

# Акустика концертных залов

- Создание концертных залов с хорошей акустикой было и остается сложнейшей задачей, которая до недавнего времени решалась исключительно опытом, интуицией и искусством архитекторов и акустиков.

- Только в последние годы с связи с развитием компьютерных технологий появились возможности для точного математического моделирования акустики залов, но эти методы только начинают развиваться

- Некоторые общие идеи, исходя из опыта строительства различных концертных залов в течение многих лет, были сформулированы следующим образом :

- Различные жанры музыки требуют разных акустических характеристик в концертном зале;

- акустические характеристики, оптимальные для слушателей и для исполнителей, существенно различаются;

- только лучшие концертные залы мира обеспечивают акустические параметры, оптимальные как для слушателей так и для исполнителей;

- не существует единого архитектурного решения для концертных залов — большинство акустических требований может быть решено различными архитектурными приемами.



- Именно поэтому создание концертных залов пока остается еще «искусством на научной основе».

- В данном разделе будут кратко рассмотрены требования к акустическим параметрам «классических» концертных залов, где звучание музыки непосредственно передается от исполнителю к слушателю.

- Современные многоцелевые концертные залы с системой звукоусиления требуют других акустических параметров, которые будут рассмотрены.

- Хорошее качество звучания музыки в концертном зале требует обеспечения всех упомянутых в субъективных критериев:
  - жизненности, полноты, пространственности, тембра, баланса, интимности, громкости, отсутствия эха, низкого уровня шумов и т. д.,

— а следовательно, и соответствующей структуры и параметров реверберационного процесса, из которых основными являются следующие:

- время реверберации, время и направление прихода первых отражений, уровень боковых отражений, отношение энергии ранних отражений к энергии поздних отражений и др.

- Все эти параметры определяют требования прежде всего к форме и размерам концертных залов, а также к их системам звукопоглощения, звукоотражения и звукоизоляции

- В концертных залах также можно выделить две различные части:
  - площадь для оркестра (эстраду) и площадь для зрителей, которая может быть разделена еще на две части — около эстрадную и дальнюю зрительскую часть.

- Акустические требования к этим частям несколько различаются:
  - форма и размеры «классического зала» определяются прежде всего требованиями к достижению оптимальных времени реверберации и структуры ранних отражений (время, уровень и направление прихода).



- Оптимальное время реверберации, как показано на рис. 5.1.15, зависит от вида музыкального исполнения: для органной музыки — 3-5 с, для симфонической 2-2,2 с и для камерной 1,3-1,6 с.



Рис. 5.1.15. Оптимальное время реверберации на частотах 500–1000 Гц

- При этом важную роль играет и стиль исполняемой музыки: в период барокко среднее время реверберации было 1,6 с, классической музыки — 1,8 с, романтической — 2-2,2 с.

- Для обеспечения теплоты звучания время реверберации должно увеличиваться на низких частотах примерно на 20%.

- Это требует разных архитектурных параметров концертных залов: объем на одного слушателя должен составлять 10-12 м<sup>3</sup> для органной музыки, 8-10 м<sup>3</sup> для симфонической и 6-7 м<sup>3</sup> для камерной.

- Все это ограничивает общую вместимость залов с естественной акустикой 1500-2000 человек (хотя современные залы уже имеют вместимость 2200-2500 человек).

- Объемы, соответствующие этим вместимостям, — 12000-20000 м<sup>3</sup>. Размеры и время реверберации наиболее известных концертных залов даны в таблице 5.1.3.

Таблица 5.1.3

Название, местонахождение	Год строи- тельства	Объем, м <sup>3</sup>	Кол-во мест	Объем на одно место, м <sup>3</sup>	T <sub>рев</sub> , с
Колонный зал Дома Союзов, Москва	1814	12500	1600	7,8	1,72
Гроссер-Мюзик-ферейнсаал, Вена	1870	15000	1680	8,9	2,05
Симфонический зал, Бостон	1900	18740	2631	7,1	1,8
Концертгебау, Амстердам	1878	18780	2047	8,5	2,0
Большой Зал Консерватории, Москва	1901	17000	1800	9,4	1,8
Зал Филармонии, Берлин	1963	24200	2200	11,0	2,2
Ройал-Альберт-Холл, Лондон	1871	86600	6080	14,2	2,5
Карнеги-Холл, Нью-Йорк	1891	24250	2784	8,7	2,15
Концертный зал, Лейпциг	1981	21000	1900	11,0	2,0



- Анализ параметров для лучших залов позволил получить следующее эмпирическое выражение, связывающее время реверберации, объем и высоту зала:  
 $(V/T500)m/h_{\max} \approx 0,2S.$

- Кроме оптимального времени реверберации в концертных залах важно обеспечить и другие параметры:
  - ясность —  $C80$ , интимность, коэффициент внутрислуховой корреляции и др. которые также определяются выбором соотношения размеров и формы зрительного зала.

- В старых концертных залах ширина и высота обычно составляли 20 м и 17 м, это обеспечивало приход первых фронтальных отражений с интервалом 20-30 мс.

- При уменьшении этих интервалов эстетическое восприятие музыки ухудшается.

- Если для речевых помещений размер зала определяется его вместимостью, но может быть уменьшен без потери разборчивости речи, то в концертных залах размер определяется требованиями к качеству звучания музыки и не может быть уменьшен ниже некоторого предела (независимо от количества зрителей).

- В залах малых размеров на местах слушателей образуется слишком плотная временная структура ранних отражений, из-за которой при малом времени реверберации звучание оказывается «плоским»; кроме того, резонансы воздушного объема попадают в слышимый диапазон и вносят дополнительную «окраску» в тембр звучания.

- Длина зала, как и ранее рассмотренных помещений, ограничивается необходимостью доставки на самые удаленные места от эстрады прямой звуковой энергии достаточно высокого уровня.

