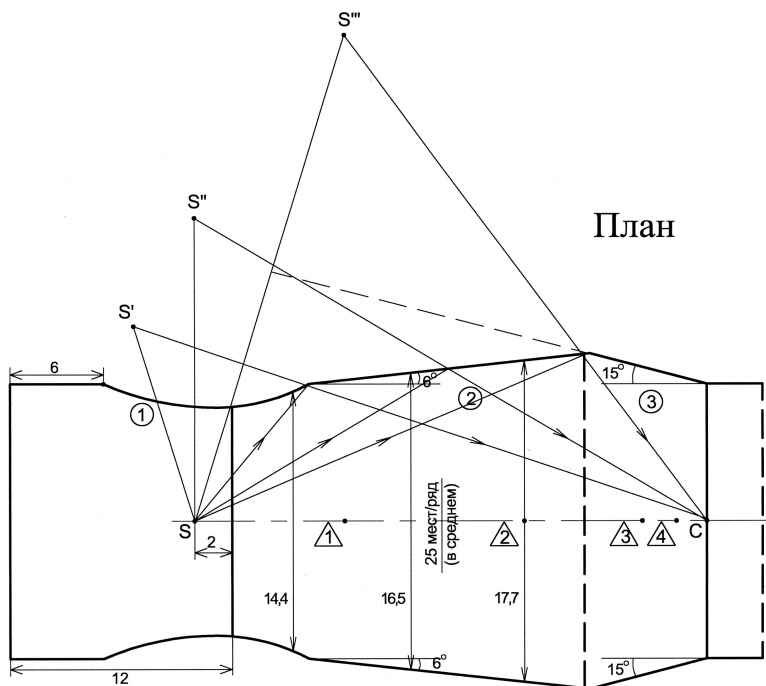


Рис. 1.4. Второй возможный вариант плана зала драматического театра на 800 зрителей (криволинейные поверхности сцены и авансцены).

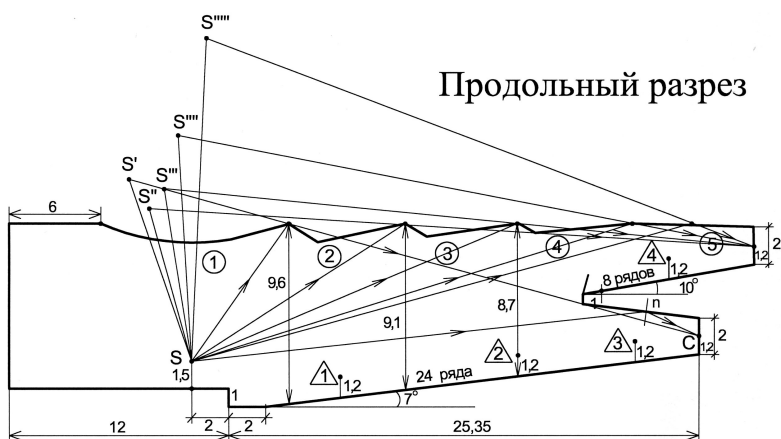


Рис. 1.5. Третий возможный вариант продольного разреза зала драматического театра на 800 зрителей (криволинейный передний

акустический козырек).

