

**МОСКОВСКИЙ АРХИТЕКТУРНЫЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ)**

КАФЕДРА "АРХИТЕКТУРНАЯ ФИЗИКА"

**ДИСЦИПЛИНА
"АРХИТЕКТУРНАЯ
ФИЗИКА"
Раздел
"АРХИТЕКТУРНАЯ
АКУСТИКА"**

**УЧЕБНО-
МЕТОДИЧЕСКИЕ
УКАЗАНИЯ
к курсовой
РАСЧЕТНО-
ГРАФИЧЕСКОЙ
РАБОТЕ**

A detailed architectural drawing of a bell, split vertically down the middle. The left half is white, and the right half is black. The bell is shown in a three-quarter view, with its clapper visible. Below the bell, a series of concentric, curved lines represent sound waves emanating from the bell's mouth. The drawing is overlaid with a grid of lines, and there are small rectangular markers on the lines, possibly indicating measurement points or specific acoustic parameters. The overall style is technical and precise.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКУСТИКИ
ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ**

ЖДИМУХИН А.А. КИСЕЛОВА Е.Г.

МОСКВА • МАРХИ • 2012



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

А.А. Климухин
Е.Г. Киселева

Проектирование акустики зрительных залов

*Учебно-методические указания к курсовой
расчетно-графической работе*

Москва
МАРХИ
2012

УДК 534.2
ББК 38.113
П 79

Климухин А.А., Киселева Е.Г.

Проектирование акустики зрительных залов: учебно-методические указания к курсовой расчетно-графической работе / А.А. Климухин, Е.Г. Киселева. — М.: МАРХИ, 2012. — 80 с.

Учебно-методические указания по разделу «Архитектурная акустика» дисциплины «Архитектурная физика» составлены на основе 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 архитектуры на дневных и вечернем факультетах, а также могут быть использованы в НИРС. Индивидуальные задания с исходными расчетными параметрами на РГР выдаются преподавателем, а в составе дипломного проекта или НИРС предопределяются конкретными (нормативными) показателями, принятыми объемно-планировочными решениями и выбранными отделочными материалами. Выполнение РГР или раздела дипломного проекта сопровождается консультациями преподавателей кафедры «Архитектурная физика».

Учебно-методические указания являются необходимым актуализированным дополнением к главе «Архитектурная акустика» в учебнике «Архитектурная физика».

© МАРХИ, 2012
© Киселева Е.Г. 2012
© Климухин А.А. 2012

Содержание:

	ВВЕДЕНИЕ	4
I.	Теоретические основы проектирования зрительных залов	5
1.	Требования к размерам и форме зала	5
2.	Применение геометрических (лучевых) отражений и их построение	8
3.	Определение рекомендуемого времени реверберации	11
4.	Расчет времени реверберации проектируемого зала	14
5.	Проверка разборчивости речи в зале	21
II.	Примеры зрительных залов	23
III.	Разбор некоторых существующих залов, удачные и неудачные решения, причина неудач.	48
	Пример №1	54
	Пример акустического проекта зала драматического театра на 750 зрительских мест	
	Пример №2	65
	Пример акустического проекта зала многоцелевого назначения на 600 зрительских мест	
	Пример №3	74
	Пример акустического проектирования концертного зала	
IV.	Перечень вопросов к зачету по архитектурной акустике	78
	Список литературы	79

ВВЕДЕНИЕ

Архитектурная акустика - одна из старейших научных дисциплин, данные которой непосредственно влияли и влияют на формирование архитектурной формы. Достаточно вспомнить античные амфитеатры на открытом воздухе, где обеспечивались прекрасная видимость и слышимость того, что происходило на сцене. Законы распространения прямого и отраженного звука в пространстве, экстерьерном и интерьерном, сегодня достаточно хорошо известны, однако в мире не так много построенных зодчими залов с совершенной акустикой для разных жанров звуковых представлений. В массовой, рутинной практике строительства немало помещений с дискомфортными акустическими условиями - достаточно вспомнить залы ожидания в вокзалах, перронные залы метро, гулкие учебные аудитории большого объема, музыкальные залы с плохой слышимостью и т.п., где невозможно понять транслируемые явления или целиком различить произносимые фразы и нюансы музыки.

Архитектурная акустика - не техническая дисциплина. Искусство акустического проектирования связано с грамотным выбором объема, формы и пропорций помещения, с количеством, качеством и пространственным расположением отдельных (звукоотражающих и звукопоглощающих) материалов, т.е. непосредственно с архитектурным проектированием, с созданием комфортной звуковой среды, благоприятного акустического микроклимата. Тонкости акустических расчетов архитектор обычно поручает инженеру-акустику, но он должен уметь грамотно поставить ему задачу и согласовать в процессе архитектурного проектирования вышеперечисленные параметры объемно-пространственного и конструктивно-отделочного решения зала с результатами предварительно оцененных им акустических расчетов и требованиями эстетики принятого архитектурного решения. Это - процесс вариативного выбора оптимального решения обоих специалистов, нередко - путем взаимных компромиссов.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1. Требования к размерам и форме зала

В закрытом помещении после прекращения действия источника звука слушатель воспринимает прозвучавший музыкальный или речевой сигнал в течение некоторого временного интервала. Это объясняется тем, что уровень звукового давления (у.з.д.), созданный в расчетной точке, является интегральной характеристикой энергии прямого звука и энергии отраженных от поверхностей помещения звуковых волн. Процесс спада звуковой энергии называется реверберационным процессом, а само явление - реверберацией.

Для количественной оценки реверберации используется понятие - время реверберации, которое не должно зависеть ни от индивидуального порога слышимости, ни от начального уровня сигнала и которое он определил как время, за которое первоначальная энергия сигнала уменьшится в миллион раз (или снижается на 60 дБ).

Надлежащее время реверберации, характеризующее общую гулкость помещения, является одним из важных условий хорошей акустики зала. При этом следует помнить, что для достижения четко определенного времени реверберации требуется достаточная диффузность звука в зале.

Время реверберации является первой и одной из основных характеристик помещений, зависящей от объема помещения и общего звукопоглощения.

Объем зала определяется пропорциями зала. Отношение длины зала l к средней ширине $в$ оптимально: $1,3 \leq \frac{l}{в} \leq 1,6$;

В таких пределах и отношение ширины зала $в$ к средней высоте h :

$$1,3 \leq \frac{в}{h} \leq 1,6$$

Залы в плане обычно имеют форму трапеции с углом раскрытия боковых стен 5^0 - 12^0 .

Прямоугольная форма с горизонтальным потолком допустима только для лекционных залов с вместимостью не более 200 человек.

Время запаздывания первых отражений от потолка (по продольному разрезу) и стен (по плану) проверяется по формуле (1):

$$t_3 = \frac{(l_{omp.} - l_{np.}) \cdot 1000}{340}, (с) \quad (1)$$

где $l_{omp} = (l_{над} + l_{ом})$ длина пути отраженного звука,
 $l_{над}$ –длина луча падающего на отражающую поверхность от источника звука;

$l_{ом}$ –длина луча отражающегося от поверхности звука до расчетной точки;

$l_{np.}$ - длина пути прямого звука.

Точки выбираются в начале, в середине и в конце зала, при наличии балкона одна точка берется дополнительно на балконе.

Допустимое время запаздывания для речи 20-25 мс (миллисекунд), для музыки – 30-35 мс, для многофункциональных залов – 25-30 мс.

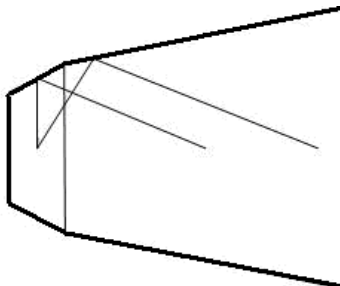
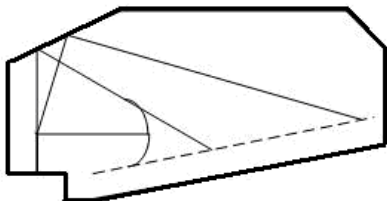
При построении продольного разреза зала следует учитывать, что подъем пола должен составлять 12-14 см на ряд в партере (шаг рядов минимум 90 см), на балконе подъем 25-30 см на ряд.

Радиус действия прямого звука составляет 8-9 м для речи и 10-12м для музыки. В этой зоне усиление прямого звука с помощью отражений не требуется. В связи с этим в зону радиуса прямого звука не должно попадать ни одного первого отражения. На остальных местах интенсивные первые отражения должны перекрывать всю зону зрительных мест.

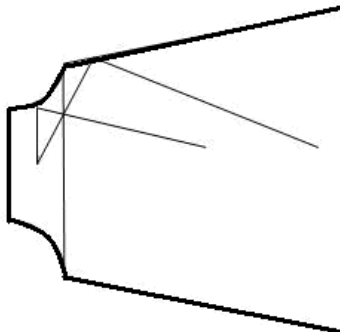
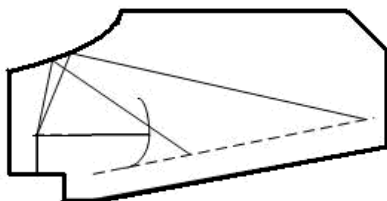
В залах с относительно большой высотой и шириной всегда есть опасность прихода первых отражений от потолка и стен с большим запаздыванием в первые ряды зрительных мест, что создает неразборчивость звуков. Для исправления этого явления на потолке и стенах в припортальной зоне следует выполнять специальные звукоотражающие конструкции, задача которых направлять отраженный звук в глубину зала (рис.1).

При примыкании задней стены зала к потолку под углом 90^0 может возникнуть так называемое **театральное эхо** – отражение звука от потолка и стены в направлении к источнику звука, приходящее с большим запаздыванием. Для устранения этого следует предусматривать наклонную часть потолка у задней стены или наклонную заднюю стену зала (рис.2).

Лекционный зал



Зал драматического театра



Зал музыкального театра

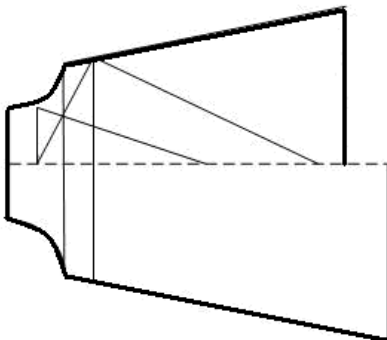
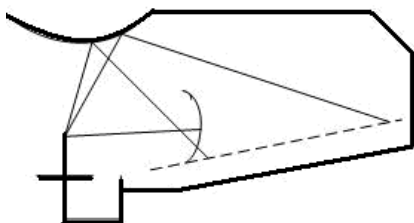
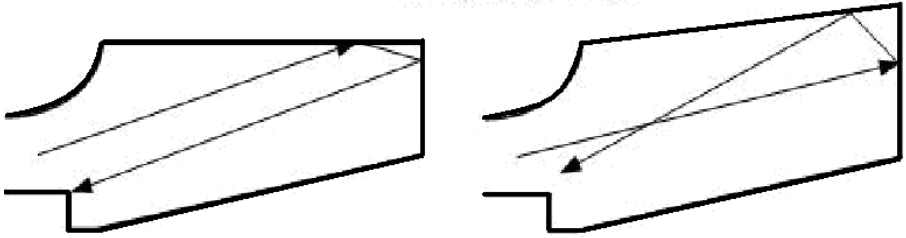


Рисунок 1 - Первые отражения от потолка, стен и отражателей

«Театральное» эхо



«Театральное» эхо отсутствует

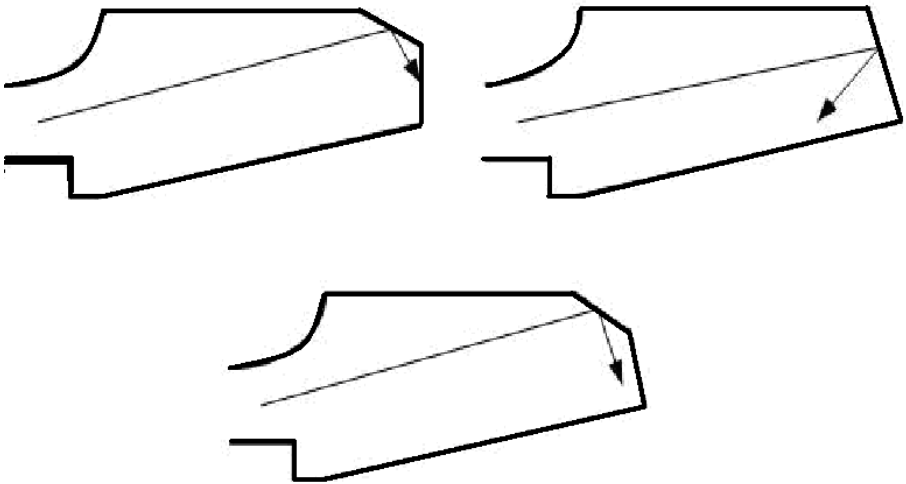


Рисунок 2 - Конструкция потолка или задней стены зала.

2. Применение геометрических (лучевых) отражений и их построение

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

Приближенная оценка формы и размеров помещений с акустической точки зрения состоит в анализе звукового поля на основе принципов геометрической акустики, то есть, в рассмотрении распростране-

ния прямых и отраженных звуковых волн и построении так называемого "лучевого эскиза".

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

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

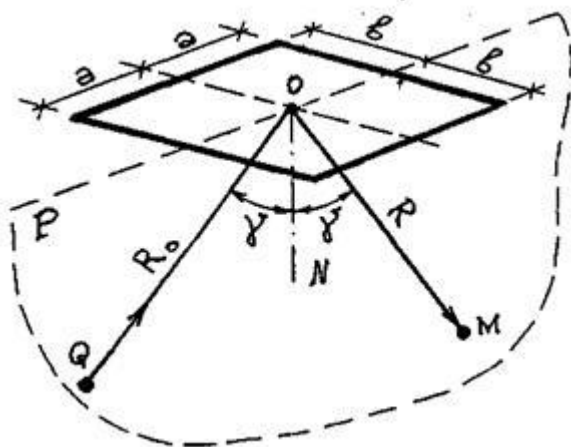


Рисунок 3 - Отражение звука от плоского отражателя

Допустимость применения способа геометрических (лучевых) отражений зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и точке приема. Отражающая поверхность должна при этом иметь массу не менее 20 кг/м^2 , и ее коэффициент звукопоглощения α для рассматриваемых частот не должен превышать 0,1. На рис. 3 отражающая поверхность взята в виде прямоугольного плоского отражателя со сторонами, равными $2a$ и $2b$, центр его совпадает с точкой геометрического отражения O , а сторона $2a$ параллельна лучевой плоскости P , в которой лежат падающий звуковой луч QO , отраженный луч OM и нормаль ON ;

R_0 - расстояние от источника Q до точки O ; R - расстояние от точки O до точки приема M ; g - углы падения и отражения звукового луча.

При построении геометрических отражений от плоскости удобен прием, показанный на рис. 4а. Здесь используется мнимый источник Q_1 , симметричный с действительным точечным источником Q по отношению к отражающей плоскости и находящийся по другую ее сторону. Для построения мнимого источника надо опустить из точки Q перпендикуляр QA на отражающую плоскость и на продолжении его отложить отрезок AQ_1 , равный отрезку QA . Прямые, проведенные из мнимого источника Q_1 , после пересечения ими отражающей плоскости, удовлетворяют условию равенства углов падения и отражения, то есть являются искомыми отраженными лучами, создаваемыми действительным источником Q .