- Однако здесь следует учесть, что голос певца или звук инструмента способен излучать большую мощность, чем речь актера.
- В связи с этим максимальное удаление слушателя от эстрады может быть увеличено по сравнению с залом драматического театра.



- Статистические данные, собранные в ходе анализа максимального удаления мест слушателей от эстрады для музыкальных залов разной вместимости, построенных в разных городах мира и известных хорошими акустическими свойствами, показали, что максимальная удаленность слушателей от эстрады в партере не превышает 40 м, а на балконе — 45 м.

- Ограничения ширины и высоты зала распространяются прежде всего на припортальную часть для обеспечения необходимой структуры ранних отражений; в более удаленной от эстрады части ширина и высота зала может быть увеличена.

- Ширина зала у портала рекомендуется не более 25 м, а на расстоянии одной трети длины зала — не более 30 м.

- Высота зала (если принять за уровень пол сцены) у портала не должна превышать 9 м, а на расстоянии 7 м от портала — 10,5 м.

- Таким образом, при выборе основных размеров концертного зала, равно как и его формы, особое внимание должно быть уделено его припортальной части, занимающей около одной трети, а в больших залах — одной четверти его длины.

- Эта часть должна быть так спроектирована, чтобы на местах слушателей была сформирована оптимальная структура ранних отражений.

- Исследования, выполненные на основе измерений, позволили собрать достаточно полный статистический материал по интервалу времени запаздывания первых отражений.

- Результаты анализа собранных материалов очень хорошо совпадают с результатами субъективных исследований и подтверждают ценность структуры ранних отражений в качестве одного из важнейших критериев качества акустики концертного зала.

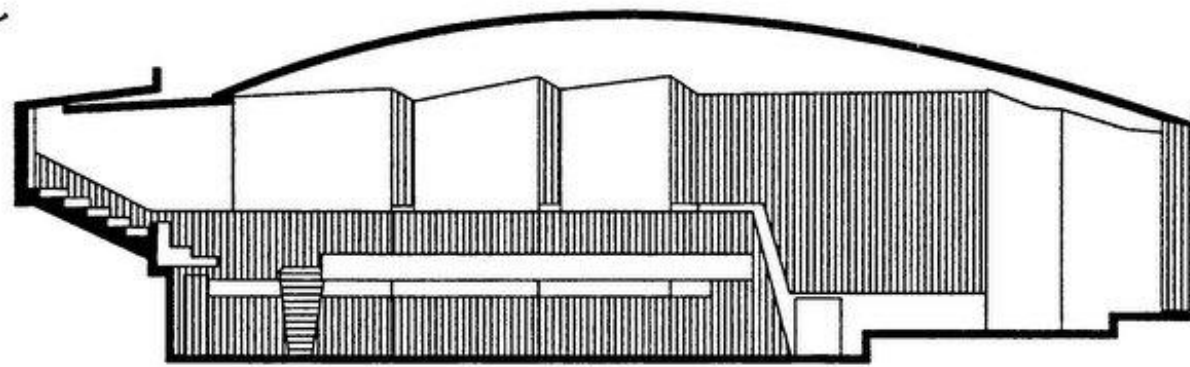


- Например, в залах, известных своими прекрасными акустическими свойствами, время запаздывания первого отражения, приходящего в лучшие места, составляет:

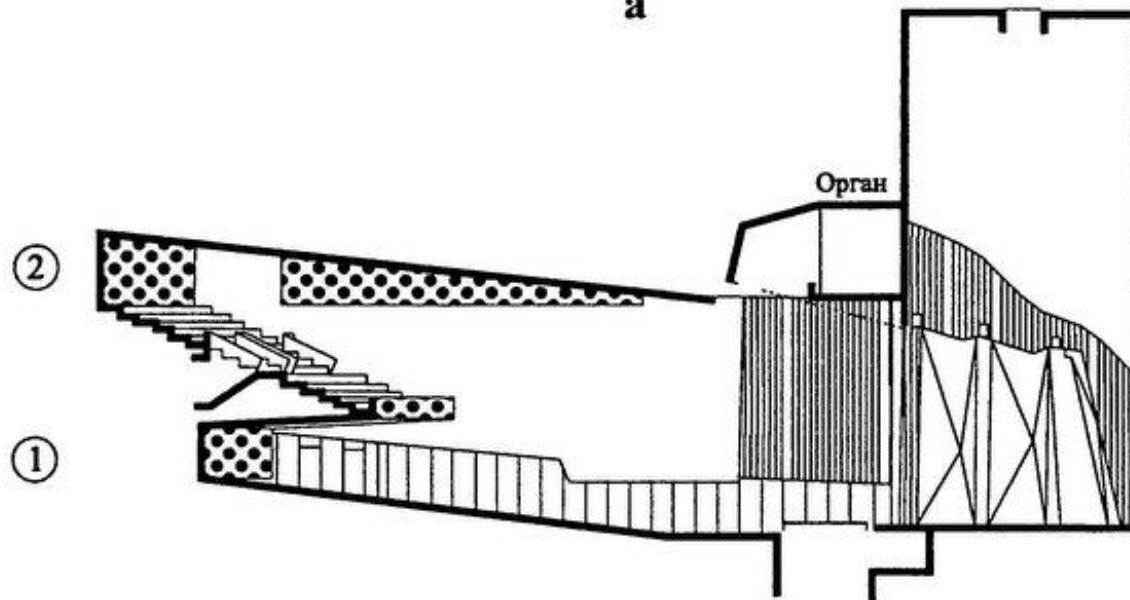
- в Большом зале Московской консерватории — 21-26 мс,
- в Колонном зале Дома Союзов — 24-28 мс, в Санкт-Петербургской капелле — 25-30 мс, в Концертном зале в Зальцбурге — 23 мс и т. д.

