

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»

В.М. Разживин, О.Л. Викторова, Л.Н. Петрянина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ

Рекомендовано Редсоветом университета
в качестве учебного пособия по курсовому проектированию
для студентов, обучающихся
по направлению 270300 – Архитектура

Пенза 2013

УДК725.8.01.053.1(075.8)

ББК 38.712 - 02 я 75

P17

Рецензент – кандидат технических наук С.В. Зворыгина
(ГИП ООО Гражданпроект)

Разживин В.М.

P17

Проектирование зрительных залов с естественной акустикой: учеб. пособие по курсовому проектированию / В.М. Разживин, О.Л. Викторова, Л.Н. Петрянина. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 75 с.

Изложены теоретические основы акустического проектирования залов, дана методика анализа запаздывания звуковых отражений, времени реверберации.

Подготовлено на кафедре «Городское строительство и архитектура» и предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 270100 «Архитектура» дисциплина «Архитектурная физика» и 270800 «Строительство» дисциплина «Архитектура промышленных зданий и сооружений».

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2013

© Разживин В.М., Викторова О.Л.,
Петрянина Л.Н., 2013

ВВЕДЕНИЕ

История развития архитектурной акустики своеобразна. На протяжении ряда веков строились здания, многие из которых прославились замечательной акустикой. Вместе с тем архитектурная акустика как прикладная наука начала свое существование только в начале XX столетия. Несмотря на это именно сейчас строятся театральные помещения с неудовлетворительной акустикой.

Объяснение этого парадокса достаточно простое. В прежние времена основной путеводной линией строительства был опыт. Накапливающийся веками опыт утвердился и выразился в нескольких приемах проектирования театрального зала: форма в плане подковообразная или овальная, многоярусное расположение зрительских мест при сравнительно небольшой удаленности лож от сцены.

В распоряжении архитектора был в то время небольшой ассортимент строительных материалов, среди которых особое положение заняло дерево, отличающееся прекрасными акустическими свойствами.

Наконец, несмотря на грандиозность сооружений, масштабы строительства были ограничены, а автором проекта мог быть один человек, решавший все основные вопросы.

Но было бы ошибочно считать, что все прославленные классические театры удачно выходили «из-под карандаша» авторов. В качестве примера можно привести зрительный зал Большого театра в Москве, акустика которого была доведена до высокого качества только после реконструкции 1853 года известным архитектором театральных зданий А. Кавосом. Результаты последнего крупного ремонта здания и реконструкции зрительного зала 2011 года, по мнению специалистов, требуют времени и осмысления.

Технический прогресс в технологиях производства строительных работ, использования новых отделочных материалов, а также применение систем кондиционирования и пр. усложнило проектирование и привело к разделению профессий. Архитектора больше интересовали формообразование зрительного зала, решения интерьера и иные узкоспециализированные вопросы. Озвучиванием же стали заниматься специалисты из области архитектурной физики.

Учебное пособие посвящено проектированию естественной акустики зрительного зала и ориентировано на углубление знаний студентов специальности/направления «Архитектура» при изучении раздела «Акустика» дисциплины учебного плана «Физика».

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА О СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТЕАТРАЛЬНЫХ ЗАЛОВ

Архитектурная акустика изучает явления, связанные с распространением звука, а также методы акустических расчетов, позволяющие прогнозировать результаты проектирования в соответствии с критериями предпочтительности озвучивания залов различного назначения.

Театр, как сооружение, приспособленное для драматических представлений, получил правильное устройство впервые в древней Греции (рис.1), а по его образцу позже и в Риме. По сохранившимся до наших времен культовым и зрелищным сооружениям видно, что основы распространения звука были известны древним строителям. Размеры греческих и римских театров на открытом воздухе выбирались таким образом, чтобы в наибольшей степени использовать энергию отраженных волн.

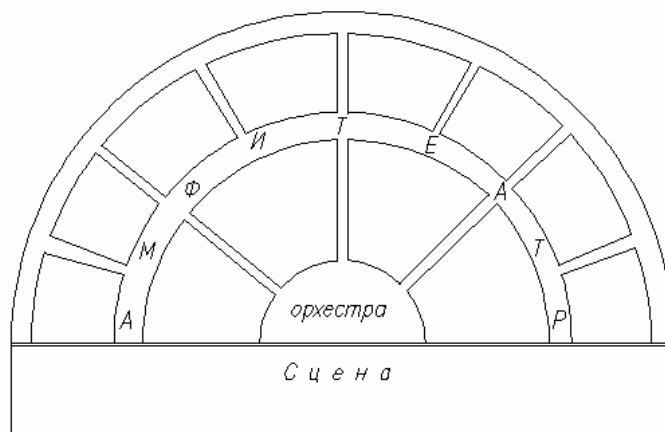


Рис.1. План греческого театра

Античный театр состоял из трёх главных частей:

- 1) амфитеатр, или зрительное пространство с сидениями, расположенными полукругом и концентрическими рядами и ярусами;
- 2) площадка перед сценой – орхестра, на которой располагался хор и выступали танцоры;
- 3) сцены глубиной 3,5–4 м в Греции и 6–8 м в Риме в виде небольшого возвышения или помоста, на котором выступали актёры.

Представления давались при дневном свете; в Греции часто состязания драматургов при постановке трилогий длились 2-3 дня. Женские роли исполнялись юношами; а актёрам для создания определенного образа своего персонажа (негодяй или герой, молодой или почтенного возраста) надевали маски. В средние века духовные театральные представления первоначально давались в церквях; затем появились стран-

ствующие труппы актёров и фокусников, игравших на ярмарках во временных постройках. Постоянные театры в Западной Европе возникли с XV-XVI века. К началу XIX выработался современный тип театрального здания:

1) полукруглый зрительный зал с слегка наклоненным полом, который занят рядами кресел (партер) и несколькими ярусами галерей, занятыми рядами лож, балкона и отдельных мест;

2) узкое и длинное пространство для оркестра между партером и сценой;

3) сцена – возвышенное над партером пространство, предназначенное для выступлений актёров. От зрительного зала сцена отделяется несколькими занавесами. Перед первым занавесом на полу помещается ряд ламп (рампа) для освещения сцены. Сцена обставлена рядом декораций – это кулисы. С 1896 года вводятся вращающаяся сцена, которая дает возможность менять обстановку сцены чрезвычайно быстро и незаметно.

Появление закрытых театров стало ступенью в развитии драматического и музыкального искусства. Ограниченный объём театрального помещения позволял обеспечить разборчивое восприятие речи при сравнительно небольших мощностях голоса актёра; стало возможным увеличение темпа речи и расширение динамического диапазона, позволяющего переходить с крика на шёпот.

Колыбелью современного театра является Италия, где до XVII века строились деревянные театры, которые носили характер открытых греческих театров с полукруглым амфитеатром и сценой. Этот театр был уже под крышей.

В конце XVIII века в Италии создается тип здания музыкального театра, распространившийся по всему миру. Итальянский театр имел преимущественно овальную форму зрительного зала в плане с расположенными по периметру ярусами. Овальная форма предполагает неравномерное распределение звуковой энергии при гладких поверхностях стен. Однако для устранения этого акустического явления по вертикали устраивались выступающие в зал ярусы (до 6–7) глубиной до 3 метров, хорошо рассеивающие звуковую энергию. Размещение зрителей на ярусах в виде чередующихся в 2–3 ряда «лент» повышало степень рассеивания звуковой энергии. Такая многоярусная схема планировки зрительного зала позволяла иметь на относительно небольшой площади большую вместимость.

Кроме того, в отделке залов использовалось большое количество бархата, что создавало значительное звукопоглощение и, как следствие, – короткое время реверберации. По отзывам специалистов, залы Боль-

шого театра в Москве и Королевской оперы в Лондоне суховаты с точки зрения звучания музыки и хороши для вокала (табл.1).

На рубеже XX столетия в строительстве появляются железобетонные конструкции, позволяющие перекрывать большие пролеты. Появляется новый тип безъярусного театра, характерной чертой которого становится устройство балконов в задней части зала.

Т а б л и ц а 1

Наименование театра	Количество ярусов	Число зрителей	Объём, м ³	Время реверберации, с	Максимальная удаленность последнего ряда, м
Ла-Скала (Милан)	6	2290	16000	1,3	26
Большой театр (Москва)	5	2100	13800	1,55	24
Оперный театр (Одесса)	5	1700	12000	1,6	23,5
Национальная опера (Париж)	4	2130	15000	1,45	22
Королевская опера (Лондон)	4	1710	10000	1,4	24

Архитекторы У. Сэбин, Л. Карбюзье и другие начинают исследовательские работы по акустическим проблемам и используют их результаты в практическом строительстве.

При возведении зала частной оперы в Чикаго использованы рекомендации У. Сэбина. Объём зала – 2400 м³, вместимость – 3600 человек, время реверберации для заполненного зала $T_{500}=1,9$ с. Архитектурные формы зрительного зала считаются близким к удовлетворительным: в плане зал почти секторной формы, задняя стенка имеет малую кривизну, потолок расчленен мелкими архитектурными элементами, для передней части потолка над сценой устроен козырек, позволяющий отражать звуковую энергию в глубину помещения.

Концертный зал Плейели в Париже имеет объём 22000 м³, вместимость 3000 человек и время реверберации заполненного слушателями зрительного зала $T_{500}=1,5$ с. Форма плана секторная; зал имеет наклонные боковые стены. Потолку придана параболическая кривизна с фокусом возле эстрады. Однако этот экспериментальный зал имеет акустические дефекты. В частности, криволинейная поверхность акустического потолка концентрирует различные шумы на эстраде, что ме-

шает слаженной работе музыкантов, а поэтому переднюю часть потолка пришлось обработать звукопоглощающими материалами, что снизило время реверберации. Кроме того, вследствие большой высоты в передние и средние ряды приходят сильно запаздывающие отражения звуковой энергии, что создает неразборчивость музыкальных фраз.

Колонный зал Дома Союзов в Москве считается одним из лучших в акустическом отношении музыкальных залов в Европе. Прямоугольный по форме зал имеет по периметру стен мраморные колонны диаметром 90 см, благодаря чему создается высокая степень однородности звукового поля. Объём зала – 12500 м³; вместимость – 1600 человек; время реверберации при полном заполнении $T_{500}=1,6$ с.

Схожее архитектурное построение имеет Большой зал государственной филармонии в Санкт-Петербурге. При объёме зрительного зала 16380 м³ и вместимости 1400 человек создается прекрасная акустическая обстановка. Высокая степень однородности звука достигается большим количеством колонн диаметром 100 см по периметру зала и большими висячими люстрами на горизонтальном потолке. Время реверберации в пустом зале $T_{200}=2,2$ с и $T_{1000}=1,8$ с.

Концертный зал имени Чайковского в Москве имеет объём зрительного зала 18000 м³ и вмещает 1700 зрителей. Овальная форма плана не способствует равномерному распределению звуковой энергии; время реверберации для прослушивания музыкальных программ удовлетворительное.

Большой зал консерватории в Москве имеет объём 17000 м³ и вместимость 2150 зрителей. Время реверберации для заполненного слушателями зала $T_{500} = 2,2$ с. Акустика зала вполне удовлетворительная для звучания органной и симфонической музыки. Основные параметры вышеперечисленных залов приведены в табл.2.

Т а б л и ц а 2

Наименование театра	Объём, м ³	Объём на одного человека, м ³	Вместимость	Время реверберации T_{500} , с
1	2	3	4	5
Вагнеровский театр в Байрете	113000	8,4	1345	2,2
Зал частной оперы в Чикаго	24000	6,7	3600	1,9
Концертный зал в Прейели, Париж	22000	7,3	3000	1,5
Зал Куинс-Холл, Лондон	12000	6	2026	1,4
Колонный зал Дома Союзов, Москва	12500	7,8	1600	1,6

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Зал государственной филармонии, Санкт-Петербург	16380	11,7	1400	1,8
Концертный зал им. Чайковского, Москва	18000	10	1700	2,2
Большой зал консерватории в Москве	17000	7,9	2150	2,2
Бетховен-Халле в Бонне	16000	11	1420	1,8
Большой зал Лидер-Халле в Штутгарте	16000	8	2000	1,9
Средний зал Лидер-Халле в Штутгарте	5500	7	800	1,8
Королевский зал британского фестиваля, Лондон	18000	6	3000	1,7

В театральных залах, построенных в первой половине и середине XX века главным образом преследовалась проектировщиками цель – выдержать время реверберации в пределах рекомендуемых значений от объема помещения соответствующего назначения [1, 2, 5, 6].

К достижениям отечественной архитектурной акустики следует отнести зрительные залы Детского музыкального театра, театра им. Е. Вахтангова, Московского драматического театра им. А.С. Пушкина, Дворца культуры ЗиЛа, студии Государственного дома звукозаписи, ателье записи и прослушивания киностудии «Мосфильм». В этих залах соблюдены требования геометрической акустики: рационально выбраны формы и размеры, что обеспечивало высокую степень однородности поля и оптимизацию времени запаздывания начальных отражений. В каждом конкретном случае выбраны свои архитектурно-планировочные решения. Залам сравнительно небольшой ширины придана форма прямоугольного параллелепипеда. Таковы Большой и Малый залы Московской консерватории, Большой зал московского Дома ученых. При небольшой ширине зала количество отражений, приходящих на места слушателей, быстро нарастает со временем и в завершающей части процесса реверберации настолько велико, что обеспечивает хорошую однородность звукового поля. В залах большой ширины (Колонный зал Дома союзов, Большой зал Санкт-Петербург-

ской филармонии) введены звукорассеивающие конструкции в виде ряда колонн. В современных залах большой вместимости хорошего рассеяния звуков достигают членением стен и потолка и установкой крупных рассеивающих поверхностей на стенах.

Однако удовлетворительная акустика, ограничения прослушивания музыкальных программ (орган, симфонический оркестр, вокал) связаны с недостаточной проработкой архитектуры помещения. Время реверберации в концертных залах больше, чем в любых иных залах. Однако время реверберации не всегда определяет акустические свойства залов. Например, в Малом зале Московской государственной консерватории акустические свойства прекрасны, а время реверберации составляет 2 с. В то же время, если следовать рекомендациям, для объема зрительного зала 2550 м³ время реверберации должно быть около 1,35 с. Решающим фактором здесь является структура ранних отражений.

Звукоотражающие экраны на потолке, расчленение стен по вертикали ярусами лож и выступающих балконов, на которых размещается до 40% зрителей, создают хорошие условия для рассеивания звуковой энергии, формирования диффузного звукового поля и характерны для зрительных залов старого типа. Современные решения больших концертных залов характеризуются преимущественным размещением слушателей перед эстрадой, но иногда с нарушением симметрии размещения относительно центральной продольной оси и комбинированием плоских, вогнутых и выпуклых поверхностей внутренних стен. Это делается для того, чтобы выпуклая часть стены равномерно рассеивала звуковую энергию и особенно звуков одной части оркестра, где расположена, например, группа скрипачей и виолончелистов. Для устранения опасности фокусирования звуковой энергии и лучшего рассеивания отраженного звука вся вогнутая поверхность расчленяется уступами до 1 м глубиной и шагом 3–4 м, что обеспечивает рассеивание звука вплоть до частот 100 Гц.

Архитектура концертных залов постоянно изменялась в течение XX и начала XXI века с учетом накапливаемого опыта. Строящиеся сегодня в мире концертные здания кардинальным образом отличаются от аналогичных по функции зданий, построенных в 70-е годы XX столетия.

В первоначальный период развития концертных залов стремление театральных постановщиков к совершенству исполнения привело к разделению исполнителей и зрителей (оркестровой ямой, порталом с антрактным занавесом). Действие приняло одностороннюю направленность, а зрительская зона – фронтальное расположение. Такое плани-

ровочное решение входило в норму вместе с проведением концертных программ в театральных и клубных залах со сценическими коробками.

С появлением универсального концертного зала им. Чайковского, решенного единым пространством с открытой эстрадой и устройством дополнительной площадки для оркестра в виде боковой галереи (а не оркестровой ямы) зрители почувствовали себя участниками действия. В театрах начали искать новые сценографические формы и освобождаться от громоздких декораций, а в концертной среде до сих пор сохраняется инерция использования декоративных задников, а порой, и бутафорской атрибутики.

Послевоенный бум строительства концертных залов за рубежом ознаменовался поиском новых направлений в концертной деятельности. Все крупные концертные залы решены единым пространством с эстрадой, максимально охваченной зрительской зоной (концертные залы Берлинской филармонии и Бетховенский в Бонне). Зал Берлинской филармонии является самым большим концертным залом Берлина и рассчитан на 2440 мест. Длина зала составляет 60 м, ширина — 55 м, высота с подиумом — 21 м. Зал Филармонии отличается необычным интерьером. Сцена перенесена в центр зала, и оркестр как на арене окружён со всех сторон публикой, размещающейся на разноуровневых террасах лож (рис.2). Акустические проблемы были великолепно решены за счёт особой конструкции стен и мягкой обивки потолка. По той же схеме стали сооружаться и отечественные объекты (Большой зал московского Международного Дома музыки, летний концертный зал в Сочи).



Рис. 2. Модель Берлинской филармонии (слева) и Зала камерной музыки (справа)

Усилившаяся конкуренция и борьба за зрителя (особенно с телевидением) определяет необходимость использования двух серьезных преимуществ концертных залов: предоставление условий для общения зрителей с «живыми» звуками, артистами, а также возможность для публичного выражения эмоций (рис.3). За рубежом, где конкуренция острее, акустика залов настраивается на каждую программу, а залы не превышают вместимость в 3000 мест (предел для залов с естественной акустикой).