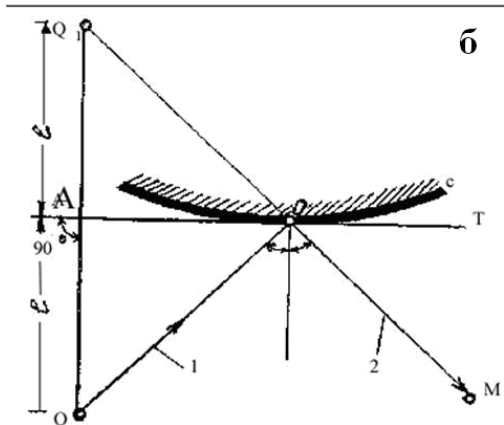
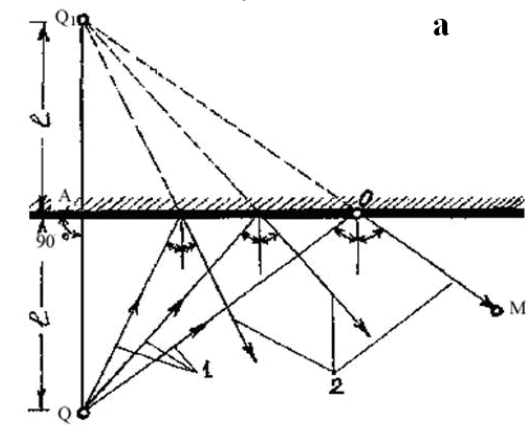


Рисунок 4. - Построение геометрических отражений звуковых лучей с помощью мнимого источника:

- а - отражение от плоскости;
- б - отражение от кривой поверхности;
- Q - источник звука;
- Q_1 - мнимый источник звука;
- 1 - прямые лучи,
- 2 - отраженные звуковые лучи.

Метод мнимых источников применим и при построении отражений от кривых поверхностей. Если требуется найти отражение от какой-либо точки O кривой поверхности C (см. рис. 4б) при заданном положении источника Q , то следует в точке O построить касательную плоскость T к поверхности. Мнимым источником в этом случае является точка Q_1 , симметричная источнику Q относительно касательной плоскости; продолжение OM прямой Q_1O после пересечения ее с поверхностью C является искомым отраженным лучом. Здесь для каждой точки O отражающей поверхности приходится находить свой мнимый источник Q_1 в отличие от ранее рассмотренного случая (см. рис. 4а), у которой для отражения от любой ее точки мнимый источник один и тот же (при заданном положении источника Q). Суммарная длина $QO + OM$ лучей QO и OM , дающая длину полного хода отраженного звука от источника Q до некоторой точки приема M , равна расстоянию Q_1M от мнимого источника Q_1 до точки M (см. рис. 4а, 4б). При этом, разумеется, следует брать истинные длины указанных отрезков, а не их проекций.

Если лучевая плоскость P (см. рис.3) параллельна одной из плоскостей проекций (вертикальной или горизонтальной), то углы падения и отражения проецируются на эту плоскость без искажения, и построение отраженного луча выполняется при помощи описанных приемов.

3. Определение рекомендуемого времени реверберации (T_p)

Большое значение в зале имеет время реверберации. Оптимальные величины времени реверберации в диапазоне 500-1000 Гц для залов различного назначения в зависимости от объема зала приведены на рис.6.

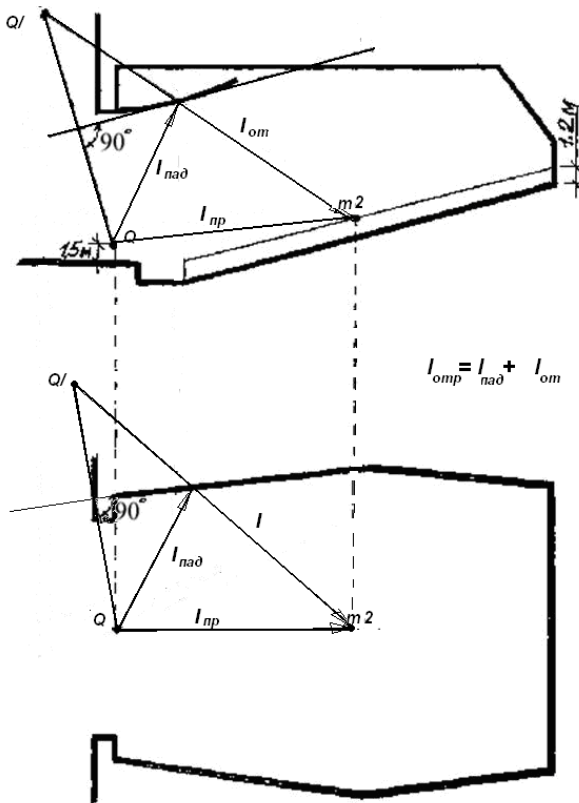
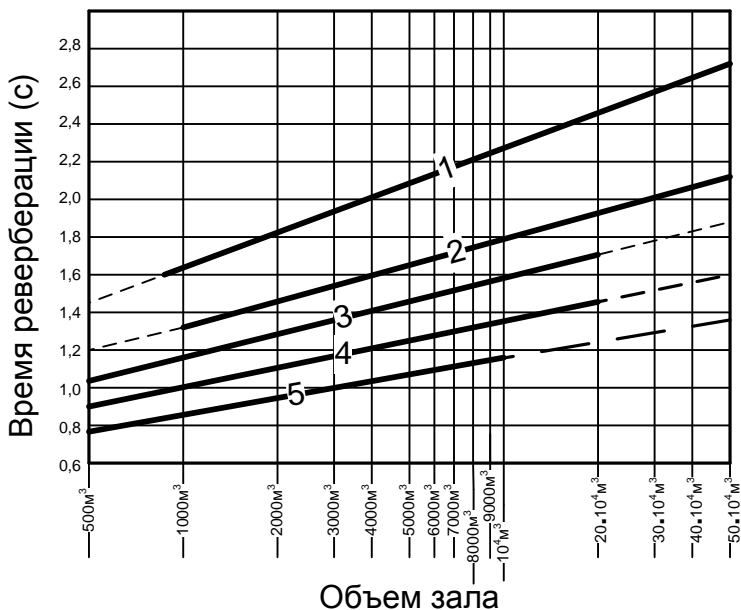


Рисунок 5 - Построение геометрического отражения при касательной плоскости, перпендикулярной плоскости проекции.



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%.

Рисунок 6 – 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. 6, 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 почастотно 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).

4. 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 (2):

$$A_{\text{общ}}(125,500,2000) = \sum \alpha_i S_i + \sum A_{\text{крес.с.лущ.}} + \alpha_{\text{об}} S_{\text{обц}} \quad (2)$$

где $\sum \alpha_i S_i$ — сумма произведений площадей отдельных поверхностей S , м² на их коэффициент звукопоглощения α для данной частоты;
 $\sum A_{\text{крес.с.лущ.}}$ - сумма ЭПЗ, м² слушателей и кресел, которая рассчитывается по формуле (3):

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

где $0,7 \cdot N \cdot A_{\text{слуш.в.кр.}}$ - 70 % кресел зала заполнены слушателями,

N – общее число кресел в зале;

$0,3 \cdot N \cdot A_{\text{кр.без.с.лущ.}}$ - 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;

$A_{крес.слуш.}$ - коэффициенты звукопоглощения разных материалов и конструкций, а также ЭПЗ слушателей и кресел даны в таблице 4.

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.

$\alpha_{доб}$ — коэффициент добавочного звукопоглощения, учитывающий добавочное звукопоглощение, вызываемое 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 $\alpha_{доб}$ 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 $A_{общ}$ подсчитывается $\bar{\alpha}$ — средний коэффициент звукопоглощения внутренней поверхности зала на данной частоте:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{общ}}{S_{общ}} \quad (4)$$

$A_{общ}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения (ЭПЗ), м²;

$\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения (КЗП);

$S_{общ}$ - площадь всех внутренних поверхностей помещения (стены, потолок, пол, сцена 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 (5):

$$T = \frac{0,163V}{\bar{\alpha} S_{\text{общ}} + nV} ; \text{с} \quad (5)$$

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 2.

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 (5) 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 $L:W:H$, 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 сплошная звукопоглощающая отделка потолка или двух противоположных стен. При такой отделке звуковые волны распространяющиеся между потолком и полом (или между противоположными стенами), затухают заметно быстрее, чем между двумя противоположными поверхностями, 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 окажется меньше истинного.

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

$$\frac{A_{пот} + A_{пол}}{S_{пот} + S_{пол}} = \frac{A_{стен}}{S_{стен}} ; \quad (6)$$

Подсчитанное по формуле (5) время реверберации даже при выполнении рекомендаций по удельному объему, но при произвольном 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 1

Эквивалентная площадь звукопоглощения для слушательских кресел. (м²)

Зрители и кресла	Эквивалентная площадь поглощения, <i>A_{крес. слуш.}</i> (м ²)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Зритель на кресле мягком и полумягком	0,25	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	0,15	0,2	0,2	0,25	0,3	0,3
Кресло полумягкое	0,08	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2
Кресло обитое искусственной кожей	0,08	0,1	0,12	0,1	0,1	0,08
Кресло жесткое с фанерной спинкой и сиденьем	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05

Таблица 2

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
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» 300x300x20 мм						

Материалы и конструкции	Коэффициенты звукопоглощения для октавных полос, α (Гц)					
	125	250	500	1000	2000	4000
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
--<-- 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
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 наполнителем	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 наполнителем 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 прослой-	0,5	0,7	0,6	0,55	0,55	0,6

Материалы и конструкции	Коэффициенты звукопоглощения для октавных полос, α (Гц)					
	125	250	500	1000	2000	4000
кой 100 мм						
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 мм	0,15	0,5	0,85	0,8	0,8	0,7
Фанера толщиной 6 мм и слоем минер. ваты толщиной 100 мм	0,6	0,23	0,14	0,09	0,08	0,02

Таблица 3

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 $-\ln(1-\bar{\alpha}) = 0,39$.

5. Проверка разборчивости речи в зале

Результирующий эффект восприятия звука в помещении, с точки зрения его разборчивости, зависит от величины относительного воздействия на слушателя полезной и "бесполезной" частей звуковой энергии. К полезной звуковой энергии относятся энергия прямого звука и первых его полезных отражений (со временем запаздывания до 20 миллисекунд). К "бесполезной" - вся остальная звуковая энергия и "бесполезной" она названа условно, так как фактически она представляет собой реверберирующий фон в помещении.

Для лекционных залов и залов драматических театров разборчивость речи на местах зрителей имеет наиболее важное значение.

Коэффициент разборчивости речи K_p определяется из выражения по формуле (8):

$$K_p = \frac{A}{16\pi(1-\bar{\alpha})^2} \left(\frac{1}{r_0^2} + \frac{1-\alpha_1}{r_1^2} + \frac{1-\alpha_2}{r_2^2} + \dots + \frac{1-\alpha_n}{r_n^2} \right), \quad (8)$$

где A – эквивалентная площадь поглощения в зале в диапазоне 500-2000 Гц, m^2 (берется из таблицы расчета времени реверберации);

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

r_0 - расстояние между источником звука и рассматриваемой точкой, м;

$r_1, r_2 \dots r_n$ - длина пути первых отражений от источника звука до рассматриваемой точки, пришедших в течение 20 миллисекунд, ($r_{1 \dots n} = \ell_{отр}$), м;

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

Минимальной величиной K_p считается 0,2, что соответствует 80% артикуляции, т.е. зрители правильно слышат 80% произнесенных звуков.

Таблица 4

Рекомендуемые параметры различных залов

Вид зала	Максимальная вместимость, человек	V удельный, м³/чел.	Максимальная длина (до авансены) м
Лекционные и конференц-залы	400	4-5	24-25 (20)
Музыкально-драматических театров (оперетта)	1200	5-7	28-26 (25)
Театры оперы и балета	1500	6-8	30-32 (30)
Концертные: камерные симфонические	400 2000	6-8 8-10	20-22 42-46
Залы для хорового пения и органной музыки	2000	10-12	42-46
Кинозалы		4-5	45 (в летних 60)
Многоцелевого назначения	500-1000	4-6	30-34 (32)
Залы современной эстрадной музыки	2500	4-6	48-50

II. ПРИМЕРЫ ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ

1. Камерный зал классической музыки в г. Нагаока

- Местонахождения - г. Нагаока, Япония
- Вместимость: - 700 мест,
- Воздушный объем зала: 9500 м³
- Общая площадь: 3300 м²
- Площадь сцены: 134 м²
- Форма зала в плане: Овальная

Время реверберации

T 500-1000:

Пустой 1,9 сек

Полный 1,8 сек

Отделочные материалы

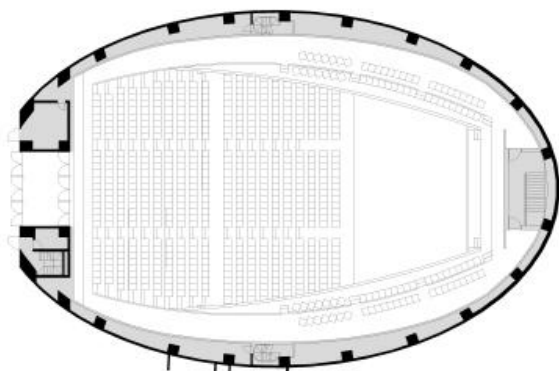
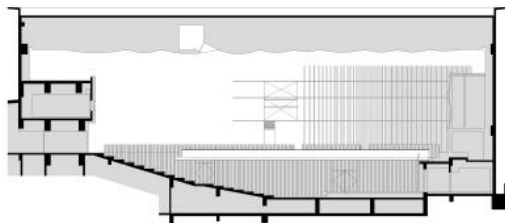
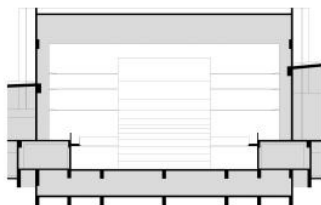
Потолок: гипсокартонные листы с 3 слоями стекловолокна.

Нижняя стенка: деревянная доска.

Верхняя стенка: гипсокартонные листы с 2 слоями стекловолокна.

Этаж: 50 мм деревянная доска на бетон;

Сиденья: мягкие.



0 5 10 15 20 METERS

Рисунок 7 – План и разрезы камерного зала классической музыки в г. Нагаока



Рисунок 8 – Вид сцены с боку



Рисунок 9 – Вид сцены из зрительного зала

2. Центральный Театр Советской Армии (ЦТСА)

- Местонахождение: Москва
- Архитектор: К. Алабян и В. Симбирцев (1934—1940 гг)
- Вместимость: 1500 мест
- Воздушный объем зала 7900 м³
- Удельный объем: 11,9 м³

Авторы проекта пришли к идее плана в виде правильного десятиугольника, который естественно давал переход к фигуре пятиконечной звезды. И в это «прокрустово ложе» готовой символической формы с большой изобретательностью, по-своему логично была втиснута каноническая композиционная схема театра. Зрительный зал получил очертания трапеции с закругленной задней стеной, все места веером расположились в партере и амфитеатре.

Над главным залом расположен репетиционный зал на 500 мест, (теперь используемый как малая сцена).