- Наличие эстрады вместо сцены в значительной мере обуславливает архитектуру концертного зала, отличающуюся от архитектуры театральных залов.

- Оказалось не обязательным строить залы по ярусной системе, так как оборудование эстрады жесткими звукоотражающими конструкциями позволяет значительно увеличить уровень отраженной звуковой энергии, приходящей к слушателям в начальном периоде реверберационного процесса, и помогает обеспечить оптимальную структуру ранних отражений.
- Рис. 5.2.11.



а



б

Рис. 5.2.11.

а — две части зала с плавным переходом (концертный зал в Бонне);  
 б — сочетание двух разных форм сцены и зала (концертный зал в Детройте)

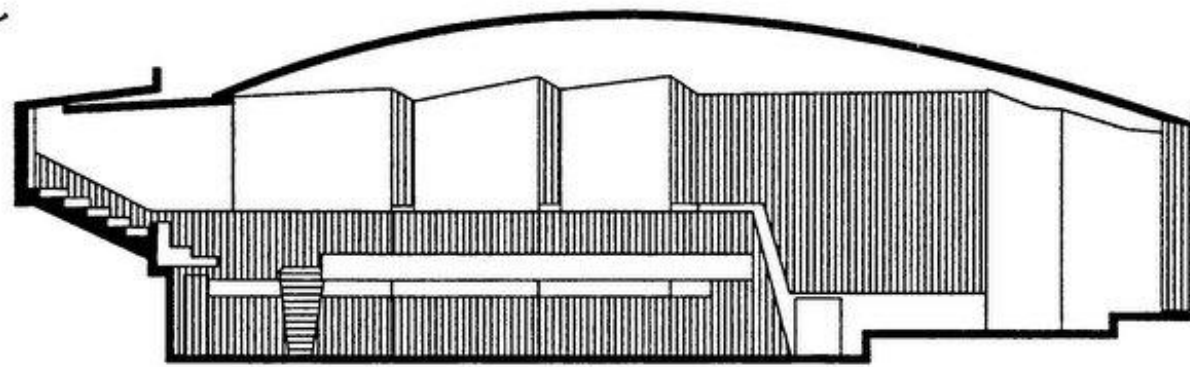
- а — две части зала с плавным переходом (концертный зал в Бонне);
  - б — сочетание двух разных форм сцены и зала (концертный зал в Детройте)
- Это в свою очередь позволяет удалить слушателя от эстрады и увеличить размеры зала.

- В современных залах используются разные формы зрительного зала для той части, которая примыкает к эстраде (примерно  $1/3$  общей длины), и остальной его части.

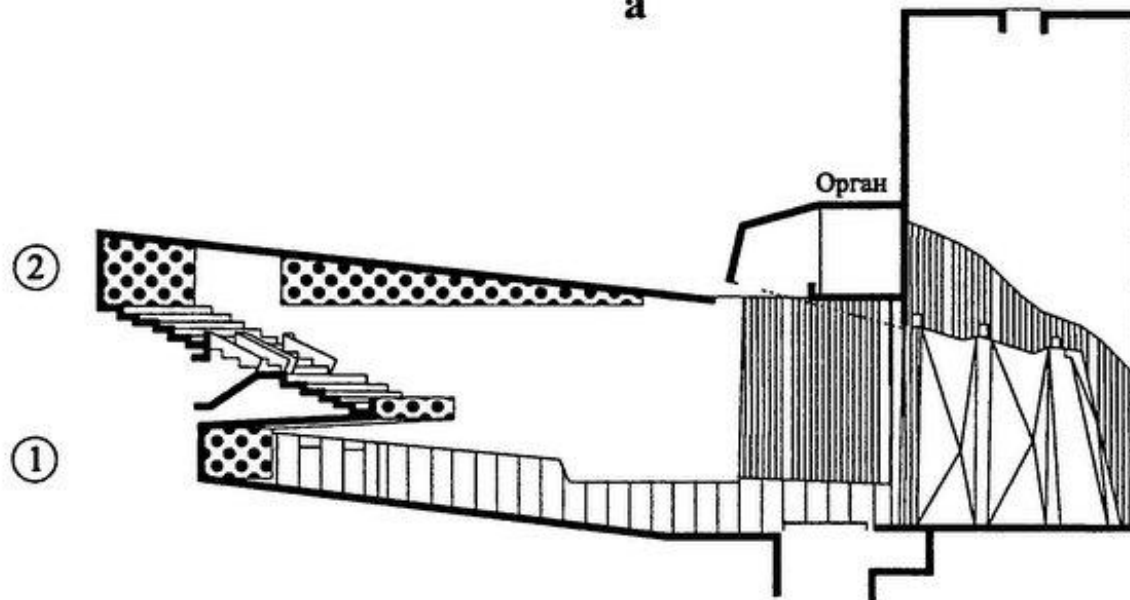
- Можно заметить два типичных направления при решении их интерьера: единую форму зала с плавным переходом эстрады в зрительный зал



- (рис. 5.2.11а) и композицию из двух разных форм для зала и сцены (рис. 5.2.116).



а



б

Рис. 5.2.11.

а — две части зала с плавным переходом (концертный зал в Бонне);

б — сочетание двух разных форм сцены и зала (концертный зал в Детройте)

- Эстрада и ближайшая к ней часть зала: для музыкантов, находящихся на сцене, субъективные параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на их качество исполнения, несколько отличаются от параметров, воспринимаемых слушателем.

