

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емец Валерий Сергеевич
Должность: Директор филиала
Дата подписания: 13.04.2026 12:31:15
Уникальный программный ключ:
f2b8a1573e931f1098cfe699d1debd94fcff35d7

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Рязанский институт (филиал)
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Московский политехнический университет»

Кафедра Информатика и информационные технологии

Е.В. Тинина

**АКУСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗАЛОВ
РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Руководство по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Строительная климатология»

Рязань
2018

Тинина Е.В.

Акустический расчет залов различного назначения: Руководство по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Строительная климатология». – Рязань: Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 2018. - 20 с.

Приведены основные теоретические сведения и понятия архитектурной акустики, формулы для расчета акустики помещений и залов различного назначения, описана методика выполнения лабораторной работы.

Печатается по решению методического совета Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета.

© Рязанский институт (филиал)
Московского политехнического
университета, 2018
© Тинина Е.В., 2018

Цель работы:

- изучение основных принципов архитектурной акустики;
- расчет акустических характеристик залов различного назначения;
- выбор соответствующего проектного решения зала.

Введение

Архитектурная акустика - это научная дисциплина, данные которой непосредственно влияют на формирование архитектурной формы. Это касается всех типов залов: театры, залы для речевых программ, залы вокзалов, учебные аудитории большого объема, музыкальные залы и т.п.

Детальными акустическими расчетами занимается инженер-акустик, но архитектор должен уметь грамотно поставить ему задачу и согласовать в процессе проектирования параметры объемно-пространственного и конструктивно-отделочного решения зала.

1 Акустические характеристики залов

В закрытом помещении возникают многократные отражения звуковых волн от всех поверхностей, в результате чего после прекращения действия источника звука слушатель воспринимает прозвучавший сигнал в течение некоторого времени.

Процесс спада звуковой энергии называется реверберацией. Для количественной оценки реверберации используется понятие времени реверберации, которое не зависит ни от индивидуального порога слышимости, ни от начального уровня сигнала.

Время реверберации, характеризующее общую гулкость помещения, является одним из важных условий хорошей акустики зала. Для достижения четко определенного времени реверберации требуется достаточная диффузность звукового поля в зале.

Время реверберации зависит от объема и конфигурации помещения и общего звукопоглощения (отделочных материалов). Например, прямоугольная

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

Но залы с одним и тем же временем реверберации могут иметь различную по качеству акустику. Это связано с тем, что в залах наблюдается запаздывание отражений по отношению к прямому звуку, которое меняется от точки к точке. Это зависит от размера зала и его отделки.

Время (t_3 , мс) запаздывания первых отражений от потолка (расстояние определяется по продольному разрезу зала) и стен (определяется по плану) проверяется по формуле

$$t_3 = \frac{l_{omp} - l_{np}}{0,34}, \quad (1)$$

где $l_{omp} = (l_{над} + l_{ом})$ – общая длина пути отраженного звука, м; $l_{над}$ – длина луча, падающего на отражающую поверхность от источника звука, м; $l_{ом}$ – длина луча, отражающегося от поверхности до расчетной точки, м; l_{np} – длина пути прямого звука (от источника звука до расчетной точки), м.

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

Допустимое время запаздывания для речи до 25 мс, для музыки – до 35 мс, для многофункциональных залов – до 30 мс.

В зале всегда существует зона, в которую не должно попадать ни одного первого отражения. Максимальный радиус действия прямого звука в этой зоне составляет 8-9 м для речи и 10-12 м для музыки. В других местах интенсивные первые отражения должны перекрывать всю зону зрительных мест (рисунок 1).

При проектировании залов в большинстве случаев над авансценой и в конце зала выполняют специальные звукоотражающие конструкции, задача которых направить отраженный звук в нужные точки зала (рисунок 1 и 2). Это устраняет неразборчивость звуков. При примыкании задней стены зала к потолку под углом 90^0 может возникнуть так называемое «театральное» эхо – отражение звука от потолка и стены в направлении к источнику звука, приходя-

шее с большим запаздыванием. Для устранения этого недостатка изменяют угол между потолком и стеной (рисунок 2).

