

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ЕСТЕСТВЕННАЯ АКУСТИКА ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ

Методические указания
по курсовому проектированию

Под общей редакцией доктора технических наук,
профессора Ю.П. Скачкова

Пенза 2013

УДК534.84:721.053(075.8)

ББК 22.32:38.71 я73

Е86

*Методические указания подготовлены в рамках проекта
«ПГУАС – региональный центр повышения качества подготовки
высококвалифицированных кадров для строительной отрасли»
(конкурс Министерства образования и науки Российской Федерации –
«Кадры для регионов»)*

Рекомендовано Редсоветом университета

Рецензент – кандидат технических наук, доцент
А.К. Гаврилов

Е86

Естественная акустика зрительных залов: методические указания по курсовому проектированию / В.М. Разживин, О.Л. Викторова, Л.Н. Петрянина, С.А. Холькин; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 47 с.

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

Методические указания направлены на ознакомление с основными законами естественно-научных дисциплин, принципами проектирования зданий, овладение методами проведения инженерных изысканий с использованием стандартных прикладных расчетных и графических программных пакетов.

Методические указания подготовлены на кафедре «Городское строительство и архитектура» и базовой кафедре ПГУАС при ООО «Гражданпроект» и предназначены для выполнения акустического расчета зрительных залов различного назначения. Данный расчет используется при выполнении курсового проекта по дисциплине «Архитектура гражданских зданий» студентами, обучающимися по направлениям «Строительство» (бакалавриат) и «Архитектура» (бакалавриат).

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2013

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

ПРЕДИСЛОВИЕ

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. К этому следует добавить, что 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 которого особое положение заняло дерево, отличающееся прекрасными акустическими свойствами.

Наконец, несмотря на грандиозность сооружений, масштабы строительства были ограничены и 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 Большой театр в Москве, акустика которого была доведена до высокого качества только после реконструкции 1853 года известным архитектором театральных зданий А. Кавосом.

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

Методические указания посвящены проектированию естественной акустики зрительного зала и ориентировано на углубление знаний студентов специальности «Архитектура» в изучении дисциплины «Архитектурная физика».

ВВЕДЕНИЕ

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, а по его образцу позже и в Риме. Античный театр состоял из трёх главных частей:

- 1) зрительного пространства с сидениями, расположенными полукругом и concentрическими рядами и ярусами;
- 2) оркестра, места выступления и плясок хора;
- 3) сцены, приподнятой задней части оркестры (помоста), на которой 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, юноша или человек почтенного возраста) надевали маски. В средние века духовные театральные представления первоначально давались в церквях, затем появились странствующие труппы актёров и фокусников, игравшие на ярмарках во временных постройках. Постоянные театры в Западной Европе возникли в период с XV по XVI век. К началу XIX века 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 обставляется рядом декораций – это кулисы. С 1896 года вводится 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. Но этот театр был уже под крышей.

В конце XVIII века в Италии создается тип здания музыкального театра, который распространяется 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 рассеивающих 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.

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

Кроме того в отделке залов использовалось большое количество бархата, что создало значительное звукопоглощение и как следствие – короткое время реверберации. По отзывам специалистов, залы Большого театра в Москве и Королевской оперы в Лондоне суховаты с точки зрения звучания музыки и хороши для вокала.

На рубеже XX столетия в строительстве стали использоваться железобетонные конструкции, позволяющие перекрывать большие про-

леты. Появляется новый тип безъярусного театра, характерной чертой которого становится устройство балконов в задней части зала.

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 театрального помещения.

Концертный зал Плейели в Париже имеет объём 22000 м³, вместимость 3000 чел. и время реверберации заполненного слушателями зрительного зала $T_{500} = 1,5$ с. Форма плана секторная, зал имеет наклонные боковые стены. Потолку придается 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 мешает 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 чел., время реверберации при полном заполнении $T_{500} = 1,6$ с.

Схожее архитектурное решение имеет зал государственной филармонии в Санкт-Петербурге. При объёме зрительного зала 16380 м³ и вместимости 1400 чел. 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.

Т а б л и ц а 2

Наименование театра	Объём, м ³	Объём на одного человека, м ³	Вместимость, чел.	Время реверберации T_{500} , с
Вагнеровский театр, Байрет	113000	8,4	1345	2,2
Зал частной оперы, Чикаго	24000	6,7	3600	1,9
Концертный зал в Плейели, 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
Зал государственной филармонии, Санкт-Петербург	16380	11,7	1400	1,8
Концертный зал им. Чайковского, Москва	1800-	10	1700	2,2
Большой зал консерватории, Москва	17000	7,9	2150	2,2
Бетховен-Халле, Бонн	16000	11	1420	1,8
Большой зал Лидер-Халле, Штудгарт	16000	8	2000	1,9
Средний зал Лидер-Халле, Штудгарт	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, проектировщиками преследовалась единственная цель – выдержать время реверберации в пределах рекомендуемых значений в зависимости от объема помещения соответствующего назначения [1, 2, 3, 6].

Однако удовлетворительная акустика, ограничения прослушивания музыкальных программ (орган, симфонический оркестр, вокал) имеют причину в недостаточной проработке архитектуры помещения. Время реверберации в концертных залах больше, чем для любых иных залов. Однако время реверберации не всегда полностью определяет акустические свойства залов. Например, в малом зале Московской

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 преимущественно круговым 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 особенности 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 в 3-4 м, что обеспечивает рассеивание звука вплоть до частот 100 Гц. В связи с этим, студентам рекомендуется рассмотреть обобщенный опыт проектирования театральных залов за последние 10–15 лет в России и за рубежом [1, 2, 3, 6].

1. АКУСТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЛАМ

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 конце 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.

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 драмтеатров, учебных аудиториях и конференц-залах4–5;
- в залах музыкально-драматических театров(оперетта)5–7;
- в залах театров оперы и балета.....6–8;
- в концертных залах камерной музыки6–8;
- 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 0–32;
- 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

том, что 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, м³.

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: соотношения длины и ширины, ширины и высоты помещения должны быть не более 2 единиц и не менее 1, длина при этом 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 4-5 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. 1). 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.

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 от падения предметов с высоты. С внутренней стороны барьеров балконов и лож целесообразно предусматривать углубления для ног зрителей, сидящих в первом ряду.

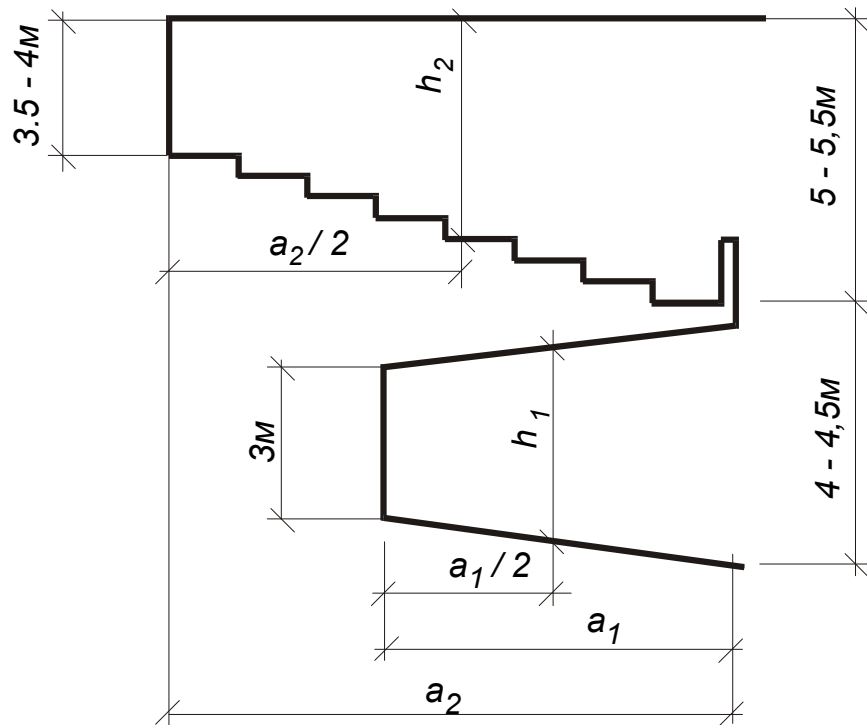


Рис. 1. Размещение балкона в зрительном зале

Студент самостоятельно решает вопрос о выборе планировочного решения зрительного зала и его профиля, при необходимости используя известные [1, 2, 3, 5] аналитические расчеты, если они не противоречат возможностям конструктивного решения. Архитекторы должны иметь достаточно выдумки и фантазии, чтобы уже на начальном этапе проекта установить надлежащие объем и основные очертания зала.