- К числу основных из них можно отнести следующие:

- время реверберации — процесс затухания в зале должен быть отчетливо слышен в паузах и давать музыкантам чувство опоры;

- поддержка — этот параметр позволяет музыкантам слышать себя даже на тихих уровнях;

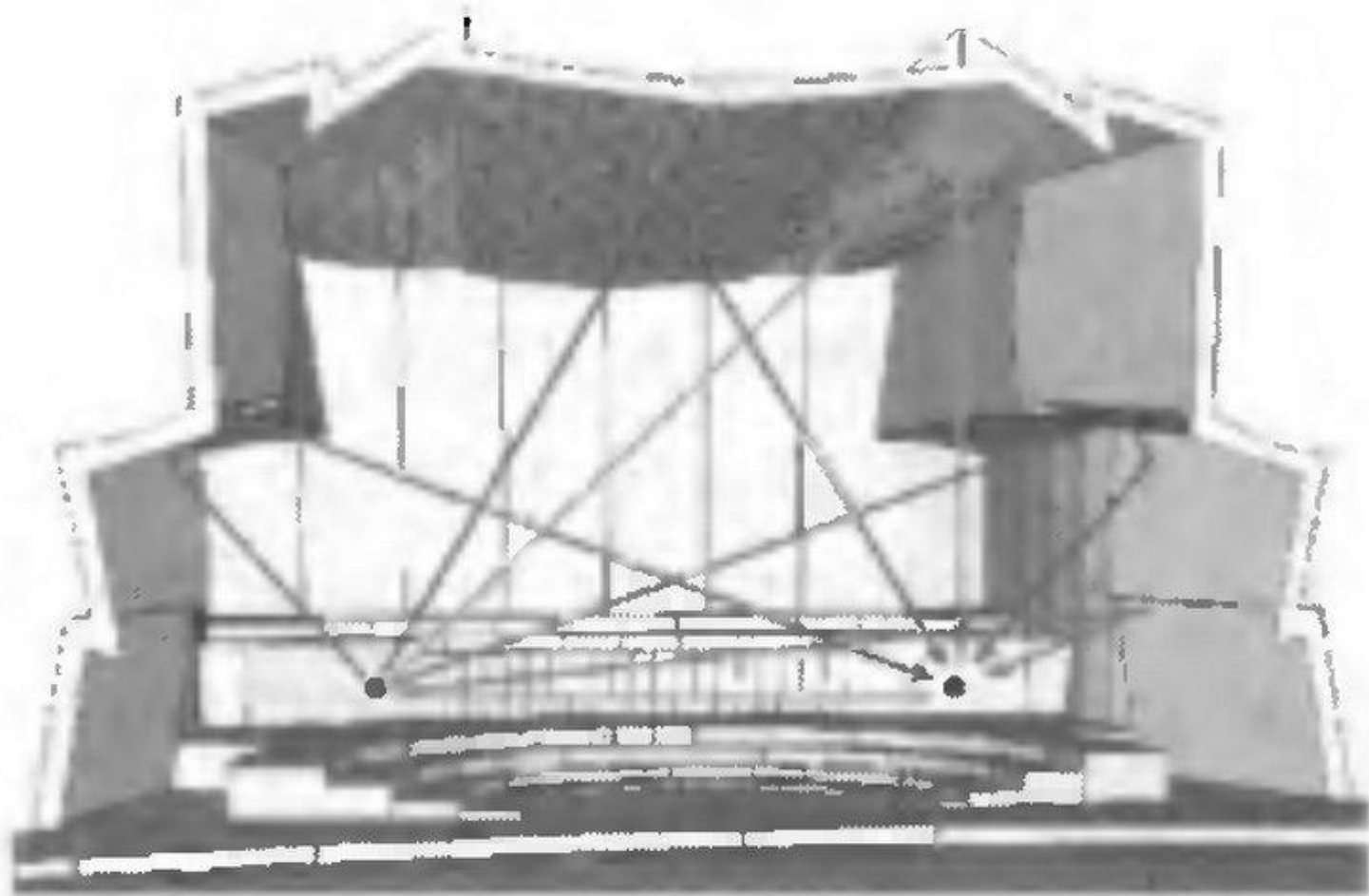
- тембр позволяет оценить влияние помещения на звучание инструментов и на восприятие музыкантами тонального баланса между инструментами в ансамбле;

- - динамика характеризует динамический диапазон в данном помещении и определяет степень, с которой помещение влияет на динамику исполнения;



Слышание друг друга — необходимо для обеспечения ритмической точности, настройки и баланса по уровням; задержка сигналов во времени — если музыканты далеко друг от друга, то возникают слишком большие временные задержки, которые нарушают ритмическую точность и влияют на тембр.

- Исследования позволили установить, что ощущение поддержки возникает у музыкантов при высоком уровне ранних отражений на сцене (рис. 5.2.12).



**Рис. 5.2.12. Структура отражений  
на сцене**

- Измерения показывают, что в хороших залах их уровень значительно выше порогов слышимости.