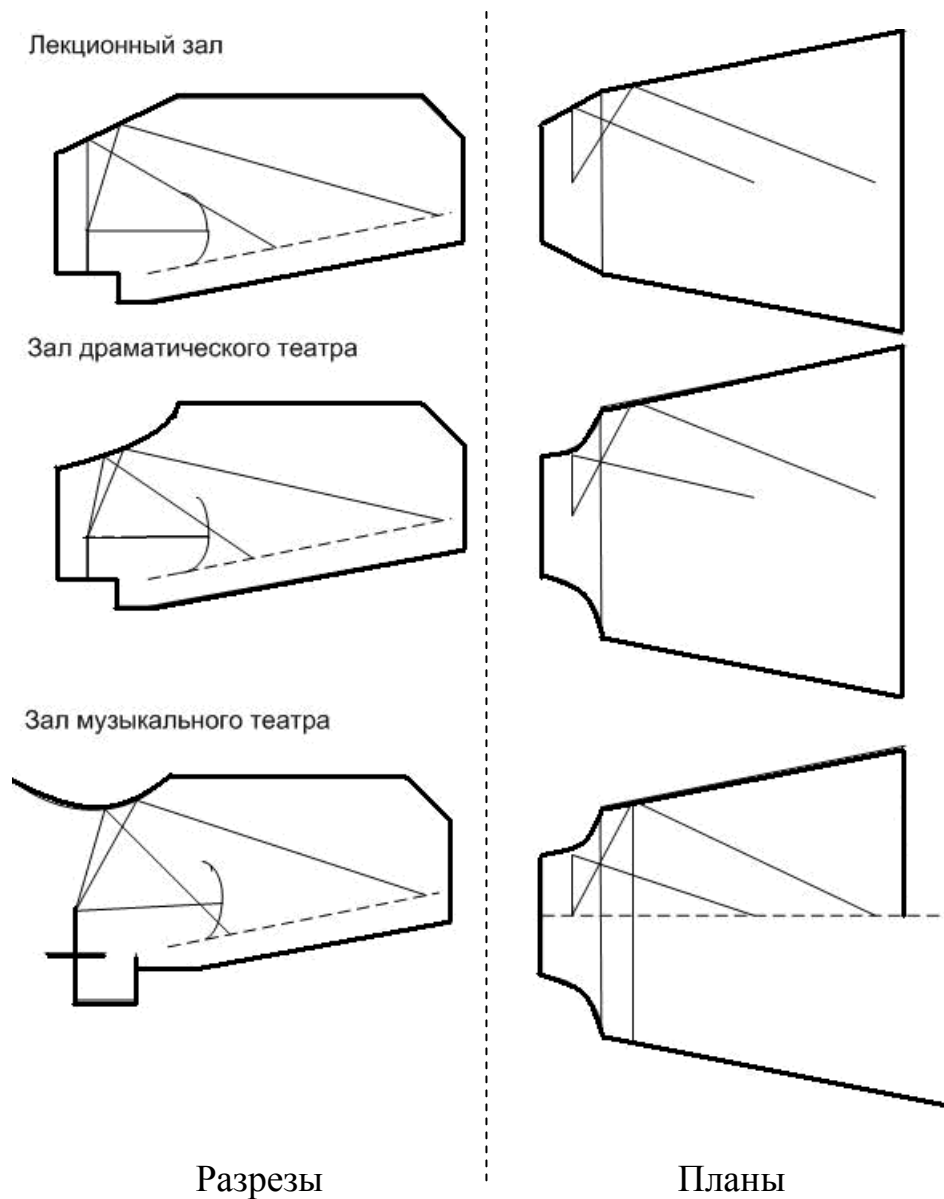


Рисунок 1 - Первые отражения от потолка, стен и отражателей для различных видов залов

Важное значение в акустике залов имеет понятие «диффузного (однородного) звукового поля», характеризуемого тем, что во всех точках поля усредненные во времени уровень звукового давления и поток приходящей по любому направлению звуковой энергии постоянны.