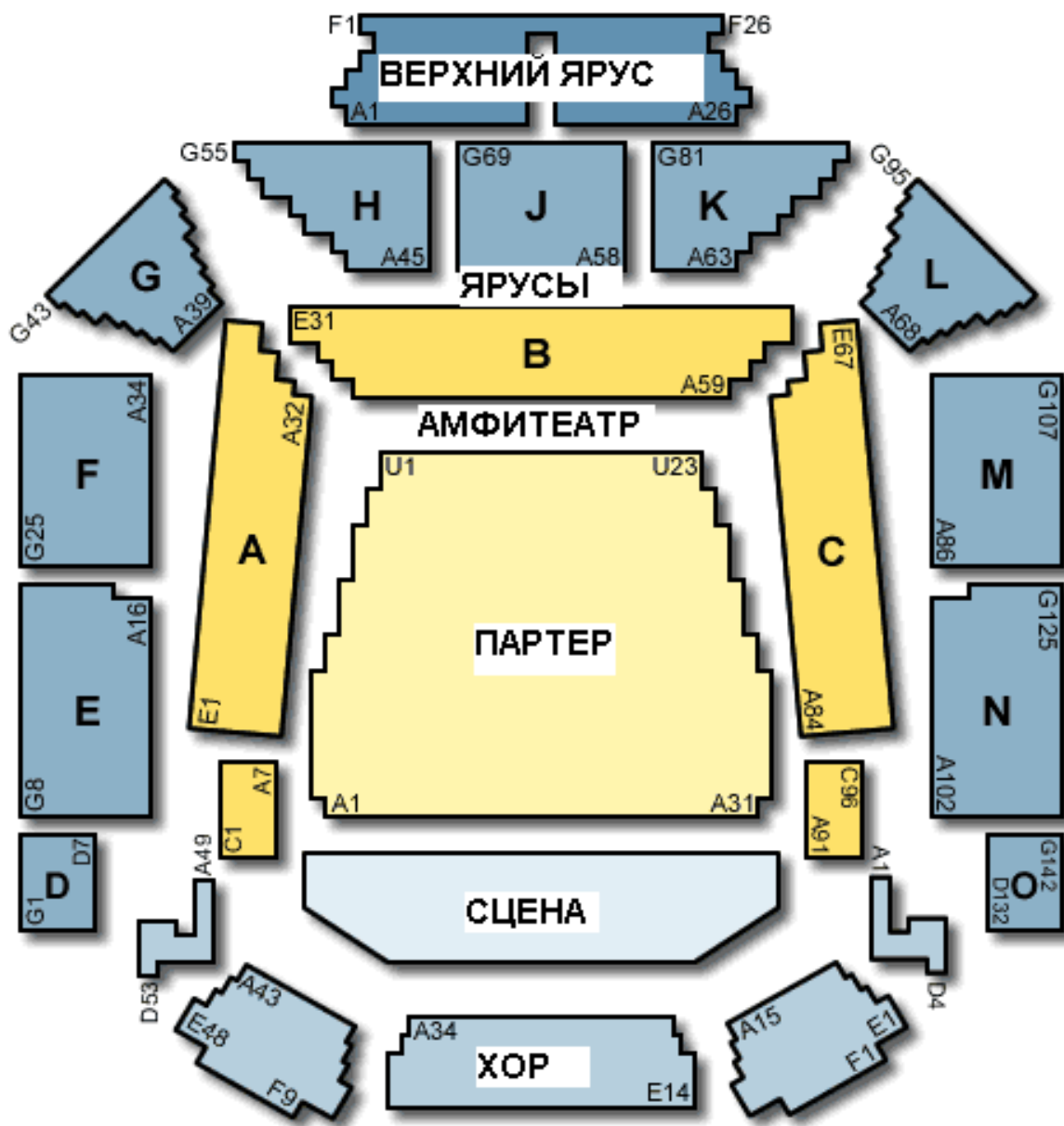


Рис.3. Планировка концертного зала Royal Concert (Глазго, Шотландия)

В России имеется сравнительно небольшой опыт нового проектирования концертных залов. Ввиду нехватки финансовых средств для проведения концертной деятельности в основном использовались фи-

лармонические и консерваторские здания, построенные в начале XX века, здания домов и дворцов культуры постройки 20-70-х гг. Здания, предназначенные для проведения исключительно или преимущественно концертных программ, строились в СССР со второй половины 1960-х до конца 1980-х гг. Проектированием занималась специализированная проектная организация – ЦНИИЭП зрелищных зданий им. Б.С. Мезенцева, которая выполняла все подобные проекты.

С начала 1990-х гг. строительство концертных залов в России почти не ведется. Исключения – возведение Международного Дома музыки на Красных Холмах, Центра оперного пения Вишневской на ул. Остоженка в Москве, концертного зала «Мариинский» в Санкт-Петербурге. В первых двух случаях отсутствие опыта подобной работы у проектировщиков привело к серьезному ухудшению естественной акустики зрительного зала.

Решение о создании нового Концертного зала было принято художественным руководителем Мариинского театра В.А. Гергиевым после пожара 2004 года, разрушившего здание бывших Художественных мастерских Мариинского театра, построенных архитектором А.В. Шретером в 1900 году. На месте сгоревшего здания был задуман новый концертный зал «Мариинский» с уникальной акустикой, отвечающий последним требованиям сценической технологии.

К созданию проекта были привлечены крупные иностранные специалисты, среди которых один из ведущих французских архитекторов, специализирующийся на проектировании и строительстве театров и концертных залов – Ксавье Фабр с группой французских инженеров-сценографов из фирмы «SCENE», всемирно известный японский специалист по акустике Язу Тойота, а также французские инженеры по несущим конструкциям и техническим сетям из бюро «SETEC-Bâtiment».

Проектирование и строительство было осуществлено в рекордно короткие сроки: меньше чем за год был создан проект и разработаны рабочие чертежи, и чуть больше года понадобилось на строительство здания.

По замыслу архитекторов новый концертный зал должен был частично вписаться в габариты сгоревшего здания, расположенного на очень узком и вытянутом участке, сохранив уцелевшие от пожара части исторических фасадов художественных мастерских со стороны улицы Писарева.

Особая конфигурация зрительного зала, образующая единое пространство в форме «колыбели», была определена архитектором для достижения высокого качества и богатства звука и прекрасной видимости сценической площадки с любого зрительского места (рис.4).

Концепция зала совместила в себе два традиционных типа концертных залов – продолговатой прямоугольной формы «shoe box» (по такой модели создан, например, зал «Musikverein» в Вене) и формы ступенчатых террас, расположенных вокруг оркестровой площадки (этому типу соответствует, например, зал Берлинской филармонии).

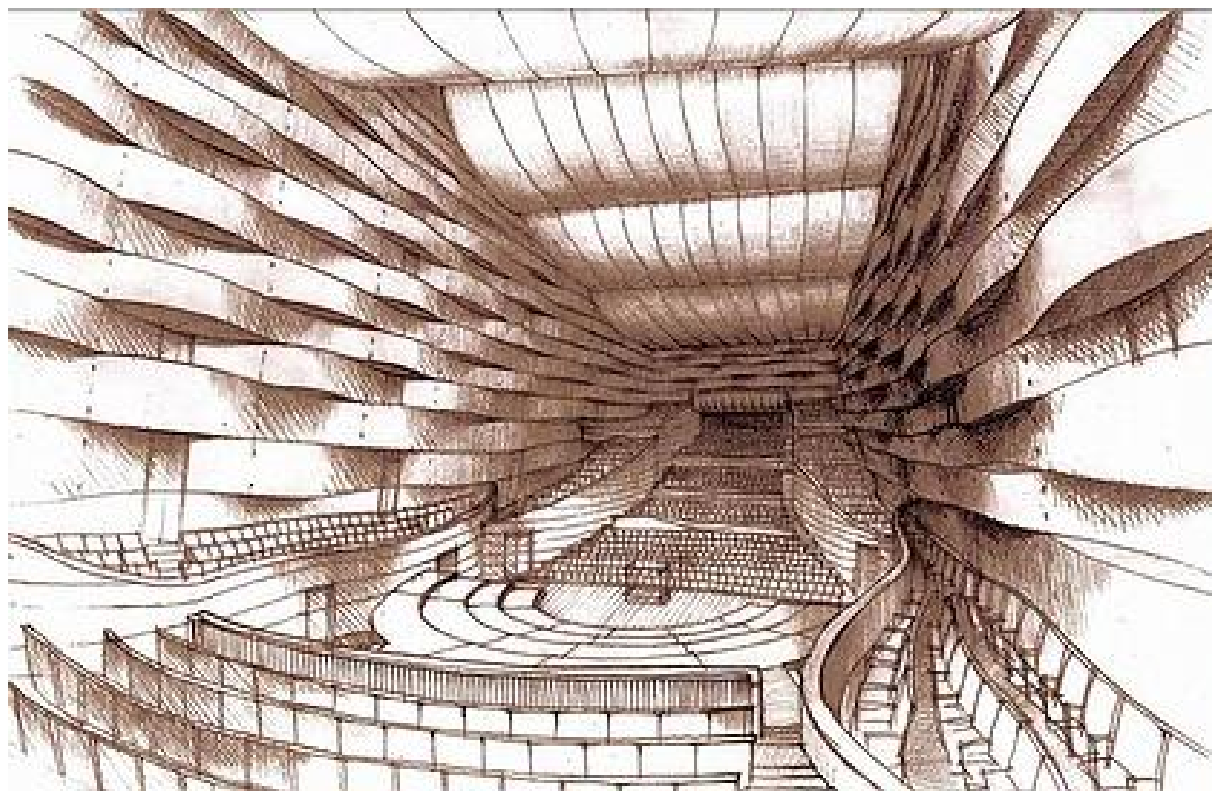


Рис. 4. Решение интерьера зрительного зала (эскиз К.Фабра)

Оригинальная обшивка стен зала, состоящая из попеременно выпуклых и вогнутых деревянных панелей, создающих эффект «плетения», оказывает значительное влияние на распределение звука. Над разработкой и реализацией этого непростого замысла отделки зала архитекторы работали совместно со специалистами фирмы «FINNFOREST Merk GmbH».

Основные параметры зрительного зала:

- вместимость зала рассчитана на 1110 посадочных мест, включая хоровой ярус на 120 концертных мест, который также может быть занят зрителями;
- общий объем зала составляет приблизительно 1300 м³;
- ширина – 24 м, длина – 52 м и высота в среднем - 14 м;
- размеры сцены – радиус 20 м, глубина 15 м;

- вместимость подъемной оркестровой площадки составляет 130 мест для музыкантов.

Главная уникальная особенность зрительного зала «Мариинский» заключается в возможности его трансформации и использования для различного рода театральных и общественных мероприятий, таких как: балет, опера, музыкальные постановки и конференции. При этом концертной деятельности зала отводится ведущая роль (рис. 5).



Рис. 5. Продольный разрез концертного зала «Мариинский»

Новое здание представляет собой сложный многофункциональный комплекс, включающий в себя все службы, необходимые для обеспечения комфорта зрителей, музыкантов, артистов и служащих театра. В зону обслуживания публики входят гардеробы, зрительские фойе с барами (700 м² общей площади), салоны с сувенирными лавками, лестницы и лифты. В здании предусмотрена возможность передвижения для маломобильных посетителей, а в зрительном зале для них устроены специальные места.

Помимо общественных помещений, предназначенных для публики, в здании предусмотрены репетиционный зал, мастерские, склады, административные и технические помещения, а также все помещения, необходимые для размещения оркестра, артистов и обслуживающего персонала театра.

Сегодня новый Концертный зал с уникальной акустикой и современным оснащением сцены распахнул двери для петербуржцев и гостей города благодаря совместным усилиям руководства Мариинского театра, архитекторов, строителей и всех русских и иностранных специалистов, участвовавших в реализации этого проекта. 29 ноября 2006 года зал открылся для слушателей. Летом 2009 года в Концертном зале был установлен орган работы французской фирмы «Даниэль Керн» (Страсбург). Уникальная особенность мастеров фирмы «Даниэль Керн» – в сочетании опыта и традиций немецкого и фран-

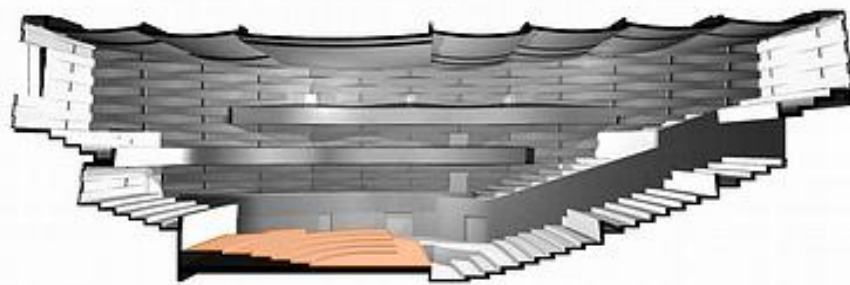
цузского органостроения, уходящих в глубину веков. Орган в Концертном зале (рис.6) – первый за столетие французский инструмент в России, который отличается от органов немецких мастеров и конструктивными особенностями, и характером звучания, что позволяет полноценно исполнять в России не только немецкую, но и французскую органную музыку.



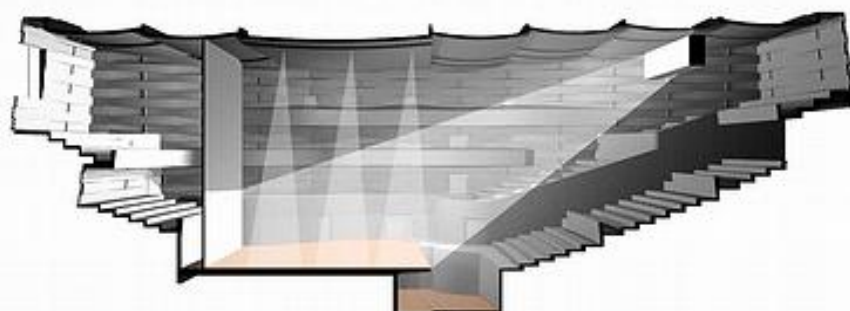
Рис.6. Орган в концертном зале

Официальных норм, регламентирующих правила разработки концертных залов не существует, при проектировании следует руководствоваться общими требованиями СНиП 2.08.02-89* «Общественные здания и сооружения». Однако, ГУП МНИИП «Моспроект-4» и ЗАО ЦНИИЭП им. Б.С. Мезенцева в 2004 г. разработали для г. Москвы и утвердили Москомархитектурой «Рекомендации по проектированию концертных залов», которые могут быть применены в качестве основы и для других регионов.

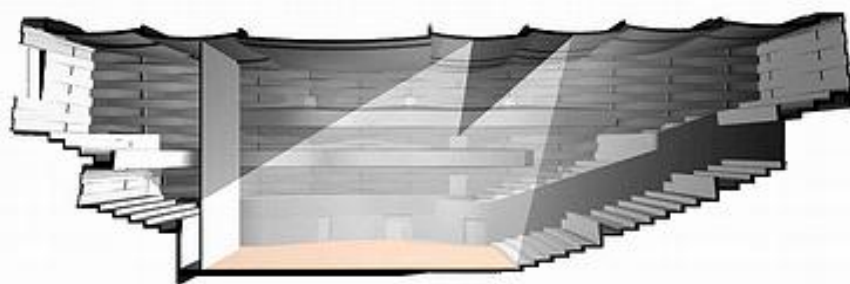
Как уже отмечалось, совершенствование планировочного решения концертных залов с целью улучшения их акустических и зрительских качеств непрерывно продолжается и современные концертные залы строятся по принципиально иным типологическим схемам, чем 30 лет назад (рис.7).



ВАРИАНТ КОНФИГУРАЦИИ КОЦЕРТНОГО ЗАЛА - ДЛЯ КОНЦЕРТА СЕЧЕНИЕ



ВАРИАНТ КОНФИГУРАЦИИ КОЦЕРТНОГО ЗАЛА - ДЛЯ ОПЕРЫ СЕЧЕНИЕ



ВАРИАНТ КОНФИГУРАЦИИ КОЦЕРТНОГО ЗАЛА - ДЛЯ БАЛЕТА СЕЧЕНИЕ

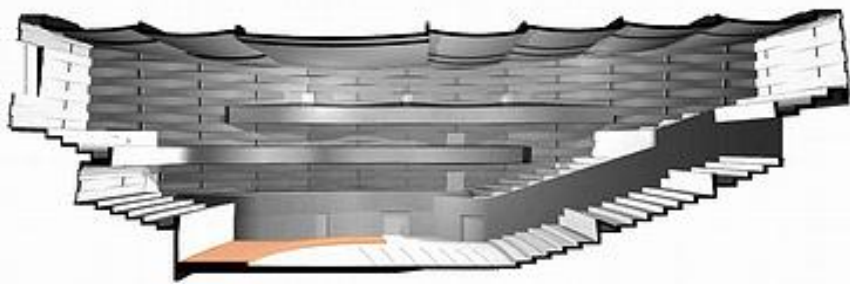


Рис.7. Варианты трансформации сцены

Можно выделить следующие тенденции:

- Приближение исполнителя к зрителю. В современных концертных залах с естественной акустикой отказываются от размещения исполнителей на сцене театрального типа или сцена-эстрада в пользу выдвинутой в центр зала эстрады без занавеса. Зрители в этом случае размещаются не только перед площадкой, но и по бокам от нее и даже за ней (на приподнятых галереях), оказываясь на минимальном расстоянии в зоне прямого звука. Такой тип площадки оптимален для больших филармонических, камерных и литературных выступлений и менее предпочтителен для эстрадных, хореографических, народных и сборных концертов. Это связано с тем, что интенсивность звука резко падает с удалением слушателя от исполнителя и необходимо размещать максимальное число зрителей в непосредственной близости от эстрады. Не рекомендуется размещать на расстоянии свыше 27 метров от эстрады слушателей литературных концертов, свыше 30 метров – камерных, свыше 45 метров – больших филармонических.

- Галереи по бокам и позади сценической площадки используются также для размещения хора в случае его совместного выступления с оркестром, или оркестра, если на основной площадке выступает хореографический коллектив (рис.8) Такая схема также хорошо подходит для использования в современных конференц-залах, в типологии которых также прослеживаются тенденции к отказу от фронтальной схемы размещения лектора – зрителей в пользу кольцевой.

- Отказ от ортогональной (прямоугольной) формы зала. Залы имеют сложную конфигурацию, определяемую акустическими расчетами.

- Размещение залов в автономных «капсулах». В непосредственной близости от залов (акустических в первую очередь) запрещается размещение венткамер, вентшахт, лифтовых шахт, других помещений повышенной шумности, не рекомендуется размещать залы вблизи авто- и железнодорожных магистралей, линий метрополитена, трамвая, троллейбуса. Для того чтобы избежать внешних влияний на зал, современные концерт-холлы проектируются в виде автономных акустических капсул, связанных с остальными конструкциями здания через специальные амортизаторы (залы подвешиваются на тросах или опираются на резиновые подушки). В России такое решение впервые применено в Московском Международном Доме музыки.

- В залах широко используются мобильные и трансформируемые архитектурные элементы для «настройки» зала под определенный тип концерта или коллектив: подвешиваемые над эстрадой и залом звуко-

отражающие экраны, накладные звукопоглощающие элементы в задней части зала.



Рис.8. Концертный зал Сегерсторм (Калифорния, США)

- Современные концертные залы проектируются как landmark buildings – «знаковые здания», современные памятники архитектуры.

В связи с интересом к рассматриваемой теме студентам рекомендуется рассмотреть обобщенный опыт проектирования театральных залов за последние 10 – 15 лет в России и за рубежом [1, 3, 5, 6].

1. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНОМУ РЕШЕНИЮ ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА

Любой лектор, певец, артист прекрасно ощущает, как по-разному звучит его голос в различных условиях: в маленькой сильно заглушенной комнате, в большом зале, на открытом пространстве и т.д. Естественно, он произвольно или непроизвольно подстраивает свой голос под окружающие условия. Однако опытный певец или артист может сохранять основные свойства своего голоса (тембр, звуковысотные отношения и др.) в самых разных окружающих условиях, иначе бы голос менялся до неузнаваемости, и петь и говорить в изменяющихся условиях шумов и акустической обстановки было бы практически невозможно. Таким образом, существуют механизмы, которые, с одной стороны, позволяют певцу, лектору и др. все время контролировать окружающую обстановку, с другой стороны – поддерживать до определенной степени постоянство акустических параметров своего голоса. Изучение этих механизмов чрезвычайно важно для исполнителей.

Анализ обратной связи, с помощью которой исполнитель получает информацию об акустических параметрах (громкости, точности интонирования, тембре и др.) собственного голоса в различной акустической обстановке, является важнейшей проблемой для качества пения и речи. Отсутствие обратной связи о качестве голоса или её неверная интерпретация могут испортить исполнение. А как сделать её достоверной?

Когда оратор или певец находится в помещении, то к нему, как и другим слушателям в зале, приходят как прямые звуки его голоса, так и отраженные сигналы (рис.9). Если он находится на сцене, то структура ранних отраженных звуков существенно отличается от структуры в зрительном зале, поскольку сцена представляет собой большое, сильно поглощающее пространство из-за наличия декораций. Исполнитель может судить о качестве своего голоса в основном по отраженным звукам из зала, именно поэтому так важно наличие отражающих поверхностей на боковых припортальных стенах и на потолке. Особенно это важно для оперных театров, так как в случае неправильно выбранных конструкций отражающих поверхностей на потолке и конфигурации оркестрового пространства оркестр может вообще заглушить голос певца. Поэтому акустика при сценической части зала должна быть запроектирована таким образом, чтобы часть отраженных звуков обязательно попадала к исполнителям.