Форма и размеры зрительного зала должны способствовать улучшению слышимости музыки и речи. Нежелательно проектировать помещения круглой, овальной, подковообразной формы в плане (рис. 2), способствующей концентрации звука в точке F , если источник звука (ИЗ) расположен на сцене.

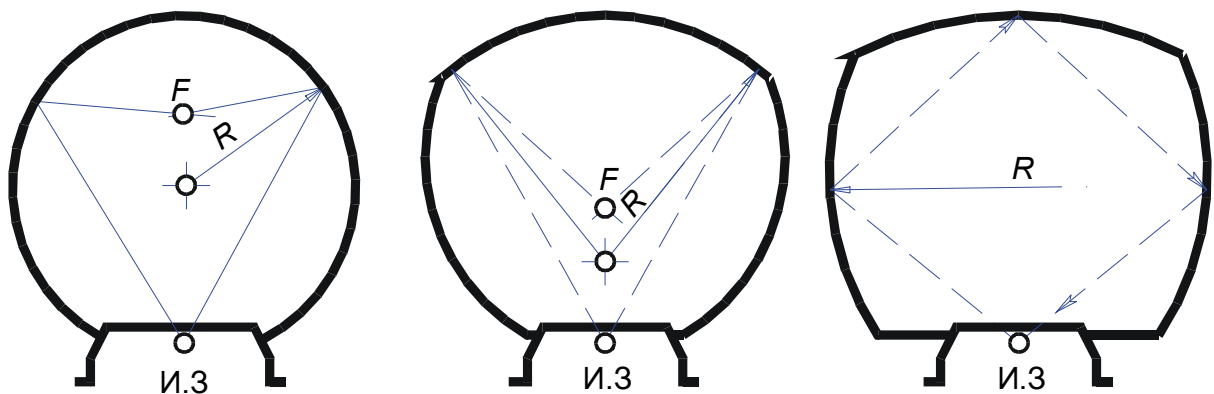


Рис. 2. Отражение звука ограждающими поверхностями разной формы

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 его 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 $2,5-4^\circ$) 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. 3). Если их очертание подвергнуть дальнейшему членению или придать им выпуклую форму, то будет достигнуто рассеивание в широком диапазоне частот.

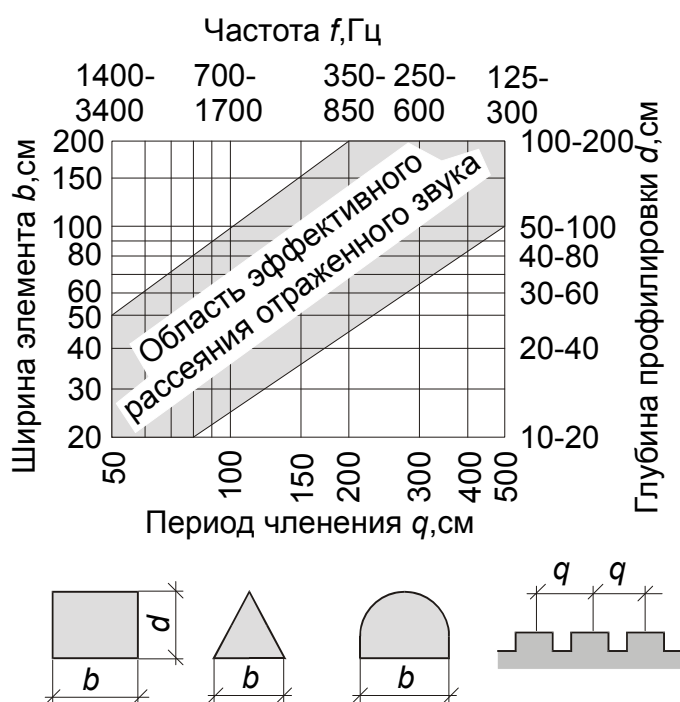


Рис. 3. Размеры периодических членений, обеспечивающих рассеивание звука в частотном диапазоне 125-3400 Гц

Размещение 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 увязано как с вопросами благоприятного слухового восприятия, так и соответствующих условий (беспрепятственных, частично ограниченных, ограниченных) видимости, заполнением зрительного зала слушателями и их безопасной эвакуации из него в обычных или аварийных условиях [4].

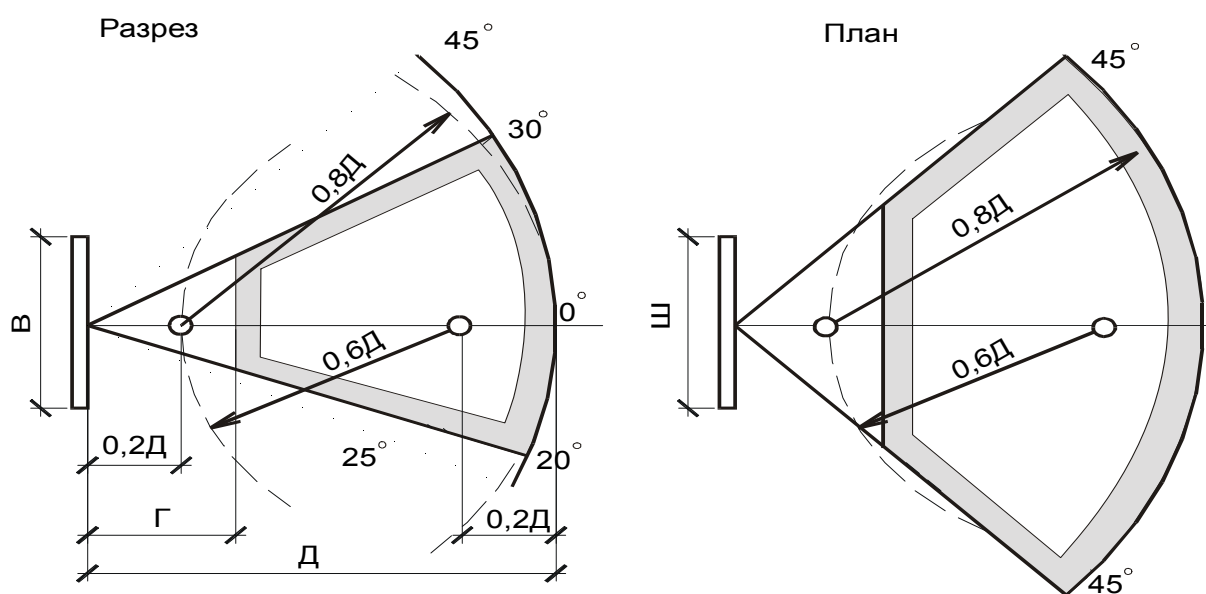


Рис. 4. Зона расположения зрителей перед киноэкраном:

В – высота рабочего поля киноэкрана;

Ш – ширина рабочего поля киноэкрана;

Г – расстояние от киноэкрана до спинки кресел первого ряда зрительских мест; Д – глубина зрительного зала

Расстояние между передней границей эстрады, сцены или барьера оркестровой ямы и спинками кресел 1-го 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 следует предусматривать не более 1 м, а в зрительских залах вместимостью до 500 мест – не более 0,8 м. 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.