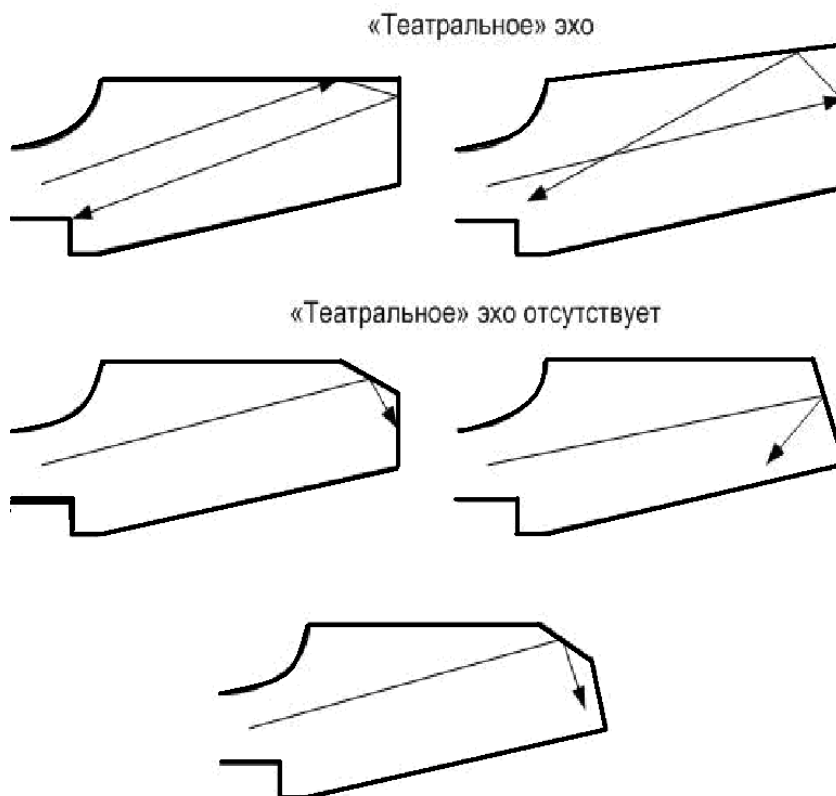


Рисунок 2 - Конструкция потолка и задней стены зала

Поздние звуковые отражения могут вызвать эхо, что зависит от времени запаздывания и интенсивности отражения по отношению к прямому звуку и от типа звукового сигнала. Возникновение эха также зависит от размера зала и отделки. Если запаздывание отраженного звука более 50 мс по сравнению с прямым от источника звука, то слушатель различает прямой и отраженный сигналы. Так как за это время звук проходит 17 м, то разность расстояний, прошедших прямым и отраженным звуком, не должна превышать эту величину (рисунок 3).

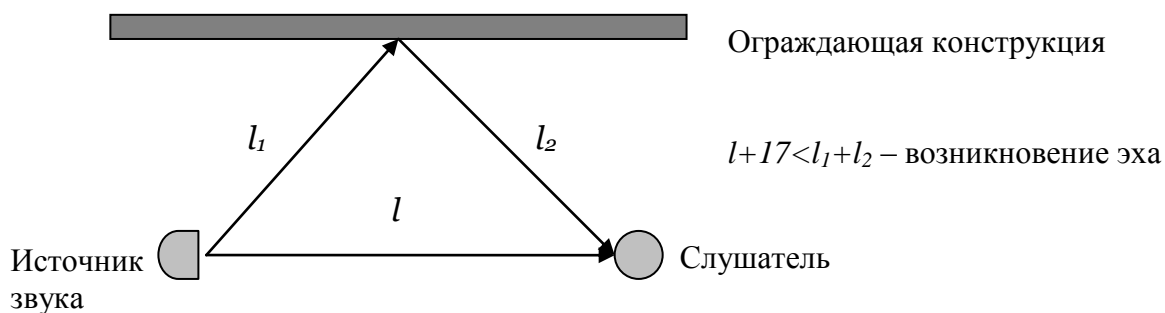


Рисунок 3 – Схема возникновения эха

Многократное, или «порхающее», эхо представляет собой периодическую последовательность эха (как минимум трехкратное повторение сигнала). Оно зависит от разницы в уровнях предыдущего и последующего отражений и от типа сигнала: минимальный интервал для речи – 50 мс, для музыки – 100 мс.

2 Акустическое проектирование залов

Акустическое решение залов зависит от его назначения и вместимости. При проектировании рассматриваются архитектурно-строительные параметры зала, а также проводятся расчеты времени реверберации и геометрических отражений, а для речевых и оперных залов проверяет разборчивость речи.

2.1 Основные архитектурно-строительные параметры зала

Условиями обеспечения достаточно диффузного звукового поля являются соответствующие пропорции зала, непараллельность стен, равномерное распределение звукопоглотителя и членение необходимой части внутренних поверхностей.

Каждый тип зала имеет рекомендуемую максимальную вместимость (количество N зрителей), удельный объем $V_{уд}$ (отношение объема V зала к количеству N) и максимальную длину (таблица 1).

Объем зала определяется пропорциями: длиной l , шириной $в$, высотой h . При расчетах используют соотношения между этими параметрами

$$\begin{aligned} 1,3 \leq \frac{l}{в} \leq 1,6, \\ 1,3 \leq \frac{в}{h} \leq 1,6. \end{aligned} \tag{2}$$

Залы в плане обычно имеют форму трапеции с углом раскрытия боковых стен от 5° до 12° .

В залах вместимостью более 600 человек устраивают балконы, что сокращает длину зала и повышает его диффузность (особенно на низких частотах, на которых обычные элементы отделки не дают нужного рассеивания).