В отечественной и зарубежной практике проектирования театров применяется шесть схем построения глубинной колосниковой сцены,

различающихся степенью пространственного развития и объемом возможностей, которые может предоставить сцена:

- с двумя карманами и аръерсценой;
- с одним карманом и аръерсценой;
- с двумя карманами без аръерсцены;
- с одним карманом;
- без карманов, но с аръерсценой;
- без карманов и аръерсцены.

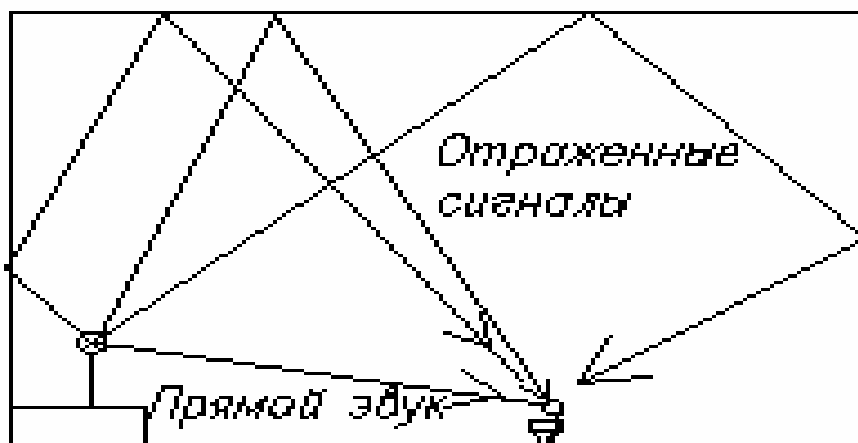


Рис.9. Структура отраженных звуков в зрительном зале

Наиболее распространенная и многократно апробированная схема глубинной колосниковой сцены классического театра приведена на рис.10.

Следует помнить о том, что естественный источник звука (музыкальный инструмент, голос исполнителя) имеет ограничения по громкости. Поэтому для закрытого помещения необходимо предусмотреть такую форму потолка и стен, которая отражала бы основную часть звука в конец зала. Это требование вытекает из неравномерности распределения звуковой энергии по залу. В передних рядах она велика, а по мере удаления от источника – уменьшается за счет поглощения слушателями.

Хорошим акустическим качеством характеризуются помещения, где выполнены следующие основные требования:

- все места слушателей обеспечены прямой звуковой энергией, а также энергией ранних отражений;
- в помещении создано диффузное звуковое поле, исключаящее возникновение эха, концентрацию звука и другие нежелательные явления;

- время реверберации зала, заполненного слушателями, соответствует величине и назначению помещения;
- посторонние шумы сведены к минимуму.

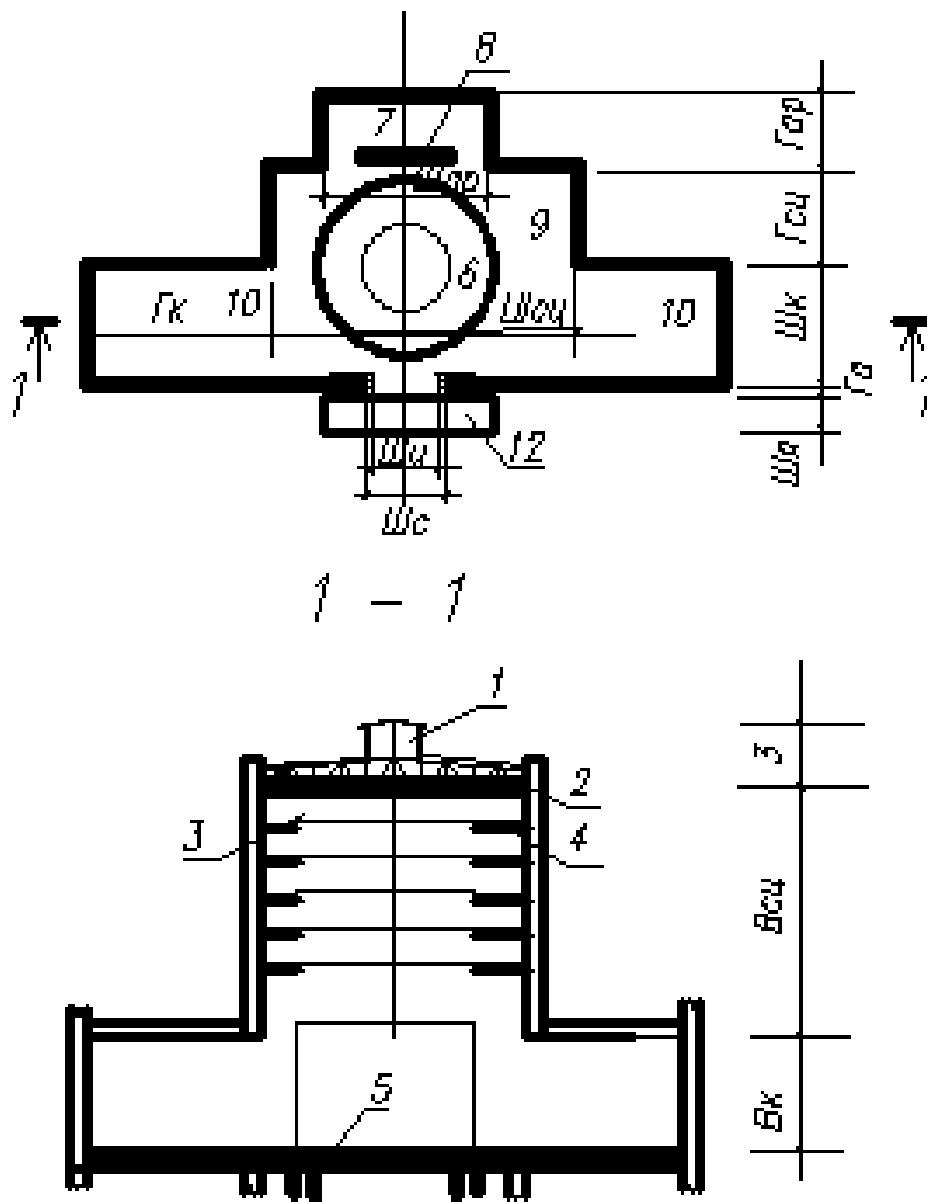


Рис. 10. План и поперечный разрез сцены с обозначениями элементов:
 1 – дымовые клапаны; 2 – штанкетная площадка; 3 – колосники сцены;
 4 – рабочие галереи; 5 – трюм; 6 – вращающийся круг; 7 – аррьерсцена;
 8 – крышка сейфа для скатанных декораций; 9 – сцена; 10 – карман сцены;
 11 – авансцена; 12 – проем оркестровой ямы; Шсц – ширина сцены;
 Гсц – глубина сцены; Всц – высота сцены; Шк – ширина кармана;
 Гк – глубина кармана; Вк – высота кармана; Шар – ширина аррьерсцены;
 Гар – глубина аррьерсцены; Шс – ширина строительного портала;
 Ши – ширина игрового портала

Величину общего объема зала определяют в соответствии с назначением зала и его вместимостью. В соответствии с п.13.2 [2] в зрительном зале должны быть выдержаны следующие требования по удельному воздушному объёму, приходящемуся на одного слушателя в м³:

- в залах драматических театров, учебных аудиториях и конференц-залах 4–5;
- в залах музыкально-драматических театров (оперетта) 5–7;
- в залах театров оперы и балета 6–8;
- в концертных залах камерной музыки 6–8;
- в концертных залах симфонической музыки 8–10;
- в залах для хоровых и органнх концертов 10–12;
- в концертных залах современной эстрадной музыки (киноконцертных залах) 4–6.

В целях обеспечения акустического комфорта не рекомендуется превышать следующие предельные значения глубины зрительного зала в метрах:

- в драмтеатрах, учебных аудиториях и конференц-залах 24-25;
- в театрах оперетты 28-29;
- в театрах оперы и балета 30-32;
- в концертных залах камерной музыки 20-22;
- в концертных залах симфонической музыки, хоровых и органнх концертов 42-46;
- в многоцелевых залах вместимостью более 1000 мест 30-34;
- в концертных залах современной эстрадной музыки 48-50.

Для залов многоцелевого назначения средней вместимости (до 1000 мест) рекомендуемая величина принимается в пределах 4–6 м³ на слушательское место. Основная трудность акустического проектирования залов многоцелевого назначения большей вместимости заключается в следующем. Для речи и музыки требуется различный звуковой режим, который достичь известными приемами (например, изменяя соотношение площадей отражающих и поглощающих поверхностей) не представляется возможным ввиду интенсивного поглощения звуковой энергии в воздухе (особенно на высоких частотах) и ограниченной мощности источника звука. Изменить ситуацию можно, используя для этого электроакустические системы.

В основу композиционного построения многих произведений искусства, начиная с архитектуры античности, положено такое соотношение средних значений длины, ширины и высоты помещений, зданий

и пр., как ряд чисел Фибоначчи (3:5:8). Модуль отношения X определяется по формуле (1)

$$X = \frac{\sqrt[3]{V}}{4,94}, \quad (1)$$

где V – объем помещения, здания, м^3 .

Линейные размеры – длина, ширина и высота зала определяются через модуль, соответственно как $8X$; $5X$; $3X$.

Важно то, что для достижения гармоничной пропорции зала необходимо следовать следующему правилу: соотношение длины и ширины, ширины и высоты помещения должны быть не более 2 единиц и не менее 1. При этом длина по самой удаленной поверхности зала на балконе не должна превышать 30 м. В зависимости от объемно-планировочного решения зала допускается увеличение или уменьшение указанных величин до 20 %.

В случае устройства балкона в зрительном зале глубина подбалконного пространства не должна превышать 6 рядов зрительских мест. В этом случае высоту над последним рядом не следует допускать менее 3 м, а у входа в подбалконное пространство – не менее 4 м (рис.11). Отношение выноса балкона a_1 к средней высоте подбалконной пазухи h_1 должно быть не менее 1,5; для надбалконной пазухи соотношение a_2 к h_2 может быть увеличено до 2.

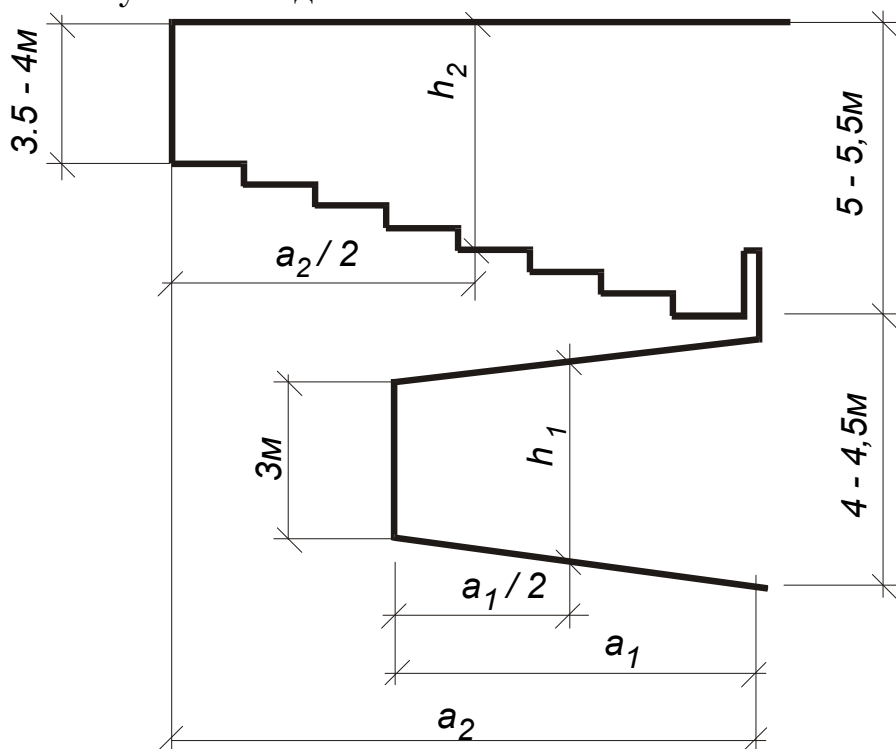


Рис. 11. Размещение балкона в зрительном зале

У границы зоны зрительских мест устраиваются отдельные, отгороженные барьерами, ложи: служебные – со входом из помещений, обслуживающих сцену, и гостевые – со входом из специальных гостевых помещений. На барьерах балконов предусматриваются устройства, предохраняющие падение предметов с высоты. С внутренней стороны барьеров балконов и лож целесообразно предусматривать углубления для ног зрителей, сидящих в первом ряду.

Студент должен самостоятельно решать вопрос о выборе профиля зала, при необходимости используя аналитические расчеты с условием, что они не противоречат конструктивному решению зала [5]. Архитекторы должны иметь достаточно выдумки и фантазии, чтобы выбором форм, профилировки, фактуры и цвета строительных материалов согласовать акустические элементы с общим стилем сооружения, сделать его составной частью общего архитектурного решения.

Форма и размеры зрительного зала должны способствовать улучшению слышимости музыки и речи. Нежелательно проектировать помещения круглой, овальной, подковообразной формы в плане (рис.12), способствующих концентрации звука в т.Ф, если источник звука (ИЗ) расположен на сцене.

Такое очертание допустимо лишь при специальном расчленении вогнутых поверхностей слегка наклонными стенами для отражения в сторону слушателей и декоративными поясами для решения задачи рассеивания отраженного звука.

Выпуклые поверхности, наоборот, создают рассеянное отражение звука и повышают диффузность в зале.

Гладкие поверхности, параллельные друг другу, не способствуют достижению однородности звукового поля. В результате отражения возникают точки или зоны сильной концентрации звука, в которых эти усиления повторяются с особой четкостью. Подобное явление (“порхающее эхо”) может быть устранено небольшим (до 2,5-4°) отклонением стен от параллельности, устройством на их плоскости рассеивающих архитектурных деталей, радиус кривизны или размеры которых соизмеримы с длиной волны. В области слухового восприятия длины волн составляют от 3 м до 3 см. Для низких частот необходимы элементы, близкие по размерам барьерам балконов, пилястр, колонн, глубоким дверным и оконным нишам. На средних и высоких частотах нетрудно создать эффективное рассеяние малозаметными структурами в виде рельефных углублений размером около 30 см, волнистых элементов (с длиной волны более 10 см), уступов, горизонтальных поясов, бордюров (рис.13). Если их очертание подвергнуть дальнейшему членению или придать им выпуклую форму, то будет достигнуто рассеивание в широком диапазоне частот.

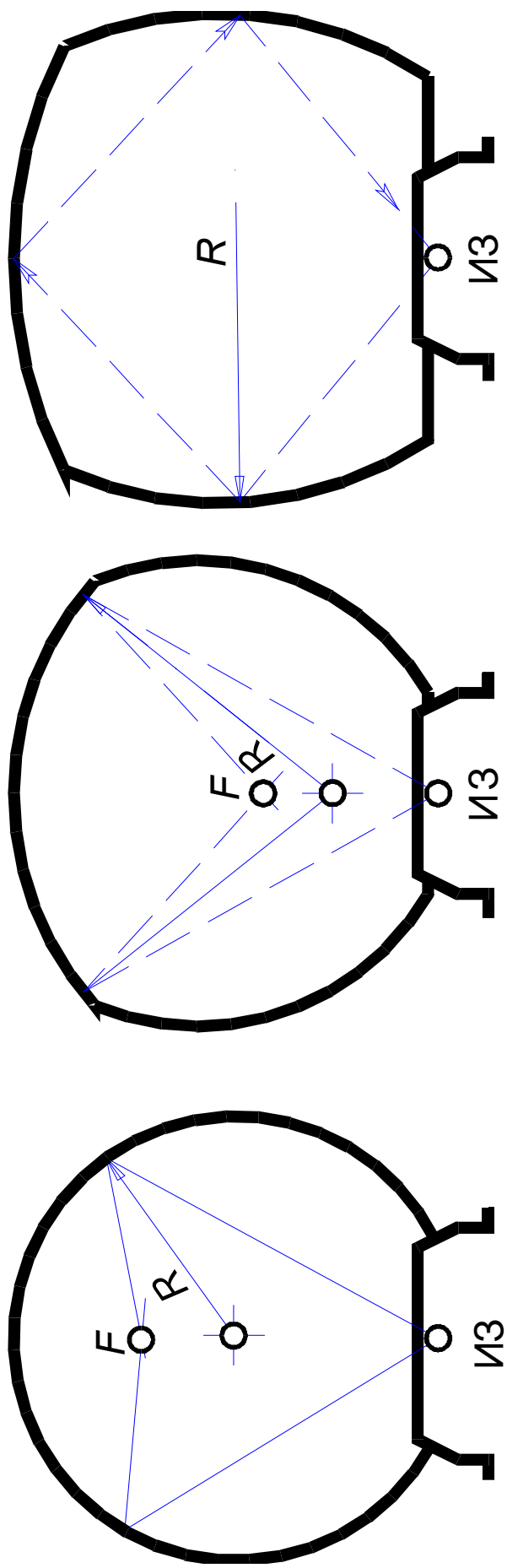


Рис. 12. Отражение звука ограждающими поверхностями разной формы

Для получения хорошего отражения или рассеяния звука необходимо, чтобы отражающие поверхности имели линейные размеры не менее 1,5 длины волны падающего на них звука. Размеры отражателей вблизи демонстрационной площадки должны быть по ширине не менее 5–6 м с тем, чтобы при перемещении источника звука (исполнителя) в игровой зоне обеспечивалось равномерное покрытие по площади слушательских мест первыми направленными полезными отражениями. Для получения рассеянных (диффузных) отражений расчлененные поверхности должны иметь ширину 1,5–2 м, глубину 0,5–1 м при шаге членения 2–4 м.

Дополнительные более мелкие членения крупных элементов обеспечивают рассеяние в широком диапазоне звуковых частот. При этом наибольший эффект дают элементы криволинейной выпуклой формы.