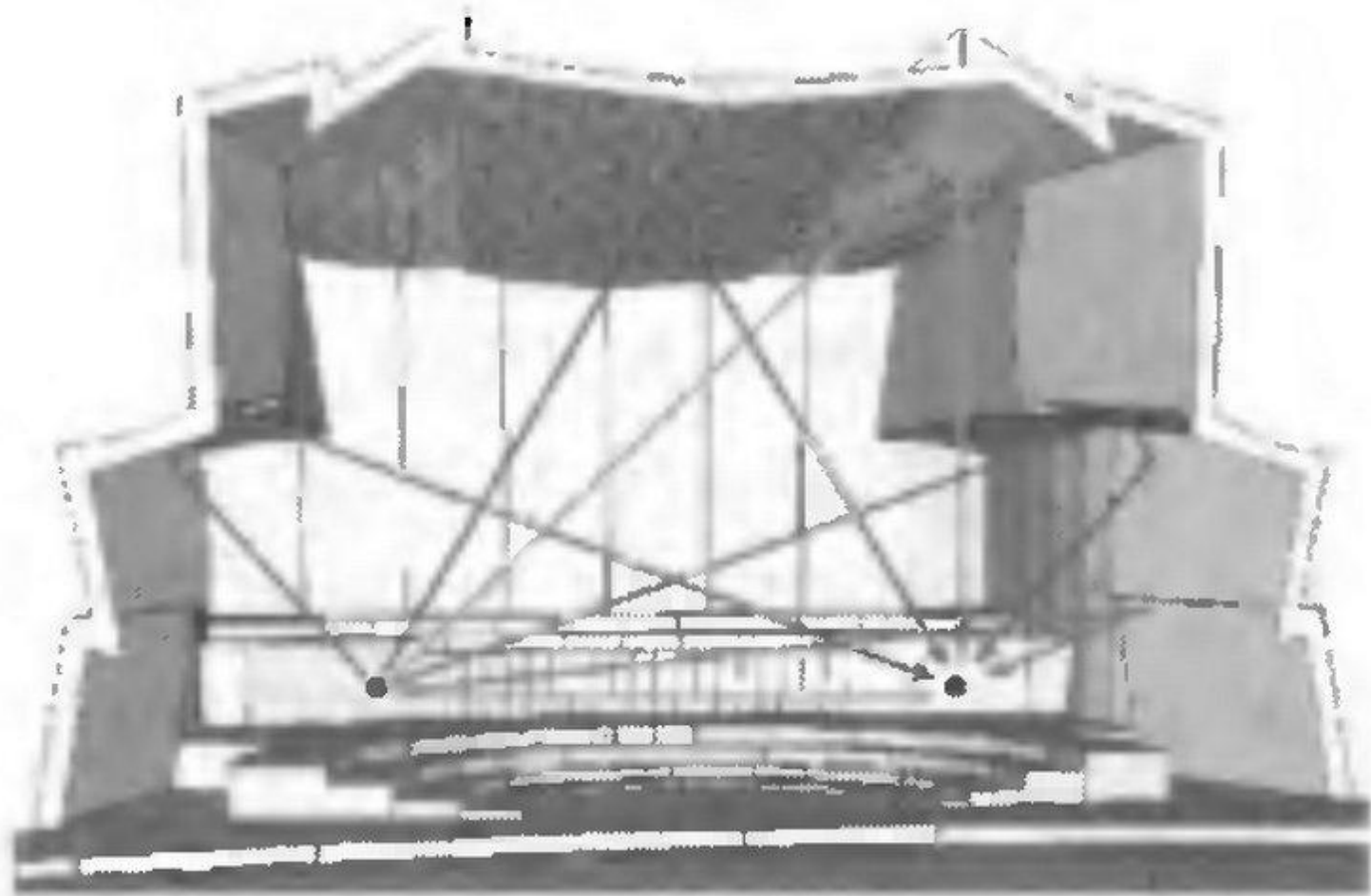
- Для обеспечения слитности исполнения в ансамбле существенное значение имеет величина задержки прямого звука от соседних участников.

- Результаты исследований показали, что максимальное время задержки должно быть в пределах до 20 мс.

- Ширина и глубина эстрады (сцены) зависят от числа исполнителей (на каждого должно приходиться примерно 2 м<sup>2</sup>) и от высоты потолка припортальной части зала.

- Если потолок сравнительно низкий (ниже 10 м), то могут быть выбраны большая ширина и глубина сцены, т. к. при такой высоте прямой звук и ранние отражения Рис 5 2.12.





**Рис. 5.2.12. Структура отражений  
на сцене**

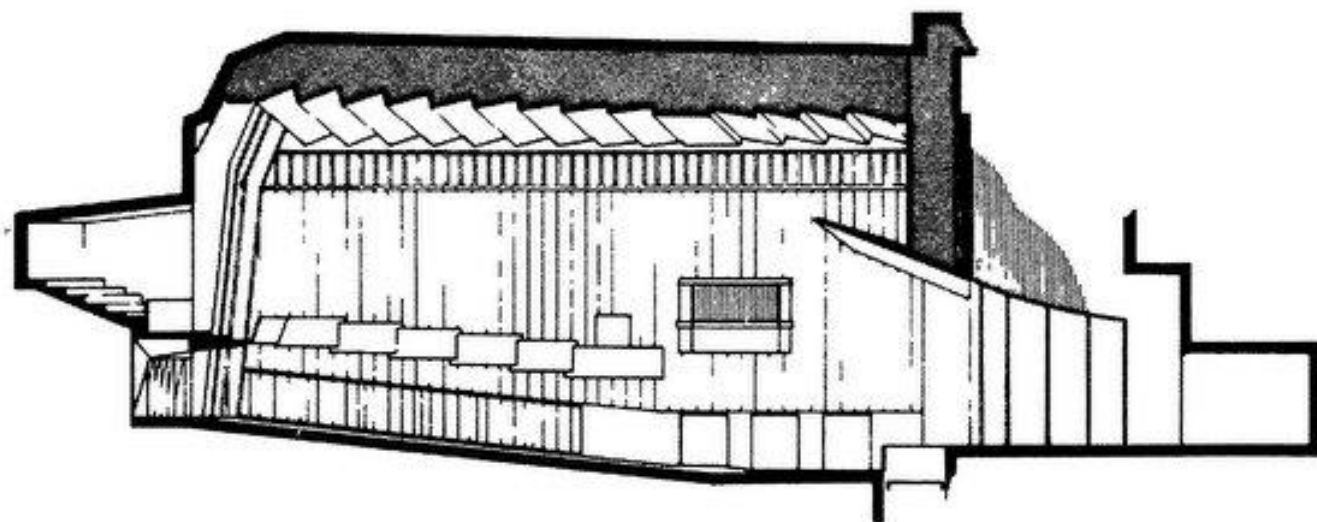
- Структура отражений попадают к исполнителям (что на сцене важно для их взаимной слышимости) и к зрителям.

- Если потолки высокие, то для обеспечения первыми отражениями исполнителей и зрителей необходимо ограничить площадь эстрады: ширина не более 15 м, высота не более 10 м.