Таблица 1 – Рекомендуемые параметры различных залов

Вид зала	Максимальная вместимость, человек	Удельный объем, м ³ /человек	Максимальная длина (без авансены), м
Лекционные и конференц-залы	400	4-5	25 (20)
Музыкально-драматические театры	1200	5-7	28 (25)
Драматические театры	1200	4-6	30 (27)
Театры оперы и балета	1500	6-8	37 (35)
Концертные залы:			
Камерные	400	6-8	20
Симфонические	2000	8-10	45
Залы для хорового пения	2000	10-12	46
Кинозалы	-	4-5	45 (в летних – 60)
Многоцелевого назначения	1000	4-6	34 (32)
Залы современной эстрадной музыки	2500	4-6	50

На рисунке 4 представлена геометрия задней стены зала с балконом. Для его конструкции характерны следующие соотношения

$$\begin{aligned} a_1 / h_1 &\leq 1,5, \\ a_2 / h_2 &\leq 2, \end{aligned} \quad (3)$$

где a_1 – вынос балкона; h_1 – средняя высота подбалконной пазухи; a_2 – вынос балкона по верхней его части; h_2 – средняя высота балкона по отношению к потолку.

Пол партера и балкона должен иметь профиль, обеспечивающий хорошую видимость сцены, а также это важно для акустики, что связано с уменьшением поглощения прямого звука при его распространении над сидящими слушателями. Для этого сцена поднимается над полом не менее чем на 1 м. Подъем партера рассчитывается по 12-14 см на один ряд, а уровень ушей слушателей при расчете акустики зала берется 1,2 м от пола. Высоты h'_1 и h'_2 стены под и над балконом берут порядка 2,2 м (рисунок 4).

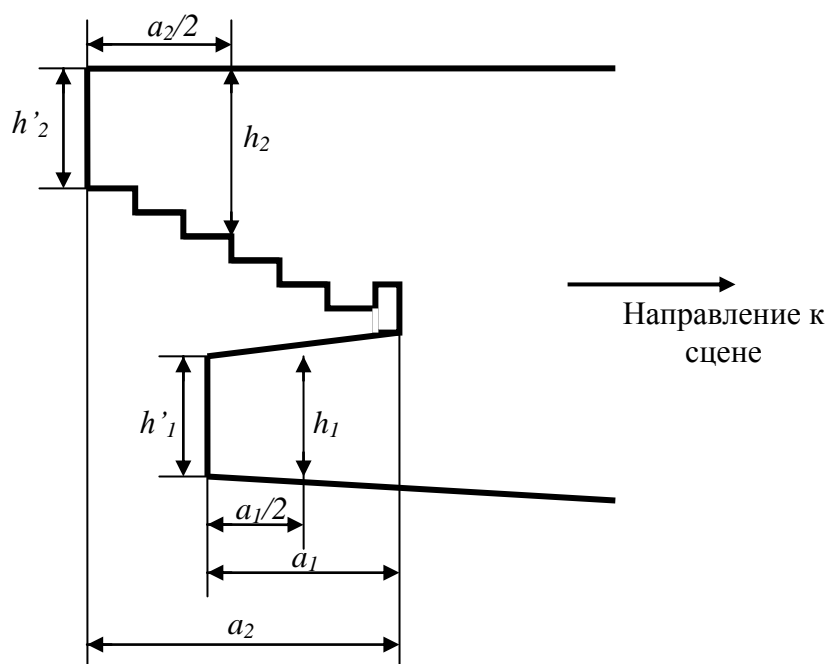


Рисунок 4 – Разрез части зала с балконом

В партере и на балконе устраивают проходы порядка 0,9-1 м на балконах и до 1,3 м в партере. Авансцену обычно выносят в сторону зала на 2 м.

Отделка зала рассматривается как на основе эстетических норм, так и на основе акустических характеристик.

2.2 Анализ звукового поля на основе геометрической акустики

С помощью геометрической акустики проводится оценка формы и размеров зала, анализируется структура первых отражений и распределение этих отражений по всей площади зрительных мест. Для этого чертятся план и разрез помещения и в них проводятся прямые и отраженные звуковые лучи до соответствующих точек в зале, то есть осуществляется построение «лучевого эскиза».

Построения в геометрической акустике производят также, как и в геометрической оптике.

Допустимость применения этого способа зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и точке в зале. Отражающая поверхность должна при этом иметь

массу не менее 20 кг/м^2 , а ее коэффициент α звукопоглощения для рассматриваемых частот не должен превышать $0,1$. Также применение геометрических отражений возможно, если наименьшая сторона отражателя больше величины $1,5\lambda$, где λ – длина волны звука, м.

На рисунке 5 отражающая поверхность взята в виде плоского прямоугольника со сторонами, равными $2a$ и $2b$, центр его совпадает с точкой отражения O , сторона $2a$ параллельна плоскости P , в которой лежат падающий QO и отраженный OM лучи, а также нормаль ON . На рисунке: R_0 - расстояние от источника Q до точки O ; R - расстояние от точки O до точки M (слушатель); γ - углы падения и отражения звукового луча.