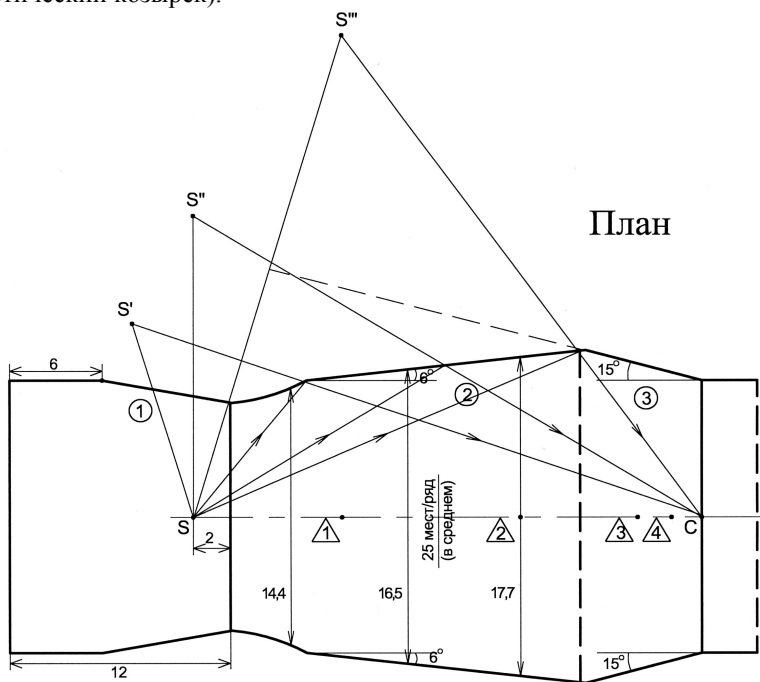


Рис. 1.6. Третий возможный вариант плана зала драматического театра на 800 зрителей (плоские скошенные поверхности сцены и авансцены).

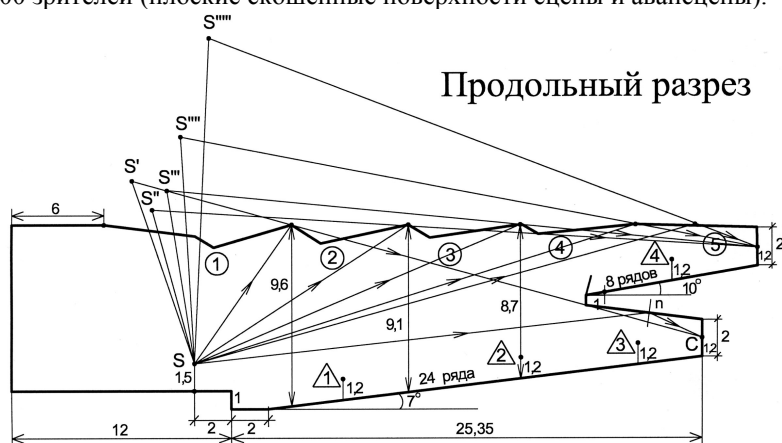


Рис. 1.7. Четвертый возможный вариант продольного разреза зала драматического театра на 800 зрителей (плоский передний акустический козырек).

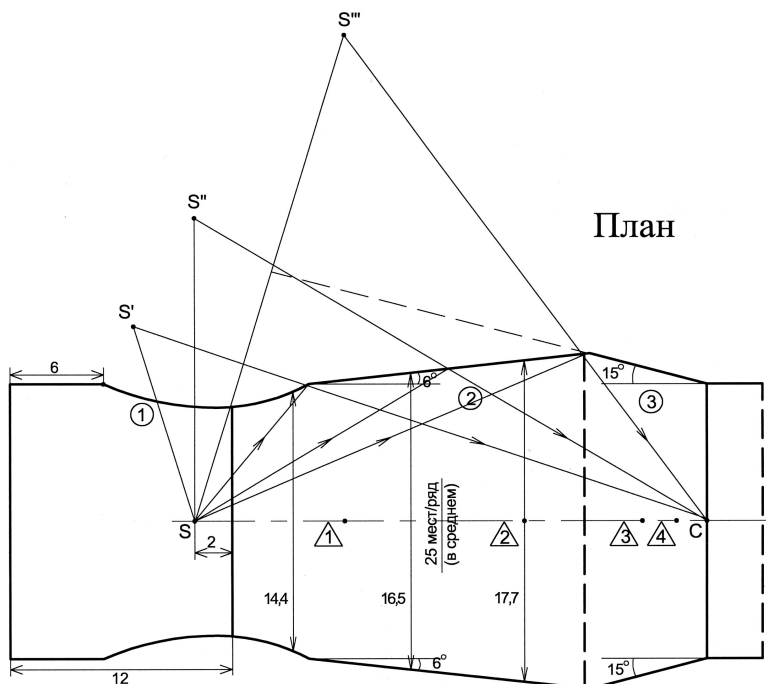


Рис. 1.8. Четвертый возможный вариант плана зала драматического театра на 800 зрителей (криволинейные поверхности сцены и авансцены).

ПРИМЕР II. Акустическое проектирование зала театра оперетты на 1200 зрителей.