Вместе с объемом колосников основной сцены (где могли передвигаться танки) эти залы скомпонованы в единый пластический объем, увенчанный башенкой-постаментом для фигуры советского воина со знаменем (проект такой скульптуры изготовил тогда же скульптор И. Шадр). (Разбор акустических характеристик см. ниже в примерах удачных и неудачных залов).



Рисунок 10- Центральный Театр Советской Армии

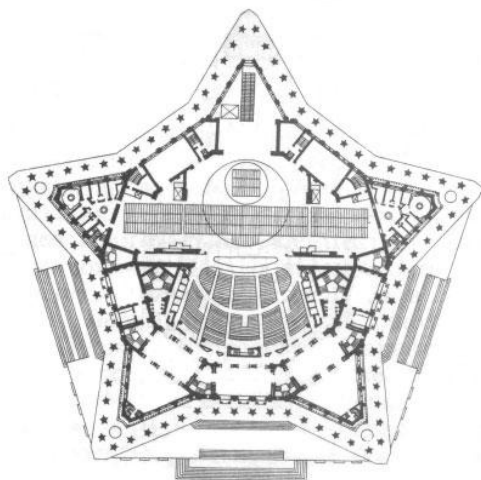


Рисунок 11 – План Центрального театра Советской Армии



Рисунок 12 – Вид зрительного зала Центрального театра Советской Армии

3. Театр им. Горького. Ростов-на-Дону

- Местонахождение: Ростов-на-Дону
- Архитектор: В.А. Шуко и В.Г. Гельфрейха (1930—35 гг.)
- Вместимость: 2250 мест
- Воздушный объем зала 11276 м³

Внешним видом театр напоминает трактор.



Рисунок 13 – Театр им. Горького. Ростов-на-Дону

Здание входит в список шедевров эпохи конструктивизма — в Лондонском музее истории архитектуры России представляют всего два макета: собор Василия Блаженного и Драматический театр им. Максима Горького. Ле Корбюзье и Оскар Нимейер называли театр жемчужиной советской архитектуры.

Образ театра был представлен своеобразным памятником первой индустриальной пятилетке и уподоблен гигантскому трактору. При этом была решена задача объединения театра с концертным залом в единый блок. Центральную зрелищную часть (большой и малый залы, вестибюль, фойе) театра архитекторы закомноновали в форму кубического объема. «В основу приема замысла проекта, — как писали авторы, — легло размещение малого зала в передней части здания над фойе

главного зала и устройство входов как в большой, так и в малый зал с площади Революции, т.е. с главного фасада».

Первой премьерой стал спектакль «Мятеж» по повести Д. Фурманова (на сцену была выведена конница).

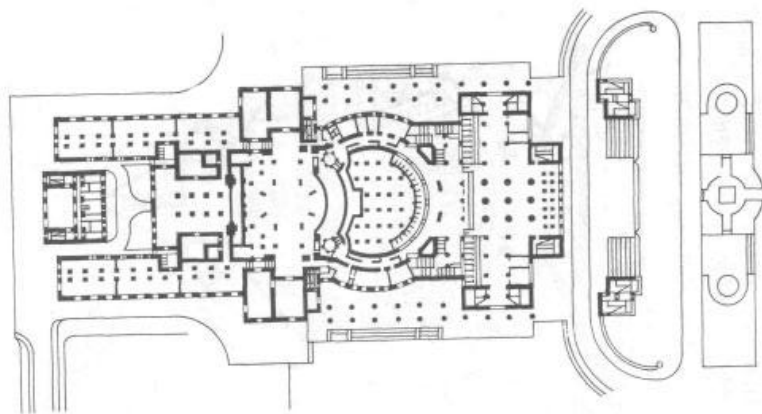


Рисунок 14 – План театра им. Горького. Ростов-на-Дону

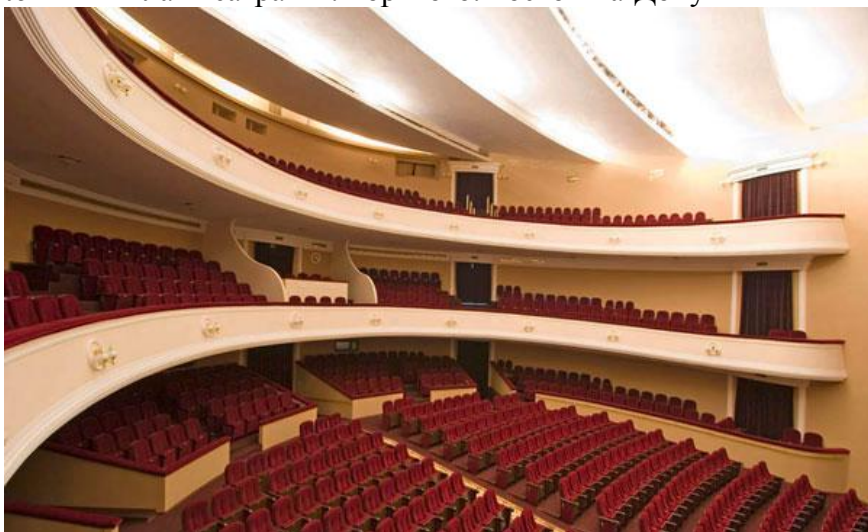


Рисунок 15 – Зрительный зал театра им. Горького. Ростов-на-Дону

4. Зал Сити Тэйсетсу Кристэл

- Местоположение: г. Ахакисава, Хоккайдо, Япония
- открылся в сентябре 1993 г
- в форме обувной коробки.
- Вместительность: 600 мест.
- Воздушный объем зала: 6 800 м³
- Общая площадь поверхности: 2 500 м²
- Пространство сцены: 250 м²
- Назначение: многофункциональный (концерты классической музыки; лекции и презентации с электроусилением голоса).

Время реверберации:

При концертах классической музыки

T₅₀₀₋₁₀₀₀:

Пустой 2,2 сек

Полный 1,9 сек

С электрическим усилением голоса.

T₅₀₀₋₁₀₀₀:

от 1,4 до 1,7 секунды с полной аудиторией

Отделочные материалы:

Потолок: 2 слоя гипсокартонных листов (12.5mm)

Стены: фанера 48 мм толщиной

Помимо листов гипсокартона, используемых на стене верхней части зала, имеются панели из натурального дерева, толщиной 48 мм ,занимающие большинство боковых стен в зале.

Пол: паркет

Кресла: полумягкие

Акустический занавес

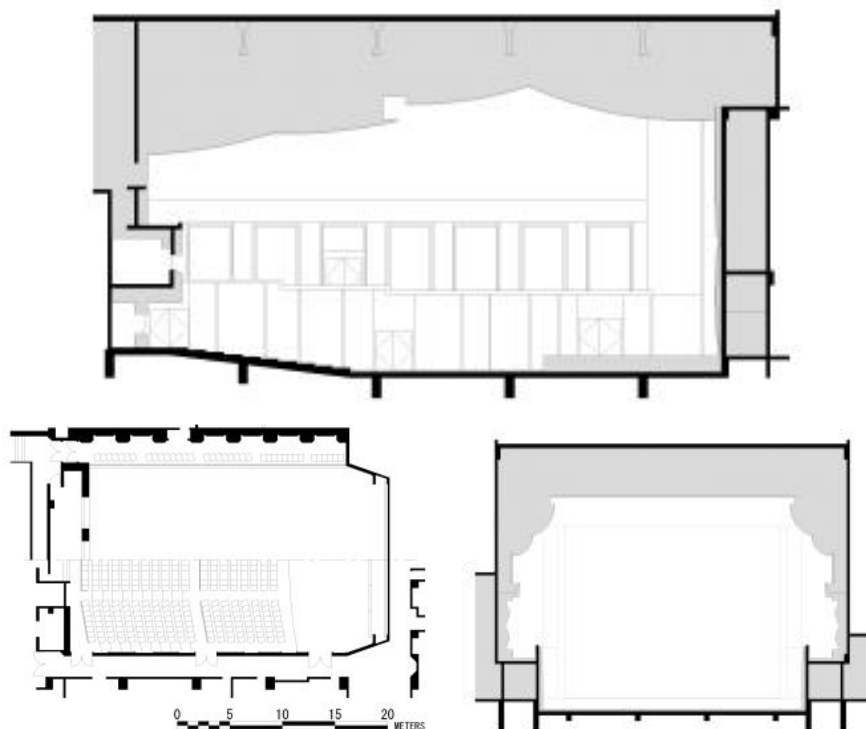


Рисунок 16 – План и разрезы зала Сити Тэйсетсу Кристэл



Рисунок 17 – Сцена, оборудованная для проведения концертов зала Сити Тэйсетсу Кристэл



Рисунок 18 – Сцена зала Сити Тэйсетсу Кристэл



Рисунок 18 – Зрительный зал Сити Тэйсетсу Кристэл

5. Центр исполнительских искусств в Бард-колледже

- Местонахождение: Аннандейл-на-Гудзоне, штат Нью-Йорк
- Архитектор: Фрэнк О. Гери
- Вместимость 900 мест
- Воздушный объем зала 9040 м³
- Общая площадь: 10220 м³
-

Время реверберации $T_{500-1000}$:

Пустой - 1,9 сек (Концерт)

1,3 сек (Опера)

Полный - 1,7 сек (Концерт)

1,1 сек (Опера)

Отделочные материалы

Потолок: Фанера

Стены: Бетон

Пол: Бетон

Кресла: Мягкие



Рисунок 19 – Центр исполнительских искусств в Бард-колледже

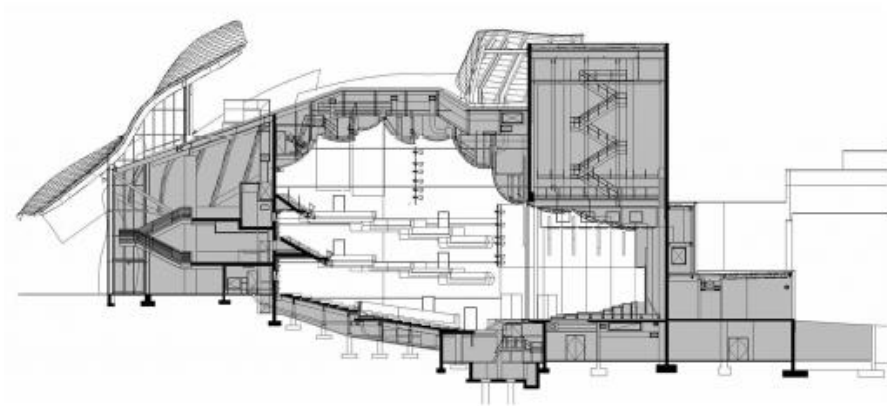


Рисунок 20 – Продольный разрез зрительного зала Центра исполнительских искусств в Бард-колледже

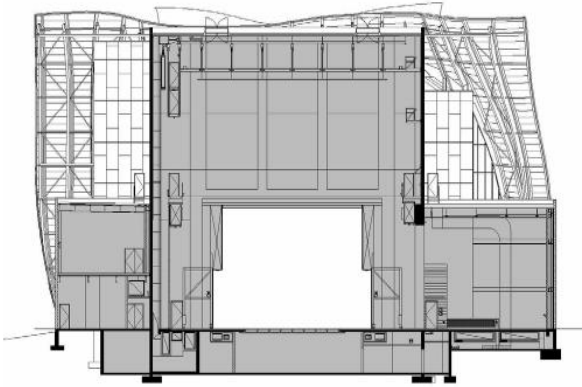


Рисунок 21 – Поперечный разрез зрительного зала Центра исполнительских искусств в Бард-колледже

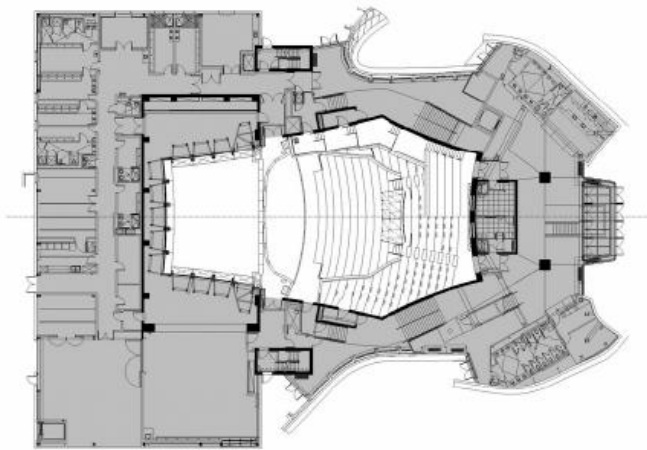


Рисунок 220 – План зрительного зала Центра исполнительских искусств в Бард-колледже



Рисунок 23 – Сцена Центра исполнительских искусств в Бард-колледже



Рисунок 24 –Зрительный зал Центра исполнительских искусств в Бард-колледже

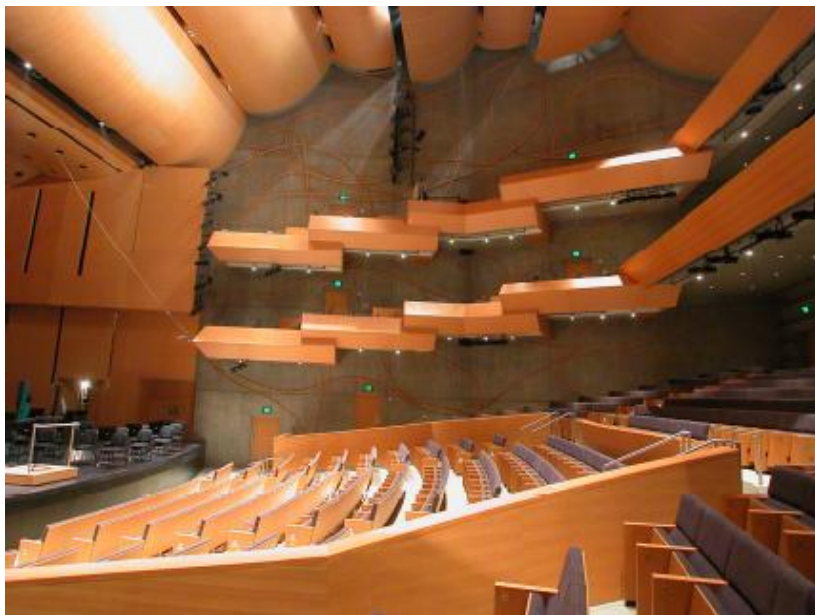


Рисунок 25 –Зрительный зал Центра исполнительских искусств в Бард-колледже

6. Театр Кумамото

- Местонахождение: Кумамото, Кюсю, Япония
- Вместимость:
 - концертный зал - 1813 места
 - зал драматического театра - 1183 места
- Воздушный объем зала 18130 м^3
- Удельный объем концертного зала - $10 \text{ м}^3/\text{чел}$