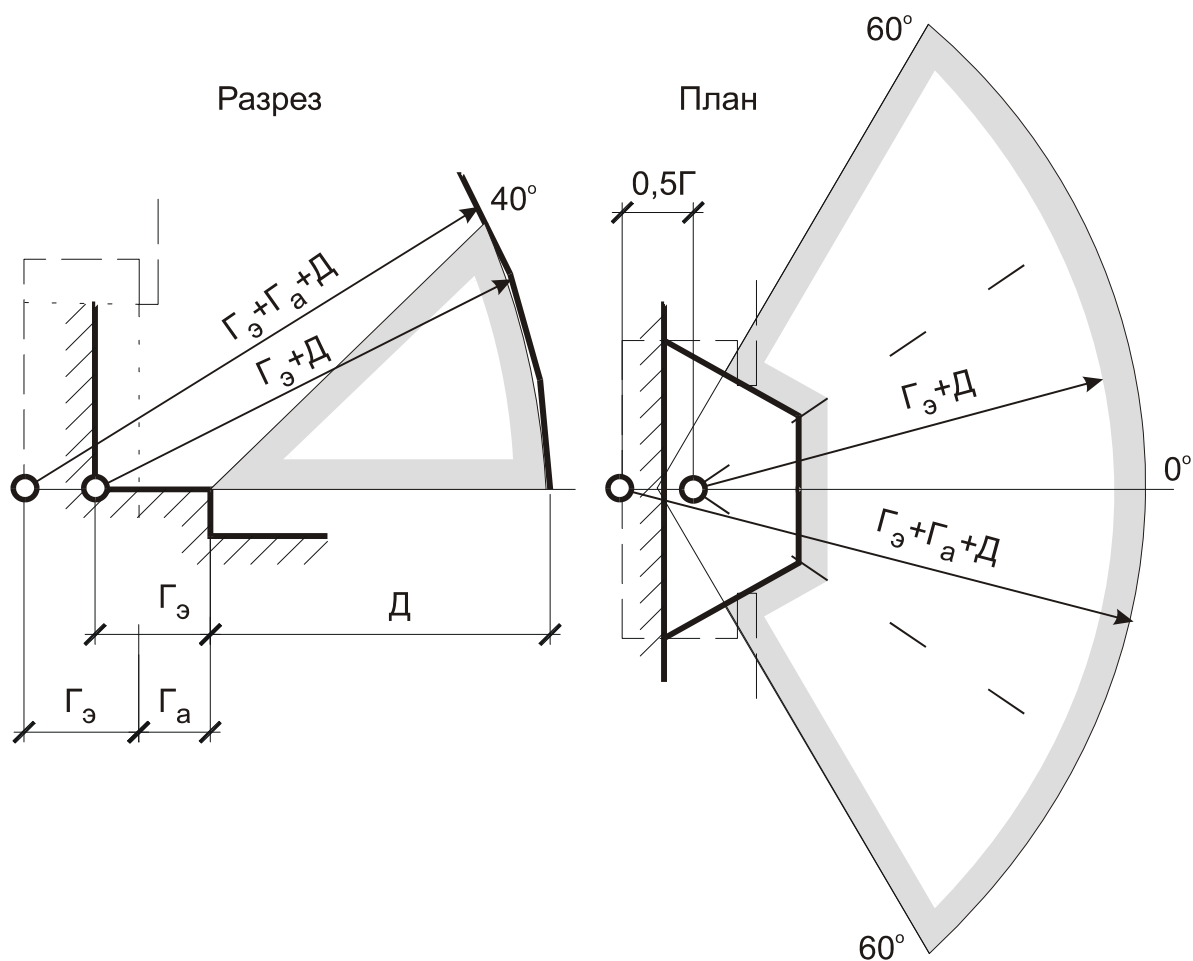


Рис.5. Зона размещения зрителей перед эстрадой:
 $\Gamma_{\text{а}}$ – глубина авансцены; $\Gamma_{\text{э}}$ – глубина эстрады

Зрительные залы рекомендуется 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 или полумягкие кресла. 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 возможно устанавливать стулья или скамьи со спинками. При перепаде уровней пола соседних рядов более 0,7 м рекомендуется устанавливать между рядами ограждение, предохраняющее зрителей от падения при проходе их 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).

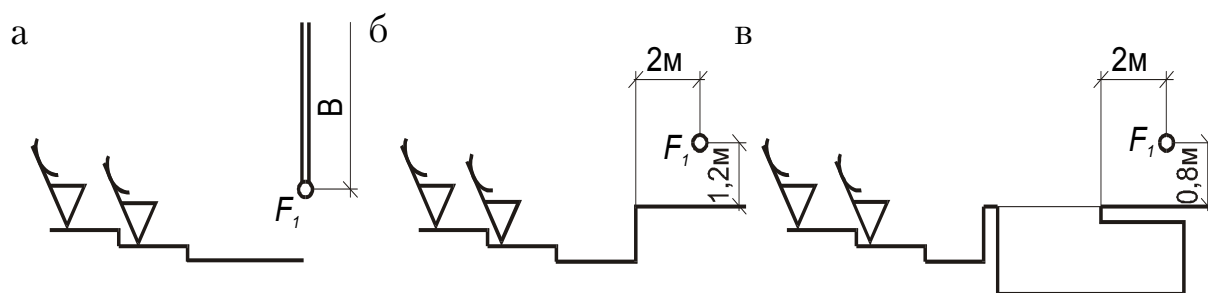


Рис. 6. Положение расчетных точек наблюдения:
 а – кинотеатр; б – эстрада; в – театральная сцена;
 В – высота рабочего поля киноэкрана

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

Таблица 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.

Таблица 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

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. Если соединить прямой линией объект различения, находящийся в расчетной (например, на планшете сцены) точке видимого поля, с глазом зрителя, сидящего на удаленном ряду в глубине зрительного зала, то головы всех людей, находящиеся перед данным зрителем, должны быть расположены ниже этой линии.

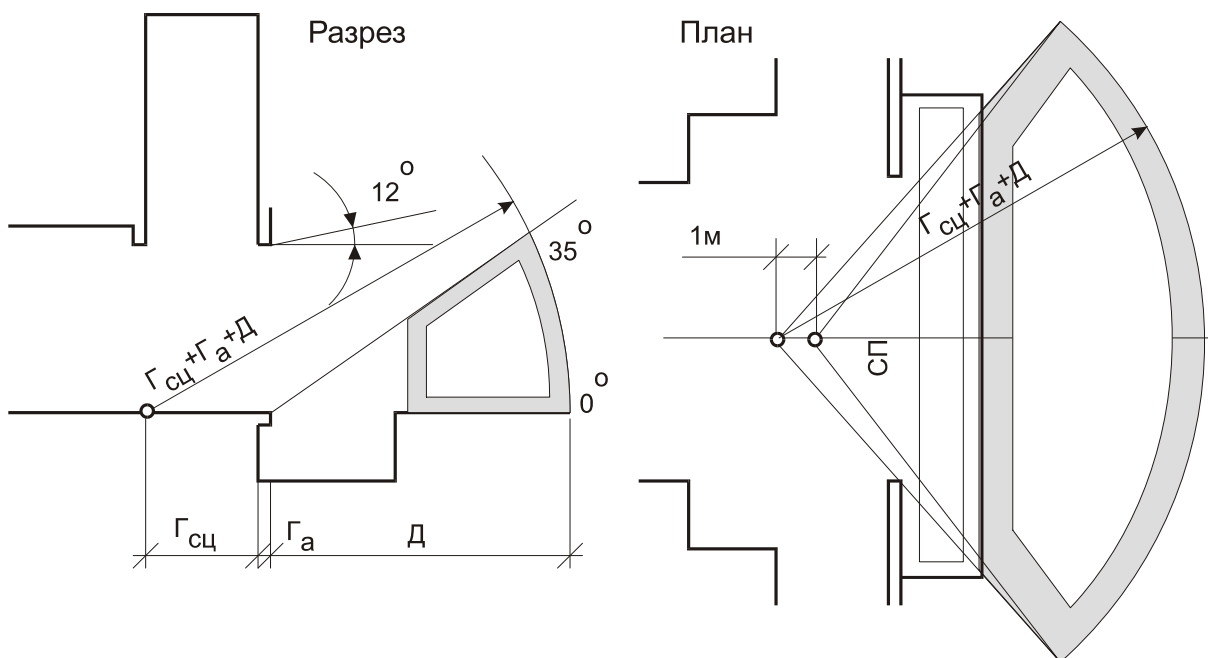


Рис. 7. Зона расположения зрителей перед сценой:

Γ_a – глубина авансцены;
 $\Gamma_{сц}$ – глубина сцены;
СП – строительный портал

Построение профиля по отрезкам ломаной линии следует определять с обеспечением 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.