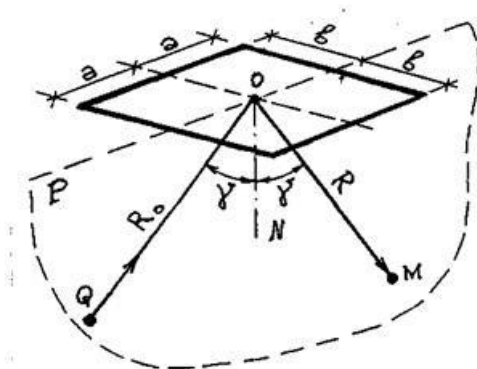


Рисунок 5 – Отражающая поверхность и ход звуковых лучей

При построении геометрических отражений от плоскости удобен прием, показанный на рисунке 6, а. Здесь используется мнимый источник Q_1 , симметричный действительному точечному источнику Q звука (симметрия относительно отражающей плоскости). Для построения мнимого источника надо опустить из точки Q перпендикуляр QA на отражающую плоскость и на продолжении его отложить отрезок AQ_1 , равный отрезку QA . Прямые, проведенные из мнимого источника Q_1 , после пересечения ими отражающей плоскости, удовлетворяют условию равенства углов падения и отражения.

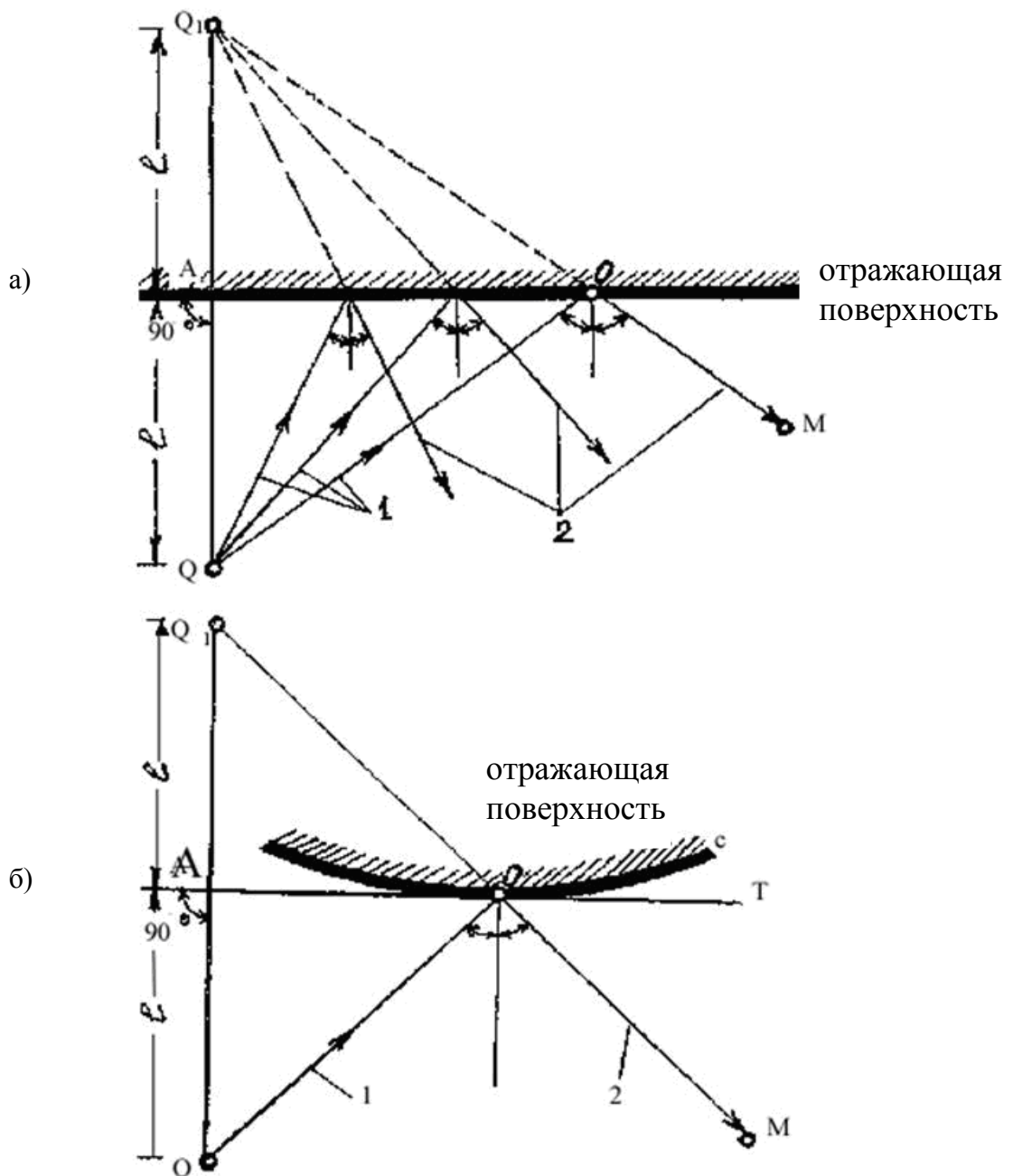


Рисунок 6 – Построение геометрических отражений звуковых лучей с помощью мнимого источника: а - отражение от плоскости; б - отражение от кривой поверхности (1 - прямые лучи, 2 - отраженные звуковые лучи)

Метод мнимых источников применим и при построении отражений от кривых поверхностей (рисунок 6, б). Если требуется найти отражение от какой-либо точки O кривой поверхности c при заданном положении источника Q , то следует в точке O построить касательную плоскость T к этой поверхности. Мнимым источником в этом случае является точка Q_1 , симметричная источни-

ку Q относительно касательной. Отрезок OM (продолжение прямой Q_1O) после пересечения с поверхностью s является искомым отраженным лучом. Здесь для каждой точки O отражающей поверхности нужно находить свой мнимый источник Q_1 в отличие от ранее рассмотренного случая с ровной плоскостью.

