

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емец Валерий Сергеевич  
Должность: Директор филиала  
Дата подписания: 28.06.2028 15:38:08  
Уникальный программный ключ:  
f2b8a1573c931f1098cfe699d1debd94fcff35d7

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**

# **СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА**

Лабораторный практикум

Рязань  
2020

**УДК 69:53**

**ББК 38.1**

**Т42**

**Тинина, Е.В.**

**Т42** Строительная акустика: лабораторный практикум / Е. В. Тинина. – Рязань: Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 2020. – 36 с.

Лабораторный практикум содержит теоретические сведения по дисциплине «Строительная физика» раздел «Строительная акустика» и методические указания к выполнению лабораторных работ.

Настоящее пособие предназначено для студентов всех форм обучения, направлений и специальностей, изучающих дисциплину «Строительная физика».

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

**УДК 69:53**

**ББК 38.1**

© Тинина Е.В., 2020

© Рязанский институт (филиал)  
Московского политехнического  
университета, 2020

## Содержание

Введение.....	4
1 Основные теоретические сведения.....	4
2 Лабораторный практикум.....	23
2.1 Лабораторная работа № 5.8. Исследование звукоизоляции ограждающих конструкций.....	23
2.2 Лабораторная работа № 5.9. Акустический расчет залов различного назначения.....	29
Библиографический список .....	35

## **Введение**

Лабораторный практикум представляет собой учебно-методическое руководство к лабораторным занятиям для студентов строительных специальностей и направлений подготовки и включает описание двух лабораторных работ по строительной физике, выполняемых студентами на кафедре «Информатика и информационные технологии» Рязанского института (филиала) Московского политехнического университета.

Вошедшим в настоящее издание описаниям лабораторных работ предшествуют теоретические сведения, позволяющие студентам самостоятельно подготовиться к выполнению работ и получить более глубокое представление о сути изучаемых явлений. Также каждая работа включает теорию и методику проведения эксперимента, порядок выполнения и обработку экспериментальных результатов, рекомендации по применению материалов, форм, размеров ограждающих конструкций. Для проведения самоконтроля каждая работа заканчивается контрольными вопросами.

## **1 Основные теоретические сведения**

При проектировании зданий и сооружений большое внимание уделяется проблемам, связанных с распространением звуковых волн через ограждающие конструкции и в помещениях. В зависимости от назначения здания перед проектировщиками ставятся следующие задачи: создание условий для наилучшего восприятия речи и музыки и всемерное подавление шума.

Речь, музыка, природные и техногенные шумы – это звуковые колебания или волны. Звукот называют процесс распространения колебательного движения в среде, а их источником является колеблющееся тело. При этом частицы упругой среды приходят в колебательное движение.

Звуковая волна – это звук, который укладывается в диапазон частот от 16 до 20 000 Гц. Звуковая волна является продольной волной. Звуковая волна характеризуется частотой  $f$ , длиной волны  $\lambda$  и скоростью  $v$  распространения. Данные величины связаны между собой следующим выражением  $v = \lambda f$ .

Для любого газа скорость распространения звуковых волн прямо пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры  $T$  и молярной массы  $M$  частиц этого газа

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты, который зависит от строения газа;

$R$  – газовая постоянная.

Таблица 1.1 – Скорость звука в различных газах

Газ	Скорость, м/с
Воздух	331
Кислород	315
Водород	1263
Углекислота	258

В таблице 1.1 приведены значения скорости звука в некоторых газах при температуре 0 °С. При распространении звуковых волн в атмосфере большую роль играют ее неоднородность, влажность, наличие и сила ветра. Также на этот процесс влияют отражающие и поглощающие поверхности.

Скорость ветра у поверхности Земли меньше, чем на некоторой высоте. Это приводит к загибанию вверх звуковых лучей, идущих против ветра. Плохая слышимость против ветра объясняется тем, что звуковые лучи проходят над головой наблюдателя. Этим же объясняется плохая слышимость при сильно нагретой поверхности Земли днем.

Звуковая волна оказывает на любое тело давление. Со временем оно может изменяться. Это вызвано смещением частиц воздуха от своих исходных положений при распространении волн. Наибольшее отличие давления от нормального будет показывать амплитуду звуковой волны.

Характеристикой звуковой волны, определяемой по его действию на орган слуха, является громкость. Поскольку громкость трудно оценить, пользуются другим понятием, позволяющим производить измерение. Это энергия звуковой волны. Именно она определяет громкость или интенсивность  $I$  звука. Интенсивность звука представляет собой энергию, излучаемую источником в единицу времени с единицы поверхности. Если интенсивность превышает  $1 \text{ Дж}/(\text{с м}^2)$  или  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , то уже может ощущаться боль в ухе. При распространении звуковых волн могут возникать стоячие волны, а также для них характерны явления интерференции и дифракции.

Человек воспринимает звуки с помощью своего слухового аппарата – уха. Около височных костей черепа находится улитка, представляющая собой небольшую костную полость, наполненную лимфой. К улитке подходят окончания слухового нерва. Волокна нервов имеют различную длину и натяжение, что соответствует различным резонансным частотам. Звуковые колебания по слуховому каналу доходят до барабанной перепонки, затем через систему слуховых косточек передаются окну, ведущему в полость улитки. При действии звуков определенной частоты нужные волокна приходят в резонансное колебание и возбуждают соответствующие нервные окончания.

При действии сложного звука раздражение испытывает ряд нервных окончаний, в результате чего человек может воспринимать составляющие сложного звука отдельно.