Количество рядов на первом ближайшем к сцене или 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 предыдущим. Однако допускается равное число рядов на каждом отрезке в целях упрощения расчетов.

Для удобства расчетов вводится система координат $X-Y$, начало которой располагается в расчетной точке F_1 . На рис. 8 приводится пример построения профиля по кривой наименьшего подъема методом вычисления высотных отметок Y_i через координаты зрителя, сидящего на первом ряду каждого из назначенных для расчета участков.

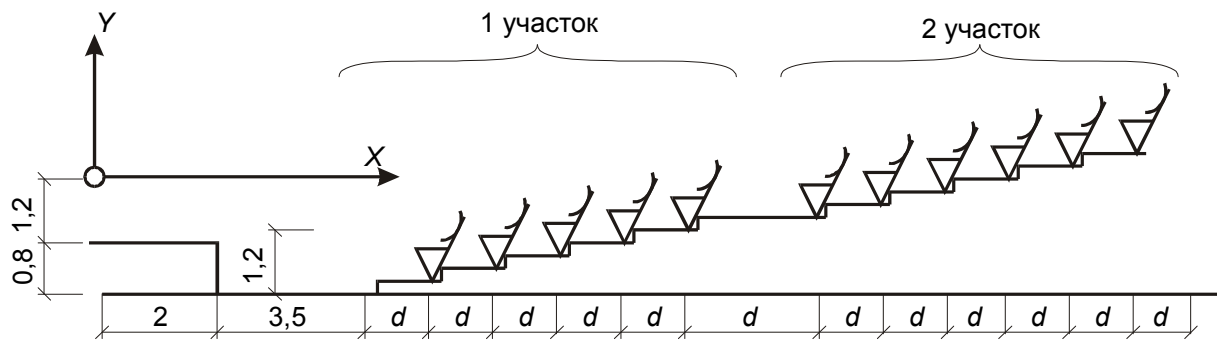


Рис. 8. Построение профиля зрительских мест методом отрезков

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. 8 и принятыми значениями имеем:

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

$$x_0 = 2 + 3,5 = 5,5 \text{ м};$$

$$x_1 = x_0 + d \cdot n_1 = 10,25 \text{ м};$$

$$y_0 = -0,8 \text{ м};$$

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

Просчитаем результат на втором отрезке:

$$x_1 = 10,25 \text{ м};$$

$$y_1 = -0,19 \text{ м}$$

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

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

Высота подъема зрительских мест последнего ряда соответствует

$$H = y_2 - y_0 = 1,81 \text{ м},$$

а высота ступеней подъема каждого ряда на 1 и 2 отрезках составит:

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

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 [5].

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 для создания 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. 9) до слушателя N превышает 8 м, необходим, кроме прямого звука, приход в эту точку малозапаздывающего первого отражения. Рекомендуется задержка прихода по-

следнего в искомую точку не более, чем на 20 мс, что соответствует разности хода (около 7 м) прямого qN и отраженного от поверхности $q \cdot K + K \cdot N$ звуков. Допускается разница ходов прямого и отраженного звуков ($q \cdot K + KN - q \cdot N$) равная 10 м (30 мс) [1].

Для оценки времени запаздывания первых отражений от поверхности стен и потолка используется метод мнимых источников (рис. 9). Чтобы построить мнимый источник, необходимо опустить перпендикуляр к отражающей поверхности и на его продолжении построить отрезок $qP = q'P$.

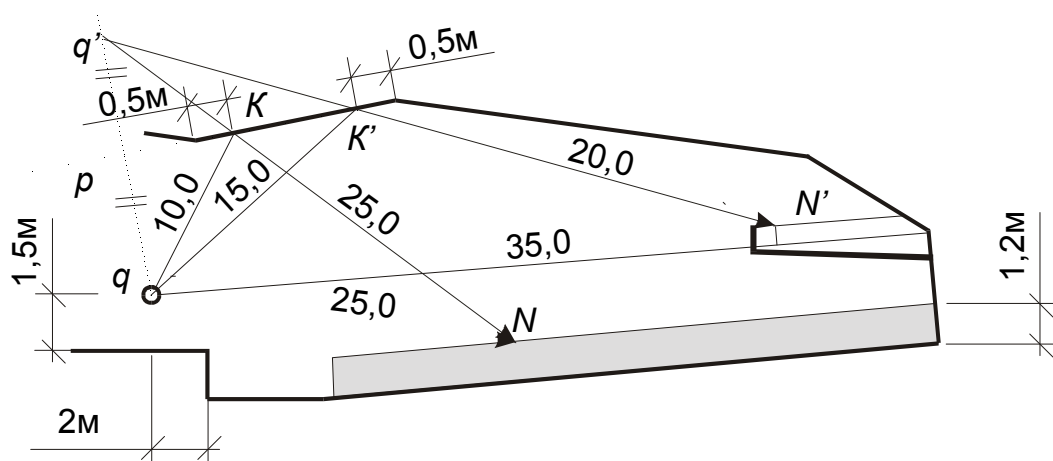


Рис. 9. Построение геометрических отражений методом построения звукового луча из мнимого источника

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. 10) 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.

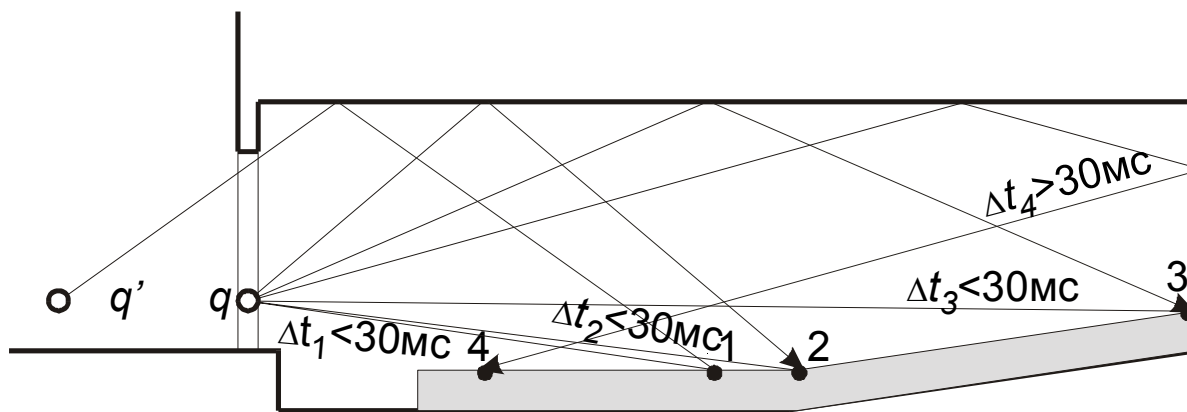


Рис. 10. Отражение от горизонтального потолка

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. Форма отражателя (рис. 11) должна иметь выпуклое очертание с большим радиусом кривизны, что обеспечит одинаково рассеянное отражение независимо от места отражения источника звука на сцене.