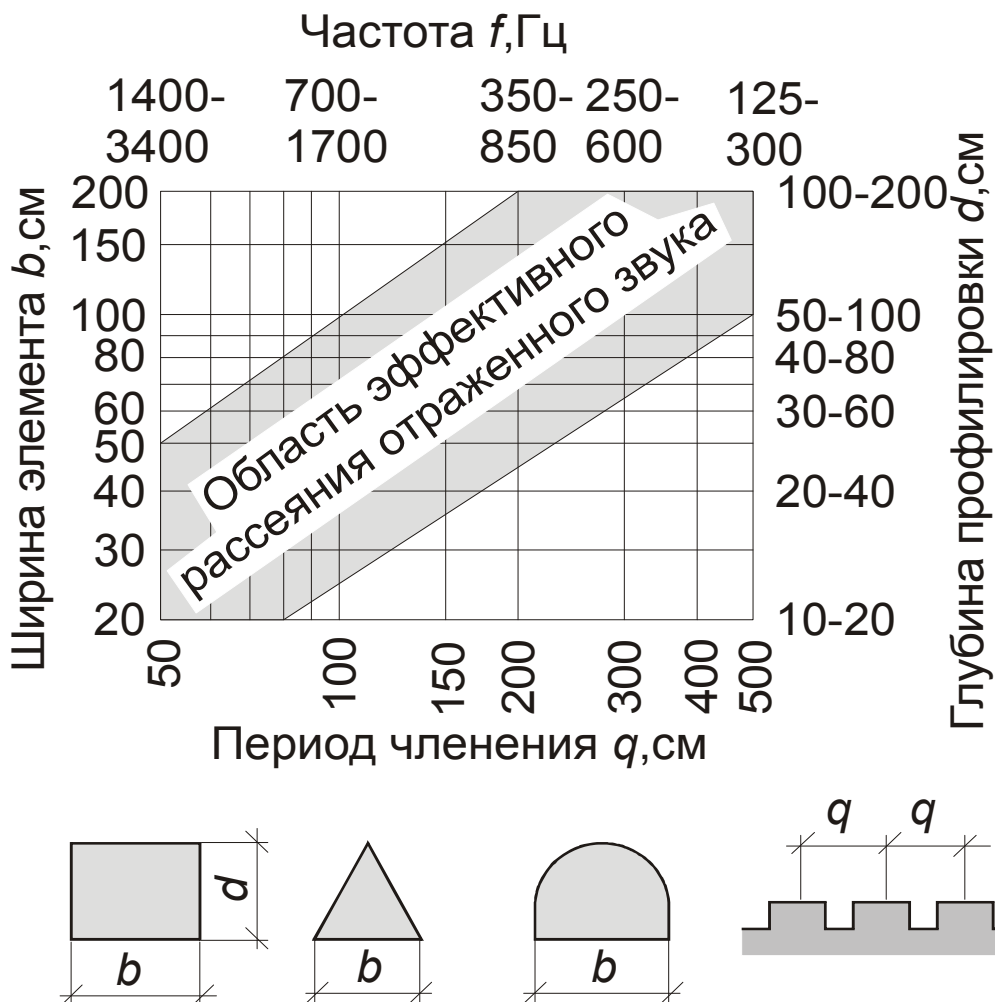


Рис. 13. Размеры периодических членений, обеспечивающих рассеивание звука в частотном диапазоне 125-3400 Гц

Размещение технологического оборудования в зале (устройство сцены, эстрады или небольшого подиума для лекторского стола и трибуны, подвеска экрана для демонстрации кинофильмов, установка кресел, оркестровой ямы, зрительских лож и балконов) должно быть согласовано с вопросами благоприятного слухового восприятия, а также соответствующих условий видимости (беспрепятственной, частично ограниченной, ограниченной), заполнения зрительного зала слушателями и их безопасной эвакуации из него в обычных или аварийных ситуациях [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Условия видимости зрелища отражаются специальным показателем – комфортностью восприятия (видимости) с данного зрительского места. Субъективное чувство комфортности, удобства восприятия данного зрелища с данной позиции – это устойчивый показатель, который практически не зависит от пристрастий зрителя и от реальных колебаний формы данного зрелища (смены мизансцен, конкретных номеров, изменения освещенности и т.д.). Каждому виду зрелища (концертному, театральному, спортивному и т.д.) отвечают зоны разной комфортности восприятия (видимости) – от «очень удобно», до – «очень неудобно». Выявлено, что если зрители расположены в относительно плоском партере, то места по оси зала не являются самыми лучшими. Зрители предпочитают смотреть на эстраду несколько сбоку, что, по-видимому, усиливает перспективу. Зрители сохраняют комфортное восприятие в пределах входящего в портал угла гораздо большего, чем 30°, традиционного для нормирования театра. Зоны разного качества входят друг в друга, образуя форму бабочки (рис.14, 15).

Расстояние между передней границей эстрады, сцены или барьера оркестровой ямы и спинками кресел 1 ряда зрительских мест следует принимать не менее 1,5 м, а в зрительных залах вместимостью до 300 мест – не менее 1,2 м. Высоту уровня планшета эстрады (сцены) над уровнем пола 1-го ряда зрительских мест рекомендуется предусматривать не более 1 м, а в зрительских залах вместимостью до 500 мест – не более 0,8 м [6]. В лекционных аудиториях высота лекторского стола не должна превышать 0,8 м, а расстояние от него до спинок сидений 1-го ряда слушателей должно быть не менее 1,5 м.

Зрительные залы необходимо проектировать с учетом установки в них кресел с откидными сидениями. Исключения могут быть сделаны для лекционных залов учебных заведений, залов ожидания на вокзалах и на трибунах спортивных сооружений. В креслах, стульях и скамьях в зрительных залах предусматриваются устройства для крепления их к полу. В театральных залах рекомендуется применять мягкие и полумягкие кресла.

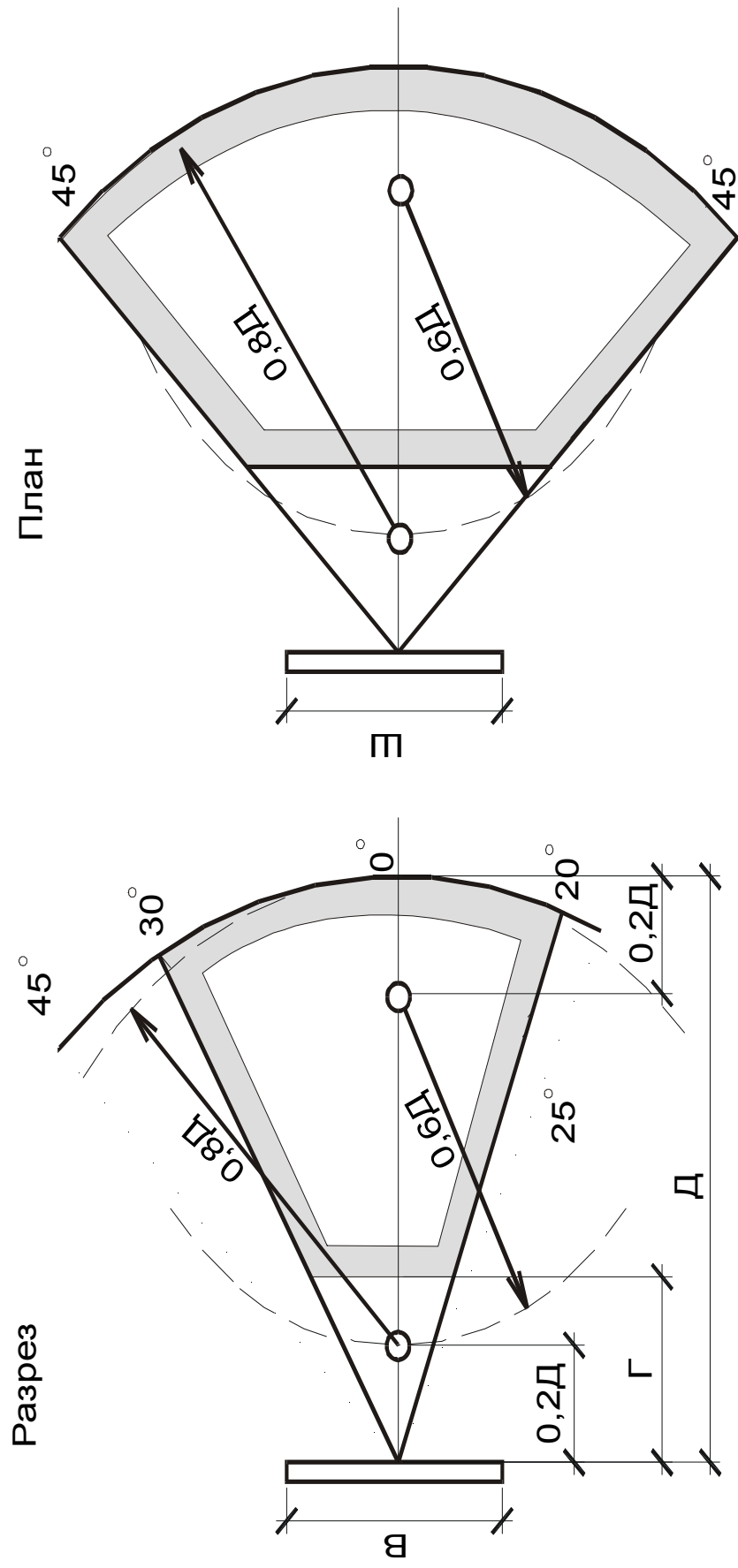


Рис.14. Зона расположения зрителей перед киноэкраном:
 В – высота рабочего поля киноэкрана; Ш – ширина рабочего поля киноэкрана; Г – расстояние от киноэкрана до спинки кресел первого ряда зрительских мест; Д – глубина зрительского зала

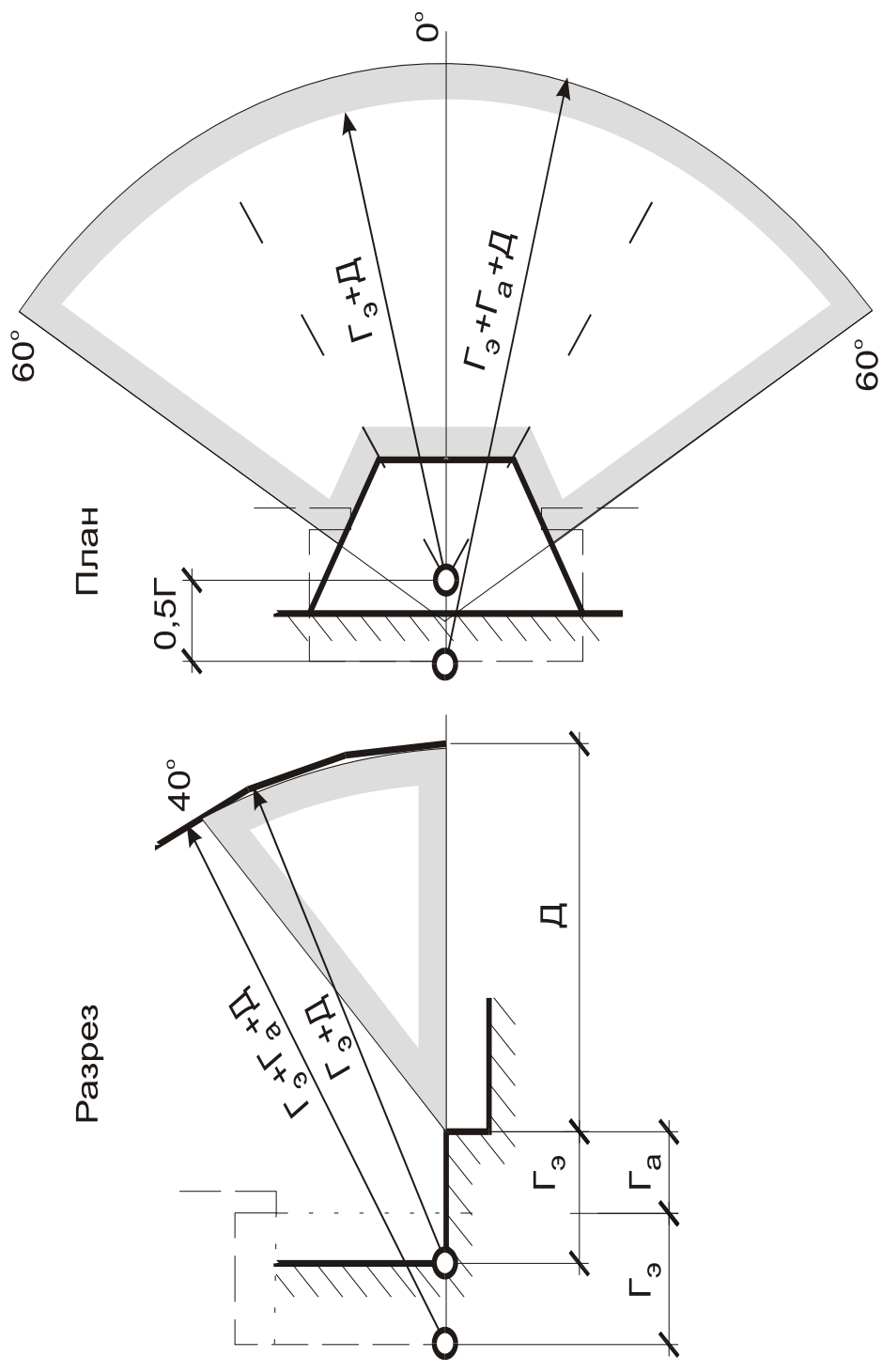


Рис.15. Зона размещения зрителей перед эстрадой:
 $\Gamma_{\text{а}}$ – глубина авансцены; $\Gamma_{\text{э}}$ – глубина эстрады

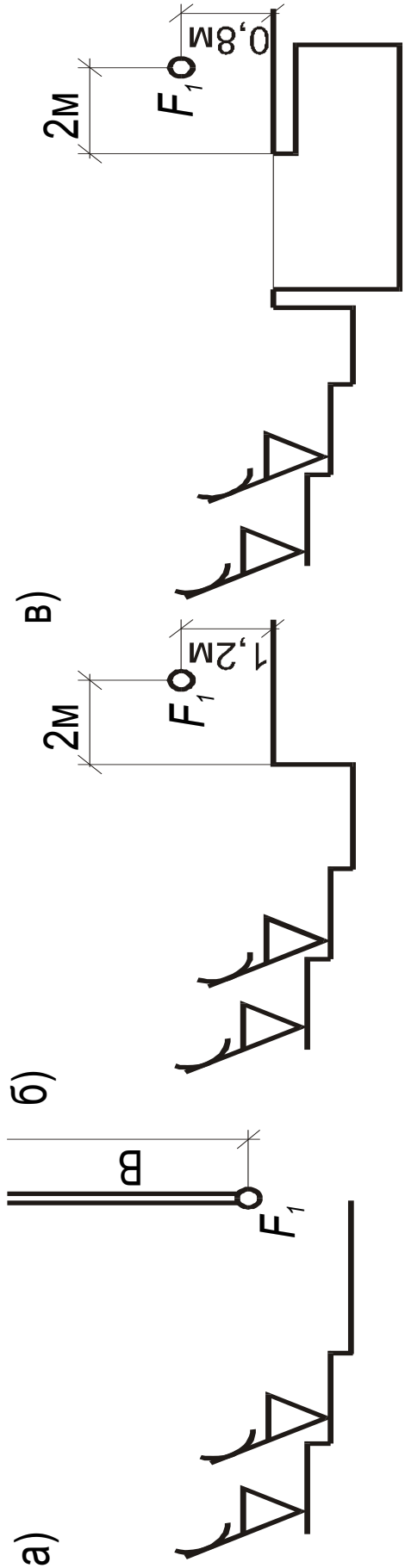


Рис. 16. Положение расчетных точек наблюдения:
 а – кинотеатр; б – эстрада; в – театральная сцена;
 В – высота рабочего поля киноэкрана

Крайние кресла ряда в проходах возможно оборудовать откидными сидениями (строфонтенами) с пружинными устройствами, обеспечивающими их самопрокидывание. В ложах и на балконах глубиной не более двух рядов зрительских мест рекомендуется устанавливать стулья или скамьи со спинками. При перепаде уровней пола соседних рядов более 0,7 м рекомендуется устраивать между рядами ограждение, предохраняющее от падения при проходе зрителей на место.

Профиль линии размещения зрительских мест, как и места в зрительном зале, необходимо проектировать в соответствии с условиями видимости объекта, расположенного на сцене (эстраде).

При проектировании в составе демонстрационного комплекса сцен рекомендуется размеры и требования принимать согласно табл. 3 [6].

Т а б л и ц а 3

Вместимость зрительного зала, мест	Типы сцены
До 600	С-1 – С-4
От 500 до 800	С-5 – С-6
От 700 до 1200	С-7
От 1100 до 1500	С-8
От 1500 и более	С-9

Размеры оркестровой ямы в театрах следует принимать по табл.4.

Т а б л и ц а 4

Театры	Ширина, м	Ширина проема, м	Высота, м
Драматический и музыкально-драматический	3,0	2,0	2,1– 2,4
Музыкальной комедии	4,5	3,5	2,1– 2,4
Оперы и балета	6,0	4,5	2,1– 2,4

В концертных программах оркестров и хоров для хорошего слитного звучания и избежания эха (для исполнителей и для слушателей первых рядов) оркестр должен быть размещен на площади шириной не более 22 м, хор – не более 46 м. Ширину эстрады, предназначенной для выступления хора и оркестра, следует принимать по более жестким требованиям для оркестра – 22 м. Для комфортного восприятия оркестра, расположенного на эстраде, рекомендуется удалять слушателей от оркестра не менее чем на 6,5 м.

При расположении слушателей вокруг игровой площадки наиболее акустически комфортная зона – перед оркестром, менее – с боков и наименее – сзади, в связи с чем места слушателей, сидящих сзади оркестра (хора), как правило, приподнимают над уровнем игровой площадки (рис. 17). Чтобы довести до слушателей как можно больше прямой звуковой энергии, не следует допускать преград (конструкций, оборудования, реквизита и т.п.) на пути распространения звуковой энергии от источника к слушателю. С этой же целью предусматривается подъем планшета сцены по отношению к полу зрительного зала и уклон пола зоны слушательских мест, а также попланый подъем исполнителей на игровой площадке. Такое решение уменьшает поглощение прямого звука впереди сидящими слушателями и его экранирование.

Практика показывает, что превышение рядов, обеспечивающее хорошую видимость, как правило, является достаточным и для обеспечения хорошей акустики зала.

Для того чтобы зритель беспрепятственно видел объект, необходимо создать ему такие условия, при которых он мог бы обозревать данный объект над головами впереди сидящих зрителей [7]. Если соединить прямой линией объект различения, находящийся в наихудшей (расчетной) точке видимого поля, с глазом зрителя, то головы всех людей, находящиеся перед данным зрителем, должны быть расположены ниже этой линии.

Построение профиля по отрезкам ломаной линии (рис.18) следует определять с обеспечения заданного превышения $C=0,14$ м, что соответствует условиям беспрепятственной видимости. При ограниченной видимости для зрителя каждого последующего ряда, начиная от первого, на любом из отрезков $C=0,07$ м. Число отрезков нужно принимать равным числу десятков рядов всего профиля партера зрительного зала.

Число рядов на первом (ближайшем к сцене, эстраде) отрезке определяют как частное от деления расстояния по горизонтали от расчетной точки F_1 до глаза зрителя первого ряда на величину глубины ряда $d=0,95$ м, а число рядов на каждом последующем отрезке увеличивают в 1,5–1,6 раза по сравнению с предыдущей. Допускается равное число рядов на каждом отрезке.