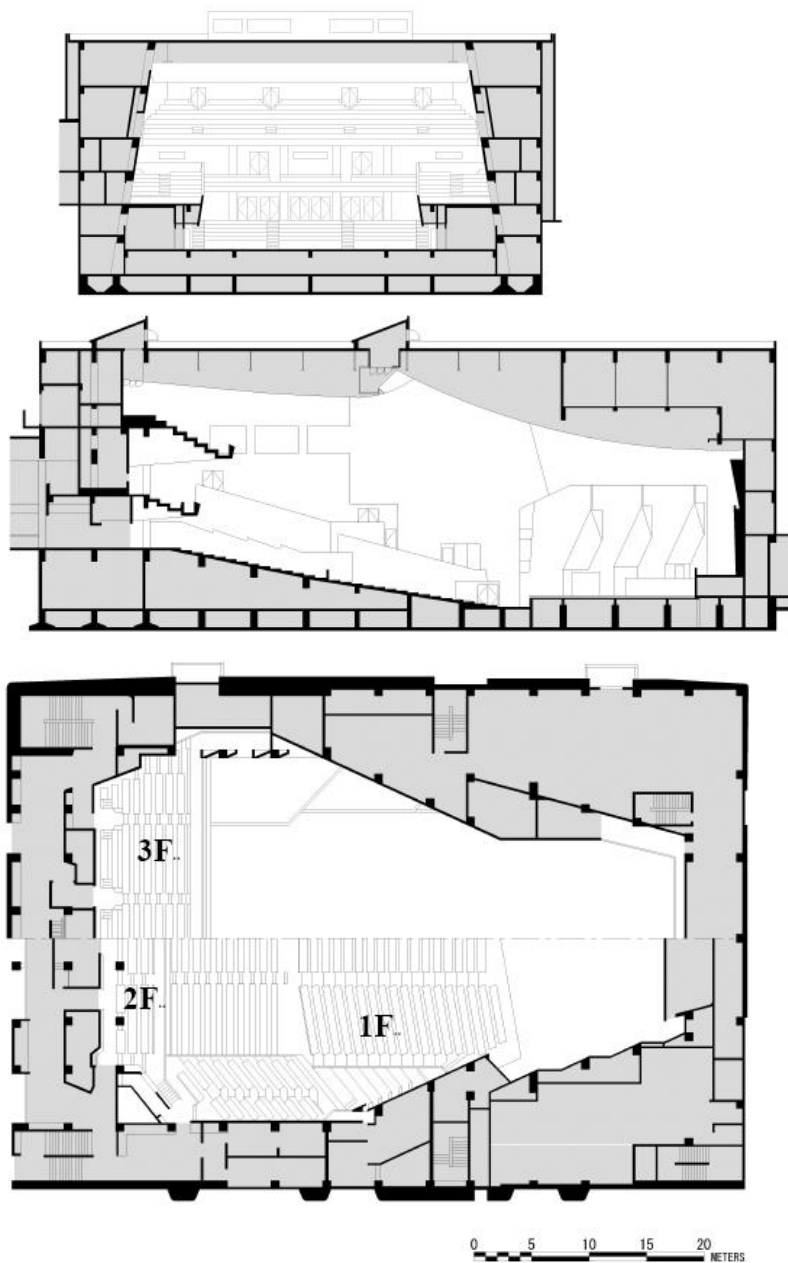


Рисунок 26 – План и разрезы театра Кумамото



Рисунок 27 – Сцена театра Кумамото

Для того чтобы получить эффективное отражения в таком большом пространстве, шириной 20 м на первом этаже, были построены провисающие стены боковых крыльев



Рисунок 28 – Стены театра Кумамото

Для получения ранних отражений в зале боковые стенки были наклонены примерно на восемь градусов



Рисунок 29 – Зрительный зал театра Куамото

7. Концертный зал Мариинского театра

- Местонахождение: г. Санкт-Петербург (2006 г) является частью кампуса зданий принадлежащих Мариинскому театру
- Архитектор: фирма архитекторов Париж Фабр
- Вместимость: концертный зал - 1100мест
- Воздушный объем зала 12000 м^3
- Удельный объем концертного зала $-10,9 \text{ м}^3/\text{чел}$

Время реверберации: $T_{500-1000}$:

Пустой - 2,2 сек

Полный - 1,9 сек



Рисунок 30 – Зрительный зал концертного зала Мариинского театра



Рисунок 31 – Сцена концертного зала Мариинского театра

Размеры нового концертного зала 22 м в ширину, 52 м в длину и 14,5 м от пола сцены до потолка. Конфигурация нового зала в основном имеет форму коробки, но многие места расположены вокруг сцены с круто наклоненной основной зоной кресел.

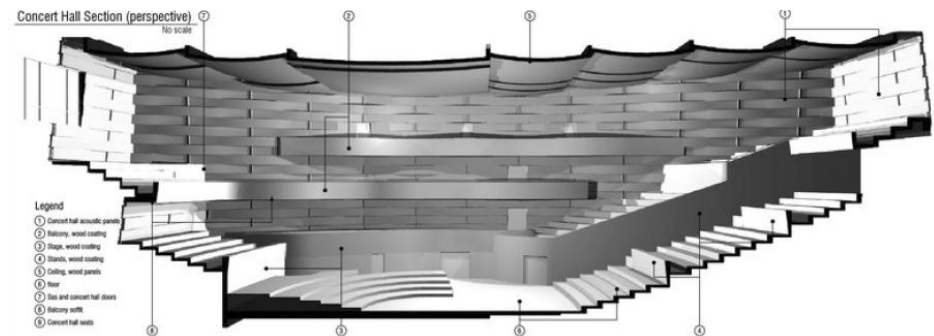


Рисунок 32 – Разрез зрительного зала концертного зала Мариинского театра

Отделка интерьера зала выполнена из древесины по всему залу, на потолке, стенах и полу. С акустической точки зрения повсеместное использование древесины в интерьере зала благоприятно. Но на потолке для лучшего отражения толщина древесины составляет около 20 см.

Акустические характеристики.

Формы и размеры помещения были изучены с помощью компьютерного моделирования с точки зрения распределения ранних отражений для различных периодов времени (0-30ms, 30-60ms, 60-90ms,) (см. рис.33).

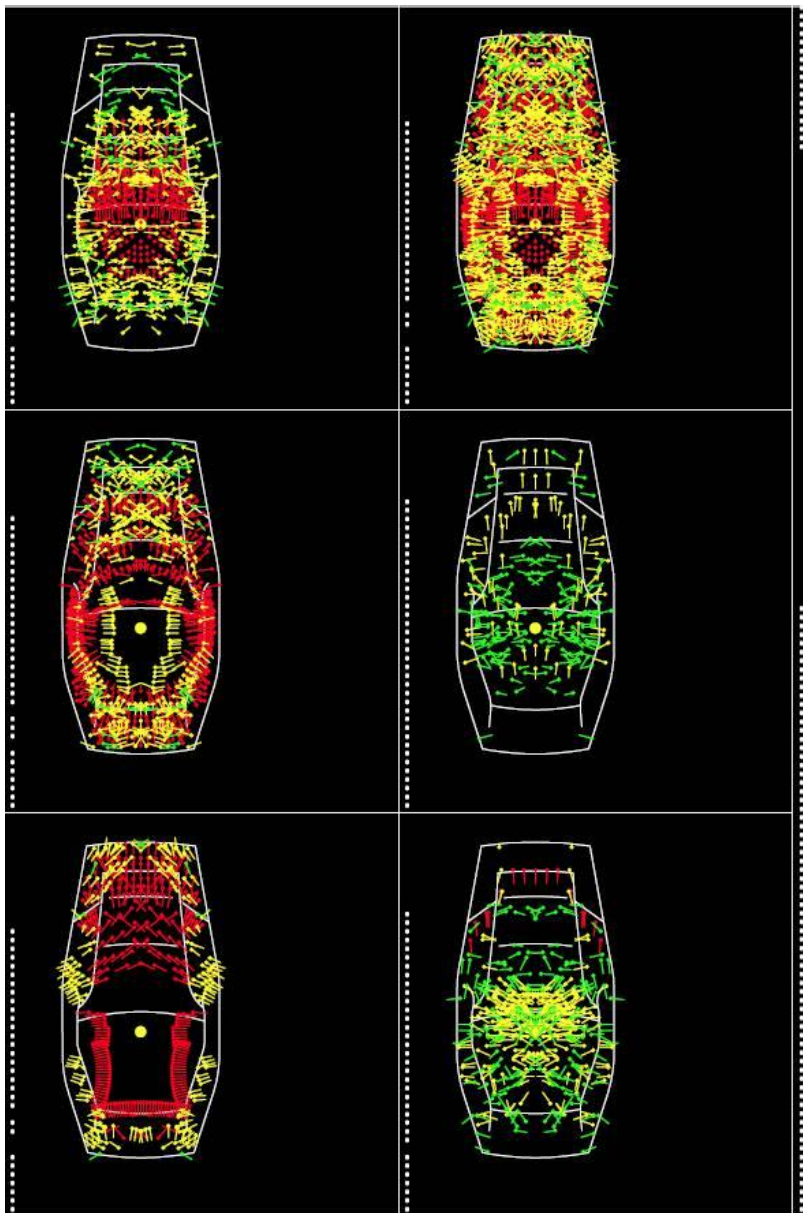


Рисунок 33 – Акустические исследования концертного зала Мариинского театра

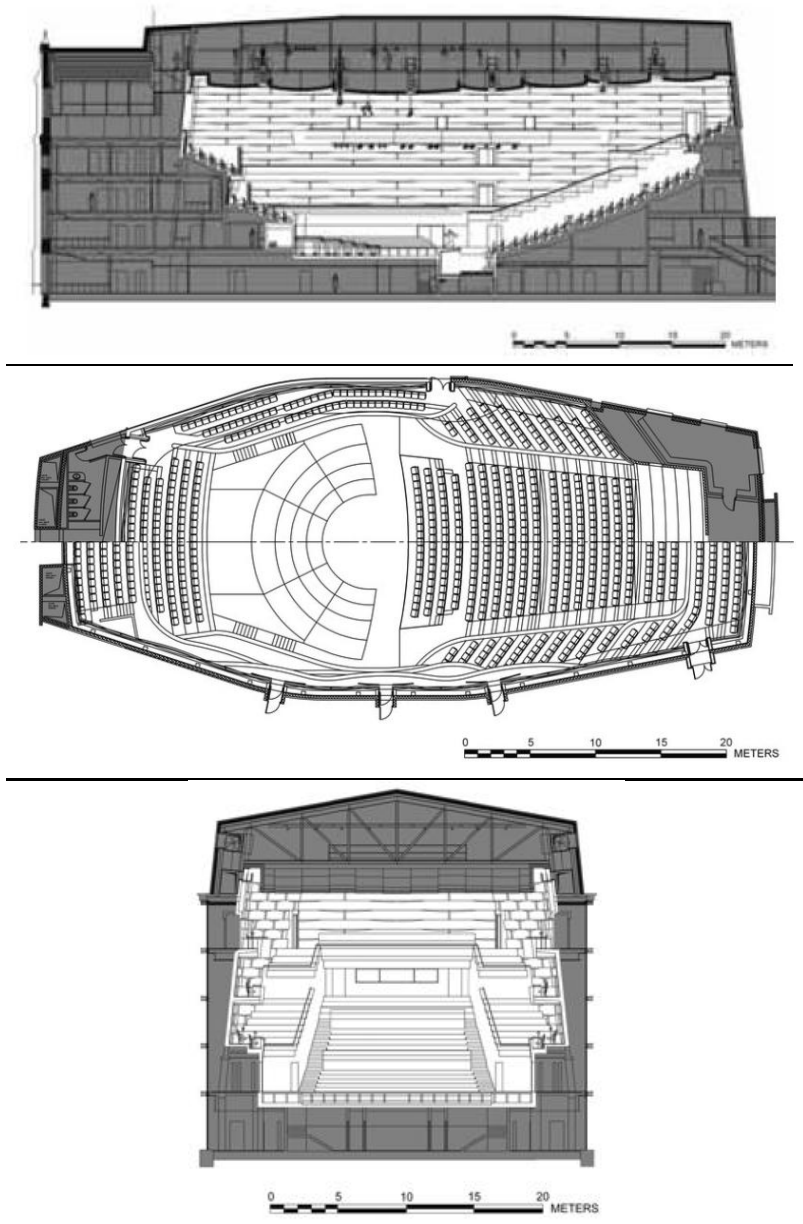


Рисунок 33 – План и разрезы концертного зала Мариинского театра

8. ХУДОЖЕСТВЕННАЯ БАШНЯ В Г.МИТО

Местонахождение: г. Мито (1990 г)

У здания есть концертный зал, театр драмы и галерея современного искусства.

Вместимость Концертного зала: 680 мест,

Воздушный объем зала: 7140 м³

Площадь внутренних поверхностей - 2250 м²

Площадь сцены: 119 м²

Форма зала - шестиугольный первый этаж, разбитый на три блока и ряд балконов окружающих пространства сцены.



Рисунок 34 –Художественная башня в г. Мито



Рисунок 35 – Концертный зал Художественной башни в г. Мито

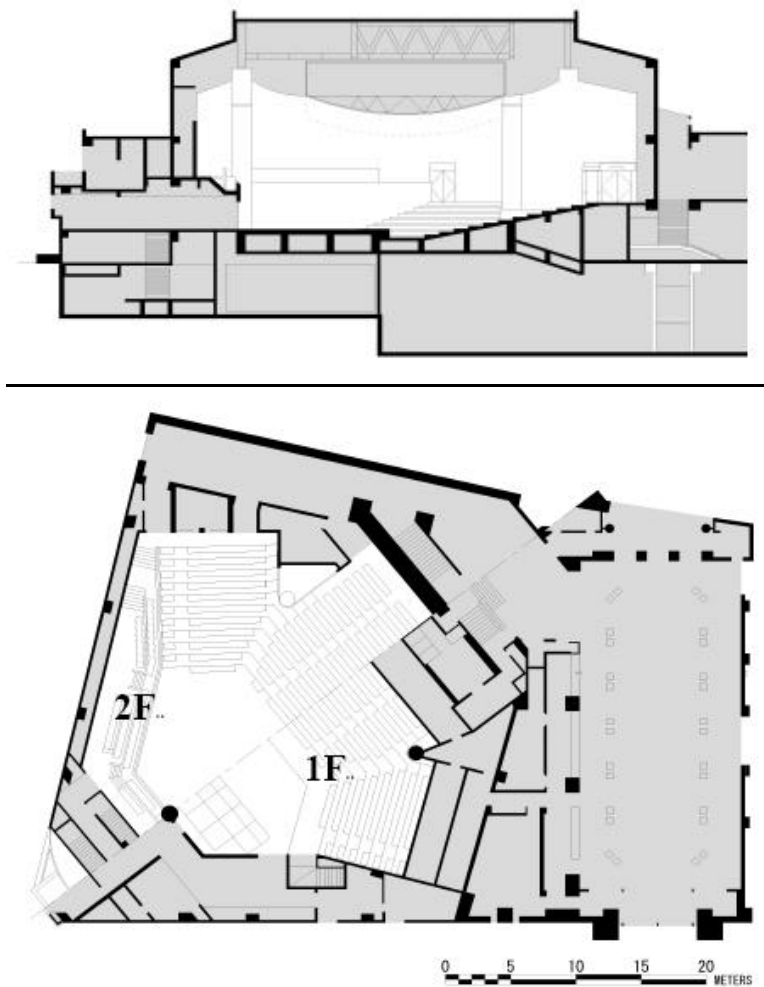


Рисунок 36 – План и разрез концертного зала Художественной башни в г. Мито

Отделочные материалы:

Потолок: гипсокартонные листы с 3 слоями стекловолокна.

Нижняя стенка: перфорированные гипсокартонные листы с 3 слоями стекловолокна.

Верхняя стенка: перфорированные гипсокартонные листы с

2 слоями стекловолокна.

Этаж: 60 мм деревянная доска на бетон

Сидения: мягкие

Орган: 46 stop, в вестибюле

Время реверберации на средних частотах:

$T_{500-1000}$

Пустой зал - 1,9 сек

Полный зал - 1,6 сек



Рисунок 37 – Сцена концертного зала Художественной башни в г. Мито

Акустика этого зала ценится многими музыкантами и любителями симфонической музыки.