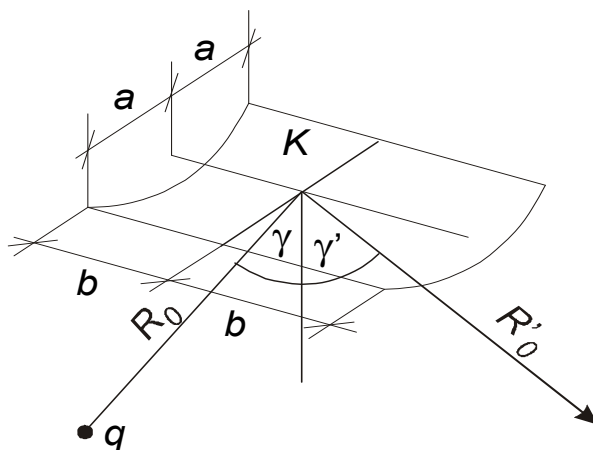


Рис. 11. Построение лучевого эскиза от выпуклого отражателя шириной $2a$ и длиной $2b$

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

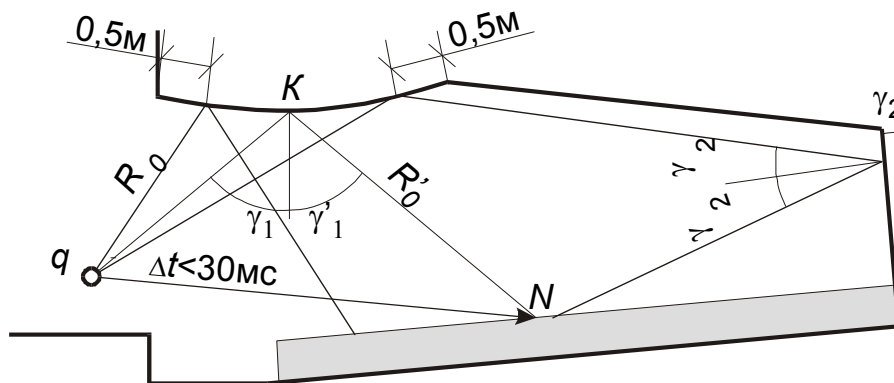


Рис. 12. Распределение отражений выпуклой поверхностью потолка и наклонной плоскостью стены

Если ввести безразмерные величины

$$u = a \cdot \cos \gamma_1 \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R'_0} \right)}; \quad (2)$$

$$w = b \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R'_0} \right)}, \quad (3)$$

то абсолютное отклонение фактического уровня звукового давления в т. O от уровня, соответствующего строго геометрическому отражению, можно рассчитать по формуле (4), приведенной ниже.

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

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

Хорошее распределение звуковых отражений дает правильное расчленение потока секциями (рис. 13, а, б, в). При этом секции в зависимости от формы, размеров, расположения отражателя по отношению 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. 13, г). Такой прием позволяет улучшить слышимость на задних рядах зала.

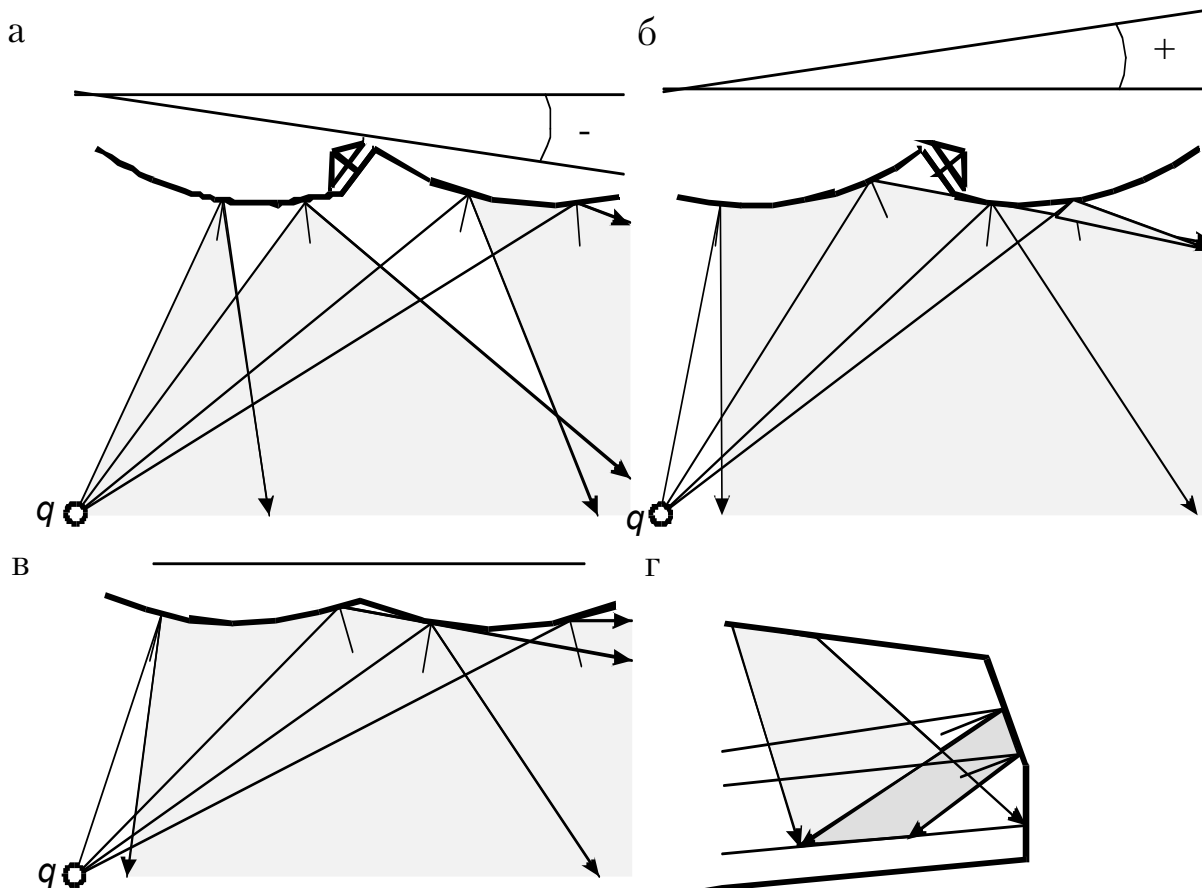


Рис. 13. Распределение отражений при расчленении поверхности:
 а – потолка, выпуклыми секциями при отрицательных углах наклона;
 б – то же, при положительных углах;
 в – то же, при нулевых углах;
 г – потолка и стены

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 запозданием 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).

На рис. 14, а 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.

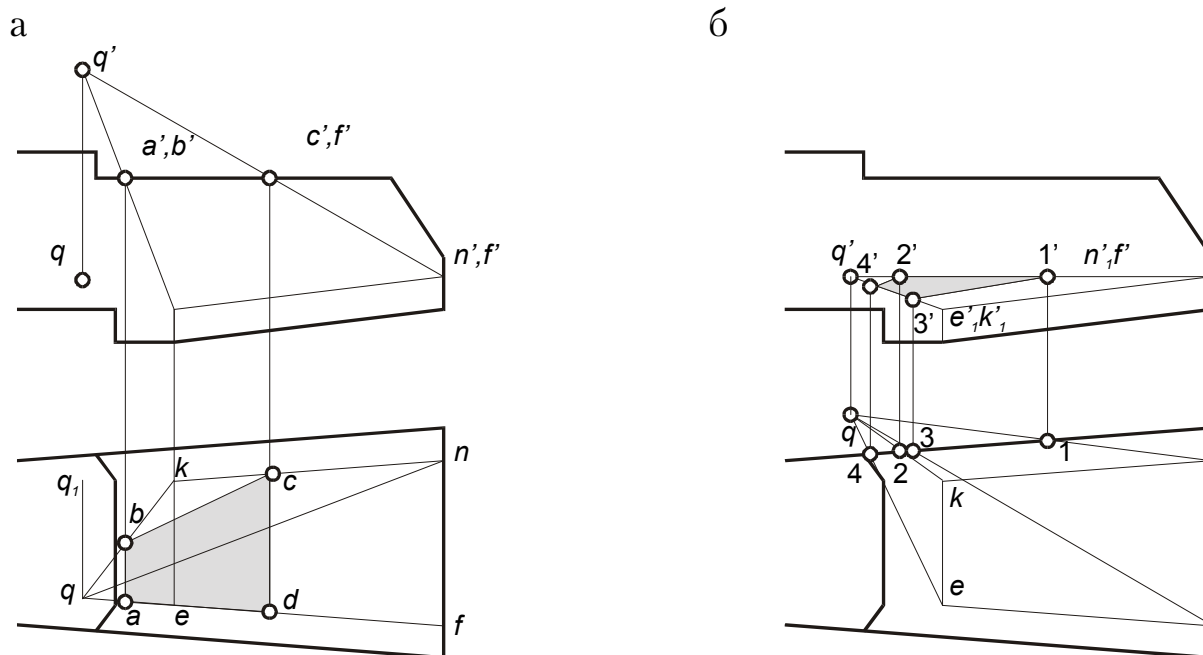


Рис.14. Построение площадок первых отражений:
а – на поверхности потолка; б – на поверхности стен

Аналогично находится участок первых отражений на боковой поверхности стен (рис. 14,б).