2.3 Определение времени реверберации

При проектировании концертных и оперных залов, а также залов, в которых применяются различные узкополосные звукопоглотители, расчет времени реверберации следует проводить на частотах 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Гц, для других залов – 125, 500, 2000 Гц.

Оптимальные величины времени реверберации в диапазоне от 500 до 1000 Гц для залов различного назначения в зависимости от объема приведены на рисунке 7. Значения времени определяются по графикам, но допускается ряд отклонений от оптимальной величины:

- на частотах 500, 1000, 2000 Гц - $\pm 10\%$;
- на частотах 125, 250 Гц - увеличение на 20 %.

Кроме этого рекомендуется скорректировать полученные значения для времени реверберации:

а) для лекционных аудиторий, конференц-залов рекомендуется уменьшить время реверберации на частоте 125 Гц на 15 %;

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

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

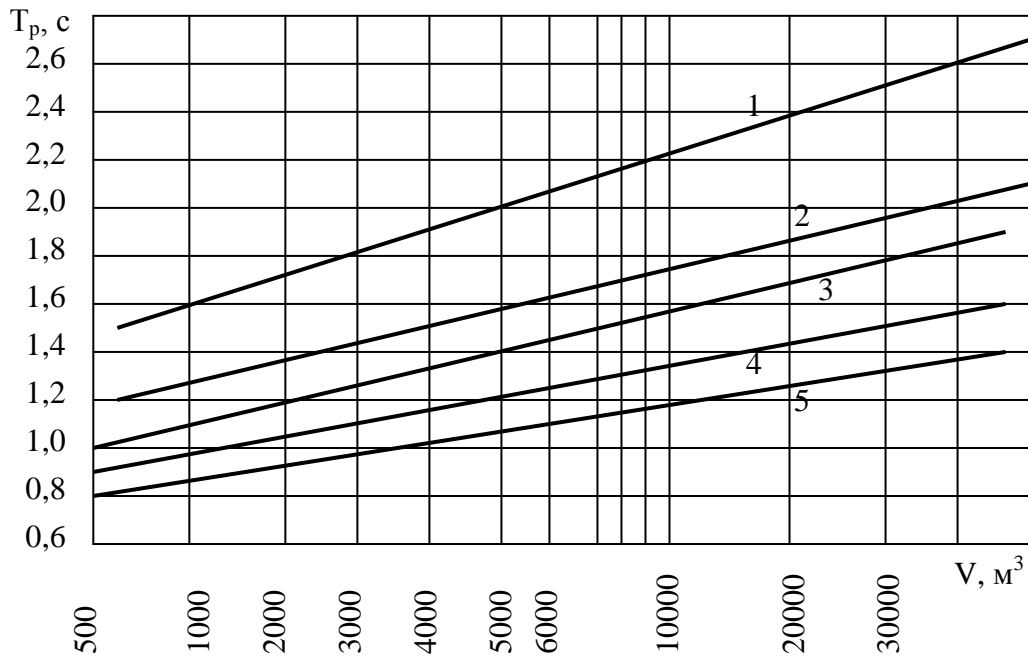


Рисунок 7 - Рекомендуемое время реверберации на средних частотах:

1 – залы для ораторий и органной музыки; 2 – залы для симфонической музыки; 3 – залы для камерной музыки, залы оперных театров; 4 – залы многоцелевого назначения, спортивные залы; 5 – лекционные залы, залы заседаний, залы драматических театров, кинозалы, пассажирские залы

Если значение времени реверберации получится меньше рекомендуемого, то нужно увеличить объем зала, если больше – рассмотреть возможность уменьшения объема и увеличения звукопоглощения.