Чтобы получить равномерные отражения в аудитории и пространстве сцены, над сценой был установлен большой круглый навес 13 м. в диаметре.

Высота варьируется от 6.0 м. до 8.4 м. от уровня сцены, Конец круглого навеса - укрепленное гипсом стекловолокно 24 мм толщиной.

В конце вестибюля установлен Орган



Рисунок 38 – Орган в вестибюле Художественной башни в г. Мито

III. РАЗБОР НЕКОТОРЫХ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗАЛОВ, УДАЧНЫЕ И НЕУДАЧНЫЕ РЕШЕНИЯ, ПРИЧИНА НЕУДАЧ.

Лекционные залы, аудитории

Зал	Вместимость, чел.	Объем, м ³	Удельн. объем м ³ /чел	Максимальное удаление от лектора, м	Оценка
Типовая аудитория МГУ	209	1048	5,0	14	Отл.
Лекционный зал Дворца культуры и науки в Варшаве	400	1800	4,5	17	Отл.
Большая аудитория МГУ	520	3144	6,0	24	Уд.
Конференц-зал МИД (высотка на Смоленской пл.)	520	5000	9,6	20	Неуд.

Для лекционных залов рекомендуется оптимальный удельный объем 4-5 м³/чел. Первые два зала не вызывают никаких замечаний.

Большая аудитория МГУ – объем завышен, время реверберации: $f_{500} - 2,3$ $f_{2000} - 1,9$ с при норме 1,0-1,1 с. Помещение несколько «гулкое», страдает разборчивость речи. Из-за большой высоты потолка велико запаздывание первых отражений в передней части аудитории.

Конференц-зал МИД – все недостатки предыдущего зала резко усугубляются, акустические условия неудовлетворительны.

Залы драматических театров

Театры	Вместимость, чел.	Объем, м ³	Удельн. объем м ³ /чел	Максимальное удаление от сцены, м	Оценка
Центральный театр Российской Армии	1500	17900	11,9	32	Неуд.
МХАТ (Камергерский)	1160	4850	4,2	23	Хор.
Театр им. Вахтангова	1050	4600	4,4	26	Отл.
Театр им. Пушкина	950	4400	4,6	22	Хор.

Центр. театр Российской армии – целый набор ошибок:

- удельный объем 11,9 м³/чел при оптимальном 4-5 м³/чел.

Результат – завышенное время реверберации 1,5-1,6 с на f= 500-1000 Гц (норма 1,2 с), зал «гулкий».

- высокий потолок 18,3 м – большое запаздывание отражений, в центре зала 60 мс.

- угол раскрытия стен 18° вместо 10-12° - отражения от стен не попадают в партер.

- отношение $\frac{\ell}{b} = 0,76$, рекомендуемое 1,3-1,6, результат – плохая раз-

борчивость на боковых местах.

- задняя стенка – цилиндрическая форма – фокусирование звука, эхо в первых рядах партера.

- глубина под балконом 2,6h (должно быть не более 1,5h), плохая слышимость.

Залы театров оперы и балета

Театры	Вместимость, чел.	Объем, м ³	Удельный объем м ³ /чел	Максимальное удаление от сцены, м	Оценка
Большой (Москва) Новый филиал	2300 970	13800 7900	6 8,1	24 25	Хор. Хор.
Оперы и балета (Минск)	1145	11410	10	25	Неуд.
Оперы и балета (Волгоград)	1100	5440	4,9	22	Неуд.
Детский музыкальный (Москва)	1250	8250	6,6	24	Хор.
Новая опера (Москва)	790	5500	7,0		Хор.
Ла Скала (Милан)	2289	11250	4,9	22	Уд.
Оперный (Одесса)	1728	9000	5,2	23	Уд.
Ковент-Гарден (Лондон)	2150	12250	5,7	25	Уд.
Национальная Опера (Париж) 1875	2130	10000	4,7	25	Хор.
Опера «Бастилья» (Париж) 1989	2700	21000	7,8	34	Неуд.
Театр Колон (Буэнос-Айрес) 1908	2487	20570	8,3	30	Отл.

Большой театр – в целом акустика хорошая, несколько сухо звучит музыка. Удельный объем на нижнем пределе оптимального 6-8 м³/чел.

Оперный театр в Минске – завышен объем, большая реверберация, гулко, плохая разборчивость. Форма в плане – полукруглая, фокусирование звука, отражения от стен не поступают в середину партера. Пространство под балконом $\ell = 2,2h$, должно быть не более $1,5h$, плохо слышно в задних рядах под балконом.

В Волгограде объем занижен, музыка звучит сухо, нет объемного звучания.

Детский музыкальный театр им. Н. Сац оценивается на 4. Для устранения «театрального эха» пришлось обработать звукопоглощающим материалом примыкание потолка к задней стене и барьер балкона. Широкое раскрытие боковых стен привело к дефициту отражений (от стен) в партер, что компенсируется отражениями от козырька. Кривизна задней стены создавала опасность фокусирования звука, для исправления этого принято сложное членение задней стены.

Знаменитые театры Ла Скала в Милане и Национальная Опера в Париже имеют заниженные объемы ($4,9$ и $4,7$ м³ /чел). Музыка в них звучит очень сухо и только психологический настрой публики под влиянием огромного многолетнего авторитета этих театров не позволяет оценить их акустику как неудовлетворительную. Время реверберации в этих залах на средних частотах одинаково $1,25$ с, в то время как оптимальное $1,6$ с.

Вместе с тем новый оперный театр в Париже «Бастилья» большей частью публики оценивается как неудовлетворительный с точки зрения акустики. По общему мнению специалистов лучшей акустикой обладает оперный театр Колон в Буэнос-Айресе.

Концертные залы

Зал	Вместимость, чел.	Объем, м ³	Удельн. объем м ³ /чел	T (500Гц) Измер	T(500Гц) Оптим.
Роял Альберт Холл (Лондон) 1871	5220	86650	16,6	2,4	2,2
Барбикан (Лондон) 1982	2026	17750	8,8	1,7	1,9
Зал музыкального общества (Вена) 1870	1680	15000	8,9	2,0	1,9
Бостонский симфонический 1900	2625	18740	7,1	1,9	1,9
Карнеги Холл (Нью-Йорк) 1891	2800	24270	8,7	1,8	2,0
Колонный зал Дома Союзов (Москва) 1814	1600	12500	7,8	1,8	1,85
Большой зал Консерватории (Москва) 1901	2150	17000	7,9	1,8	1,9
Концертный зал им. Чайковского 1930	1560	17630	11,2	2,0	1,9
Светлановский зал ММДМ (Москва) 2002	1800	17000 (19000) орг.	9,4 (10,5)	1,9 (2.1)	1,9 (2,35)
Гос. филармония (С.-Петербург)	1400	16380	11,7	1,8	1,9
Бетховен – Халле (Бонн) 1959	1420	16000	11,2	1,8	1,9

В больших концертных залах для симфонической музыки оптимальный удельный объем 8-10 м³/чел, при органной музыке желательно его увеличить до 10-12 м³/чел. Обычно принято считать максимальной границей вместимости 2000 человек.

Однако, удельный объем, от которого зависит величина времени реверберации, еще не всецело определяет акустические качества зала. Огромное значение имеет структура отражений. А это уже зависит от формы зала.

Старые залы – прямоугольная форма, небольшая ширина при относительно большой высоте, колонны, полуколонны, пилястры, лепнина – отражения от стен приходят раньше, чем от потолка, направления отраженного звука отличаются от направления прямого, это создает пространственное впечатление.

Этим объясняются отличные акустические качества таких залов, как Бостонский симфонический, Карнеги Холл в Нью-Йорке, театра Колон в Буэнос-Айресе, хотя в них вместимость больше 2000 мест.

Практически все зарубежные залы, приведенные в таблице, имеют хорошие акустические качества. Только Лондонский Роял Альберт Холл отличается повышенной гулкостью.

Из московских залов хорошая акустика в Колонном Зале Дома Союзов и в Большом зале консерватории (причины – выше). Неудачен в акустическом плане Концертный зал им. Чайковского. Хотя время реверберации очень близко к оптимальному, но не все оно определяет. Зал в плане имеет форму эллипса, зрители располагаются на амфитеатре с большим подъемом. При таких условиях в зал не поступают отражения от стен, они идут только от потолка и приходят с большой задержкой из-за высокого потолка.

Интересное решение большого Светлановского зала Московского международного дома музыки, 2002 г. строительства. При вместимости 1800 чел. в обычном варианте его объем 17000 м^3 (удельный объем $9,4 \text{ м}^3 / \text{чел}$), время реверберации на средних частотах соответствует оптимальному. При исполнении органной музыки в звукоотражающем козырьке открываются окна (25% площади) и объем увеличивается до 19000 м^3 (удельный - $10,5 \text{ м}^3 / \text{чел}$), время реверберации увеличивается до 2,1 с.

Чтобы избежать отрицательных последствий купола (фокусирования) на его внутренней поверхности сделаны специальные отражатели, разбивающие его сферическую форму и обеспечивающие «перемешивание» звуков для повышения диффузности поля.

Пример №1

ПРИМЕР АКУСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ЗАЛА ДРАМАТИЧЕСКОГО ТЕАТРА НА 750 ЗРИТЕЛЬСКИХ МЕСТ

Условие: Требуется разработать проект зрительного зала драматического театра на 750 зрительских мест.

Принимаем удельный объем $4,5 \text{ м}^3/\text{чел}$, в этих условиях объем зала составит $V = 4,5 \cdot 750 = 3375 \text{ м}^3$.

Принимаем пропорции зала $\frac{l}{e} = 1,5$; $\frac{e}{n} = 1,4$, в этом случае ширина зала $e = 1,4h$, $l = 1,5e = 2,1h$.

Объем зала $V = 2,1h \cdot 1,4h \cdot h = 2,94 h^3$; $3375 = 2,94h^3$; $h^3 = 1147,96$; $h = 10,47 \text{ м}$.

Принимаем высоту зала $h = 10,5$, при этом ширина зала $e = 1,4h = 1,4 \cdot 10,5 = 14,7 \text{ м}$, длина зала $l = 1,5e = 1,5 \cdot 14,7 = 22,05 \text{ м}$.

Корректируем длину зала с учетом того, что по длине зала 2 м занимает авансцена, 1,5 м – проход перед авансценой и 1,2 м проход в центре зала. Принимает шаг рядов 0,9 м, тогда количество рядов составит

$$n = \frac{22,05 - 2 - 1,5 - 1,2}{0,9} = 19,277. \text{ Принимаем } 21 \text{ ряд, длина зала составит}$$

$$l = 21 \cdot 0,9 + 2 + 1,5 + 1,2 = 23,6 \text{ м}.$$

Аналогично корректируем ширину зала, принимая центральный проход 1,3 м и ширину одного кресла 0,5 м.

$$\text{Количество мест в ряду в среднем составляет } \frac{14,7 - 1,3}{0,5} = 26,8.$$

Принимаем 26 мест, ширина зала составит $26 \cdot 0,5 + 1,3 = 14,3$. После корректировки объем зала составляет

$$V = 23,6 \cdot 14,3 \cdot 10,5 = 3543,5 \text{ м}^3.$$

При этом удельный объем $V_{\text{уд}} = \frac{3543,5}{750} = 4,7 \text{ м}^3$, что вполне укладывается в норму.

Итак, в партере у нас 21 ряд по 26 мест (в среднем), т.е. в партере размещается 546 человек, на балконе необходимо предусмотреть 204 места.

Строим план нашего зала. Принимаем угол раскрытия боковых стен 10° , тогда расширение зала с каждой стороны составит $\text{tg } 10^{\circ} \cdot l = 0,176 \cdot 23,6 = 4,15$ м, принимаем 4 м.

В этом случае задняя стена составит 18,3 м, ширина зала у авансены 10,3 м.

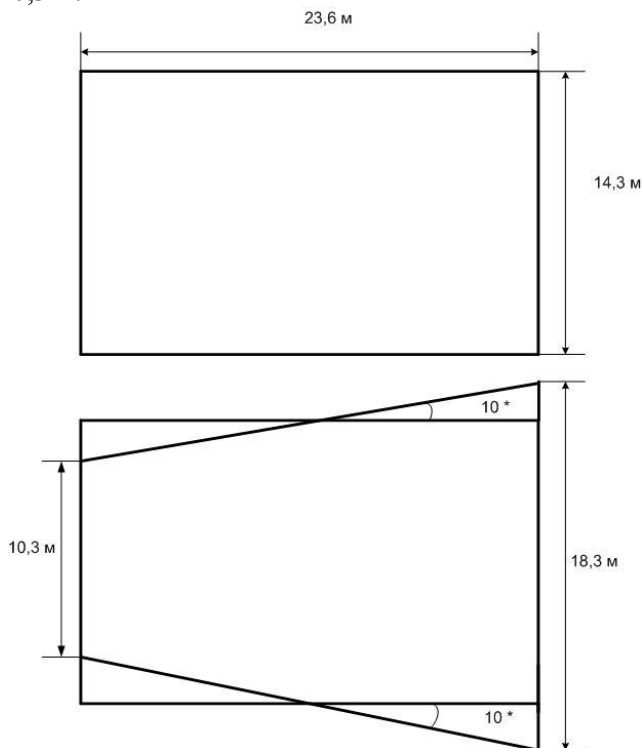


Рисунок 39

Принимаем на балконе 6 рядов, что составит вынос балкона $6 \cdot 0,9 = 5,4$ м. Ширина балкона в передней части составит $18,3 - 2 \text{ tg } 10^{\circ} \cdot 5,4 = 18,3 - 1,9 = 16,4$ м. Средняя ширина балкона $\frac{18,3 + 16,4}{2} = 17,35$ м.

Принимаем на балконе 2 прохода общей шириной 1,85 м, тогда количе-

ство мест в ряду $\frac{17,35 - 1,85}{0,5} = 31$, а всего на балконе разместятся 31·

6 = 186 человек. Всего осталось 204 – 186 = 18 человек, для них выполним 2 балкона по боковым стенам по 9 человек.