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 ста-

новится 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. 15).

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, 2, 5], которое сравнивается с расчетным.

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

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

Если расчет показал, что $f_{кр} \leq 125$ 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

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

- в диапазоне частот 2000–4000 Гц по формуле:

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

где $\bar{\alpha} = \alpha_1 \frac{S_1}{S_{общ}} + \alpha_2 \frac{S_2}{S_{общ}} + \dots + \alpha_n \frac{S_n}{S_{общ}}$ – средний коэффициент зву-

копоглощения из числа i поверхностей отражения (поглощения) звука в зрительном зале. Коэффициенты звукопоглощения α_i наиболее распространенных в строительной практике материалов приведены в прил. 1;

m_v – коэффициент затухания звука в воздухе в зависимости от относительной влажности [1].

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.

Оптимальные значения времени реверберации в области средних частот 500–1000 Гц для залов различного назначения приведены на соответствующей номограмме [1, 2, 5]. 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, полученной по вышеуказанной формуле для частоты 125 Гц, следует считать ориентировочным.

Как видно из рис. 15, с увеличением объёма зрительного зала время реверберации увеличивается. Залы, где первостепенное значение имеют четкость и разборчивость речи, должны иметь меньшее значение времени реверберации, в сравнении с залами для прослушивания музыкальных программ.

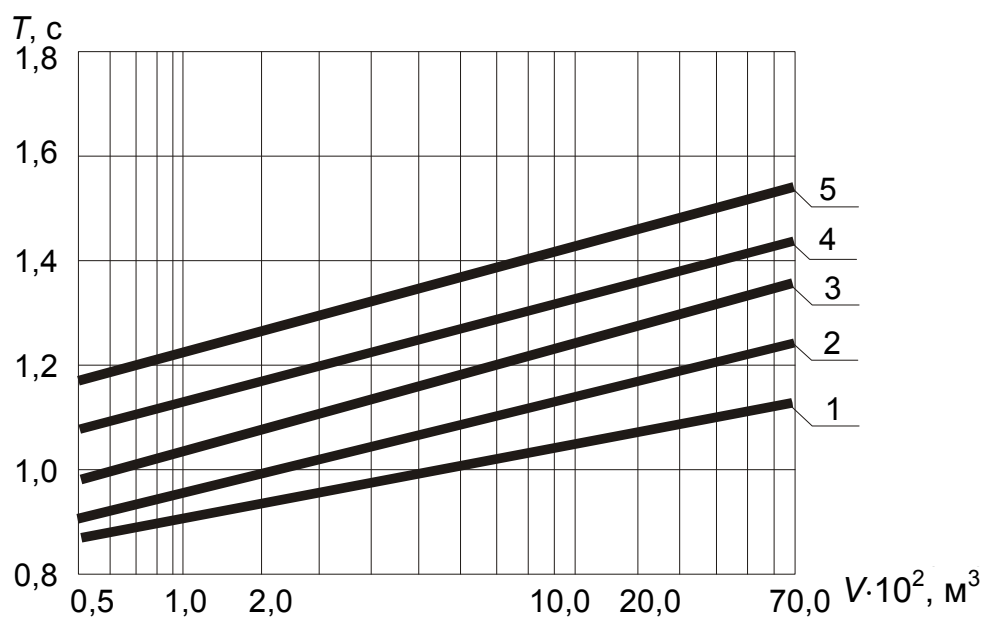


Рис. 15. Рекомендуемое время реверберации для залов различного назначения в зависимости от объема на частотах 500–4000 Гц:
 1 – лекционные залы; 2 – залы драматических театров, залов многоцелевого назначения; 3 – концертные залы, залы оперы и балета;
 4 – спортивные залы; 5 – кинотеатр

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, так как 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, использованных 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 на 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 создать чередование 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, так как 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

$$V = V_T N = 8 \cdot 325 = 2600 \text{ м}^3.$$

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 [5].

В первом приближении форму зала (по продольному разрезу) можно принять за правильный параллелепипед (рис. 16), что в дальнейшем дает возможность вносить изменения отдельно для стен, потолка с целью выбора оптимального варианта.

Рекомендации, изложенные в [5], позволяют рассчитывать параметры зрительного зала.

Зал оборудуется сценой типа С-1 (согласно табл. 3); 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 $X-Y$.

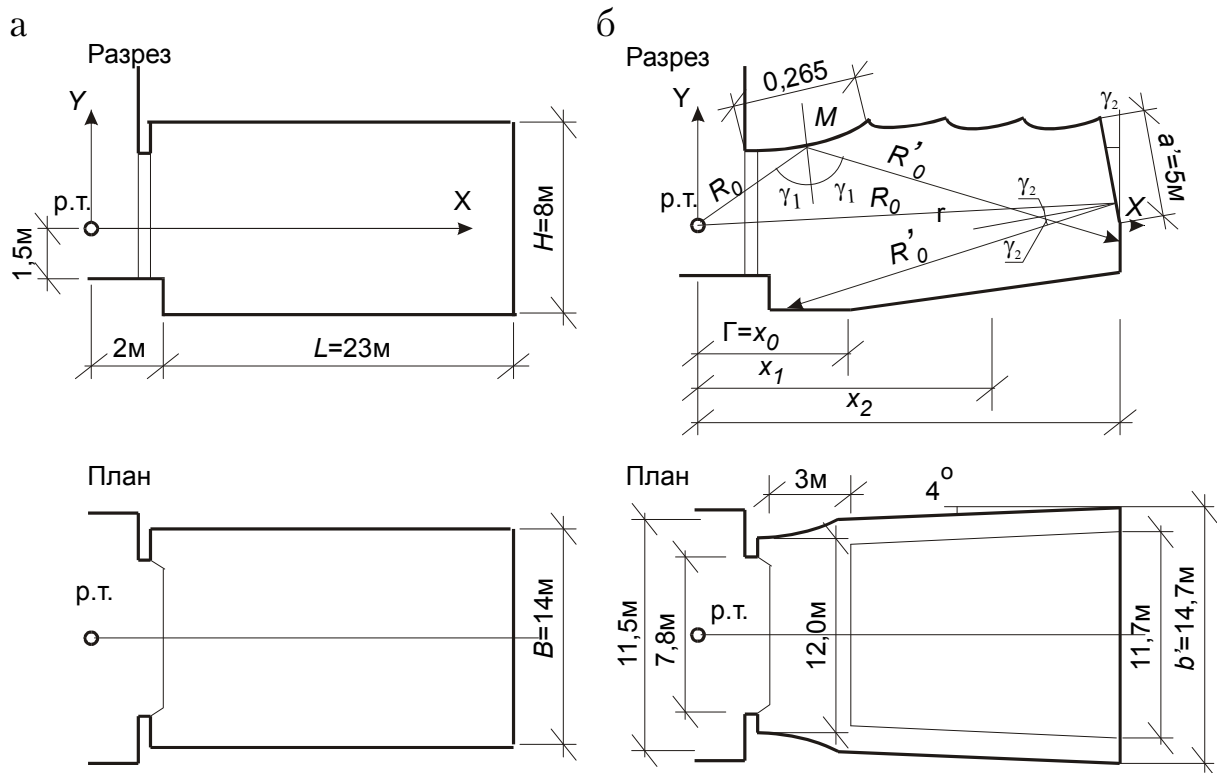


Рис. 16. Этапы проектирования зрительного зала:
 а – определение базовых размеров зала по формуле (1);
 б – уточнение размеров и формы поверхностей зала согласно п. 4.2

Превышение луча зрения, направленного на расчетную точку наблюдения над уровнем глаз впереди сидящего зрителя, следует принять $C = 0,14$ м, глубину ряда $d = 0,95$ 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 подступёнок первого ряда:

- на первом отрезке

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

- 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 нормальными условиями движения по наклонной вверх и вниз.