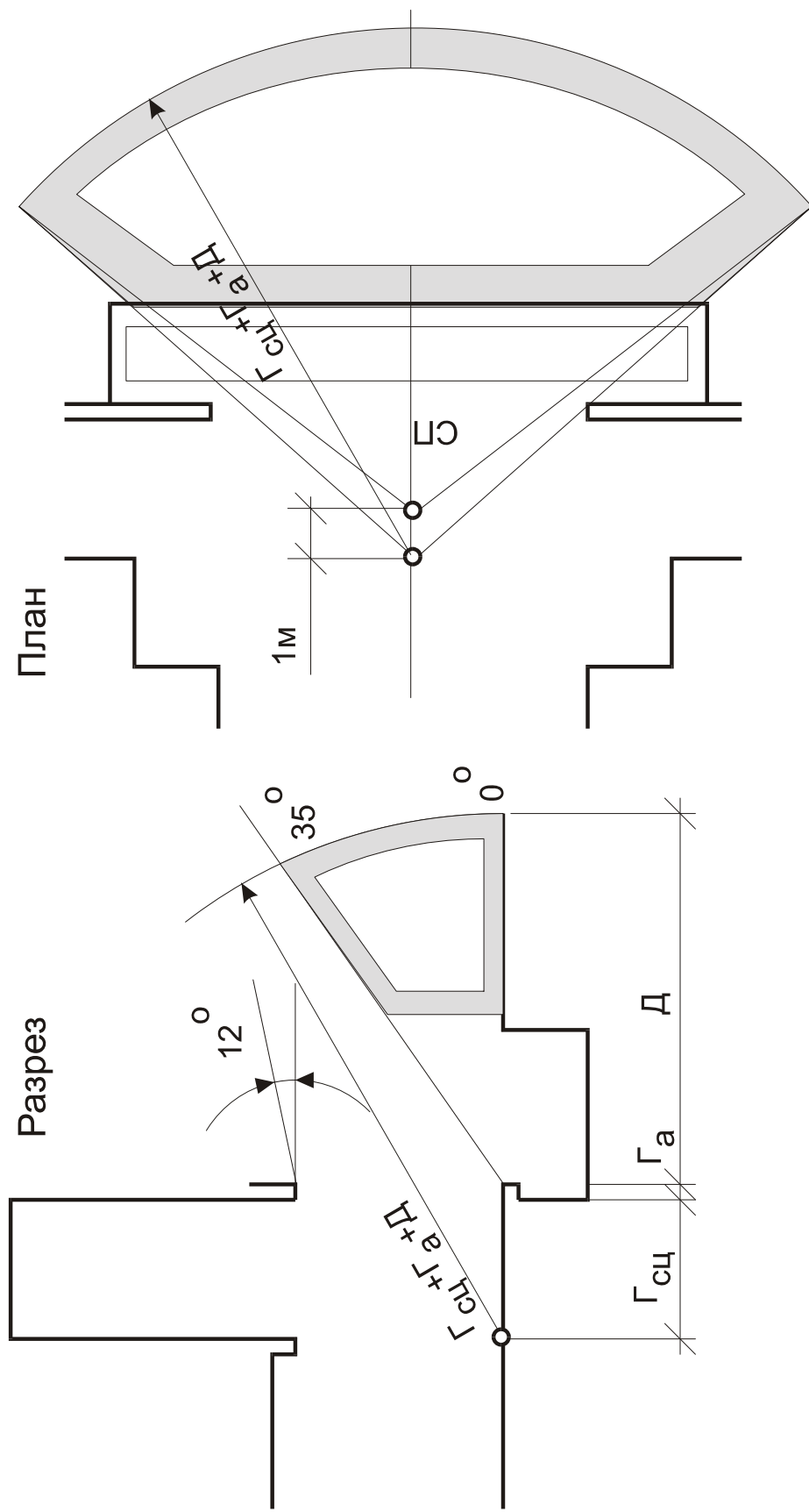


Рис. 17. Зона расположения зрителей перед сценой:
 $\Gamma_{\text{а}}$ – глубина авансцены; $\Gamma_{\text{сц}}$ – глубина сцены; СП – строительный портал

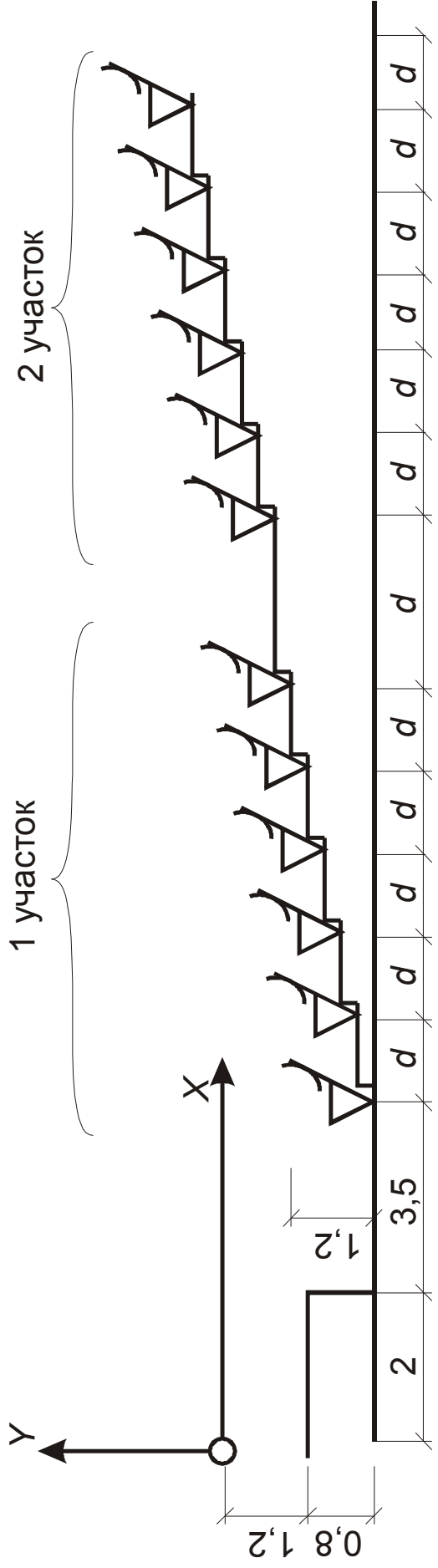


Рис. 18. Построение профиля зрительских мест методом отрезков

Превышение последнего ряда над первым на первом отрезке определяется по формуле

$$y_1 = \frac{x_1}{x_0} \cdot (c \cdot n_1 + y_0),$$

где x_0, y_0, x_1, y_1 – соответственно координаты глаз зрителя первого и последнего ряда на первом отрезке;
 n_1 – число промежутков между рядами.

В соответствии с рис. 18 и принятыми значениями имеем:

$d_1 = 1,5$ м – продольный проход в зрительном зале;

$x_0 = 2 + 3,5 = 5,5$ м;

$x_1 = x_0 + d \cdot n_1 = 10,25$ м;

$y_0 = -0,8$ м;

$y_1 = \frac{10,25}{5,5} \cdot (0,14 \cdot 5 - 0,8) = -0,19$ м.

Просчитаем результат на втором отрезке:

$x_1 = 10,25$ м;

$y_1 = -0,19$ м

$x_2 = 10,25 + 6 \cdot 0,95 + d_1 = 17,45$ м;

$y_2 = \frac{17,45}{10,25} \cdot (0,14 \cdot 6 - 0,19) = 1,1$ м.

Высота подъема зрительских мест последнего ряда соответствует 1,81 м, а высота ступеней подъема каждого ряда на 1 и 2 отрезках составят:

$$r_1 = \frac{y_1 - y_0}{5} = 0,12 \text{ м}; \quad r_2 = 0,2 \text{ м}.$$

Для организации продольного прохода в зрительном зале высоту подступенков принимаем соответственно r_1 и r_2 для каждого из отрезков. Решение аналогичной задачи по кривой наименьшего подъема описано в [7].

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРЬЕРА ЗАЛА С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ

Правильное распределение ранних (первых) отражений от поверхностей зала способно улучшить слышимость и разборчивость звуков. Существует интервал времени между приходящими прямыми и отраженными звуками, когда они воспринимаются без разрыва. Если интервал времени меньше критического, явление отражения звуков воспринимается как реверберация, больше – как эхо. Критический интервал времени в зависимости от характера звуков и дискретности составляет 20–100 мс.

Графический анализ плана и поперечного разреза зрительного зала выполняют с целью исследования времени поступления ранних отражений в зоны расположения зрительских мест при заданных положениях источника звука.

Допустимость применения геометрических отражений зависит от размеров отражающих поверхностей и длины звуковой волны. **Применение геометрических отражений считается допустимым, если наименьшая сторона отражателя – не менее 1,5–2 м.**

Радиус действия прямого звука $R_{пр}$ составляет: для речи 8–9 м, музыки – 10–12 м. На зрительские места в пределах $R_{пр}$ усиление прямого звука с помощью направленных интенсивных отражений не требуется. Начиная с $R_{пр}$ интенсивные первые отражения должны перекрывать всю зону зрительских мест. Если поверхность потолка или стен состоит из отдельных секций, конфигурацию членений следует выполнить так, чтобы отражения от соседних элементов перекрывали друг друга, не оставляя «мертвых зон», лишенных отраженного звука.

После завершения графического анализа чертежей и создания в зале оптимальной структуры ранних отражений не занятые для этой цели поверхности должны быть использованы для формирования диффузного звукового поля путем их эффективного расчленения различной формы звукорассеивающими элементами. Они и создадут необходимые условия для рассеянного, ненаправленного отражения звука. Это достигается расчленением поверхностей балконами, пилястрами, нишами и т.п. неровностями.

Балконы, ложи, скошенные стены повышают диффузность звукового поля на низких частотах, а применяемые в архитектурной практике пилястры – в основном в области средних и высоких частот.

Лучевой эскиз позволяет дать оценку этому явлению. Если расстояние от источника звука q (рис.19) до слушателя N превышает 8 м, необходим, кроме прямого звука, приход в эту точку малозапазды-

вающего первого отражения. Рекомендуется задержка прихода последнего в искомую точку не более чем на 20 мс, что соответствует разности хода (около 7 м) прямого qN и отраженного от поверхности $qK + KN$ звуков. Допускается разница ходов прямого и отраженного звуков ($qK + KN - qN$), равная 10 м (30 мс) [1, 2].

Для оценки времени запаздывания первых отражений от поверхности стен и потолка используется метод мнимых источников (рис.19). Чтобы построить мнимый источник, необходимо опустить перпендикуляр к отражающей поверхности и на его продолжении построить отрезок $qP = q'P$.

Прямые, проведенные из мнимого источника т. q' , будут являться искомыми отраженными лучами от действительного источника т. q . Аналогичным образом поступают в случае криволинейных поверхностей, отступив 0,5 м от края звукоотражающего экрана.

Размеры, форма и очертания поверхностей (потолок, боковые стены, балконы, специальные звукоотражатели) залов и аудиторий должны способствовать равномерному распределению ранних интенсивных отражений по зоне зрительских мест, повышению диффузности звукового поля и исключать возможность возникновения концентрации звуковых отражений (особенно поздних).

Плоская горизонтальная форма потолка является оптимальной. Отражения звука от потолка в случае расположения источника на авансцене (рис. 20) будут попадать на зрительские места удаленной половины зала (так называемые ранние отражения), частично – на вертикальную заднюю стену, время запаздывания которых $\Delta t_4 > 30$ мс. Эти отражения создают отчетливое эхо – повторы речи, музыкальных фраз. Такие поверхности следует выполнять из эффективного звукопоглощающего материала.

При перемещении источника звука вглубь сцены портал препятствует приходу отражений в ближнюю половину зрительских мест. При этом слабый по мощности звук вызовет повышенный шум публики в этой части зала, что повлечет за собой снижение разборчивости звука в удаленной половине помещения.

Распределить отражения передней части потолка в направлении наиболее удаленных мест можно с помощью специального отражателя, укрепленного над эстрадой или авансценой.

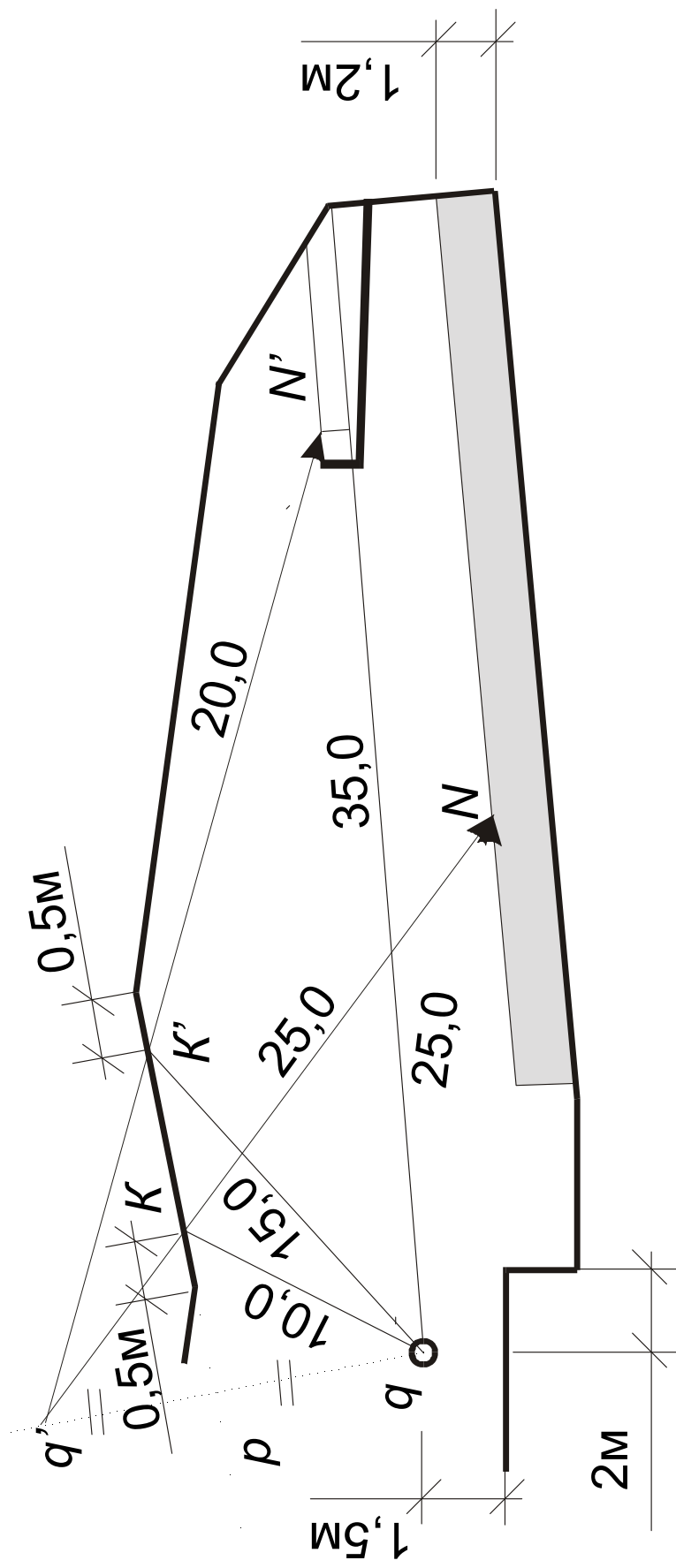


Рис. 19. Построение геометрических отражений методом построения звукового луча из мнимого источника

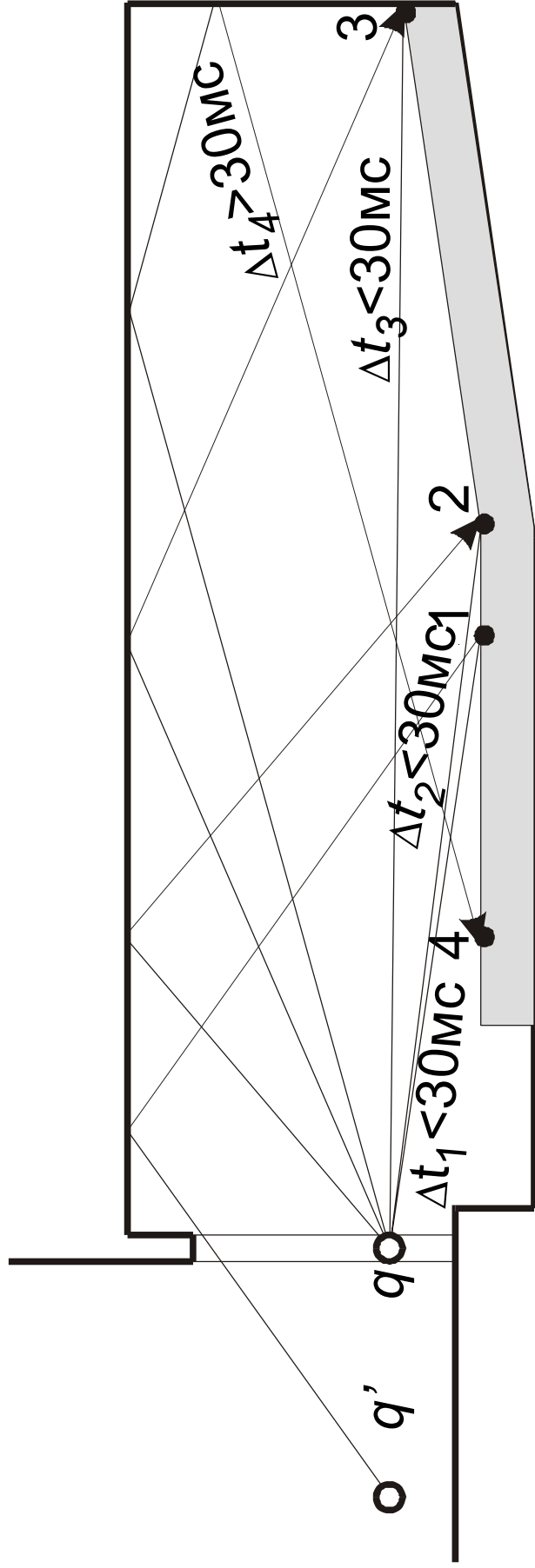


Рис. 20. Отражение от горизонтального потолка

Форма отражателя (рис.21) должна иметь выпуклое очертание с большим радиусом кривизны, что обеспечит одинаково рассеянное отражение независимо от места отражения источника звука на сцене.

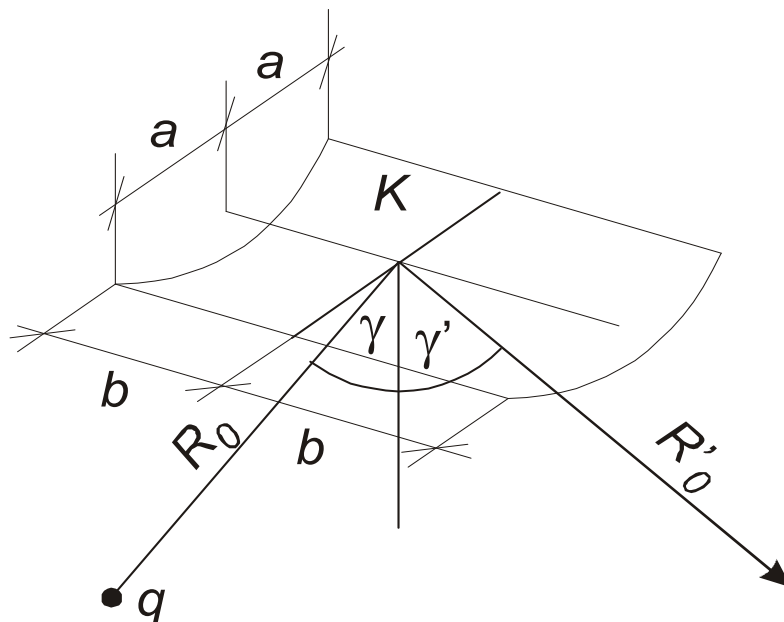


Рис. 21. Построение лучевого эскиза от выпуклого отражателя шириной $2a$ и длиной $2b$

Материалом отражателя может быть железобетон, штукатурка по металлической сетке, дерево или иной конструкционный материал с коэффициентом звукопоглощения не более 0,1 и поверхностной плотностью не менее 20 кг/м^2 . Малая сторона отражателя должна не менее чем в 1,5 раза превышать длину волны по крайней мере на частотах 300 – 400 Гц [1].

На рис.22 отражающая поверхность имеет выпуклую форму. Отражение звуковой волны – в т. К, находящейся на продольной оси зрительного зала. Расстояние от источника звука до т. К – R_0 , от т. К до т. N – R'_0 ; γ_1 и γ'_1 – углы падения и отражения равны между собой.