1. Исходный расчетный объем зала V_p найдем по формуле (2.1):

$$V_p = 0,25(1200)^{3/2} = 10390 \text{ м}^3, \quad (\text{II.1})$$

что соответствует удельному объему на одного зрителя, равному:

$$V_p^1 = 10390/1200 = 8,6 \text{ м}^3/\text{чел.}$$

2. Рациональные геометрические параметры зала – высоту, ширину и длину найдем по формулам формантного музыкального золотого сечения – (3.10÷3.12).

$$H = 0,61 V^{1/3} = 0,61 \cdot (10390)^{1/3} = 13,3 \text{ м}; \quad (\text{II.2})$$

$$B = 1,01 V^{1/3} = 1,01 \cdot (10390)^{1/3} = 22 \text{ м}; \quad (\text{II.3})$$

$$(II.4) \quad L = 1,62 \sqrt[3]{V} = 1,62 \cdot (10390)^{1/3} = 35,3 \quad \text{м.}$$

Проверка: $H \cdot B \cdot L = V = 10343 \text{ м}^3$ (погрешность 0,4%).

Суммарная площадь внутренних ограждающих поверхностей зала театра оперетты равна:

$$S_{\text{м}} = 6,55 V^{2/3} = 6,55 \cdot (10390)^{2/3} = 3120 \text{ м}^2. \quad (II.5)$$

3. Для построенного по методу мнимых источников восьмизвонного профиля потолка в разрезе зала театра оперетты и трехзвенной трапециевидальной формы плана, по формуле (4.1) получим времена запаздывания первых полезных звуковых отражений для всех четырех контрольных точек – (начало партера, середина, конец партера и середина балкона (ложи)):

Разрез:

$$1) \Delta t_1 = 0,034 \text{ с}, \quad (II.6)$$

$$2) \Delta t_2 = 0,03 \text{ с}, \quad (II.7)$$

$$3) \Delta t_3 = 0,026 \text{ с}, \quad (II.8)$$

$$4) \Delta t_4 = 0,019 \text{ с}. \quad (II.9)$$

План:

$$1) \Delta t_1 = 0,035 \text{ с}, \quad (II.10)$$

$$2) \Delta t_2 = 0,031 \text{ с}, \quad (II.11)$$

$$3) \Delta t_3 = 0,027 \text{ с}, \quad (II.12)$$

$$4) \Delta t_4 = 0,021 \text{ с}. \quad (II.13)$$

4. Предположив, что коэффициент акустической трансформации параллелепипедного объема зала находится в пределах $0,8 < K_{\phi} < 1,0$ и выбрав среднее значение - $\overline{K_{\phi}} = 0,9$, получим расчетный объем зала:

$$(II.14) \quad \overline{V_p} = 0,9 V_p = 0,9 \cdot 10390 = 9350 \quad \text{м}^3,$$

при этом удельный объем на одного зрителя составит:

$$(II.15) \quad \overline{V_p}^{(1)} = 9350/1200 = 7,8 \quad \text{м}^3,$$

что хорошо согласуется с нормативными требованиями.

Для найденного значения расчетного объема $\overline{V_p}$ находим оптимальное время реверберации на средних частотах в соответствии с формулами (5.2), (5.6), (5.8), (5.10), (5.12) и (5.13):

$$1) T = 0,39 \lg 9350 = 1,55 \text{ сек}; \quad (II.16)$$

$$2) T = 0,075 \cdot (9350)^{1/3} = 1,58 \text{ сек}; \quad (II.17)$$

$$3) T = 0,58 \cdot (9350)^{0,108} = 1,55 \text{ сек}; \quad (II.18)$$

$$4) T = 0,198 \cdot (9350/1200) = 1,54 \text{ сек}; \quad (II.19)$$

$$5) T = 0,011 \cdot (9350)^{0,545} = 1,6 \text{ сек.} \quad (\text{II.20})$$

$$6) T = \frac{0,163 \cdot 9350}{2,17(9350)^{-0,212} \cdot 2,8 \cdot 1200 \cdot 0,93} = 1,56 \text{ сек.} \\ (\text{II.21})$$

5. Диффузность звукового поля в зале.