Расчет мест в зрительном зале выполняют согласно [4, 5], предусматривая два эвакуационных прохода по 1,5 м шириной вдоль про-

дольной 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 торцовой стене придать наклон в сторону зала $\gamma_1 = 26,5^\circ$ (см. рис. 16).

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

$$N = 21 \cdot 15 = 315 \text{ мест.}$$

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 [2], а разница количества мест устраняется путем устройства дополнительного нулевого ряда из 10 кресел.

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 (см. рис. 16):

$$R_p = 7 \text{ м}; R = 14,3 \text{ м}; \gamma_1 = 43^\circ; a = 2,65 \text{ м}; b' = 5,7 \text{ м}; \lambda = 1 \text{ м.}$$

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. M 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 ΔL не превышает 5 дБ и применение метода геометрических отражений допустимо.

4.4. Подсчет площадей внутренних поверхностей зала

Площадь задней стены – 108,2 м²;

Площадь боковых стен – 338,56 м²;

Площадь пола – 300,7 м²;

Площадь пола, не занятого креслами, – 81,3 м²;

Площадь поверхности потолка – 340 м²;

Площадь открытого проема сцены – 71 м².

4.5. Расчет времени реверберации

Рекомендуемое время реверберации для концертного зала объемом 2210,35 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

$$\varphi(\bar{\alpha}) = 0,226; \bar{\alpha} = 0,203; A_{\text{общ}} = 190,64 \text{ м}^2;$$

– на частоте 500 Гц

$$\varphi(\bar{\alpha}) = 0,3; \bar{\alpha} = 0,26; A_{\text{общ}} = 244,17 \text{ м}^2;$$

– на частоте 2000 Гц

$$\varphi(\bar{\alpha}) = 0,284; \bar{\alpha} = 0,245; A_{\text{общ}} = 230 \text{ м}^2.$$

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).

Определение времени реверберации на расчетных частотах:

– на частоте 125 Гц

$$\bar{\alpha} = 0,22; \varphi(\bar{\alpha}) = 0,25; T = 1,53 \text{ с};$$

– на частоте 250 Гц

$$\bar{\alpha} = 0,272; \varphi(\bar{\alpha}) = 0,325; T = 1,18 \text{ с};$$

– на частоте 500 Гц

$$\bar{\alpha} = 0,289; \varphi(\bar{\alpha}) = 0,341; T = 1,13 \text{ с};$$

– на частоте 1000 Гц

$$\bar{\alpha} = 0,29; \varphi(\bar{\alpha}) = 0,34; T = 1,128 \text{ с};$$

– на частоте 2000 Гц

$$\bar{\alpha} = 0,26; \varphi(\bar{\alpha}) = 0,3; T = 1,2 \text{ с};$$

– на частоте 4000 Гц

$$\bar{\alpha} = 0,23; \varphi(\bar{\alpha}) = 0,26; T = 1,36 \text{ с}.$$

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)	340,0	0,04	13,6	0,05	17,0	0,06	20,4	0,08	27,2	0,04	13,6	0,06	20,4
2	Стены оштукатурены	338,56,9	0,01	3,4	0,01	3,4	0,02	6,8	0,02	6,8	0,02	6,8	0,02	6,8
3	Стены «Мелодия»	108,2	0,25	27,1	0,50	54,1	0,60	64,9	0,45	48,7	0,3	32,5	0,30	32,46
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	939,1	0,09	84,5	0,09	84,5	0,05	46,95	0,05	46,95	0,05	46,95	0,022	20,66
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 %)			210,81		261,7		271,79		272,98		248,03		217,9
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 %)							255,69						
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 %)							300						

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. 6 в соотношении звукоотражающих – звукопоглощающих материалов интерьера. В соответствии с этим вносятся изменения величин эквивалентной площади звукопоглощения (пп. 7, 9, 11 табл. 6).

Таблица 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Стены, закрытые ПА/Д гладкими с воздушной прослойкой 100 мм	108,2	0,25	27,05	0,4	43,28	0,2	21,53
	$A_{\text{общ}}, \text{ м}^2$ при 70 % заполнении			210,81		250,88		228,53
	$A_{\text{общ}}, \text{ м}^2$ при 50 % заполнении					234,07		
	$A_{\text{общ}}, \text{ м}^2$ при 100 % заполнении					278,42		

При 70 % заполнения зала время реверберации имеет значения 1,51 с, 1,238 с, 1,38 с на частотах 125, 250, 500 Гц (рис. 17, пунктирная линия). На частоте 500 Гц (рис. 18, пунктирная линия) время реверберации при 50 и 100 % заполнения зала зрителями составит соответственно 1,3 с и 1,0 с.