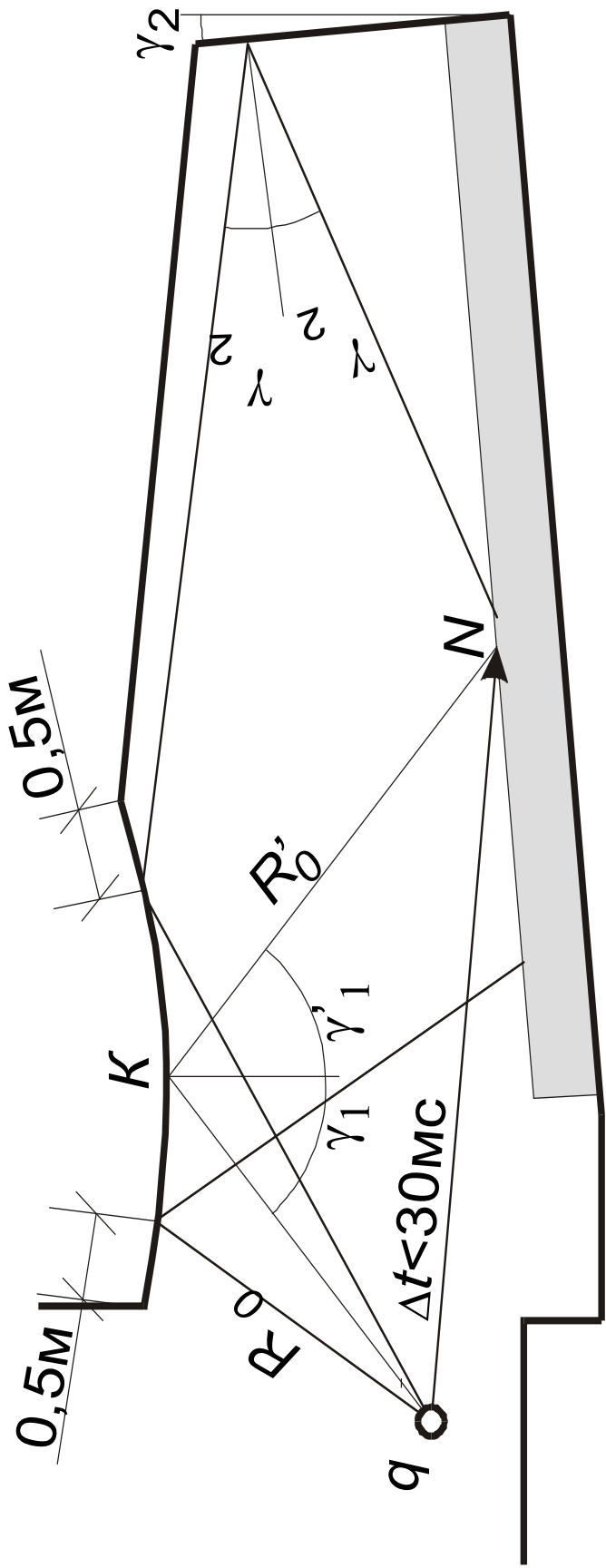


Рис.22. Распределение отражений выпуклой поверхностью потолка и наклонной плоскостью стены

Если ввести безразмерные величины

$$u = a \cdot \cos \gamma_1 \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_0^{\odot}} \right)}; \quad (2)$$

$$w = b \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_0^{\odot}} \right)}, \quad (3)$$

то абсолютное отклонение фактического уровня звукового давления в т. О от уровня, соответствующего строго геометрическому отражению, можно рассчитать по формуле

$$\Delta L = 4,4 \cdot \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{w} \right) \quad (4)$$

Если $L < 5$ дБ, то применение геометрических отражений для оценки отражения звуковых волн в помещении вполне допустимо.

Хорошее распределение звуковых отражений дает правильное расчленение потока секциями (рис. 23, а, б, в). При этом секции в зависимости от формы, размеров, расположения отражателя к источнику звука должны направлять звуковые лучи таким образом на зрительные места, чтобы они перекрывали друг друга, а запаздывания с приходом отражений к слушателю не превышали критического интервала 20-30 мс.

Полезным оказывается использование наклонной поверхности задней части потолка (рис. 23, г). Такой прием позволяет улучшить слышимость на задних рядах зала.

Размещение поверхностей, отделочные материалы которых имеют коэффициент звукопоглощения $\alpha > 0,2$, должно быть сделано в соответствии с их ролью в формировании диффузного звукового поля. От одних участков к слушателям приходят звуковые волны после одного отражения, от других – после двукратного и более. В первом случае волны приходят с небольшим запазданием по сравнению с прямой волной и с уменьшенной амплитудой колебания за счет первого поглощения отражающей поверхностью. В другом – время запаздывания значительно увеличивается с одновременным уменьшением энергии (значительными).

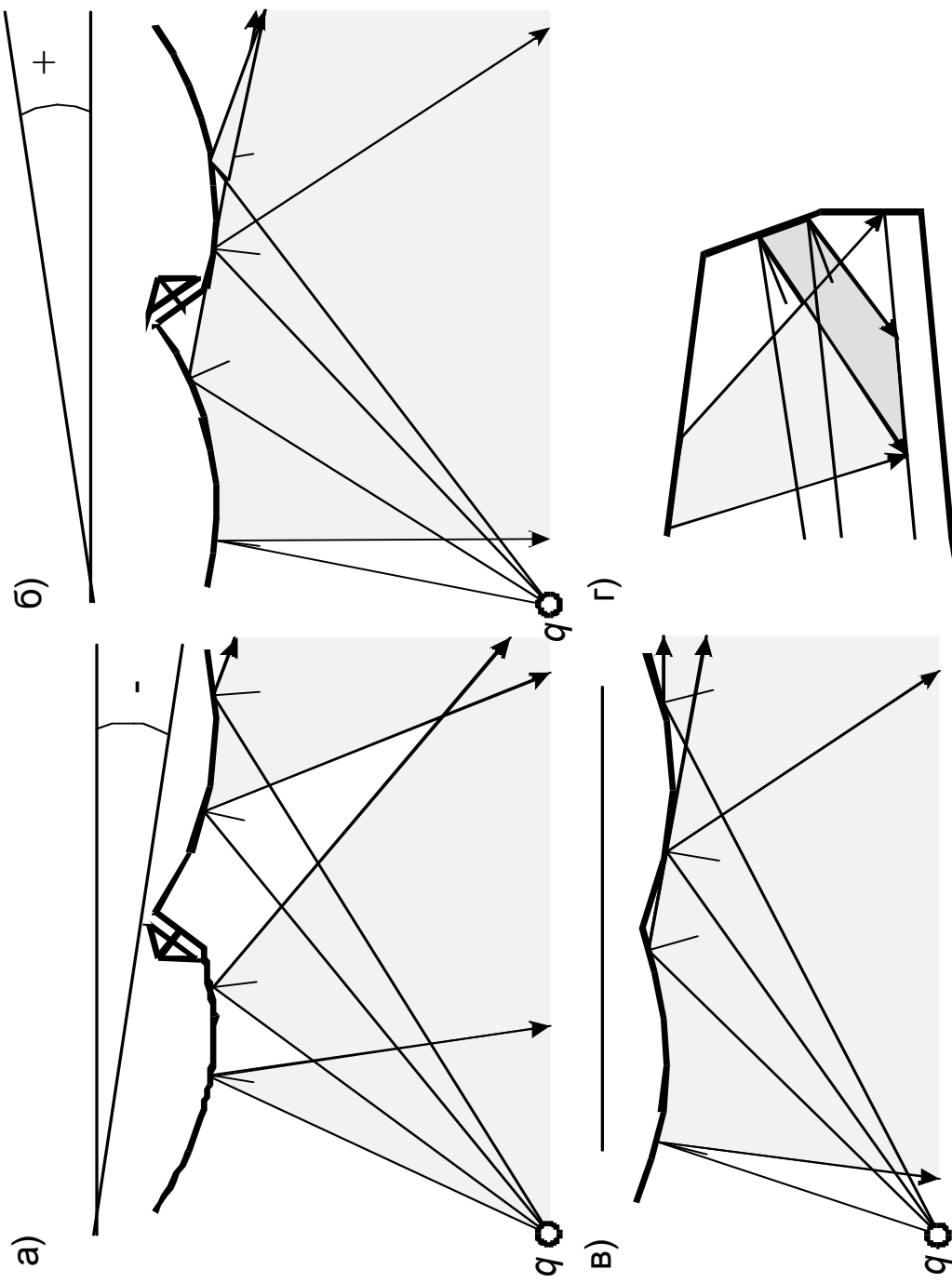


Рис.23. Распределение отражений при расчленении поверхности:

а – потолка, выпуклыми секциями при отрицательных углах наклона; б – то же, при положительных углах; в – то же, при нулевых углах; г– потолка и стены

На рис. 24 (слева) показано построение такого участка на горизонтальном плоском потолке. Из мнимого источника q' проводятся лучи к вершинам участка со слушателями. При этом на пересечении этих лучей с плоскостью потолка выявляются 4 точки: a' , b' , c' , d' – вертикальные проекции четырехугольника $abcd$, являющегося площадкой первых отражений на поверхности потолка при положении источника звука в точке q . Следует отметить, что положение источника – крайняя левая возможная точка. Мысленно переместив ее в противоположное положение относительно центральной продольной оси q_1 , можно представить границы участка первых отражений на потолке.

Аналогично находится участок первых отражений на боковой поверхности стен (рис. 24, справа).

Реверберацией называется процесс медленного “замирания” звука в закрытых помещениях после выключения его источника. Воздушный объем зала представляет собой колебательную систему с большим числом собственных частот. Каждое из собственных колебаний имеет свой коэффициент затухания, зависящий от поглощения и отражения звука внутренними поверхностями, а также от частоты.

Отраженные от поверхности волны суммируются с прямыми, следствием чего является лавинное нарастание интенсивности звука в помещении. Процесс нарастания мог бы продолжаться до бесконечности, не будь частичного поглощения энергии падающих волн теми же поверхностями и вязкое трение воздушной среды.

В результате наступает акустическое равновесие, которое нарушается тотчас же после отключения источника звука. Однако звуковые волны затихают не сразу. Время, в течение которого в помещении сохраняется остаточное звучание, называется временем реверберации.

Время реверберации оказывает большое влияние на качество звучания. Малое время реверберации делает звук сухим и безжизненным, а музыку – невыразительной, требующей от исполнителя повышенной громкости исполнения. При большом времени реверберации звук становится бубнящим, неразборчивым, а музыка гудящей и превращается в дисгармоничную смесь звуков.

Оптимальное время реверберации установлено экспериментальными исследованиями залов различного объема в зависимости от характера звуков (рис. 24).

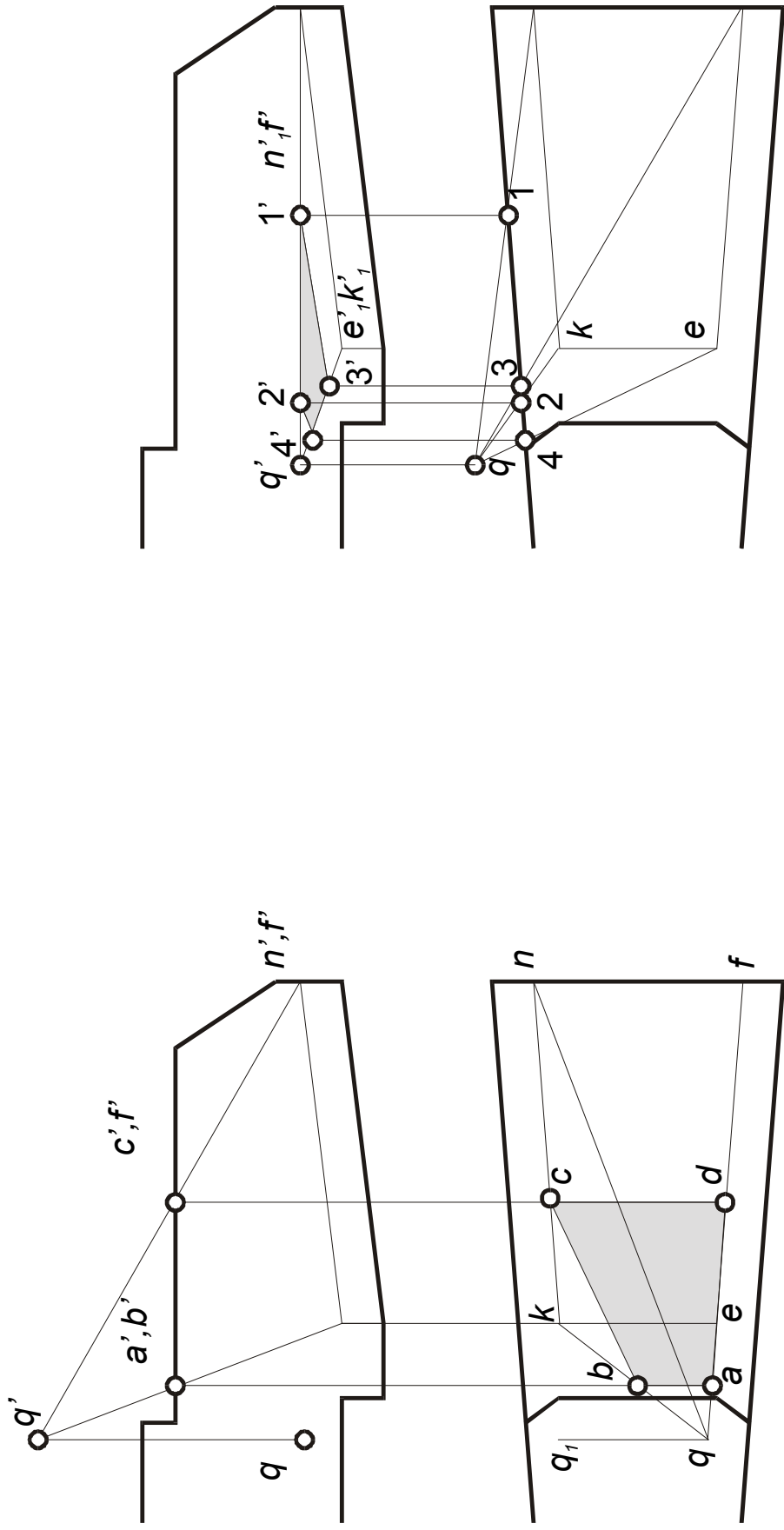


Рис.24. Построение площадок первых отражений на поверхности потолка и стен

Время реверберации рассматривается как многопараметрическая функция, определяемая не только объемом помещения V , площадью ограничивающих поверхностей S_i с соответствующими коэффициентами звукопоглощения α_i , но и начальной плотностью звуковой энергии P_0 . Очевидно, что чем больше значение этой величины, тем больше требуется времени для затухания до фонового уровня звукового давления.

Для того чтобы реверберационный процесс характеризовал только акустические свойства помещения вне зависимости от величины излучаемой источником звуковой энергии, пользуются понятием оптимального времени реверберации [1], которое сравнивается с расчетным.

Для проверки допустимости применения в расчетах методов статистической акустики (метод У.Сэбина) в нормируемом диапазоне частот следует рассчитать так называемую критическую частоту $\phi_{кр}$, Гц, выше которой наблюдается достаточное количество собственных частот (мод) воздушного объема, по формуле

$$\phi_{кр} = 125 \sqrt[3]{180/V}. \quad (5)$$

Если расчет показал, что $\phi_{кр} \leq 125$ Гц, то время реверберации в секундах следует определять в шести октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Гц по следующим выражениям:

– в диапазоне 125–1000 Гц по формуле

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S_{общ} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} = \frac{0,163 \cdot V}{S_{общ} \cdot \phi(\bar{\alpha})}; \quad (6)$$

– в диапазоне частот 2000–4000 Гц по формуле

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{S_{общ} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) + m_e \cdot V} = \frac{0,163 \cdot V}{S_{общ} \cdot \phi(\bar{\alpha}) + m_e \cdot V}, \quad (7)$$

где $S_{общ}$ – сумма площадей всех поверхностей помещения

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

$$\bar{\alpha} = \alpha_1 \frac{S_1}{S_{общ}} + \alpha_2 \frac{S_2}{S_{общ}} + \dots + \alpha_n \frac{S_n}{S_{общ}};$$

m_v – коэффициент затухания звука в воздухе в зависимости от относительной влажности [2].

Для практических целей вычисление времени реверберации свыше 4000 Гц не проводится, так как поглощение в воздухе становится большим, что исключает возможность регулирования времени реверберации за счет изменения общего звукопоглощения ограждающих поверхностей.

Оптимальное значение времени реверберации в области средних частот 500–1000 Гц для залов различного назначения приведены на соответствующей номограмме СНиП 23-03-2003. Допустимое отклонение от приведенных величин проверяется на соответствующих графиках по коридору отклонений в $\pm 10\%$. Кроме того, в октавной полосе 125 Гц допускается превышение времени реверберации, но не более чем на 20 %.

Если $f_{кр} > 125$ Гц, то результат, полученный по вышеуказанной формуле для частоты 125 Гц, следует считать ориентировочным.

Как видно из рис.25, с увеличением объема зрительного зала время реверберации увеличивается. Для корректировки воспроизводимого в помещении звука предлагается следующее [8]:

- в лекционных залах, конференц-залах не изменять время реверберации на всех частотах, кроме частоты 125 Гц (уменьшить на 15 %);
- в залах, предназначенных только для музыкальных программ, время реверберации на частотах 125 Гц и 250 Гц увеличить соответственно на 40 % и 20 %; на частотах 1000 Гц, 2000 Гц и 4000 Гц уменьшить на 10 % по сравнению с частотой 500 Гц;
- в залах многоцелевого назначения на частоте 125 Гц время реверберации увеличить на 20–40 % в зависимости от годового вклада программ с музыкальным исполнением: чем их больше, тем больший процент следует брать.

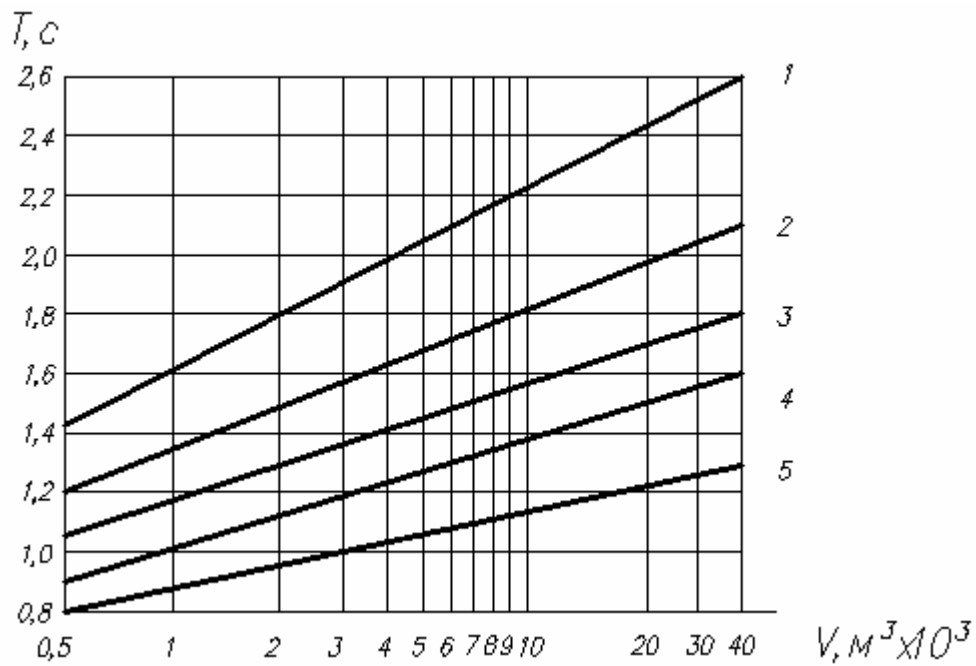


Рис.25. Рекомендуемое время реверберации для зрительных залов различного назначения в зависимости от объема на частотах 500-4000 Гц:
 1 – залы для ораторий и органной музыки; 2 – залы для симфонической музыки; 3 – залы для камерной и оперной музыки;
 4 – залы многофункционального назначения; залы музыкально-драматических театров;
 5 – лекционные залы, залы драматических театров; кинотеатры

3. РАЗРАБОТКА ЦВЕТОВОГО РЕШЕНИЯ ИНТЕРЬЕРА ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА

Вместе с решением задачи проектирования естественной акустики зала обязательным условием для архитектора является правильное оформление интерьера зала.