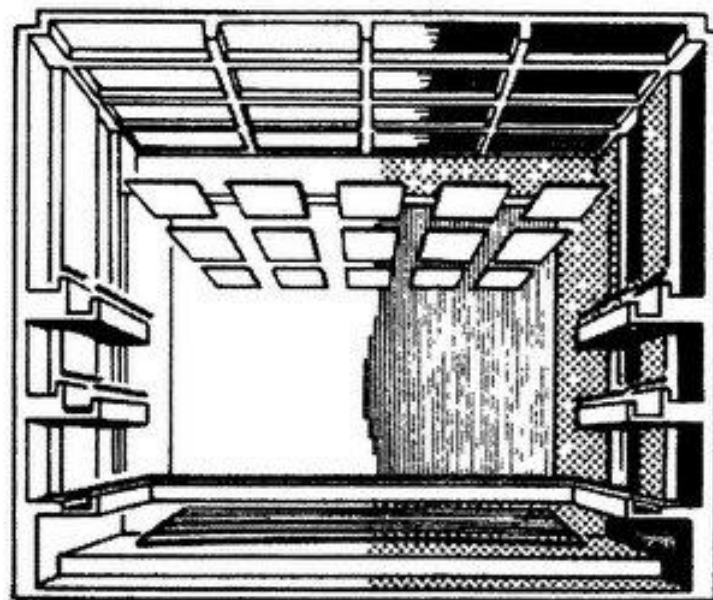
- При низких потолках и широких стенах возникают также проблемы с обеспечением необходимого времени реверберации в зрительном зале; кроме того, боковые отражения приходят на сцену слишком поздно и при этом нарушается ощущение ансамбля.

- При высоких потолках необходимое время реверберации обеспечивается, но общая площадь эстрады оказывается слишком мала.
- Поэтому в современных концертных залах часто используются навесные панели над площадью оркестра и передней частью зрительских мест

- (рис. 5.2.13а, б), форма, размер и степень наклона которых подбираются исходя из требований обеспечения первыми отражениями оркестра и зрителей.



**а**



**б**

Рис. 5.2.13.

- а** — навесные панели перед сценой  
(концертный зал «Тиволи»,  
Копенгаген);
- б** — навесные панели в зале

- Кроме того, в современных больших залах многоцелевого назначения, где оркестр размещается на просторной сцене, используются акустические раковины, состоящие из системы звукоотражающих поверхностей.



- Такая раковина может быть легко скомпонована в виде трансформируемой системы из отдельных щитов, которыми можно ограждать различные объемы на эстраде при выступлении ансамблей исполнителей.

- Размеры мобильных щитов должны быть достаточно велики во избежание потерь отраженной звуковой энергии на дифракцию вокруг краев.

- Эти потери, особенно в области низких частот, становятся ощутимыми, если любой размер щита меньше 5-6 м.

- В качестве интересного примера может служить зал в Зальцбурге вместимостью более 2000 человек (рис. 5.2.14).