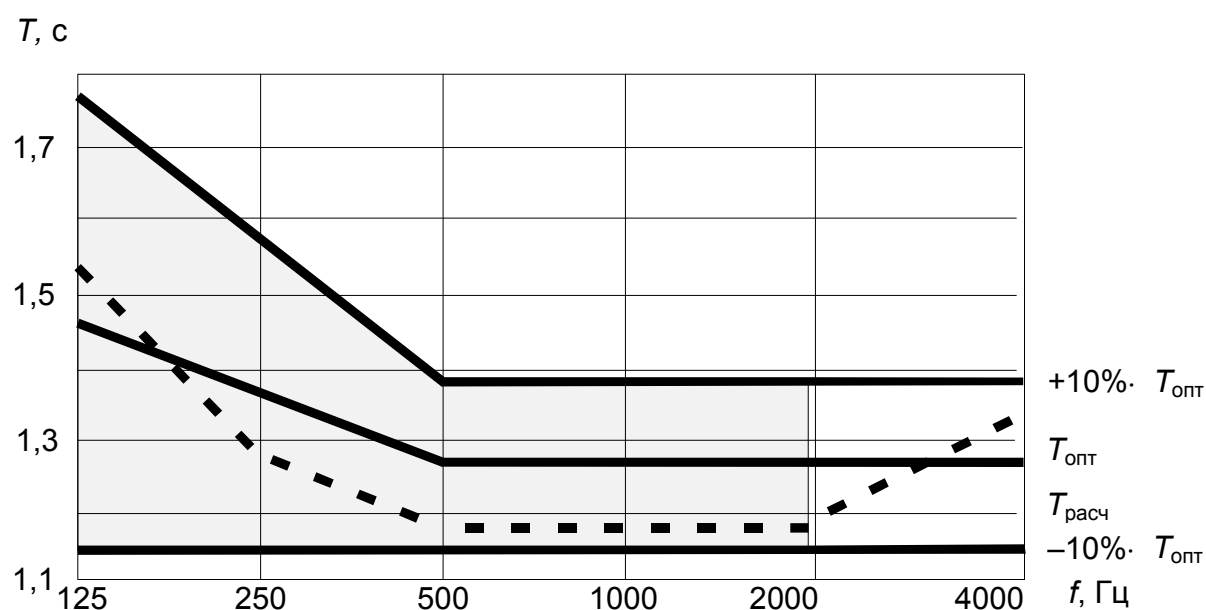


Рис. 17. График зависимости времени реверберации от частоты

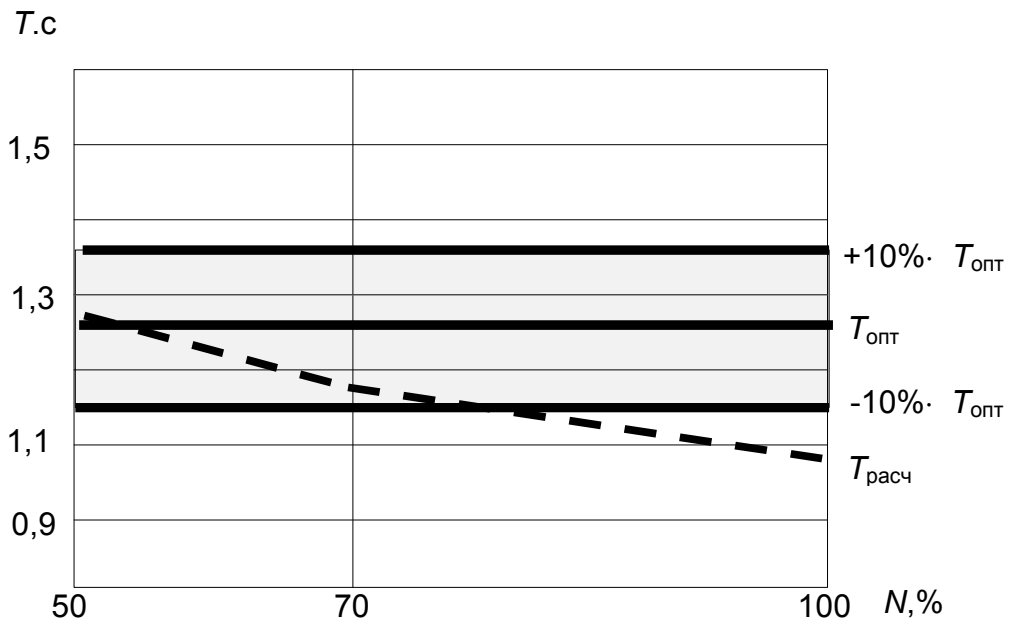


Рис. 18. График зависимости времени реверберации от заполнения зала

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

5. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа по разделу «Архитектурная акустика» курса «Архитектурная физика» состоит из двух частей:

В первой части предлагается рассмотреть вопрос о форме и размерах зала, размещении в нем 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 [1–5].

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

При выполнении работы предполагается использовать ЭВМ для оптимизации выбора элементов интерьера зала, а также необходимые сведения, полученные при изучении дисциплины «Конструкции гражданских и промышленных зданий».

6. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Курсовую работу выполняют в соответствии с индивидуальным заданием.

На первом этапе студенту необходимо проработать несколько вариантов зрительного зала по выбору оптимальной формы. Сначала рекомендуется ознакомиться с вопросами проектирования технологических элементов зала: необходимо сделать выбор эстрады или сцены, формы и размеров балкона 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. Окончательное решение должно 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 для трёх точек 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 одинаковое 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 музыка лишается объемности и мелодичности, 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 за-

писке. Объем записки должен составлять 12–16 листов. Выполнение схем и графиков должно соответствовать требованиям ЕСКД.

Тематика курсовых работ

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

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Коэффициенты звукопоглощения строительных материалов и конструкций

№ п/п	Материалы и конструкции	Коэффициент звукопоглощения для частот, Гц							
		125	250	500	1000	2000	4000		
1	2	3	4	5	6	7	8		
<i>Обычные материалы и конструкции</i>									
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		
11	Плиты древесно-стружечные неокрашенные толщиной 20 мм с воздушной прослойкой 50–150 мм	0,1	0,08	0,05	0,05	0,04	0,08		
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		

1	2	3	4	5	6	7	8
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	Переплеты оконные застекленные	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
15	Светопрозрачные ограждения из стеклблоков	0,01	0,02	0,02	0,06	0,06	0,06
16	Пол паркетный	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
17	Пол дощатый на лагах	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,09
18	Линолеум на твердой основе	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
19	Ковер шерстяной толщиной 9 мм по бетону	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,3
20	То же, на войлочной подкладке толщиной 3 мм	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,3
21	Портьеры хлопчатобумажные на подкладке со складками, поверхностная плотность ткани 0,5 кг/м ²	0,05	0,3	0,45	0,7	0,65	0,5
22	Портьеры плюшевые со складками, поверхностная плотность ткани 0,65 кг/м ²	0,15	0,35	0,55	0,7	0,7	0,65
23	Фибролит толщиной 50 мм с воздушной прослойкой 50–100 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,6	0,65
24	Вентиляционные решетки	0,3	0,42	0,5	0,5	0,5	0,51
25	Вода в ванне бассейна	0,01	0,01	0,013	0,015	0,02	0,025
26	Проем сцены, оборудованной декорациями	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
27	Киноэкран	0,3	-	0,4	-	0,4	-
<i>Покрытия полов спортивных залов</i>							
28	«Тарафлекс. Спорт М»	0,02	0,03	0,03	0,08	0,06	0,03
29	Искусственная трава фирмы «Полиграсс»	0,07	0,07	0,075	0,1	0,39	0,52
30	«Астрогурф»	0,1	0,15	0,3	0,5	0,7	0,5

1	2	3	4	5	6	7	8
31	«Пуластик»	0,05	0,12	0,2	0,2	0,15	0,1
32	«Спортан» пористый	0,05	0,06	0,7	0,1	0,3	0,5
33	«Спортан»	0,04	0,05	0,08	0,18	0,2	0,3
34	«Риздор»	0,02	0,03	0,04	0,18	0,25	0,17
35	«Тарган»	0,02	0,03	0,06	0,1	0,18	0,17
<i>Специальные звукопоглощающие материалы и конструкции</i>							
36	Плиты гипсовые перфорированные с пористым заполнителем, размер 810×810×26 мм: – без воздушной прослойки – с воздушной прослойкой, мм: 50 100 200	0,05 0,05 0,15 0,25	0,2 0,4 0,6 0,65	0,45 0,75 0,75 0,65	0,75 0,55 0,55 0,6	0,55 0,55 0,5 0,55	0,35 0,3 0,3 0,3
37	Плиты пористые акустически «Акмигран», размер 300×300×20 мм: – без воздушной прослойки – с воздушной прослойкой, мм: 50 100 200	0,05 0,15 0,25 0,35	0,15 0,55 0,55 0,6	0,5 0,55 0,55 0,6	0,65 0,65 0,65 0,65	0,65 0,65 0,65 0,7	0,7 0,7 0,7 0,75
38	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

1	2	3	4	5	6	7	8
39	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
40	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
41	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
42	Фибролит толщиной около 50 мм с воздушной прослойкой 50-100 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,75	0,65
43	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	0,4	0,7	0,8	0,8	0,75	0,65
44	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	0,75	0,6	0,45	0,3

Образец задания

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ 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 зала с естественной акустикой»

вместимостью на _____ зрителей студенту(ке) группы Арх_____

Начало проектирования _____
Окончание проектирования _____

Руководитель проекта _____
Дата выдачи _____

Образец заполнения титульного листа

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ 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 зала многоцелевого назначения с естественной акустикой вместимостью на _____ зрителей*

Выполнил студент группы Арх-42 Петров В.И.

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

Оценка _____

Дата защиты работы _____

ПЕНЗА 200_ г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архитектурная физика [Текст] / под ред. Н.В. Оболенского. – М.: Стройиздат, 1998. – С. 286–430.
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.: Стройиздат, 1998.
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.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. АКУСТИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЛАМ	9
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРЬЕРА ЗАЛА С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ	18
3. РАЗРАБОТКА ЦВЕТОВОГО РЕШЕНИЯ ИНТЕРЬЕРА ЗРИТЕЛЬНОГО ЗАЛА	26
4. ПРИМЕР АКУСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КОНЦЕРТНОГО ЗАЛА ВМЕСТИМОСТЬЮ $N = 325$ МЕСТ	28
5. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	36
6. УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ	37
ПРИЛОЖЕНИЯ	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	45

Учебное издание

Разживин Владимир Михайлович
Викторова Ольга Леонидовна
Петрянина Любовь Николаевна
Холькин Сергей Александрович

ЕСТЕСТВЕННАЯ АКУСТИКА ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ

Методические указания по курсовому проектированию

Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова

Редактор В.С. Кулакова
Верстка Т.А. Лильп

Подписано в печать 12.12.13. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл.печ.л. 2,73. Уч.-изд.л. 2,94. Тираж 80 экз.
Заказ № 323.

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