В курсовой работе предлагается разработать цветовое решение зрительного зала. При подборе цветов нельзя подходить только технически, т.к. с помощью техники художественно оформить помещение невозможно. При цветовом оформлении зрительного зала необходимо учитывать, что каждому цвету свойственна своя эмоциональная функция. Цвета могут создавать впечатление лёгкости, высоты, тяжести, широты, создавать веселые и грустные настроения.

В целом, для учреждений культуры в качестве доминирующего цвета можно рекомендовать светлую гамму желтых цветов - желтовато-зелёный – желтый – желтовато-оранжевый. В комбинации с синим цветом (особенно декоративных тканей) эти цвета производят приятное впечатление. В то время, как большие желтые поверхности оказывают оживляющее, активизирующее воздействие и создают радостно-праздничное настроение, синий цвет призывает к сдержанности. Если желтый цвет сопровождается красным, то помещение производит праздничное и очень привлекательное впечатление.

Сочетание желтого цвета с красным и красного с синим наиболее активизирующее. Но эти сочетания цветов становятся тем менее действенными, чем меньше степень их насыщенности и чем больше они приближаются к серому цвету.

Для освещения целесообразно применять рассеянный свет теплого тона.

Цвета в интерьере театрального зала, будучи нейтральными, способствуют установлению контакта зрителя со сценой.

При цветовом решении театрального зала должна быть создана атмосфера, способствующая наиболее полному восприятию представления интеллектуально и эмоционально. Психическая напряженность у зрителя должна получить своё разрешение в воздействии цветов, примененных в оформлении зала. Этого можно достичь таким сочетанием красок, при котором ослабление тонов сменяется их усилением, т.е. когда цветовое оформление привлекает внимание зрителя к сцене.

Стены и потолки в театральном зале должны быть не просто раскрашенными поверхностями, а сочетанием форм, которое создает подъём настроения. Потолок, сливаясь со стенами и сценой, способствует полной связи и общению зрителя со сценой. Чтобы

цветовым способом решать эти задачи, динамически создать переход тёплых тонов в холодные, приглушение контрастов и т.п., цвета должны быть резкими, а динамичность их сочетаний не должна приводить к ощущению неуверенности в зале.

В зале кинотеатра цвета должны активно охватить зрителя. Цветовое оформление кинозала воспринимается недолго. Когда выключается свет и начинается просмотр фильма, цвета, в которые окрашены стены, должны способствовать переключению внимания на экран. Применяя цветовое освещение, возможно создание чередования красочных эффектов.

Если в театре и кино цветовое оформление должно учитывать разнообразие спектаклей и фильмов, то в концертном зале посетителю предлагается только музыка, которую зритель слушает в освещенном зале. Концертный зал должен быть окрашен в нейтральные тона, т.к. сама музыка богата красками. Но белый цвет обычно утомляет слушателя. Фон для музыки должен быть конкретным. Можно считать, что в концертном зале в оформлении фона, перед которым расположен оркестр, более применима нейтральная «золотая» окраска, чем сплошной белый цвет. Но есть лучший цвет – синий, особенно когда он контрастирует с золотом. Для восприятия музыки это оформление лучше, чем сочетание красного с золотом или белый цвет, вызывающий скуку.

4. ПРИМЕР АКУСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КОНЦЕРТНОГО ЗАЛА ВМЕСТИМОСТЬЮ N=325 МЕСТ

В соответствии с принятой методикой проектирование зала ведется в несколько этапов.

4.1. Определение базовых размеров зала

Оптимальный объем воздуха на одного зрителя принимается $V_T = 8 \text{ м}^3$.

Требуемый объем зала $V = V_T \cdot N = 2600 \text{ м}^3$.

Расчет основных размеров зала производится через модуль “золотого сечения” линейных размеров, который определяется по формуле (1)

$$X = \frac{\sqrt[3]{2600}}{4,94} = 2,78 \text{ м.}$$

Средние размеры зала могут быть назначены в соответствии с пропорцией 3:5:8 (высота 8 м, ширина 14 м, глубина 23 м).

4.2. Задача построения профиля размещения зрительских мест

Задача решается одним из двух предлагаемых вариантов: по отрезкам ломаной линии либо по кривой наименьшего подъема [7].

В первом приближении форму зала (по продольному разрезу) можно принять за правильный параллелепипед (рис. 26), что в дальнейшем дает возможность вносить изменения отдельно для стен, потолка с целью выбора оптимального варианта.

Рекомендации, изложенные в [6], позволяют рассчитывать параметры зрительного зала.

Зал оборудуется сценой типа С-1 (согласно табл. 1 [6]); расчетная точка (р.т.), видимая зрителями как первого, так и последнего рядов, находится в двух метрах от края стены на высоте 1,5 м. Эта точка будет одновременно служить началом координатной плоскости X-Y.

Превышение луча зрения, направленного на расчетную точку наблюдения над уровнем глаз впереди сидящего зрителя следует принять $C = 0,14 \text{ м}$, глубину ряда $d = 0,95 \text{ м}$, расстояние до первого ряда зрительских мест от обреза сцены – 3 м.

Общая высота $H_1 = (y_2 - y_1) + (y_1 - y_0) = y_2 - y_0 = 1,878 \text{ м}$.

Высота подступенков первого ряда:

$$\text{на первом отрезке } r_1 = \frac{-0,596 + 1,3}{9} = 0,078 \text{ м};$$

$$\text{на втором отрезке } r_2 = \frac{1,282 + 0,596}{11} = 0,171 \text{ м}.$$

Форму и размеры ступеней в боковых проходах можно принять равными r_1 и r_2 при $d = 0,95$, что согласуется с [8].

Расчет мест в зрительном зале выполняют согласно [6], при этом предусматривается два эвакуационных прохода по 1,5 м шириной вдоль продольной оси зала. Ширину и глубину кресел назначают равными соответственно 0,65 и 0,5 м.

В целях улучшения акустических качеств зала можно отклонить продольные стены на 4° от параллельной линии [1]; задней торцевой стене придать наклон в сторону зала $\gamma_1 = 26,5^\circ$ (рис. 26).

Таким образом, окончательно принимают: размеры зала у задней стены – 14,7 м; у портала 11,45 м (осредненная ширина – 13,078 м); высоту – 7,36 м; глубину зала – 23 м.

Осредненное количество кресел в ряду принимают

$$m = \frac{11,7 + 7,8}{2 \cdot 0,65} = 15 \text{ мест}.$$

Тогда общее количество кресел в зале $N = 21 \cdot 15 = 315$ мест.

При назначении средних размеров зала объем воздуха на одного зрителя составит

$$V_1 = \frac{23 \cdot 13,078 \cdot 7,36}{325} = 6,81 \text{ м}^3.$$

Назначенные размеры зала удовлетворяют требованиям [1, 2, 3], а разница количества мест устраняется путем устройства дополнительного нулевого ряда из 10 кресел.

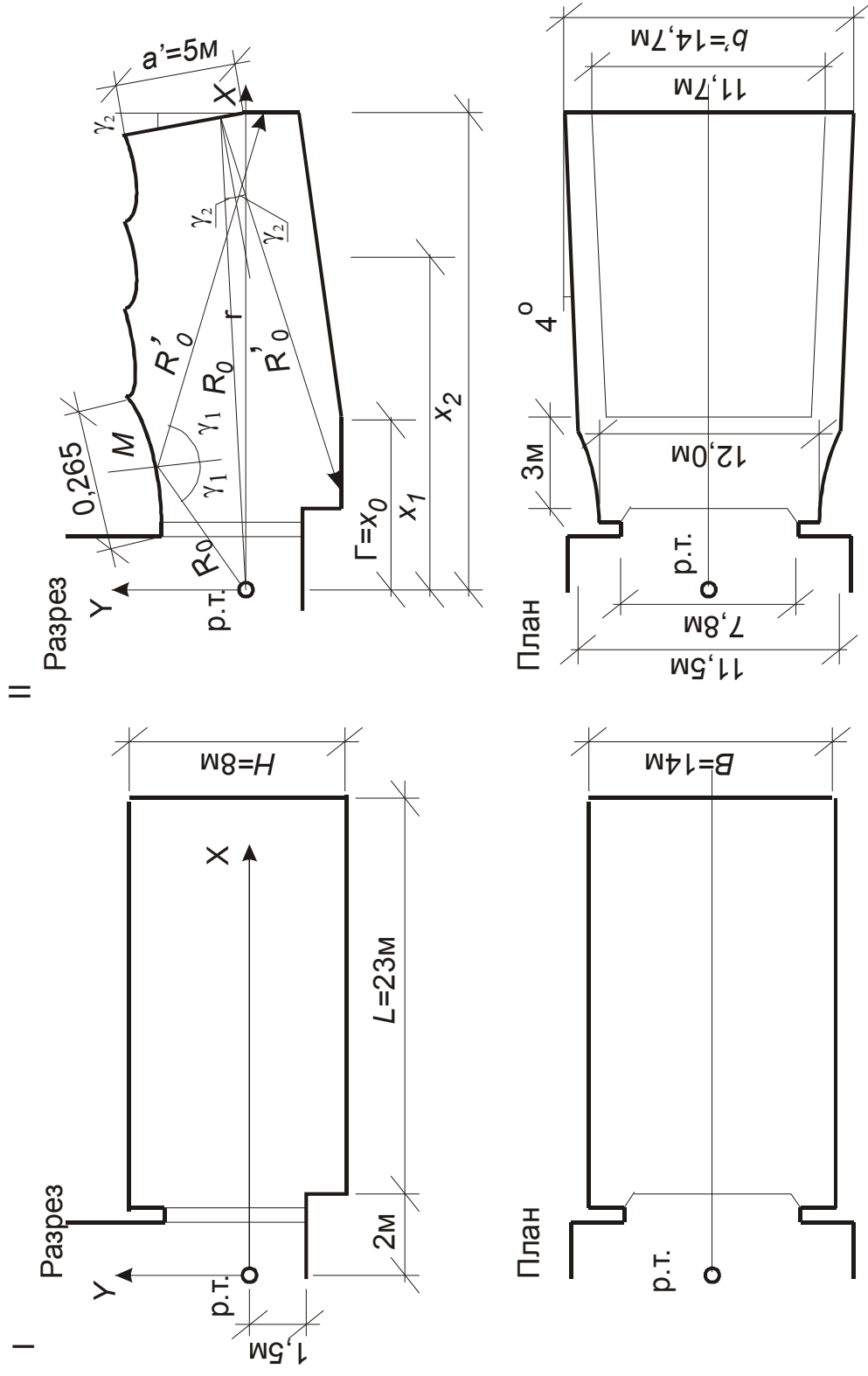


Рис.26. Этапы проектирования зрительного зала:
 I – определение базовых размеров зала по формуле (1);
 II – уточнение размеров и формы поверхностей зала согласно п.4.2

4.3. Проверка допустимости применения геометрических отражений для построения лучевых эскизов

Радиус кривизны покрытия над сценой более чем в два раза превосходит принимаемую для расчета и графического построения длину звуковой волны $\lambda=1$ м, наименьшая его сторона $2a'=5,3$ м значительно превышает λ , что свидетельствует о корректности подхода.

Исходные данные (рис. 23): $R_p = 7$ м; $R = 14,3$ м; $\gamma_1 = 43^\circ$; $a = 2,65$ м; $b' = 5,7$ м; $\lambda = 1$ м.

Расчетные значения u и w определяют по формулам (2) и (3):

$$u = 2,65 \cdot 0,729 \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{1}{7} + \frac{1}{43} \right)} = 1,26;$$

$$w = 12 \cdot \sqrt{\frac{2}{1} \cdot \left(\frac{1}{7} + \frac{1}{43} \right)} = 6,71.$$

Отклонение геометрического отражения в т. М составит по формуле (4)

$$\Delta L = 4,4 \cdot \left(\frac{1}{1,26} + \frac{1}{6,71} \right) = 3,49 \text{ дБ}.$$

Аналогично для наклонного участка потолка:

$$R_0 = 23,1 \text{ м}; R_0' = 5,2 \text{ м}; \gamma_2 = 19,6^\circ; a' = 5,0 \text{ м}; b' = 14,7 \text{ м}.$$

$$u = 5,0 \cdot 0,942 \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{1}{23,1} + \frac{1}{5,2} \right)} = 3,23;$$

$$w = 14,7 \cdot \sqrt{\frac{2}{1} \cdot \left(\frac{1}{23,1} + \frac{1}{5,2} \right)} = 10,08;$$

$$\Delta L = 4,4 \cdot \left(\frac{1}{3,23} + \frac{1}{10,08} \right) = 1,8 \text{ дБ}$$

Таким образом, для отражателя над сценой и для наклонного участка потолка $\Delta\lambda$ не превышает 5 дБ и применение метода геометрических отражений допустимо.

4.4. Подсчет площадей внутренних поверхностей зала

Площадь задней стены – 92,6 м²;
Площадь боковых стен – 364,3 м²;
Площадь пола – 300,5 м²;
Площадь поверхности потолка – 320 м²;
Площадь пола, не занятого креслами, – 81,3 м²;
Площадь открытого проема сцены – 71 м²;
Площадь боковой поверхности кресел – 21 м².

4.5. Расчет времени реверберации

Рекомендуемое время реверберации для концертного зала объемом 2213,5 м³ составляет на частотах 500 – 1000 Гц $T_p = 1,25$ с; на частоте 125 Гц допускается увеличение времени реверберации на 20% [1] и принимается $T_p = 1,5$ с.

Для частот 125, 500, 2000 Гц рассчитываем средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$ и общую эквивалентную площадь звукопоглощения (ЭПЗ) зала по формулам (6) и (7):

- на частоте 125 Гц

$$\varphi(\bar{\alpha}) = 0,227; \bar{\alpha} = 0,203; A_{\text{общ}} = 197,5 \text{ м}^2;$$

- на частоте 500 Гц

$$\varphi(\bar{\alpha}) = 0,297; \bar{\alpha} = 0,267; A_{\text{общ}} = 249,73 \text{ м}^2;$$

- на частоте 2000 Гц

$$\varphi(\bar{\alpha}) = 0,276; \bar{\alpha} = 0,242; A_{\text{общ}} = 234,78 \text{ м}^2;$$

Таким образом, ЭПЗ зала при 70 % заполнения и предполагаемой отделке незначительно (в пределах 10 %) отличается от рекомендуемой, а поэтому может быть принята в качестве базового варианта (табл.5).

Таблица 5

№ п/п	Наименование поверхностей	S, м ²	125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
			α	α×S	α	α×S	α	α×S	α	α×S	α	α×S	α	α×S
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Подвесной потолок (штукатурка)	320,0	0,04	12,8	0,05	16,0	0,06	19,2	0,08	25,6	0,04	12,8	0,06	19,2
2	Стены оштукатурены	366,9	0,01	3,7	0,01	3,7	0,02	7,3	0,02	7,3	0,02	7,3	0,02	7,3
3	Стены «Мелодия»	90,0	0,25	22,5	0,50	45,0	0,60	54,0	0,45	40,5	0,3	27,0	0,30	27,0
4	Пол паркетный	81,3	0,04	3,25	0,04	3,32	0,07	5,69	0,06	4,88	0,06	4,88	0,07	5,69
5	Проем сцены	71,0	0,2	14,2	0,30	21,3	0,30	21,3	0,3	21,3	0,3	21,3	0,30	21,3
6	Добавочное звукопоглощение	972,2	0,09	87,5	0,09	87,5	0,05	48,6	0,05	48,6	0,05	48,6	0,022	21,39
7	Зрители в полумягких креслах, (70%)	228,0	0,25	57,0	0,3	68,4	0,4	91,2	0,45	102,6	0,45	102,6	0,4	91,2
8	Свободные полумягкие кресла	97,0	0,08	7,76	0,1	9,7	0,15	14,55	0,15	14,55	0,2	19,4	0,2	19,4
	A _{общ} (70%)			208,71		254,85		261,84		263,33		243,58		212,48
9	Зрители в полумягких креслах (50%)	163	0,25	47,5	0,3	48,9	0,4	65,2	0,45	73,35	0,45	73,35	0,4	65,2
	A _{общ} (50%)							245,74						
10	Зрители в полумягких креслах (100%)	335	0,25	83,75	0,3	100,5	0,4	134	0,45	150,75	0,45	150,75	0,4	134,0
	A _{общ} (100%)							290,09						

Определение времени реверберации на расчетных частотах:

- на частоте 125 Гц средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha} = \frac{208,71}{972,2} = 0,215$; $\varphi(\bar{\alpha}) = 0,242$; а время реверберации $T = 1,53$ с;

- на частоте 500 Гц $\bar{\alpha} = 0,269$; $\varphi(\bar{\alpha}) = 0,313$; $T = 1,186$ с;

- на частоте 2000 Гц $\bar{\alpha} = 0,251$; $\varphi(\bar{\alpha}) = 0,289$; $T = 1,2$ с.

Для анализа полученных данных строим графики, на которых заштрихованная область – зона допустимых отклонений расчетных значений от оптимального времени реверберации.

Расчетные значения времени реверберации существенно отличаются от рекомендуемых значений. Для исправления необходима корректировка п.3 табл.3 в соотношении звукоотражающих - звукопоглощающих материалов интерьера. В соответствии с этим вносятся изменения величин эквивалентной площади звукопоглощения (пп.7, 9, 11 табл.5).

Т а б л и ц а 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Стены, закрытые ПА/Д гладкими с воздушной прослойкой 100 мм	90,0	0,25	22,5	0,4	36,0	0,2	8,0
	$A_{\text{общ}}$, м ² при 70 % заполнении			208,7		243,8		234,6
	$A_{\text{общ}}$, м ² при 50 % заполнении					227,6		
	$A_{\text{общ}}$, м ² при 100 % заполнении					268,1		

При 70 % заполнения зала время реверберации имеет значения 1,533, 1,284, 1,250 с на частотах 125, 500, 2000 Гц. (рис. 26, пунктирная линия). На частоте 500 Гц (рис. 27, пунктирная линия) время реверберации при 50 и 100 % заполнения зала зрителями составит соответственно 1,39 и 1,15 с.