Степень диффузности звукового поля в зале театра оперетты находим по формулам (6.3) и (6.5), предварительно определив средний коэффициент звукопоглощения и функцию звукопоглощения:

$$\overline{\alpha}_m = 1 - e^{-2,17V_m^{-0,212}} = 1 - e^{-2,17(9350)^{-0,212}} = 0,24, \quad (\text{II.22})$$

$$\varphi(\overline{\alpha}_m) = -\ln(1 - \overline{\alpha}_m) = 2,17V_m^{-0,212} = 0,31. \quad (\text{II.23})$$

Тогда при среднем радиусе гулкости для музыкальных залов $r_m = 4$ м, получим:

$$R_m = \frac{0,25(9350)^{2/3}}{16} = 6,9, \quad (\text{II.24})$$

$$R_m = \frac{0,24}{0,31 - 0,24} = 3,4, \quad (\text{II.25})$$

что хорошо укладывается в границы допустимых значений степени диффузности звукового поля для музыкальных залов – ($2 < R_m < 10$) и позволяет надеяться на улучшение пространственного восприятия музыкального сигнала, а также обеспечение более мягкого тембрального звучания.

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ РАЗРЕЗ И ПЛАН МУЗЫКАЛЬНОГО ЗАЛА ОПЕРЕТТЫ НА 1200 МЕСТ.

Для расчетного объема зала драмтеатра, равного $\overline{V}_m = 9350 \text{ м}^3$, рациональные геометрические параметры – высота, ширина и длина равны:

$$H = 0,61 \cdot \overline{V}_m^{1/3} = 0,61 \cdot 21,06 = 12,85 \text{ м};$$

$$B = 1,01 \cdot \overline{V}_m^{1/3} = 1,01 \cdot 21,06 = 21,27 \text{ м};$$

$$L = 1,62 \cdot \overline{V}_m^{1/3} = 1,62 \cdot 21,06 = 34,11 \text{ м}.$$

При известных расчетных геометрических пропорциях зала, продольный вертикальный разрез и форма плана формируются на основе

метода мнимых источников, позволяющего получить нормативное время запаздывания и равномерное распределение первых полезных звуковых отражений по зрительским местам, включая балкон (рис. 2.1 – 2.2).

Увеличение степени диффузности звукового поля осуществляется за счет полученной построением восьмизвенной структуры потолка, а также за счет трехзвенной структуры плана зала и приемлемого (в пределах 12°) углового раскрытия боковых стен.

Так же, как и в случае речевого зала драмтеатра, передний акустический козырек имеет двойную плоскую или одинарную криволинейную форму, особенность которой состоит в том, что она позволяет равномерно распределить первые полезные звуковые отражения как в зал, так и на сцену, обеспечивая при этом улучшение акустического взаимопонимания как актерского ансамбля, так и музыкантов, находящихся в оркестровой яме.

В партере, при наличии однометрового переднего прохода между оркестровой ямой и первым рядом, двух полуметровых боковых и одного трехметрового центрального прохода, располагаются в среднем 27 рядов по 34 кресла в ряду, что составляет в среднем 900 зрителей. На балконе с метровым передним проходом и центральным двухметровым располагается 8 рядов по 38 кресел в ряду, что составляет 300 зрителей.

Время запаздывания первых полезных звуковых отражений определяется по формуле (4.1) соответственно для вертикального разреза и плана:

1) Продольный вертикальный разрез:

Контрольная точка  : $\Delta t_1 = 0,034$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_2 = 0,03$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_3 = 0,026$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_4 = 0,019$ сек.

2) Горизонтальный план:

Контрольная точка  : $\Delta t_1 = 0,035$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_2 = 0,031$ сек;