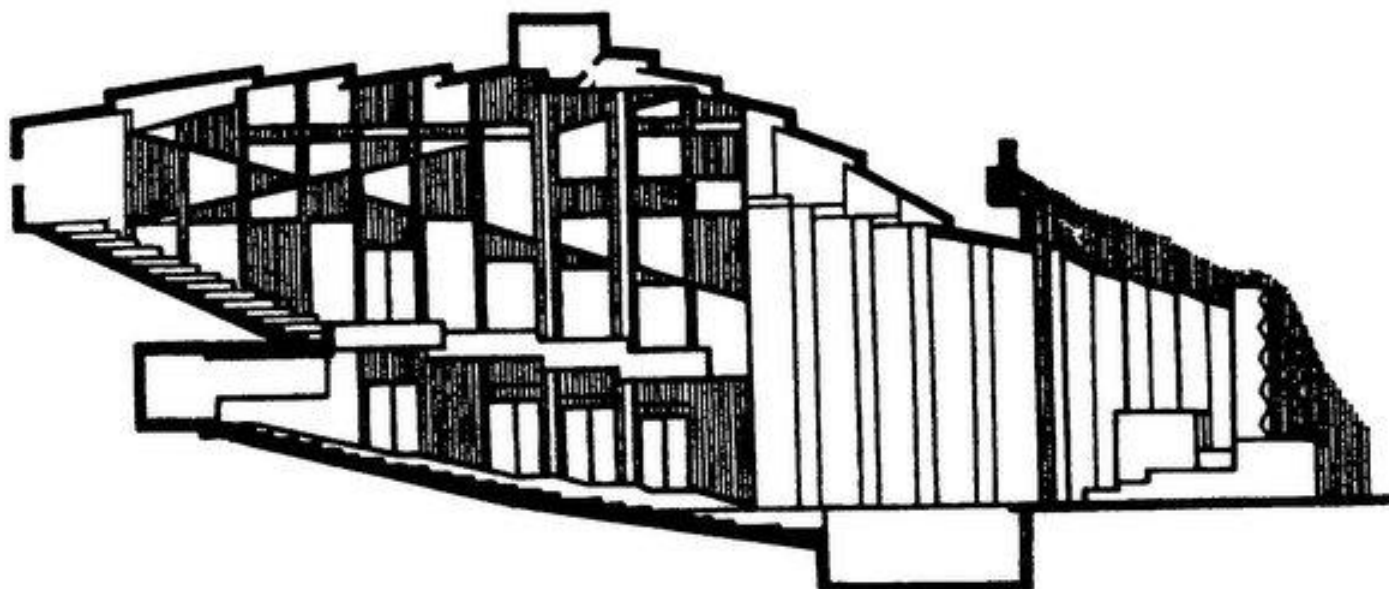


Рис. 5.2.14. Концертный зал в Зальцбурге с акустической раковиной

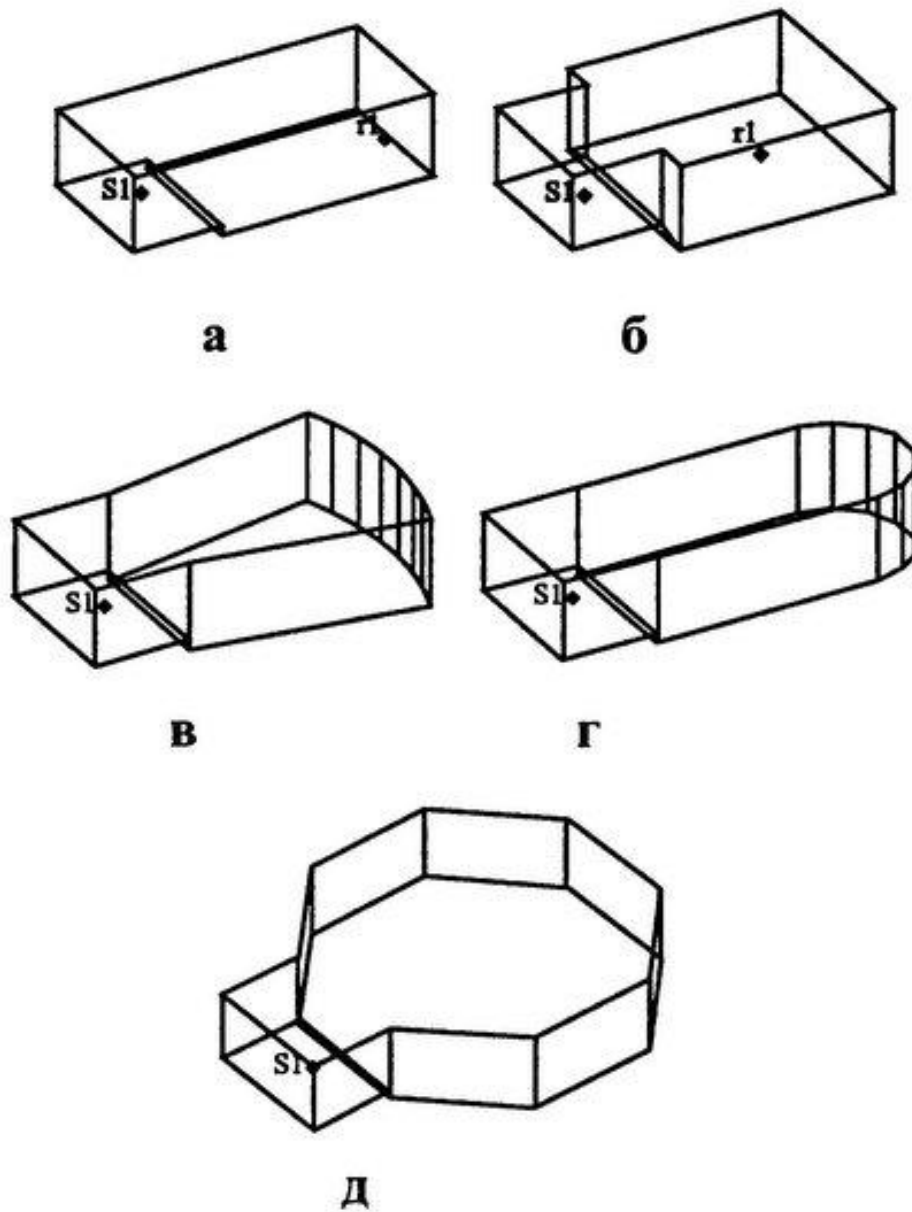
- При проведении концертов на эстраде в нем устанавливается трансформируемая раковина, обеспечивающая запаздывание первого отражения на 23 мс.

- Классические концертные программы проходят при естественных акустических условиях, т. е. без помощи систем усиления звука.
- Кроме того, в зале ставят оперные и драматические спектакли.

- Зрительская (дальняя) часть зала: основное требование к ее форме состоит в обеспечении высокой степени рассеяния звука для создания достаточного общего времени реверберации.



- Возможностей для реализации таких форм зала достаточно много, в настоящее время чаще всего для концертных залов используются следующие формы:



- а** — высокая прямоугольная форма (Shoebbox);
- б** — залы с почти квадратной площадью;
- в** — веерообразная форма с расходящимися стенами и кривыми потолками (Fan);
- г** — форма с параллельными стенами, высокими потолками, криволинейной задней стеной (Horseshoe);
- д** — специальная геометрическая форма (geometric)