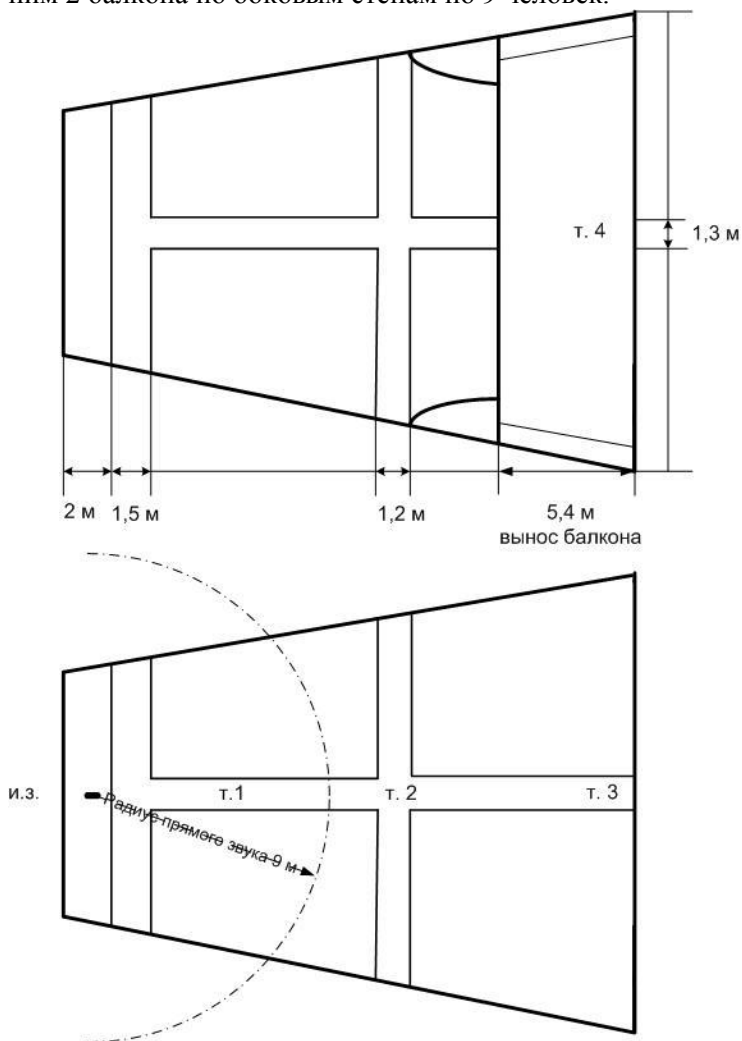


Рисунок 40

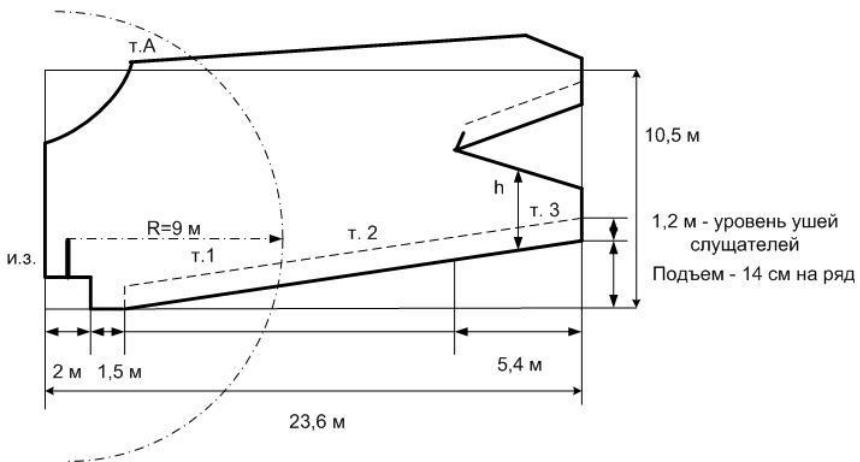
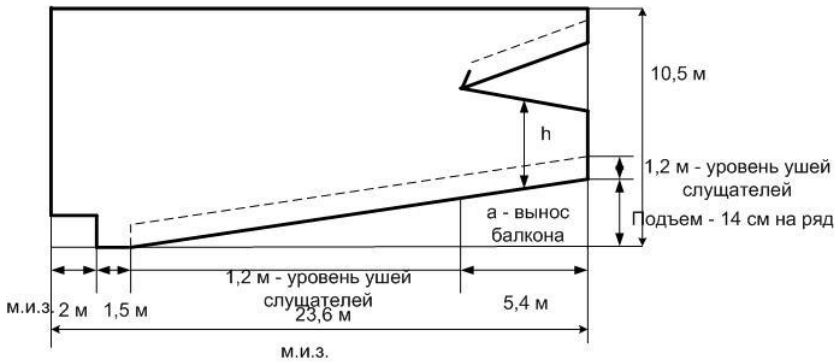
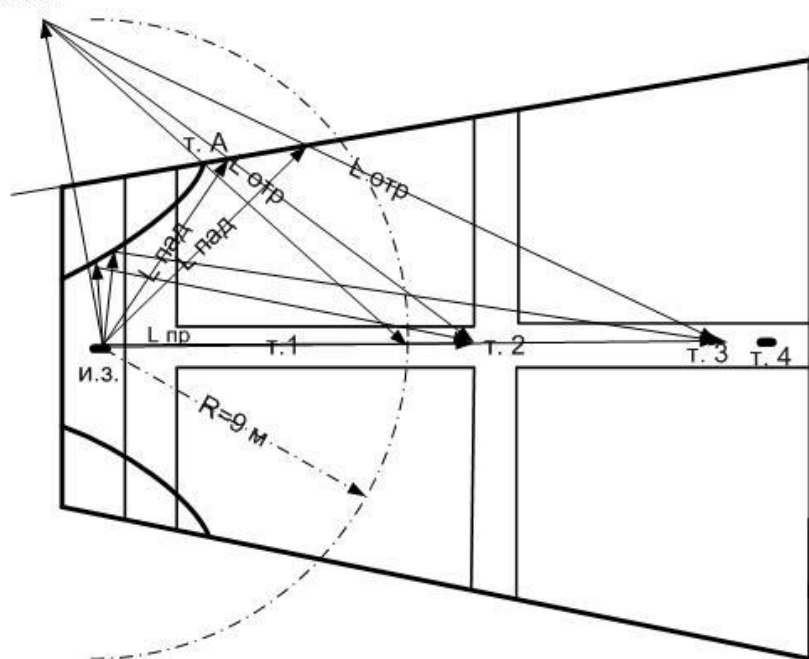


Рисунок 41

М.И.З.



т. А - начало бокового отражателя

R - радиус прямого звука

т. 1, т. 2, т. 3 - контрольные точки

Рисунок 42 – План зала

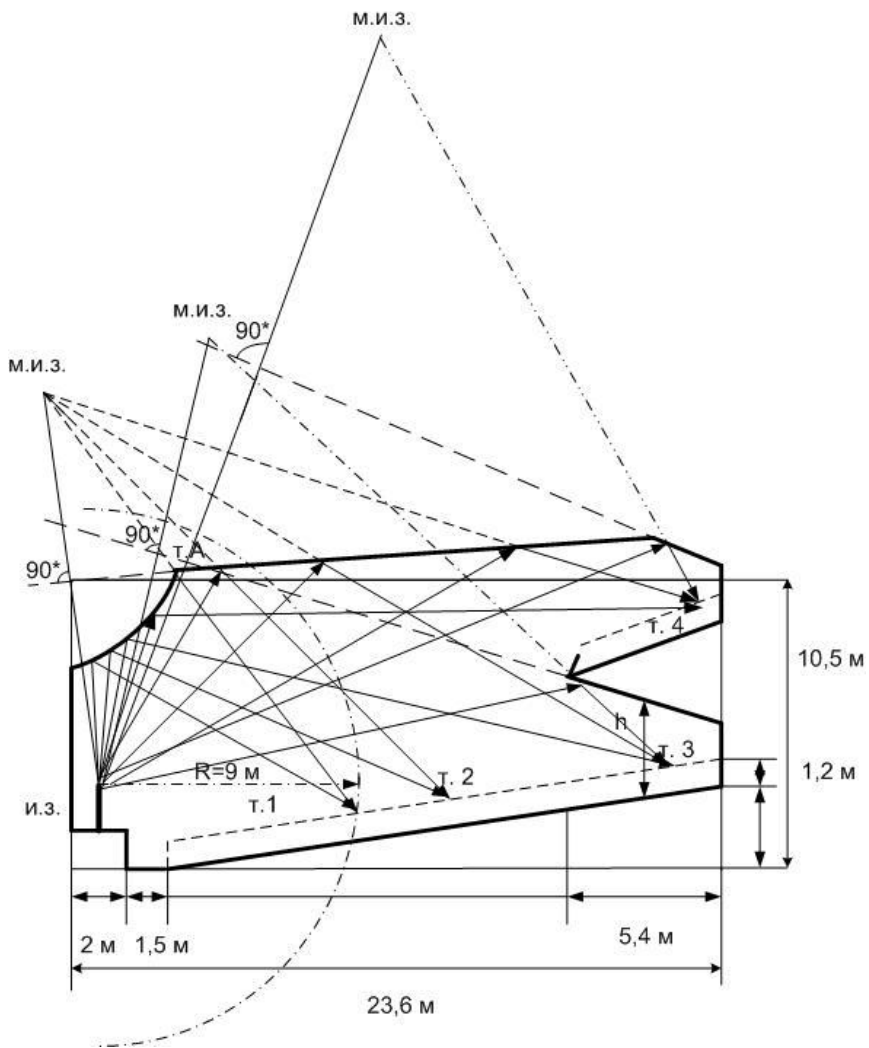


Рисунок 43 – Разрез зала

Проверка времени запаздывания звука:

$$t_{\text{зан}} = \frac{(\ell_{\text{отр}} - \ell_{\text{пр}}) \cdot 1000}{340} \leq 20 - 25 \text{ мс}$$

Т.1. В первой точке запаздывания звука нет.

Т.2.

по разрезу:

$$1. t_{\text{зан}} = \frac{(18 - 11,5) \cdot 1000}{340} = 19 \text{ мс} < 20 \text{ мс}$$

$$2. t_{\text{зан}} = \frac{(20,5 - 11,5) \cdot 1000}{340} = 26 \text{ мс} > 25 \text{ мс} - \text{желательно опустить}$$

потолок

по плану:

$$3. t_{\text{зан}} = \frac{(14,6 - 11,5) \cdot 1000}{340} = 9,1 \text{ мс} < 20 \text{ мс}$$

$$4. t_{\text{зан}} = \frac{(16,5 - 11,5) \cdot 1000}{340} = 14,7 \text{ мс} < 20 \text{ мс}$$

Т.3.

по разрезу:

$$1. t_{\text{зан}} = \frac{(25,8 - 19,5) \cdot 1000}{340} = 18,5 \text{ мс} < 20 \text{ мс}$$

$$2. t_{\text{зан}} = \frac{(26,2 - 19,5) \cdot 1000}{340} = 19,7 \text{ мс} < 20 \text{ мс}$$

$$3. t_{\text{зан}} = \frac{(22,5 - 19,5) \cdot 1000}{340} = 8,8 \text{ мс} < 20 \text{ мс}$$

по плану:

$$5. t_{\text{зан}} = \frac{(22,5 - 19,5) \cdot 1000}{340} = 8,8 \text{ мс} < 20 \text{ мс}$$

$$6. t_{\text{зан}} = \frac{(23,5 - 19,5) \cdot 1000}{340} = 11,8 \text{ мс} < 20 \text{ мс}$$

Т.4.

по разрезу:

$$1. t_{\text{зан}} = \frac{(26,5 - 22,5) \cdot 1000}{340} = 11,8 \text{ мс} < 20 \text{ мс}$$

$$2. t_{зан} = \frac{(25,5 - 22,5) \cdot 1000}{340} = 8,8 \text{мс} < 20 \text{мс}$$

$$3. t_{зан} = \frac{(25 - 22,5) \cdot 1000}{340} = 7,3 \text{мс} < 20 \text{мс}$$

по плану:

$$5. t_{зан} = \frac{(25,5 - 21) \cdot 1000}{340} = 11,7 \text{мс} < 20 \text{мс}$$

$$6. t_{зан} = \frac{(21,5 - 21) \cdot 1000}{340} = 7,3 \text{мс} < 20 \text{мс}$$

Проводим расчет времени реверберации в табличной форме. Поскольку для студента главное уяснить порядок и принципы расчета, расчет проводим для трех октавных полос 125, 500 и 2000 Гц, опуская октавы 250, 1000 и 4000 Гц.

Определение требуемого времени реверберации

По графику на рис. 3 оптимальное время реверберации при объеме зала 3543 м³ составляет $T_{500} = 1,03$ секунды.

Скорректируем рекомендуемое время реверберации для частот 125 Гц и 2000 Гц. Для речевых залов рекомендуется не изменять время реверберации на частоте 2000 Гц, а на частоте 125 Гц уменьшить на 15%.

Получаем:

$$T_{125} = 0,9 \text{с}$$

$$T_{500} = 1,03 \text{с}$$

$$T_{2000} = 1,03 \text{с}$$

Определение расчетного времени реверберации

Определяем площади составляющих ограждающих конструкций зала S , принимаем коэффициенты звукопоглощения α по таблице 2 и определяем величины эквивалентной площади поглощения отдельных поверхностей $A = \alpha S$. При этом учитываем, что площадь пола вводится в расчет только свободная от мест зрителей, т.е. только в проходах.

Таблица №1'

Поверхности и материалы	Площадь S, м ²	Октавные полосы частот, Гц					
		125		500		2000	
		α	A	α	A	α	A
Потолок (включая нижнюю часть балкона) штукатурка, клеевая краска	431	0,02	8,62	0,02	8,62	0,04	17,24
Стены, штукатурка, клеевая краска	674	0,02	13,48	0,02	13,48	0,04	26,96
Пол, ковер на войлочной подкладке	72	0,11	7,92	0,37	26,64	0,27	19,44
Проем сцены	60	0,2	12	0,3	18	0,3	18
Добавочное поглощение	S_{общ} = 1596	0,06	95,76	0,04	63,84	0,04	63,84
Зрители в мягких креслах 70% N = 525 _{кресел}	251	0,25	131,25	0,4	210	0,45	236,25
Кресла мягкие 30% N = 225 _{кресел}	108	0,15	33,75	0,2	45	0,3	67,5
	A	302,78		385,58		449,23	
	$\bar{\alpha}$	0,19		0,24		0,28	
	$-\ln(1-\bar{\alpha})$	0,21		0,27		0,33	
	T, с	1,7		1,3		1,03	

Т.к. оптимальное время реверберации составляет 1,03 секунды, а расчетное 1,3 с, то принимаем решение облицевать нижнюю часть стен деревянными панелями с воздушной полостью:

Таблица №2'

Поверхности и материалы	Площадь S, м ²	Октавные полосы частот, Гц					
		125		500		2000	
		α	A	α	A	α	A
Потолок	431	0,02	8,62	0,02	8,62	0,04	17,24
Стены, штукатурка, клеевая краска	274	0,02	5,48	0,02	5,48	0,04	10,96
Стены облицованные деревянными панелями с воздушным промежутком 50 мм.	400	0,3	120	0,06	24	0,04	16
Пол ковер	72	0,11	7,92	0,37	26,64	0,27	19,44
Проем сцены	60	0,2	12	0,3	18	0,3	18
Добавочное поглощение	S_{общ} = 1596	0,06	95,76	0,04	63,84	0,04	63,84
Зрители 70% N = 525	251	0,25	131,25	0,4	210	0,45	236,25
Кресла N = 225	108	0,15	33,75	0,2	45	0,3	67,5
	A	414,78		401,58		449,23	
	$\bar{\alpha}$	0,26		0,25		0,28	
	$-\ln(1-\bar{\alpha})$	0,3		0,29		0,33	
	T, с	1,2		1,25		1,03	

$$T = \frac{0,163V}{\varphi(\alpha)S_{общ} + nV}; \text{ с} \quad n_{125500} = 0; \quad n_{2000} = 0,009$$

$$T_{125} = \frac{0,163 \cdot 3543,5}{0,3 \cdot 1596} = 1,2 \text{ с}; \quad T_{500} = \frac{0,163 \cdot 3543,5}{0,29 \cdot 1596} = 1,25 \text{ с}$$

$$T_{2000} = \frac{0,163 \cdot 3543,5}{0,33 \cdot 1596 + 0,009 \cdot 3543,5} = 1,03 \text{ с}$$

Несколько завышено время реверберации в октаве 500 Гц.