2.4 Порядок расчета времени реверберации

1. Расчет общей эквивалентной площади звукопоглощения (ЭПЗ).

Общая ЭПЗ для выбранной частоты находится по формуле

$$A_{\text{общ}} = \sum \alpha_i S_i + \sum A_k + \alpha_d S_{\text{общ}}, \quad (4)$$

где $\sum \alpha_i S_i$ – сумма произведений площадей S (м^2) отдельных поверхностей на их коэффициент α звукопоглощения для данной частоты (i – количество поверхностей); $\sum A_k$ – сумма ЭПЗ слушателей и кресел, которая рассчитывается по формуле (5), м^2 ; α_d – коэффициент добавочного звукопоглощения, учитывающий

добавочное звукопоглощение, вызываемое прониканием звуковых волн в различные щели и отверстия, колебаниями разнообразных гибких элементов, поглощением звука осветительной арматурой и другим оборудованием зала; $S_{общ}$ – площадь всех внутренних поверхностей помещения (стены, потолок, пол, сцена), m^2 .

Коэффициент добавочного звукопоглощения залов в среднем может быть принят равным 0,09 на частоте 125 Гц и 0,05 – на частотах 500, 1000, 2000 Гц. Для залов, в которых сильно выражены условия, вызывающие добавочное звукопоглощение (например, многочисленные щели и отверстия на внутренних поверхностях зала, многочисленные гибкие элементы – абажуры и панели светильников), следует эти значения увеличить на 30 %, а в залах, где эти условия выражены слабо, на 30 % уменьшить.

Сумма ЭПЗ слушателей и кресел

$$\sum A_k = 0,7NA_c + 0,3NA_{\delta/c}, \quad (5)$$

где первое слагаемое соответствует 70 % кресел зала, заполненных слушателями, а второе – 30 % пустых кресел в зале; N – общее число кресел в зале; A_c и $A_{\delta/c}$ – эквивалентная площадь звукопоглощения для кресел в зале со зрителями и без них соответственно.

Чтобы время реверберации меньше зависело от процента заполнения мест, следует оборудовать зал мягкими или полумягкими креслами, обитыми воздухопроницаемой тканью.

После нахождения $A_{общ}$ подсчитывается средний коэффициент α_{cp} звукопоглощения внутренней поверхности зала на выбранной частоте

$$\alpha_{cp} = \frac{A_{общ}}{S_{общ}}. \quad (6)$$

2. Расчет времени реверберации для выбранных частот.

В большинстве случаев расчет времени реверберации достаточно произвести на трех частотах: 125, 500 и 2000 Гц по формуле

$$T = \frac{0,163V}{\varphi(\alpha_{cp})S_{общ} + nV}, \quad (7)$$

где V – объем зала, м^3 ; $\varphi(\alpha_{cp})$ – функция среднего коэффициента звукопоглощения; n – коэффициент, учитывающий затухание звука в воздухе (в октавных полосах 125-1000 Гц $n=0$, в октаве 2000 Гц – $n=0,009$, в октаве 4000 Гц – $n=0,022$). При вычислении по формуле (7) время реверберации получается в секундах, окончательный результат округляется до сотых долей секунд.

Данная формула позволяет получить реальное значение времени реверберации, только в том случае, если звуковое поле в помещении можно считать достаточно диффузным.

Наиболее частой причиной отсутствия диффузности является сплошная звукопоглощающая отделка потолка или противоположных стен. Если же потолок поглощающий, а стены сильно отражающие и слабо расчленены, то расчетное время реверберации окажется меньше истинного. Увеличенное значение расстояний при отражениях и заниженные значения коэффициента звукопоглощения приводят к увеличению времени реверберации.

2.5 Проверка разборчивости речи в зале

Разборчивость речи зависит от величины относительного воздействия на слушателя полезной и «бесполезной» частей звуковой энергии. К полезной звуковой энергии относятся энергия прямого звука (непосредственно от источника) и первых его отражений (запаздывание не более чем на 50 мс). К «бесполезной» – вся остальная звуковая энергия, которая представляет собой реверберирующий фон в помещении.

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

Для удовлетворительной разборчивости речи требуется низкий уровень шума, небольшое значение времени реверберации и соответствующая структура отражений, характеризующаяся наличием интенсивных ранних отражений и отсутствием эха.