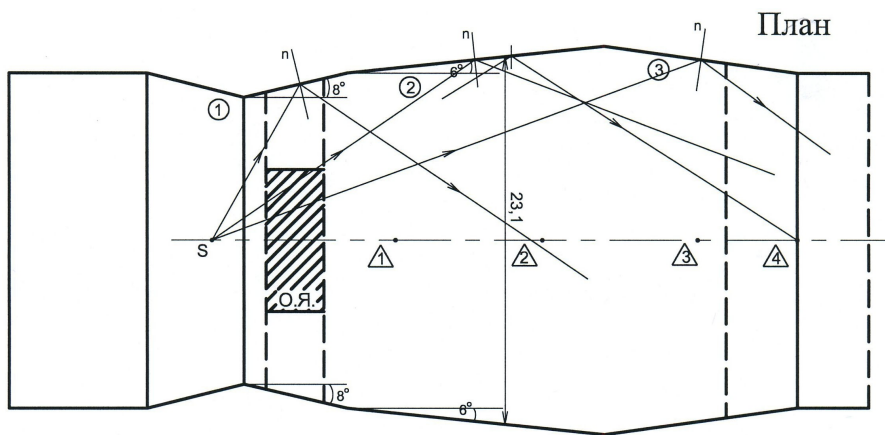
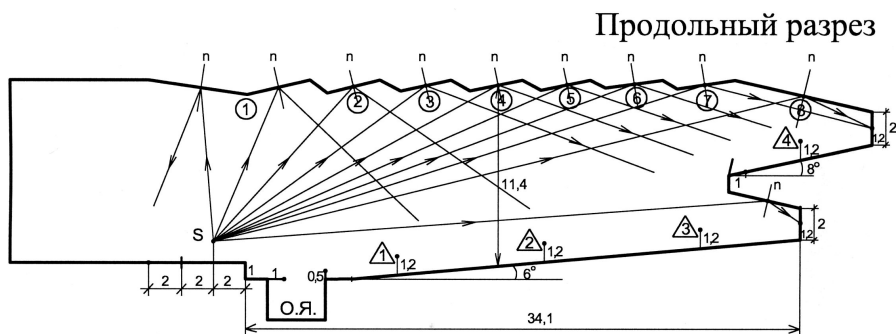
Контрольная точка  : $\Delta t_3 = 0,027$ сек;

Контрольная точка  : $\Delta t_4 = 0,021$ сек.

Так же, как и для зала драмтеатра, для увеличения степени диффузности звукового поля на боковых стенах можно рекомендовать расположить с шагом четыре метра равносторонние ($a = 1\text{ м}$) треугольные пирамидальные диффузоры – рассеиватели с переменной высотой, падающей до нуля на уровне полтора метра от пола партера. Увеличение степени диффузности с помощью треугольных пирамидальных диффузоров-рассеивателей приведет к улучшению разборчивости речи, усилению пространственной ориентации на источники звука, обеспечит более мягкое тембральное звучание.

Возможные варианты формирования вертикального продольного разреза и горизонтального плана музыкального зала оперетты на 1200 зрителей показаны на рис. 2.1 – 2.8. Предполагается, что внутренняя облицовка ограждающих поверхностей зала также традиционная: потолок – прямоугольный центр, занимающий 60% площади – сухая штукатурка, остальные 40% площади – древесно-волоконные плиты; боковые стены – две трети по высоте от потолка – древесностружечные плиты, одна треть по высоте от пола – мелкофактурная штукатурка; кресла мягкие или полумягкие; пол – паркет, линолеум, ковер шерстяной, толщиной 0,009 м по бетону.

Практика акустического проектирования музыкальных залов малых и средних объемов показывает, что лучшие результаты акустического качества достигаются для оптимального числа зрителей, равного 1200 чел, при обязательном формировании рациональной формы разреза и плана, правильного выбора отделочных материалов, обеспечения нормативного времени запаздывания звука и времени реверберации, увеличения степени диффузности звукового поля.



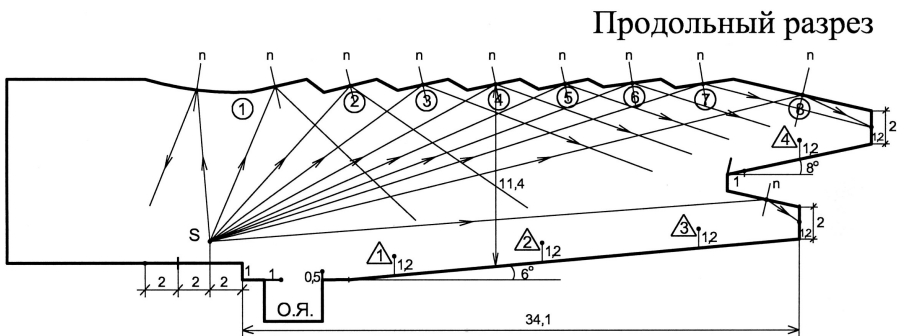


Рис. 2.3. Второй возможный вариант продольного разреза зала оперетты на 1200 зрителей (криволинейный передний акустический козырек).