Смотрим, нельзя ли сократить высоту зала. Подъем пола зала относительно центра, это 10 рядов с подъемом 14 см на ряд, т.е. всего 1,4 м, высоту до низа балкона принимаем 2,2 м, балкон занимает по высоте 2,5 м, в конце балкона высота 2,2 м и наклонный потолок еще 1 м. Итого в сумме это составляет 9,3 м, таким образом, мы можем опустить потолок на 1,2 м. В этом случае объем зала составит $23,6 \cdot 14,3 \cdot 9,3 = 3138,56 \text{ м}^3$, а время реверберации в октаве 500 Гц составит

$$T_{500} = \frac{0,163 \cdot 3138,56}{0,29 \cdot 1596} = 1,1 \text{ с, что вполне допустимо.}$$

Проверка разборчивости речи:

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

Т.1.

$$K_{p \ 125 \text{ Гц}} = \frac{414,78}{16\pi(1-0,026)^2} \left(\frac{1}{5^2} \right) = 0,6$$

$$K_{p \ 500 \text{ Гц}} = \frac{401,58}{16\pi(1-0,25)^2} \left(\frac{1}{5^2} \right) = 0,0,57$$

$$K_{p \ 2000 \text{ Гц}} = \frac{449,23}{16\pi(1-0,028)^2} \left(\frac{1}{5^2} \right) = 0,69$$

Т.2.

$$K_{p \ 125 \text{ Гц}} = \frac{414,78}{16\pi(1-0,26)^2} \left(\frac{1}{11,5^2} + \frac{1-0,02}{18^2} + \frac{1-0,02}{20,5^2} + 2 \frac{1-0,3}{14,6^2} + 2 \frac{1-0,3}{16,5^2} \right) = 0,37$$

$$K_{p \ 500 \text{ Гц}} = \frac{401,58}{16\pi(1-0,25)^2} \left(\frac{1}{11,5^2} + \frac{1-0,02}{18^2} + \frac{1-0,02}{20,5^2} + 2 \frac{1-0,06}{14,6^2} + 2 \frac{1-0,06}{16,5^2} \right) = 0,41$$

$$K_{p \ 2000 \text{ Гц}} = \frac{449,23}{16\pi(1-0,28)^2} \left(\frac{1}{11,5^2} + \frac{1-0,04}{18^2} + \frac{1-0,04}{20,5^2} + 2 \frac{1-0,04}{14,6^2} + 2 \frac{1-0,04}{16,5^2} \right) = 0,5$$

Т.3.

$$K_{p \ 125 \text{ Гц}} = \frac{414,78}{16\pi(1-0,26)^2} \left(\frac{1}{19,5^2} + \frac{1-0,02}{25,8^2} + \frac{1-0,02}{26,2^2} + \frac{1-0,02}{22,5^2} + 2 \frac{1-0,3}{22,5^2} + 2 \frac{1-0,3}{23,5^2} \right) = 0,22$$

$$K_{p \ 500 \text{ Гц}} = \frac{401,58}{16\pi(1-0,25)^2} \left(\frac{1}{19,5^2} + \frac{1-0,02}{25,8^2} + \frac{1-0,02}{26,2^2} + \frac{1-0,02}{22,5^2} + 2 \frac{1-0,06}{22,5^2} + 2 \frac{1-0,06}{23,5^2} \right) = 0,29$$

$$K_{p \ 2000 \text{ Гц}} = \frac{449,25}{16\pi(1-0,28)^2} \left(\frac{1}{19,5^2} + \frac{1-0,04}{25,8^2} + \frac{1-0,04}{26,2^2} + \frac{1-0,04}{22,5^2} + 2 \frac{1-0,04}{22,5^2} + 2 \frac{1-0,04}{23,5^2} \right) = 0,34$$

Во всех точках рассчитанный $K_p > 0,20$, следовательно разборчивость речи во всех слушательских местах будет удовлетворительная.

Пример №2

ПРИМЕР АКУСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТА ЗАЛА МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА 600 ЗРИТЕЛЬСКИХ МЕСТ

Условие: Требуется разработать проект зрительного зала многоцелевого назначения на 600 зрительских мест.

I. Основные размеры и форма зала

Принимаем удельный объем $5 \text{ м}^3/\text{чел}$, в этих условиях объем зала составит $V = 5 \cdot 600 = 3000 \text{ м}^3$.

Принимаем пропорции зала $\frac{l}{e} = 1,5$; $\frac{e}{n} = 1,4$, в этом случае ширина зала $e = 1,4h$, $l = 1,5e = 2,1h$.

$$\begin{aligned} \text{Объем зала } V &= 2,1h \cdot 1,4h \cdot h = 2,94 h^3; 3000 = 2,94h^3; \\ h^3 &= 1020; h = 10\text{м}. \end{aligned}$$

Принимаем высоту зала $h = 10$, при этом ширина зала $e = 1,4 h = 1,4 \cdot 10 = 14 \text{ м}$, длина зала $l = 1,5e = 1,5 \cdot 14 = 21 \text{ м}$.

Определим необходимость проектирования балкона:

Найдем площадь пола: $14 \cdot 21 = 294 \text{ м}^2$, Площадь, которую занимает одно кресло: $0,9 \cdot 0,5 = 0,45 \text{ м}^2$. Найдем количество кресел, которые мы можем поставить на эту площадь: $294 : 0,45 = 653,3$ кресла, нам нужно только 600, значит проектировать балкон в данном зале нет необходимости, лишь немного скорректируем размеры зала.

Корректируем длину зала с учетом того, что по длине зала 2 м занимает авансцена, 1,7 м – проход перед авансценой, проход в центре зала делать не будем.

Принимает шаг рядов 0,9 м, тогда количество рядов составит $n = \frac{21 - 2 - 1,7}{0,9} = 19,22$. Принимаем 22 ряда, длина зала составит

$$l = 22 \cdot 0,9 + 2 + 1,7 = 23,5 \text{ м}.$$

Аналогично корректируем ширину зала, центральный проход делать не будем, а запроектируем 2 прохода у стен по 1,25 м каждый, ширина одного кресла 0,5 м.

Количество мест в ряду в среднем составляет $\frac{14 - 2,5}{0,5} = 23$ места.

Проверим, все ли войдут на эти места: $23 \cdot 22 = 506$ кресел, этого не достаточно, поэтому нужно увеличить ширину ряда: $600 : 22 = 27,27$ мест в ряду нужно, что бы разместить в зале 600 человек. Принимаем количество мест в ряду 28. Тогда ширина зала составит $28 \cdot 0,5 + 2,5 = 16,5$ м. Еще раз проверим: $28 \cdot 22 = 616$ мест, 16 мест можно убрать, если разместить кресла в шахматном порядке, что улучшит видимость, тогда в одном ряду будет по 27 мест, а в следующем 28 и так далее.

После корректировки объем зала составляет $V = 23,5 \cdot 16,5 \cdot 10 = 3877,5 \text{ м}^3$, но это не окончательный объем, он уменьшится после того как мы вычертим разрез, а за счет поднятия кресел в партере и амфитеатре и искривления формы потолка высота в центре зала уменьшится до 8 м.

Только теперь можно получить окончательный воздушный объем зрительного зала (без учета объема сцены):

$$V = 23,5 \cdot 16,5 \cdot 8 = 3102 \text{ м}^3,$$

При этом удельный объем $V_{\text{уд.}} = \frac{3102}{600} = 5,17 \text{ м}^3/\text{чел}$, что вполне

укладывается в норму.

Схема плана и продольного разреза зала показана на рис. 9.

Пошаговое построение чертежей зрительного зала выполняется аналогично Примеру №1 (рис 39-43).

Общая площадь внутренних поверхностей $S_{\text{общ}} = 1340 \text{ м}^2$.

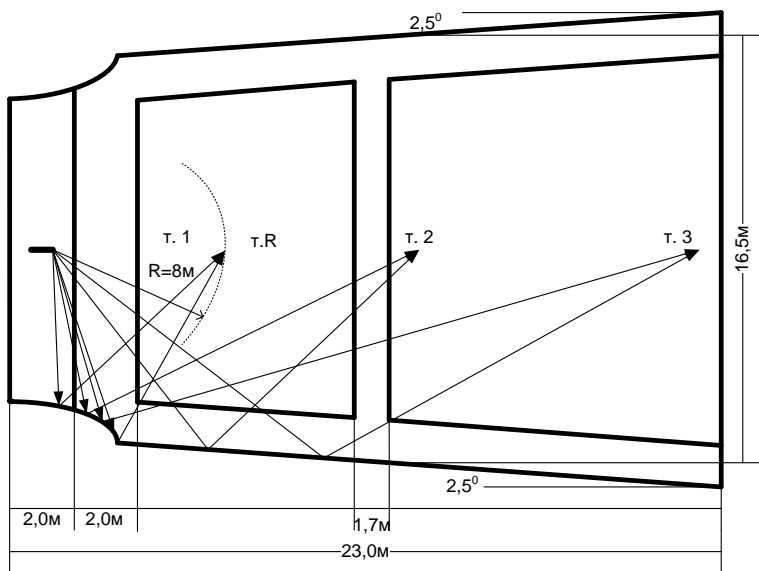
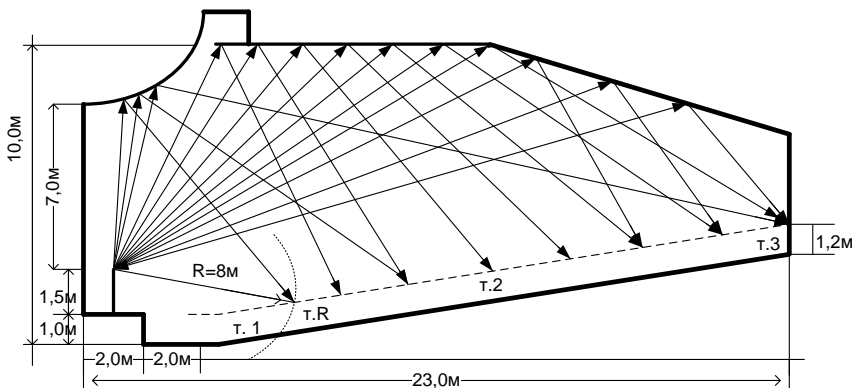


Рисунок 44 - План и разрез зала многоцелевого назначения на 600 мест с построением звуковых отражений от источника звука, находящегося на авансцене.

Форма зала в плане и продольном разрезе выбрана исходя из вышеизложенных рекомендаций и следующих требований:

1). Обеспечить слушателей в партере достаточно интенсивным прямым звуком и мало запаздывающими отражениями. Для залов многоцелевого назначения необходимо, чтобы при удалении слушателей от источника звука более чем на 9-10 м, разность ходов отраженного и прямого звуков не превышала 10 м (желательно до 7 м), что соответствует времени 25-30 мс.

2). Обеспечить возможно большую диффузность звукового поля.

Чтобы выполнить первое требование, пол в зале должен иметь значительный уклон, тем самым обеспечено превышение слушателей последующего ряда над слушателями предыдущего, дающее меньшие потери звука за счет экранирования впереди сидящими зрителями.

Над порталом участок потолка сделан наклонным для равномерного распределения первых отражений. Отражатель над авансценой и боковые отражатели при расположении источника звука на авансцене обеспечивают на расстоянии 9 м от источника достаточно малое запаздывание первых интенсивных отражений.

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

Второе требование, выполняется путем разведения стен. В данном случае каждая стена составляет угол $2,5^\circ$ с продольной осью плана зала, что способствует повышению диффузности звукового поля и значительно ослабляет неприятный эффект "порхающего эха".

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

II. Проверка допустимости применения геометрических отражений

Проверка времени запаздывания выполняется аналогично Примеру №1

3). Расчет времени реверберации и его регулировка

Определение требуемого времени реверберации

По графику рис. 3 находим рекомендуемое для объема $V = 3060 \text{ м}^3$ на частотах 500-2000 Гц время реверберации $T = 1,2 \text{ с}$.

Скорректируем рекомендуемое время реверберации для частоты 2000 Гц берется такое же время реверберации, как и на частоте 500 Гц, а на частоте 125 Гц допускается увеличение на 20%,

Получаем:

$$T_{125} = 1,5 \text{ с}$$

$$T_{500} = 1,2 \text{ с}$$

$$T_{2000} = 1,2 \text{ с}$$

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 (5):

$$T = \frac{0,163V}{\varphi(\bar{\alpha})S_{\text{общ}} + nV}; \text{ с} \quad (5)$$

где V – объем зала, м^3 ,

$S_{\text{общ}}$ – суммарная площадь всех ограждающих поверхностей зала, м^2 ,

$\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения в зале,

$\varphi(\bar{\alpha}) = -\ln(1 - \bar{\alpha})$ – функция среднего коэффициента звукопоглощения $\bar{\alpha}$, значения которой приведены в таблице 2.

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 $n = 0,022$.

Но расчет мы начнем, в отличие от Примера №1 с нахождения **требуемого среднего коэффициента звукопоглощения α и общей ЭПЗ зала $A_{общ}$** . Для этого выразим из формулы Эйринга искомую величину:

На частоте 125 Гц:

$$\overline{\varphi(\alpha)} = \frac{0,163 \cdot V}{T \cdot S_{общ}} = \frac{0,163 \cdot 3060}{1,5 \cdot 1340} = 0,25$$

$$\overline{\alpha} = 0,22$$

$$A^{тр}_{общ125} = \alpha \cdot S_{общ} = 0,22 \cdot 1340 = 295 \text{ м}^2.$$

На частоте 500 Гц:

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

$$\overline{\alpha} = 0,26$$

$$A^{тр}_{общ500} = \alpha \cdot S_{общ} = 0,26 \cdot 1340 = 350 \text{ м}^2$$

На частоте 2000 Гц:

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

$$\overline{\alpha} = 0,25$$

$$A^{тр}_{общ2000} = \alpha \cdot S_{общ} = 0,25 \cdot 1340 = 335 \text{ м}^2$$

Общую площадь составляющих ограждающих конструкций зала S мы определили после построения плана и разреза зала, запишем ее поэлементно в Таблицу № 1^{1/}, принимаем коэффициенты звукопоглощения α по таблице 2 и определяем величины эквивалентной площади поглощения отдельных поверхностей $A_{125,500,2000} = \alpha S$. При этом учиты-

ваем, что площадь пола вводится в расчет только свободная от мест зрителей, т.е. только в проходах.

В отдельной Таблице №2^{//} подбираем тип кресел.

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

Таблица 1^{//}

Определение эквивалентной площади звукопоглощения $A=\alpha \times S$ (m^2) в зависимости от площади помещения S (m^2)

Поверхности и материалы	Площадь S , m^2	Частота, Гц					
		125		500		2000	
		α	A	α	A	α	A
Потолок (штукатурка по металлической сетке)	438	0,04	17	0,06	26	0,04	17
Стены (штукатурка по кирпичу)	418	0,02	8	0,02	8	0,04	16
Пол паркетный, не занятый слушателями	106	0,04	4	0,06	6	0,06	6
Проем сцены	91	0,2	18	0,3	27	0,3	27
Внутренние поверхности оркестровой ямы, отделанные деревом	66	0,1	7	0,1	7	0,08	5
Добавочное звукопоглощение	1340	0,06	80	0,04	54	0,04	54
ИТОГО	-	-	134	-	128	-	125

Таблица 2''

Определение эквивалентной площади звукопоглощения $\alpha \times n$ (м^2) в зависимости от заполнения зала зрителями

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

n – число кресел

Примечание. Для кресел со слушателем и для свободных кресел в таблице вместо площади и коэффициента звукопоглощения показано их количество и ЭПЗ одного кресла (свободного или со слушателем).