Для определения слышимости или разборчивости речи применяют артикуляционные испытания в уже построенном зале, но приблизительно ее можно

оценить и на стадии проектирования в зависимости от уровней речи и шума в зале. Вывод по разборчивости речи можно сделать и по времени запаздывания первых отражений и принять соответствующие меры в ходе акустического расчета.

3 План акустического расчета залов

1. Определение воздушного объема зала и его линейных размеров.
2. Корректировка объема зала.
3. Расчет размеров балкона и подъема зрительных мест.
4. Построение плана и разреза зала.
5. Построение лучевого эскиза. Корректировка конфигурации потолка, выбор членения и звукопоглощения.
6. Определение времени запаздывания звука.
7. Расчет времени реверберации.
8. Корректировка размеров зала и повторный расчет времени реверберации (если необходимо).
9. Вывод. Рекомендации по выбору отделочных материалов ограждающих конструкций и их членения.

В таблице 2 приведены нормативы для акустического расчета залов разного назначения. В дополнительном материале к лабораторной работе представлены характеристики и фотографии существующих залов, их недостатки с точки зрения акустики, а также данные, необходимые для расчета залов различного назначения.

4 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Получить вариант задания для акустического расчета зала (таблица 3) и дополнительный материал к лабораторной работе.
2. Произвести акустический расчет зала (пункт 3, стр. 16 данного руководства).
3. В выводе сравнить расчетные и теоретические параметры и дать реко-

мендации по их корректировке, устранению недостатков, а также по выбору отделочных материалов ограждающих конструкций и внутреннему виду зала.

Таблица 2 – Данные для акустического расчета зала

Параметры	Норматив
Удельный объем	Таблица 1
Угол раскрытия боковых стен	5-12 ⁰
Шаг рядов, м	0,9-1
Ширина кресла, м	0,5
Вынос авансены, м	2
Проход между авансеной и первым рядом, м	1,5
Центральные проходы в партере, м	1,2-1,3
Подъем партера на один ряд, см	12-14
Проходы на балконе, м	0,9-1
Уровень ушей слушателей над уровнем пола, м	1,2
Высота сцены, м	1
Источник звука, находящийся по центру авансены, высотой, м	1,5
Подъем на балконе на один ряд, см	25-30
Высота балкона над полом по задней стене, м	Не менее 2,2
Высота стены над балконом, м	Не менее 2,2
Минимум высоты потолка над авансеной, м	6-7
Радиус действия прямого луча, м: -речь -музыка	8-9 10-12
Теоретическое время реверберации	Рисунок 7
Допустимое время запаздывания, мс: - речь -музыка -многофункциональные залы	20-25 30-35 25-30

Таблица 3 – Варианты задания

№ варианта	Назначение зала	Число зрителей
1	Драматический театр	600
2	Лекционная аудитория	150
3	Зал для симфонической музыки	1000
4	Конференц-зал	300

Контрольные вопросы

1. Перечислите акустические характеристики залов.
2. Каким образом определяется время запаздывания первых отражений.
3. Поясните возникновение эха в помещении.
4. От чего зависит время реверберации.
5. Постройте отраженные лучи для вогнутой поверхности.
6. Перечислите этапы расчета времени реверберации.
7. Опишите последовательность акустического расчета зала.

Список используемых источников

1. Архитектурная физика: Учеб. для вузов. Спец. «Архитектура»/ В.К.Мицкевич, Л.И.Макриненко, И.В.Мигамена и др.; / Под ред. Н.В.Оболенского. – М.: «Архитектура – С», 2005. – 448 с.
2. ГОСТ 12.1.003-83. (СТ СЭВ 1930-79). Шум. Общие требования безопасности: Изд.офиц.- М. 2002.
3. ГОСТ 12.1.036-81. Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях. - М. 2001.

Содержание

Введение.....	3
1 Акустические характеристики залов.....	3
2 Акустическое проектирование залов.....	7
2.1 Основные архитектурно-строительные параметры зала.....	7
2.2 Анализ звукового поля на основе геометрической акустики.....	9
2.3 Определение времени реверберации.....	12
2.4 Порядок расчета времени реверберации.....	13
2.5 Проверка разборчивости речи в зале.....	15
3 План акустического расчета залов.....	16
4 Порядок выполнения лабораторной работы.....	16
Контрольные вопросы.....	18
Список используемых источников.....	18

Учебное издание

Тинина Елена Валерьевна

АКУСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЗАЛОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Руководство по выполнению лабораторной работы

Формат 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 0,87. Тираж экз. Заказ № Цена договорная.

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета
390046, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, д. 26/53