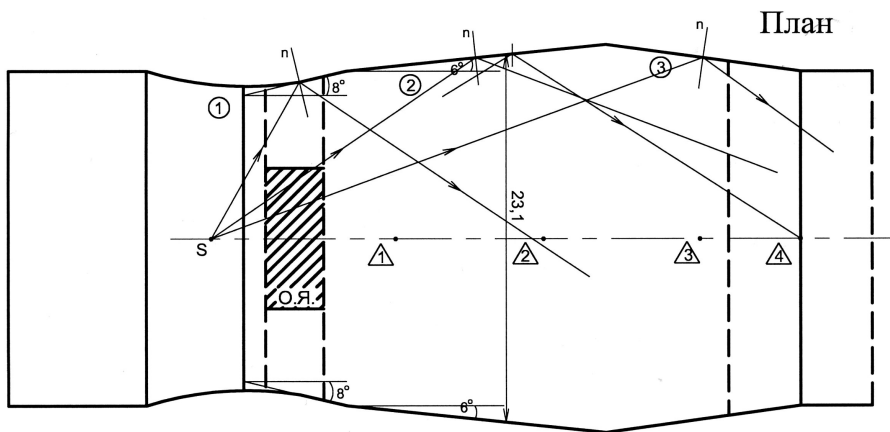


Рис. 2.4. Второй возможный вариант плана зала оперетты на 1200 зрителей (криволинейные поверхности сцены и авансены).

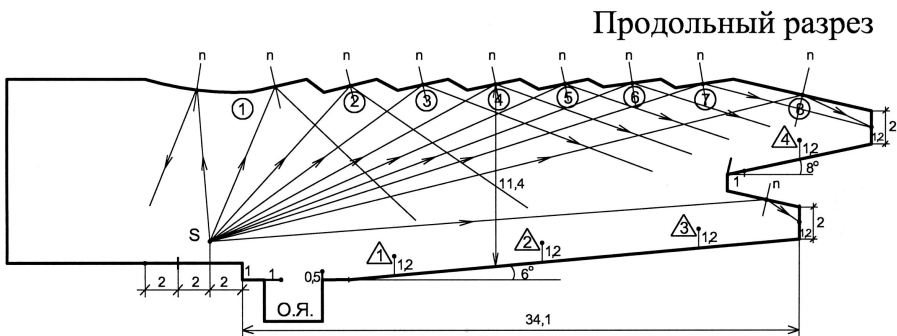


Рис. 2.5. Третий возможный вариант продольного разреза зала оперетты на 1200 зрителей (криволинейный передний акустический козырек).

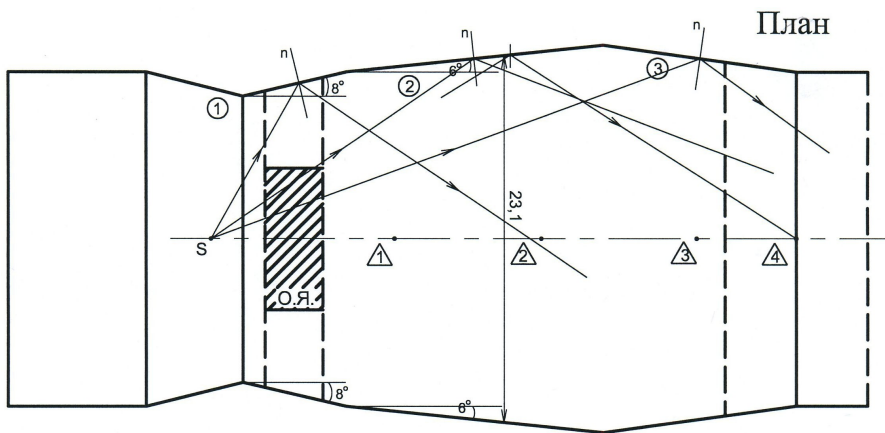


Рис. 2.6. Третий возможный вариант плана зала оперетты на 1200 зрителей (плоские поверхности сцены и авансцены).