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна на частотах:

$$125 \text{ Гц} - A'_{\text{общ}125} = 17 + 8 + 4 + 18 + 7 + 80 + 119 = 253 \text{ м}^2;$$

$$500 \text{ Гц} - A'_{\text{общ}500} = 128 + 195 = 323 \text{ м}^2;$$

$$2000 \text{ Гц} - A'_{\text{общ}2000} = 125 + 225 = 350 \text{ м}^2;$$

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

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

Находим окончательную ЭПЗ зала $A''_{\text{общ}}$ с отделкой панелью и по формулам (2) и (5) расчетное время реверберации T зала.

На частоте 125 Гц

$$A''_{\text{общ}125} = 253 + 46 = 299 \text{ м}^2;$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A''_{\text{общ}125}}{S_{\text{общ}}} = \frac{299}{1340} = 0,22;$$

$$\varphi(\bar{\alpha}) = 0,25;$$

$$T_{125} = \frac{0,163 \cdot V}{S_{\text{общ}} \cdot \varphi(\bar{\alpha})} = \frac{0,163 \cdot 3060}{1340 \cdot 0,25} = 1,5 \text{ с.}$$

На частоте 500 Гц

$$A''_{\text{общ}500} = 323 + 8 = 331 \text{ м}^2;$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A''_{\text{общ}500}}{S_{\text{общ}}} = \frac{331}{1340} = 0,25;$$

$$\varphi(\bar{\alpha}) = 0,29$$

$$T_{500} = \frac{0,163 \cdot V}{S_{\text{общ}} \cdot \varphi(\bar{\alpha})} = \frac{0,163 \cdot 3060}{1340 \cdot 0,29} = 1,3 \text{ с.}$$

На частоте 2000 Гц

$$A''_{\text{общ}2000} = 350 + 0 = 350 \text{ м}^2;$$

$$\bar{\alpha} = \frac{A''_{\text{общ}2000}}{S_{\text{общ}}} = \frac{350}{1340} = 0,26;$$

$$\varphi(\bar{\alpha}) = 0,3$$

$$T_{2000} = \frac{0,163 \cdot V}{S_{\text{общ}} \cdot \varphi(\bar{\alpha}) + nV} = \frac{0,163 \cdot 3060}{1340 \cdot 0,3 - 0,009 \cdot 3060} = 1,15 \text{ с.}$$

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

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

На рис. 45 показаны возможное размещение звукопоглощающих материалов на стенах.

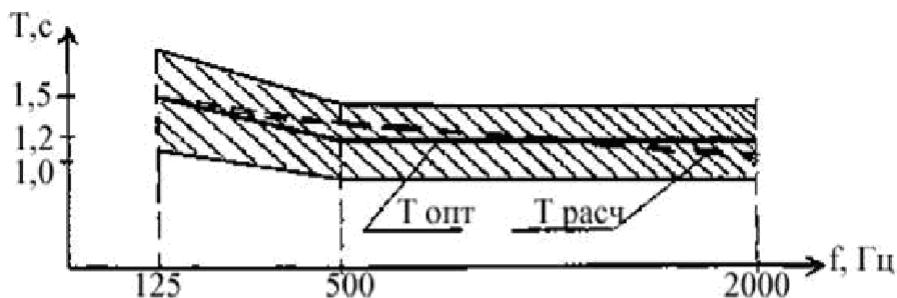


Рис.44. Частотные характеристики времени реверберации:
 1 - зона оптимального значения времени реверберации;
 2 - расчетно значение времени реверберации

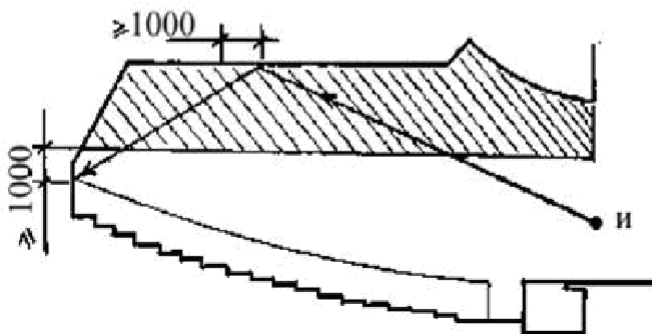


Рисунок 45 - Размещение звукопоглотителей в зале многоцелевого назначения

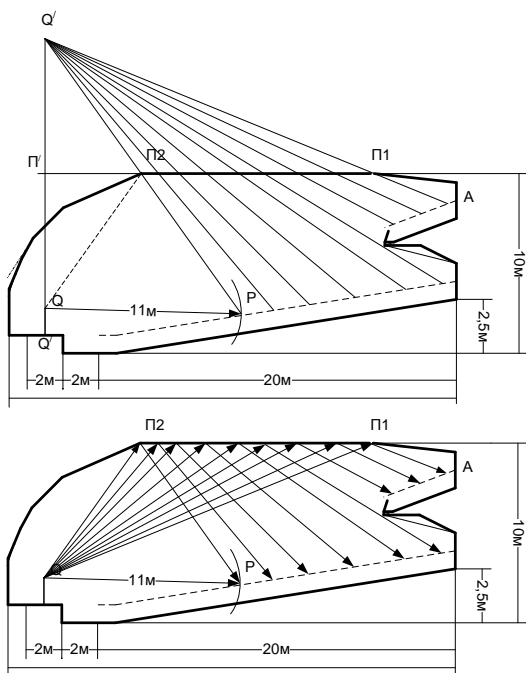
Пример №3

ПРИМЕР АКУСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНЦЕРТНОГО ЗАЛА

Эффективная потолочная отражающая поверхность может быть спроектирована с помощью графического метода, предложенного ниже. Определение необходимого наклона и размера потолочных секций над источником, расположенным в точке Q, для отражения звука в пределах угла, ограниченного точками А (ухо зрителя последнего ряда балкона на расстоянии 0,5м от задней стены) и Р (радиус прямого звука на уровне ушей слушателей в партере зала).

Построение отражающих поверхностей потолка производим указанным далее образом.

1. Определяем точку мнимого источника звука от горизонтального участка потолка Q' . Для этого выстраиваем перпендикуляр к потолку из т. Q (источник звука, находящийся по центру авансены на высоте 1,5 м от пола). На пересечении перпендикуляра и потолка ставим т. $П'$. Продляем эту прямую на расстояние равное $QП'$, ставим т. Q' - точка мнимого источника звука от горизонтального участка потолка. Далее определяем участок потолка, который будет посылать только положительные отражения в пределах угла AP . Соединяем т. Q' с т. A и т. P . В местах пересечения потолка и лучей $Q'A$ и $Q'P$ ставим соответственно точки $П_1$ и $П_2$. Участок потолка $П_1П_2$ - создает положительные отражения звука в зрительном зале. Участок от угла до т. $П_1$ требует усечения, угол наклона проверяем графически, но задняя часть стены должна быть не менее 3-3,5 м.



2. Строим второй участок отражающего потолка, но уже наклонный.

Проводим луч из т. A через т. $П_2$. Соединяем т. Q с $П_2$. На луче AP_2 откладываем расстояние $QП_2$ и ставим точку Q'' . Соединяем Q Q'' и делим его пополам точкой $П''$, точку $П''$ соединяем с точкой $П_2$. Точку Q'' соединяем с т. P , на пресечении этого отрезка с $П''П_2$ ставим точку $П_3$. Отрезок $П_2П_3$ - образует второй участок с положительными отражениями звука в зрительный зал. Все последующие наклонные участки потолка строятся аналогично.

Рисунок 46 - Построение отражения от горизонтальной части потолка

3. В плане применяется та же методика построения оптимальной конфигурации отражающих поверхностей.

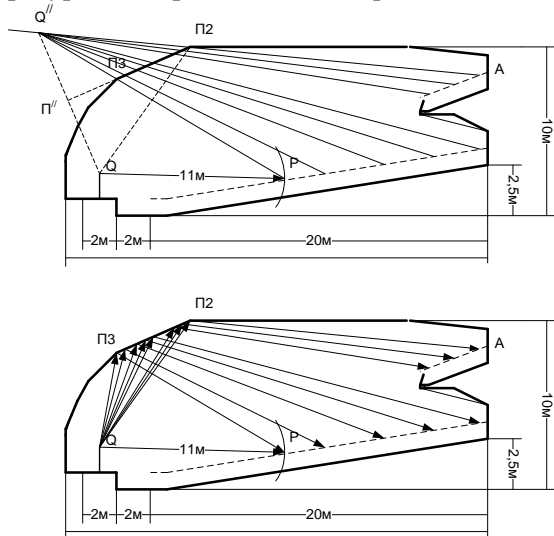


Рисунок 47 - Построение отражения от наклонных частей потолка

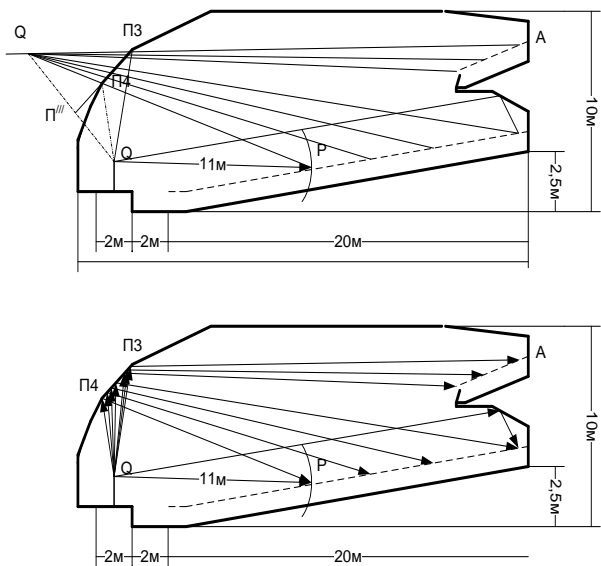


Рисунок 48- Построение отражения от наклонных частей потолка

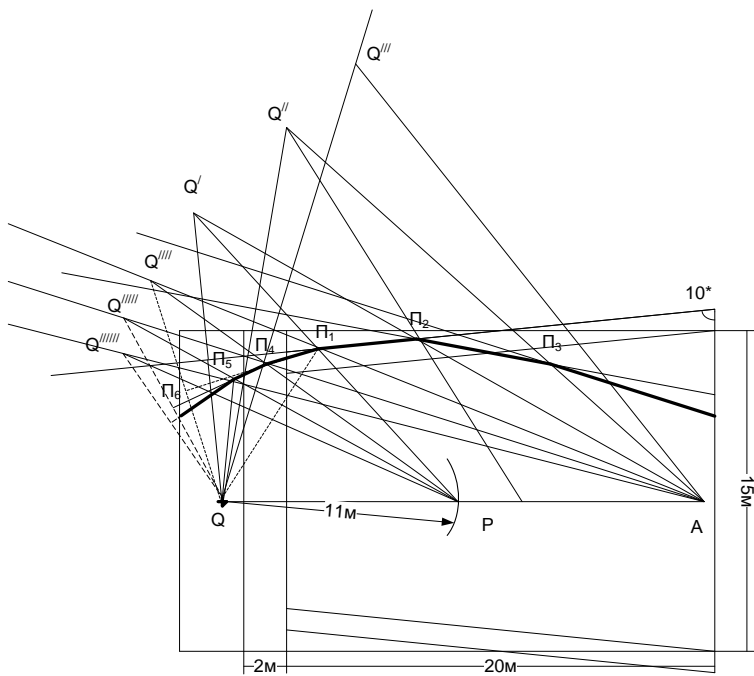
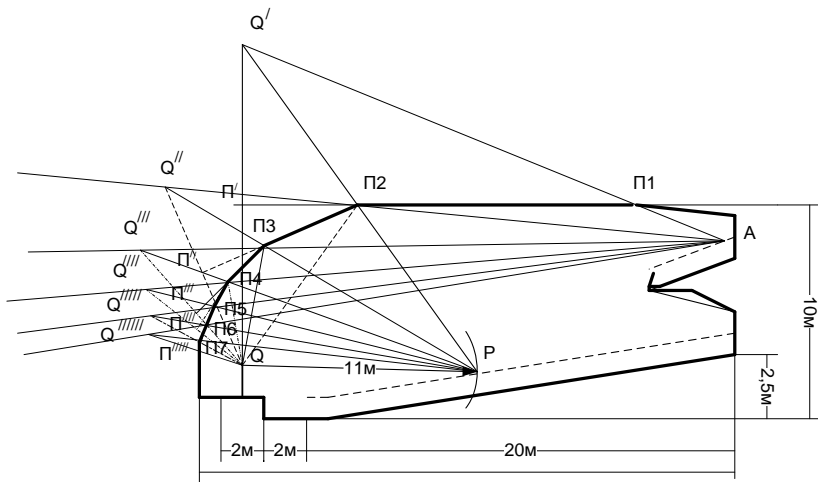


Рисунок 49 – Построение плана и разреза концертного зала на 600 посадочных мест

IV. Перечень вопросов к зачету по архитектурной акустике

1. Реверберация звука в закрытых помещениях. Время реверберации.
2. Звукопоглощение. Основные типы звукопоглощающих материалов и конструкций.
3. Основные законы геометрической акустики. Проверка допустимости применения геометрических отражений звука.
4. Методы построения геометрических отражений от плоских и криволинейных поверхностей.
5. Выбор объема, пропорций и максимальной длины зала. Примеры акустически благоприятных форм залов.
6. Построение профиля пола в залах с учетом их назначения.
7. Правильное распределение интенсивных (геометрических) отражений по площади слушательских мест залов. Расчет запаздывания интенсивных (геометрических) отражений. Допустимое их запаздывание.
8. Основные мероприятия по повышению диффузности звукового поля в залах.
9. Концентрация отраженного звука вогнутыми поверхностями залов. Способы ее ослабления.
10. Время реверберации залов, его расчет и оптимизация.
11. Особенности акустического проектирования залов с речевыми программами (аудитории, залы драматических театров).
12. Особенности акустического проектирования залов с музыкальными программами (концертные залы, залы оперных театров).
13. Особенности акустического проектирования залов с совмещением речевых и музыкальных программ (многоцелевые залы, кино - залы и спортивные залы).

Список литературы:

1. Архитектурная физика. Учебник для вузов. Коллектив авторов под ред. Оболенского Н. В. М., 2005.
2. Макриненко Л.И. Акустика помещений общественных зданий. М., 1986
3. Ковригин С.Д., Крышов С.П. Архитектурно-строительная акустика. М., 1986.
4. Соловьев А.К. Физика среды. М., 2009

Учебное издание

Андрей Александрович Климухин, к.т.н., с.н.с.
Елена Геннадьевна Киселева, ст. преп.

Проектирование акустики зрительных залов
Учебно-методические указания к курсовой расчетно-графической
работе

Под редакцией д.арх., проф. Николая Ивановича Щепеткова

Издание подготовлено на кафедре
«Архитектурной физики»
(протокол заседания кафедры №3 от 4.10.11)

Подписано в печать 6.02.12
Формат 60x90/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 5,00.
Тираж 200 экз.

ФГБОУ ВПО «Московский архитектурный институт
(государственная академия)»
107031, Москва, ул. Рождественка, д.11,
Тел.: (495) 625-50-82, (495) 624-79-90.