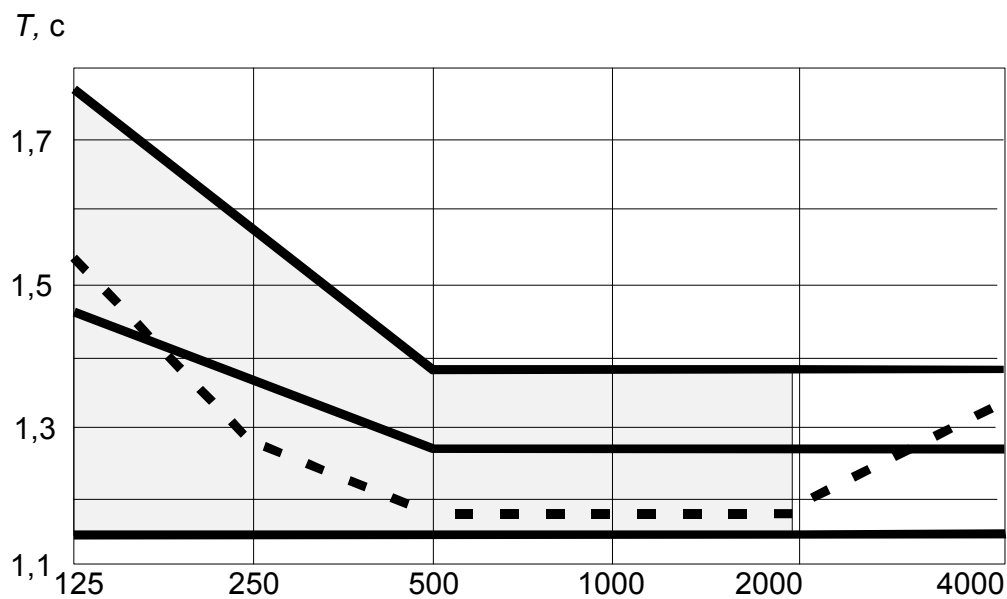


Рис.26. График зависимости времени реверберации от частоты

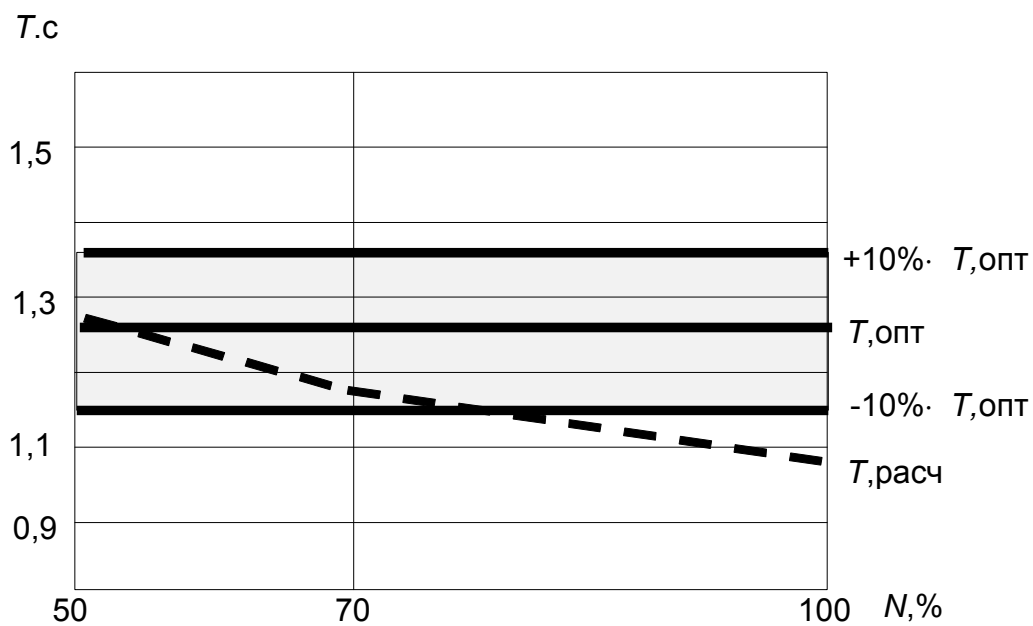


Рис.27. График зависимости времени реверберации от заполнения зала слушателями

Таким образом, результаты сравнения расчетных и нормативных значений времени реверберации указывают на правильный выбор материалов интерьера, формы зала и отдельных конструкций.

4.6. Проверка разборчивости речи

На слышимость речи и музыки большое влияние оказывает начальная часть реверберационного процесса или полезной составляющей звукового воздействия на слушателя. Она включает энергию прямого звука и начальный этап приблизительно в 20 мс прихода первых отражений. Поздняя часть остаточного звучания представляет реверберирующий отклик помещения, который является бесполезным, слабым по мощности, оказывающим маскирующий эффект на прямой звук. Это явление наблюдается на слушательских местах, расположенных в глубине зрительного зала.

Если это соотношение энергии назвать коэффициентом разборчивости речи [8], то расчетная формула для определения звуковой разборчивости может быть представлена в следующем виде:

$$K_p = (E_{\text{п}} + E_{50})/E_c,$$

где $E_{\text{п}}$ – плотность энергии прямого звука $E_{\text{п}} = P/(4\pi \cdot C \cdot r_0^2)$;

E_{50} – плотность отраженной звуковой энергии от поверхностей потолка и стен, поступившие в расчетную точку в первые 20 мс,

$$E_{50} = \frac{P(1 - \alpha_n)}{4\pi C} \left[\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \dots + \frac{1}{r_n^2} \right];$$

E_c – суммарная плотность звуковой энергии в расчетной точке

$$E_c = 4P(1 - \alpha_{\text{ср}})/\alpha_{\text{ср}} \cdot S \cdot C.$$

Тогда значение коэффициента разборчивости речи может быть определено по формуле

$$K_p = \frac{A_{\text{общ}}}{16\pi(1 - \alpha_{\text{ср}})^2} \left[\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \dots + \frac{1}{r_n^2} \right],$$

где $\alpha_{\text{п}}$ – коэффициент звукопоглощения n -поверхности на потолке и стенах;

$\alpha_{\text{ср}}$ – средний коэффициент звукопоглощения помещения;

$A_{\text{общ}}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения

$$A_{\text{общ}} = \alpha_{\text{ср}} S_0;$$

r_0 – расстояние между источником звука и рассматриваемой точкой;

r_1, r_2, r_3, r_n – длина пути пробега первых отражения от источника звука до расчетной точки, пришедшие в первые 20 мс;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_{\text{п}}$ – коэффициенты звукопоглощения поверхностей, от которых пришли первые полезные отражения.

Расчет коэффициента разборчивости речи производится в трех расчетных точках, равноудаленных друг от друга по глубине зрительного зала в направлении центральной продольной оси на частоте 500 Гц при 70 % заполнения его слушателями. Минимальной величиной коэффициента разборчивости речи считается $K_p = 0,20$, что соответствует 80 % звуковой артикуляции.

5. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа по разделу «Архитектурная акустика» дисциплины «Физика» состоит из двух частей:

В первой части предлагается рассмотреть вопрос о форме и размерах зала, размещения в нём технологического оборудования в соответствии с заданной вместимостью и функциональным назначением. Окончательный выбор варианта проектного решения зала должен отвечать требованиям зрительного восприятия и видимости, пожарной безопасности. Подбор материалов ограждающих конструкций должен быть сделан по литературным источникам [1, 3, 5].

Во второй части решается задача проектирования естественной акустики зала с учетом временной структуры ранних отражений и реверберации.

При выполнении работы предлагается использовать графические компьютерные программы для оптимизации формы, назначения размеров элементов ограждающих конструкций и цветового решения интерьера, а также необходимые сведения, полученные при изучении дисциплины «Конструкции гражданских и общественных зданий»

6. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Курсовую работу выполняют в соответствии с индивидуальным заданием.

На первом этапе студенту необходимо проработать несколько вариантов по выбору оптимальной формы зала. Сначала рекомендуется ознакомиться с вопросами проектирования технологических элементов зала: необходимо сделать выбор эстрады или сцены, формы и размеров балконов или лож для зрителей, назначить ограничения по вертикальным и горизонтальным углам обзора с крайних мест первого ряда и балкона. Задавшись условиями видимости (ограниченная, частично ограниченная, беспрепятственная), необходимо построить профиль зала и разместить зрителей по рядам в шахматном порядке, либо в затылок. Окончательный выбор должен отвечать условиям нормальной видимости и безопасной эвакуации.

На втором этапе выполняются исследования допустимости применения теории геометрических отражений в решении задачи обеспечения естественной акустики, анализируется форма потолка и стен по времени запаздывания первых отражений от них как минимум в трёх точках в партере и на балконе. Первая точка выбирается на центральной продольной оси зрительного зала сразу же за 8-метровой зоной от месторасположения условного источника звука; третья – на самом удаленном месте партера или на последнем ряду на балконе. Затем выполняется расчет времени реверберации на основных частотах (125, 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц) при 50, 70 и 100 % заполнения зала с иллюстрацией соответствующими рисунками и графиками.

При использовании естественного источника звука в зале большого объема (более 1000 м³), кроме прямой звуковой энергии, требуется необходимое количество отраженной (от боковых стен, потолка), чтобы обеспечивалось равногромкое восприятие как в середине зала, так и на дальних местах. С другой стороны, в кинозалах, где электроакустическая система лишена ограничения по мощности, необходимо сильное заглушение посредством эффективного звукопоглощения для обеспечения разборчивости речи. Вследствие этого лишается объемности и мелодичности музыка, изменяется тембр звука. Для исключения такого эффекта предлагается заглушать лишь площадки первых отражений на потолке и стенах. Такое комплексное решение позволяет сохранить звуковое поле равномерным по всей площади зала, объемным по восприятию.

Расчетная часть проекта выполняется на листах писчей бумаги, схемы и графики – на миллиметровке и подшиваются к пояснительной

записке. Объем пояснительной записки должен составлять 12-16 листов. Выполнение схем и графиков должно соответствовать требованиям ЕСКД.

6.1 Тематика курсовых работ

1. Зрительный зал драматического театра.
2. Зрительный зал театра оперы и балета.
3. Зрительный зал театра оперетты.
4. Зрительный зал театра эстрады.
5. Зрительный зал театра камерной музыки.
6. Зрительный зал театра симфонической музыки.
7. Зрительный зал театра органной музыки.
8. Зрительный зал театра хорового пения.
9. Зрительный зал театра кукол.
10. Лекционные аудитории учебного заведения.
11. Конференц-зал учреждения.
12. Многоцелевой зал административного учреждения.
13. Спортивный зал многоцелевого назначения.
14. Плавательный бассейн с дорожкой 100 м и трибунами для зрителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архитектурная физика [Текст] /под ред. В.К. Лицкевич. – М.: Архитектура-С, 2007. – 448 с.
2. СНиП 23-03-2003. Защита от шума [Текст]. – М.: Госстрой России, 2004. – С.32.
3. Ковригин, С.Д. Архитектурно-строительная акустика. [Текст] / С.Д. Ковригин, С.И. Крышов – М.: Высшая школа, 1986. – С.237-242.
4. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений [Текст]. – М.: Минстрой России, 1998. – 22 с.
5. Архитектура гражданских и промышленных зданий. Гражданские здания [Текст] / под ред. А.В.Захарова. – М.: Стройиздат, 1993. – С.178–181.
6. ТСН 31-317-99. Культурно-зрелищные сооружения. Нормы проектирования [Текст]. – М.: Госгражданстрой, 2000. – 60 с.
7. Архитектура гражданских и промышленных зданий. Т. II. Основы проектирования [Текст] / под ред. В.М.Предтеченского. – М.: Стройиздат, 1976. – 215 с.
8. Климухин, А.А. Проектирование залов и расчет основных акустических характеристик зрительных залов: времени реверберации и разборчивости речи [Текст] / А.А. Климухин, Е.Г. Киселева. – М.: МАрХИ, 2009. – 56 с.
9. Соловьев, А.К. Физика среды [Текст] / А.К. Соловьев. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 342 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Коэффициенты звукопоглощения строительных материалов и конструкций

№ п/п		Коэффициент звукопоглощения на частотах, Гц							
		125	250	500	1000	2000	4000		
1	2	3	4	5	6	7	8		
1	Кирпичная кладка без расшивки швов	0,15	0,19	0,29	0,28	0,38	0,46		
2	То же, с расшивкой швов	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06		
3	Стены оштукатуренные, окрашенные клеевой краской	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04		
4	То же, окрашенные масляной краской	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02		
5	Штукатурка по металлической сетке с воздушной полостью позади	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06		
6	Бетон с железнением поверхности	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02		
7	Мрамор, гранит и другие каменные породы шлифованные	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02		
8	Травертин	0,02	0,03	0,03	0,03	0,035	0,04		
9	Метлахская плитка	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03		
10	Панель деревянная толщиной 10-15 мм с воздушной прослойкой 50–100 мм позади плит	0,3	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04		

1	2	3	4	5	6	7	8
11	Плиты древесно-стружечные неокрашенные толщиной 20 мм с воздушной прослойкой 50-150 мм	0,1	0,08	0,05	0,05	0,08	0,1
12	Плиты твердые древесно-волокнистые толщиной 4 мм, плотностью 1000 кг/м ³ , с воздушной прослойкой 50–150 мм	0,3	0,16	0,08	0,05	0,04	0,08
13	Штукатурка гипсовая сухая толщиной 10 мм с воздушной прослойкой 50–150 мм	0,3	0,25	0,1	0,08	0,05	0,04
14	Плиты гладкие декоративные с пористым наполнителем без воздушной прослойки	0,05	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1
15	То же, с воздушной прослойкой 50 мм	0,15	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1
16	То же, с воздушной прослойкой 100 мм	0,25	0,4	0,4	0,4	0,4	0,1
17	Плиты ПА/С с набрызгом без воздушной прослойки	0,05	0,15	0,6	0,8	0,85	0,8
18	То же, с воздушной прослойкой 50 мм	0,1	0,3	0,8	0,85	0,8	0,7
19	То же, с воздушной прослойкой 100 мм	0,15	0,5	0,85	0,8	0,8	0,7
20	Перфорированные минипластины, лист 0,6×1,3 м со стеклотканью с отверстиями диаметром 8 мм, шагом 3 мм с воздушным зазором 100 мм	0,33	0,59	0,67	0,63	0,44	0,42
21	То же, с воздушным зазором 150 мм	0,45	0,65	0,67	0,52	0,5	0,47
22	Фанера толщиной 6 мм и слоем минеральной ваты толщиной 100 мм	0,6	0,23	0,14	0,09	0,08	0,02
23	Перекрытия оконные застекленные	0,3	0,2	0,145	0,1	0,06	0,04
24	Светопрозрачные ограждения из стеклоблоков	0,01	0,02	0,02	0,06	0,06	0,06

1	2	3	4	5	6	7	8
25	Пол паркетный	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
26	Пол дощатый по лагам	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,09
27	Линолеум на твердой основе	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
28	Ковер шерстяной толщиной 9 мм по бетону	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
29	То же, на войлочной подкладке толщиной 3 мм	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,37
30	Портьеры хлопчатобумажные на подкладке со складками, поверхность плотность ткани 0,5 кг/м ²	0,05	0,3	0,45	0,7	0,65	0,5
31	Портьеры плюшевые со складками, поверхность плотность ткани 0,65 кг/м ²	0,15	0,35	0,55	0,7	0,7	0,65
32	Фибролит толщиной 50 мм с воздушной прослойкой 50–100 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,6	0,65
33	Вентиляционные решетки	0,3	0,42	0,5	0,5	0,5	0,51
34	Вода в ванне бассейна	0,01	0,01	0,013	0,015	0,02	0,025
35	Проем сцены, оборудованный декорациями	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
36	Киноэкран	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
<i>Покрывтия полов спортивных залов</i>							
37	«Тарафлекс. Спорт М»	0,02	0,03	0,03	0,08	0,06	0,03
38	Искусственная трава фирмы «Полиграсс»	0,07	0,07	0,075	0,1	0,39	0,52
39	«Астротурф»	0,1	0,15	0,3	0,5	0,7	0,5
40	«Пуластик»	0,05	0,12	0,2	0,2	0,15	0,1

Продолжение прил. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
41	«Спортан» пористый	0,05	0,06	0,7	0,1	0,3	0,5
42	«Спортан»	0,04	0,05	0,08	0,18	0,2	0,3
43	«Риздор»	0,02	0,03	0,04	0,18	0,25	0,17
44	«Тарган»	0,02	0,03	0,06	0,1	0,18	0,17
<i>Специальные звукопоглощающие материалы и конструкции</i>							
45	Плиты гипсовые перфорированные с пористым заполнителем размером 810×810×26 мм - без воздушной прослойки - с воздушной прослойкой, мм 50 100 200	0,05	0,15	0,5	0,65	0,65	0,7
46	Плиты «Силакпор» - без воздушной прослойки - с воздушной прослойкой 100 мм	0,2 0,5	0,5 0,7	0,65 0,6	0,6 0,55	0,6 0,55	0,6 0,6
47	Минские плиты А-1 - без воздушной прослойки - с воздушной прослойкой 200 мм	0,1 0,4	0,3 0,65	0,6 0,65	0,7 0,7	0,8 0,75	0,8 0,75
48	Плиты «Москва» - без воздушной прослойки - с воздушной прослойкой 100 мм	0,1 0,2	0,25 0,6	0,8 0,6	0,6 0,5	0,5 0,35	0,35 0,3

Окончание прил. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
49	Плиты «Мелодия» - без воздушной прослойки - с воздушной прослойкой 100 мм	0,15 0,25	0,25 0,5	0,8 0,6	0,4 0,45	0,2 0,3	0,2 0,3
50	Слой пористого звукопоглотителя толщиной не менее 100 мм, покрытый стеклотканью или мешковиной и деревянными рейками шириной 20–25 мм, толщиной 10–12 мм и расстоянием между ними 15–20 мм						
51	То же, вместо реек гипсовые плиты размером 400×400×10 и 500×500×10 мм с отверстиями диаметром 10 мм и шагом 24 мм	0,4	0,7	0,8	0,8	0,75	0,65
		0,4	0,7	0,75	0,6	0,45	0,3

Приложение 2

Значения функции $-\ln(1 - \alpha_{\text{ср}})$ в зависимости от величины
среднего коэффициента звукопоглощения $\alpha_{\text{ср}}$

$\alpha_{\text{ср}}$	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	0,60	0,62	0,64	0,65	0,67
0,5	0,69	0,71	0,73	0,76	0,78	0,80	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

Приложение 3

Образец задания

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА

Кафедра городского строительства и архитектуры

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по архитектурной физике

на тему: «Проектирование зрительного зала драматического театра
вместимостью на 1250 зрителей»

выдано студенту(ке) группы Арх - _____

(фамилия И.О.)

Начало проектирование _____

Окончание проектирование _____

Руководитель проекта _____

Дата выдачи _____

Приложение 4

Образец заполнения титульного листа

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА

Кафедра городского строительства и архитектуры

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовой работе по архитектурной физике

на тему: «Проектирование зрительного зала драматического театра
емкостью на 1250 зрителей»

Выполнил студент группы Арх-41 Сидоров А.А.

Руководитель к.т.н., доцент Разживин В.М.

Оценка _____

Дата защиты _____

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА О СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТЕАТРАЛЬНЫХ ЗАЛОВ.....	4
1. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНОМУ РЕШЕНИЮ ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА.....	19
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРЬЕРА ЗАЛА С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ	36
3. РАЗРАБОТКА ЦВЕТОВОГО РЕШЕНИЯ ИНТЕРЬЕРА ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА.....	49
4. ПРИМЕР АКУСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КОНЦЕРТНОГО ЗАЛА ВМЕСТИМОСТЬЮ N=325 МЕСТ	51
4.1. Определение базовых размеров зала.....	51
4.2. Задача построения профиля размещения зрительских мест.....	51
4.3. Проверка допустимости применения геометрических отражений для построения лучевых эскизов.....	54
4.4. Подсчет площадей внутренних поверхностей зала.....	55
4.5. Расчет времени реверберации.....	55
4.6. Проверка разборчивости речи	59
5. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	61
6. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ	62
6.1 Тематика курсовых работ	63
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	64
ПРИЛОЖЕНИЯ	65
П р и л о ж е н и е 1 Коэффициенты звукопоглощения строительных материалов и конструкций	66
П р и л о ж е н и е 2 Значения функции $-\ln(1 - \alpha_{\text{ср}})$ в зависимости от величины среднего коэффициента звукопоглощения $\alpha_{\text{ср}}$	71
П р и л о ж е н и е 3 Образец задания	72
П р и л о ж е н и е 4 Образец заполнения титульного листа.....	73

Учебное издание

Разживин Владимир Михайлович,
Викторова Ольга Леонидовна
Петрянина Любовь Николаевна

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЛОВ
С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ**
Учебное пособие
к курсовому проектированию

Редактор В.С. Кулакова
Верстка Н.В. Кучина

Подписано в печать 11.01.2013. Формат 60x84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл.печ.л. 4,36. Уч.-изд.л. 4,69. Тираж 80 экз.
Заказ № 9.

Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28