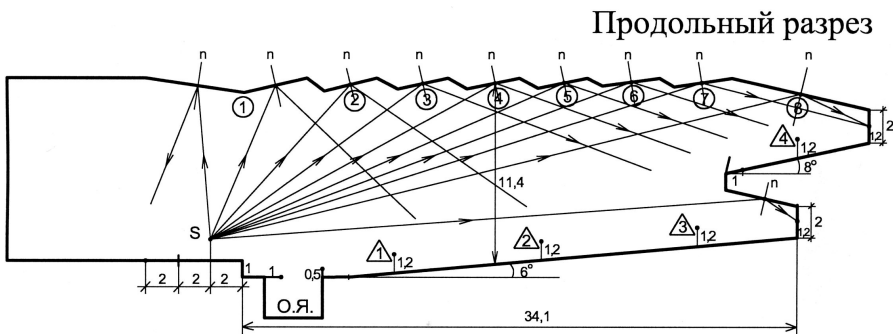


Рис. 2.7. Четвертый возможный вариант продольного разреза зала оперетты на 1200 зрителей (плоский передний акустический козырек).

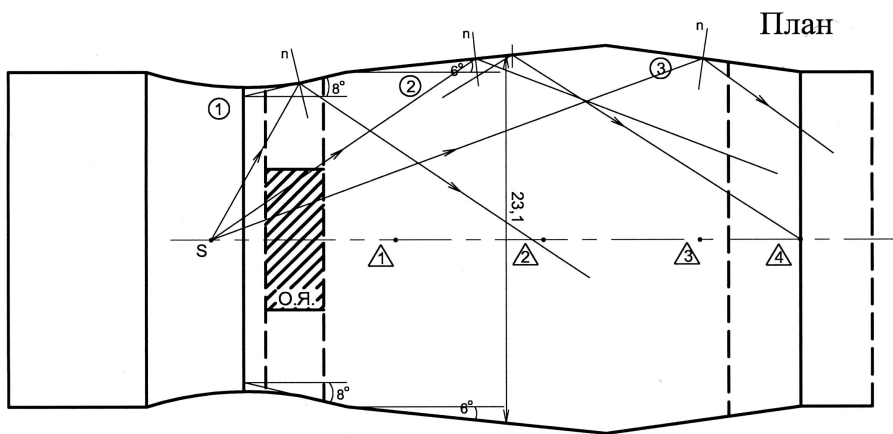


Рис. 2.8. Четвертый возможный вариант плана зала оперетты на 1200 зрителей (криволинейные поверхности сцены и авансцены).

ЛИТЕРАТУРА

1. Архитектурная физика: Учеб. для вузов, под ред. Н.В.Оболенского. – М.: Стройиздат, 1997. – 448 с.: илл.
2. Ковригин С.Д., Крышов С.П. «Архитектурно-строительная акустика». М.: «Высшая школа», 1986.
3. Макриненко Л.И. «Акустика помещений общественных зданий». М.: Стройиздат, 1986.
4. СНиП 23-03, 2003. Раздел «Архитектурная акустика залов».
5. Климухин А.А., Киселева Е.Г. «Проектирование акустики зрительных залов». М., МАРХИ, 2012.

Учебное издание

Чебанов Анатолий Дмитриевич, ст. преп.

Приближенная оценка времени реверберации для залов различного назначения

Учебно-методические указания

Под редакцией д.арх., проф. Николая Ивановича Щепеткова
и к.т.н., с.н.с. Андрея Александровича Климухина

Издание подготовлено на кафедре
«Архитектурной физики» МАРХИ
(протокол заседания кафедры №1 от 04.09.12)

Подписано в печать 11.09.12
Формат 60х90/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВПО «Московский архитектурный институт
(государственная академия)»
107031, Москва, ул. Рождественка, д.11,
e-mail: office@markhi.ru, URL: <http://www.marhi.ru>
Тел.: (495) 625-50-82, (495) 624-79-90,
(495) 625-18-61 – каф.