Рис. 5.2.15. Формы концертных залов

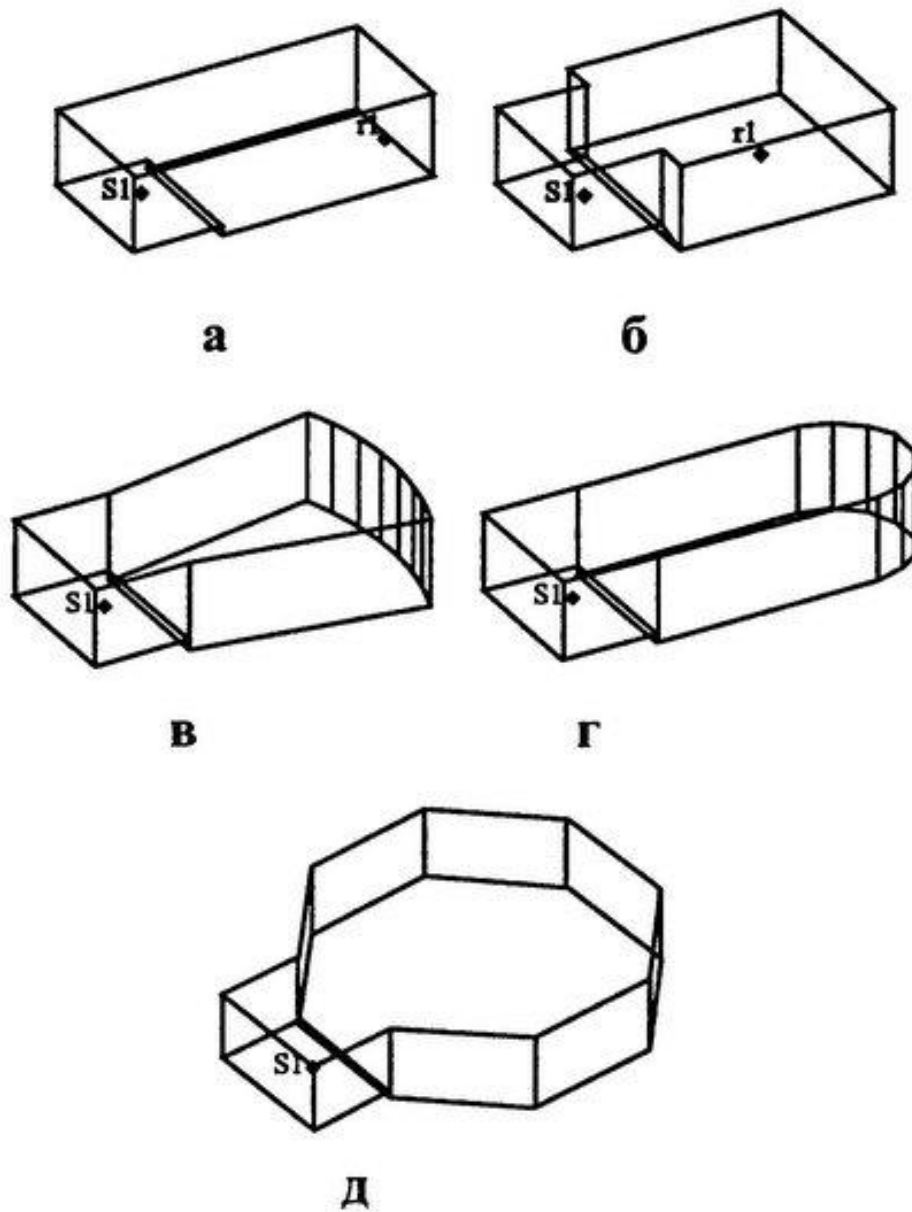
- — высокая прямоугольная форма (Shoebbox) — рис. 5.2.15а — старейшая форма, используемая как в музыкальных залах во дворцах XVII-XVIII веков, так и в крупнейших концертных залах XIX-XX веков, например Консертгебау (Амстердам, 1888), Мюзик-ферейнсаал (Вена, 1870).

- Из-за простой геометрии структура звуковых полей в таких залах лучше всего изучена и отмоделирована. Разновидностью являются залы с почти квадратной площадью
- (рис. 5.2.156);

- — веерообразная форма с расходящимися стенами и кривыми потолками (Fan), использовалась активно в период 1920 - 1960-х годов, сейчас признана неудовлетворительной из-за бедных боковых отражений (рис. 5.2.15в);

- — форма с параллельными стенами, высокими потолками, криволинейной задней стеной (Horseshoe) — рис. 5.2.15г

- Это типичная форма оперных залов, однако она часто использовалась и для концертных залов (например, Концертный зал Макдермотт в Далласе);
- — террасообразная форма (Vineyard) зала, разделенного на уменьшающиеся асимметрично поднимающиеся блоки. Вертикальные дополнительные поверхности на стенах создают ранние
- а — высокая прямоугольная форма (Shoebbox);
- б — залы с почти квадратной площадью;
- в — веерообразная форма с расходящимися стенами
- и кривыми потолками (Fan);
- г — форма с параллельными стенами, высокими потолками, криволинейной задней стеной (Horseshoe);
- д — специальная геометрическая форма (geometric)
- Рис. 5.2.15.



- а** — высокая прямоугольная форма (Shoebbox);
- б** — залы с почти квадратной площадью;
- в** — веерообразная форма с расходящимися стенами и кривыми потолками (Fan);
- г** — форма с параллельными стенами, высокими потолками, криволинейной задней стеной (Horseshoe);
- д** — специальная геометрическая форма (geometric)

Рис. 5.2.15. Формы концертных залов



- Формы концертных залов боковые отражения для всех зон зала.

- Примером может служить зал Берлинской филармонии (1963);
- — специальная геометрическая форма (geometric), (рис. 5.2.15 д). Такой зал обладает большой гибкостью при настройке акустических параметров, но труден для проектирования.

- Залы небольшой ширины могут иметь простую форму параллелепипеда; из-за их небольшой ширины количество отражений, приходящих на зрительские места, быстро нарастает со временем и в завершающей части реверберационного процесса становится настолько велико, что образуется достаточная диффузность поля.

- В залах же со сравнительно большой шириной, как правило, требуется введение звукорассеивающих элементов.

- Примером могут служить Большой зал Санкт-Петербургской филармонии и Колонный зал Дома Союзов в Москве, где два ряда больших колонн создают высокую степень диффузности звукового поля.

- В современных залах, которые имеют большие объемы, рассеяние звука достигается членением стен и потолка под разными углами либо расположением на этих поверхностях специальных архитектурных элементов, способствующих рассеянию звука (например, диффузоров Шредера).

- В качестве материалов для отделки стен и потолка, в первую очередь акустической раковины и ближайших к сцене поверхностей, обычно используется дерево (это способствует созданию красивого тембра).

- Обязательным требованием к акустике концертных залов является низкий уровень внешних и внутренних шумов.



- Требования для концертных залов составляют NC-20 (рис. 5.19), что заставляет применять специальные меры для повышения звукоизоляции в залах; подробнее эти вопросы освещены в специальной литературе

**КОНЕЦ**