Возможность оценивать направление распространения волн обусловлена наличием у человека парного слухового органа, а также способности мозговых центров учитывать разность фаз колебаний, достигающих ушей.

В субъективном звуковом восприятии человек различает три характеристики звука: высоту, тембр и громкость. Высота определяется его частотой (чем больше частота, тем выше звук). Тембр определяется характером колебаний, их составом, т.е. спектром. Ухо каждого человека воспринимает по-своему все эти характеристики. Но существует определенная зона – область слышимости, характерная для всех людей (рисунок 1.1).

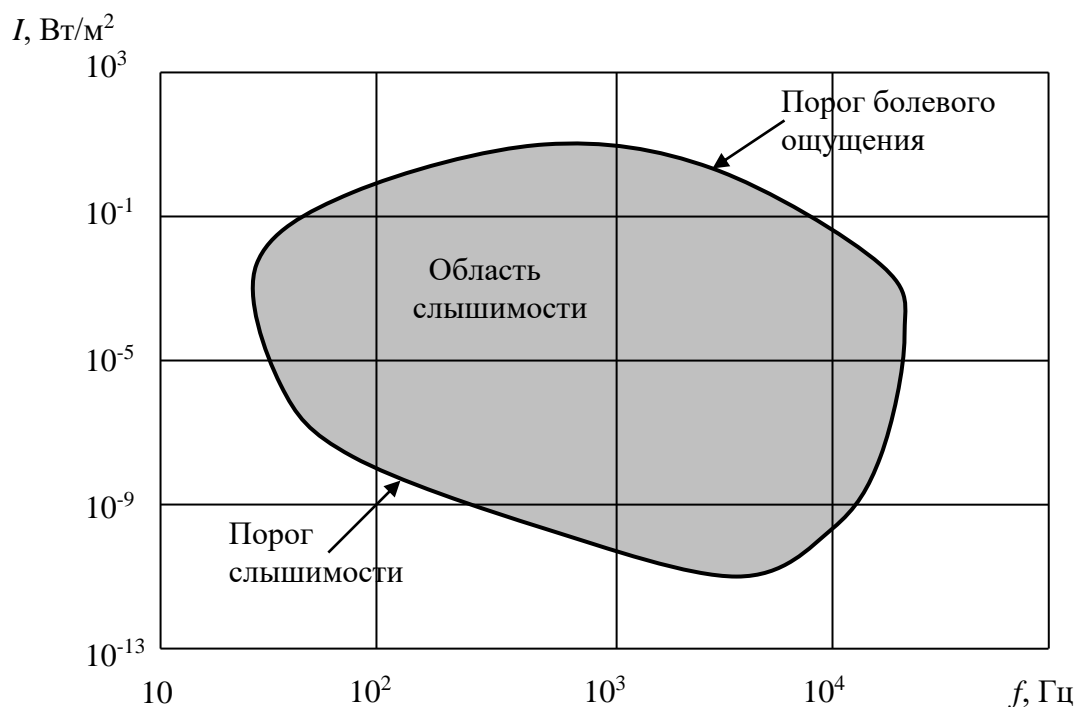


Рисунок 1.1 – Область слышимости человеческого уха  
в зависимости от интенсивности и частоты звуковых волн

Человеческое ухо может воспринимать звуки только определенных частот от 16 до 20 000 Гц. Колебания ниже 16 Гц называют инфразвуком, выше 20 000 Гц – ультразвуком.

Многие величины, не только в акустике, измеряются в децибелах. Децибел – специфическая единица, которая является математической величиной. У нее есть некоторое сходство с процентами: она не имеет единиц измерения и служит для сравнения двух одноименных величин.

Децибел (русское обозначение – дБ, международное – dB), как показывает приставка «деци», составляет десятую часть другой, более крупной единицы – бел (по имени Александра Грехема Белла – изобретателя телефона).

Бел – это десятичный логарифм отношения двух мощностей  $P_1$  и  $P_2$ , т.е.  $\lg \frac{P_2}{P_1}$ ,

где  $P_1$  – начальное значение мощности,  $P_2$  – конечное. Физическая природа сравниваемых мощностей не оговаривается и по существу может быть любой.

Для практики бел – неудобная величина, так как даже большие отношения мощностей выражаются небольшим числом. Например, если  $\frac{P_2}{P_1}=100$ , то  $\lg 100=2$ , а для отношения в 1000 – только 3. Для большей наглядности число, показывающее количество бел, умножают на десять и полученное значение считают показателем децибел: из 2-х бел получается 20 дБ. Подсчитано, что  $1 \text{ дБ} = 10 \lg 1,259$ .

Децибелы могут быть положительными и отрицательными. Положительные децибелы характеризуют усиление, а отрицательные – потери энергии.

Децибелы относятся к логарифмической системе, которая часто применяется при построении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

АЧХ – кривые, изображающие зависимость коэффициента передачи  $\kappa = \frac{P_2}{P_1}$  различных устройств от частоты внешнего воздействия. Если коэффициент  $\kappa$  имеет большой разброс по значениям, то для построения АЧХ и используется логарифмический масштаб. Это позволяет на небольшом отрезке оси отобразить широкий диапазон частот.

По оси частот в удобном для работы масштабе откладываются величины, пропорциональные не самой частоте, а логарифму  $\lg \frac{f}{f_0}$ , где  $f_0$  – частота, соответствующая началу отсчета. Против отметок на оси надписываются значения нужных частот. Интервал, характеризующий рост частоты в десять раз, называют декадой, двукратному отношению частот соответствует октава.

Децибелы широко используются в акустических расчетах. Интенсивности звуков, с которыми приходится иметь дело в современных условиях, могут различаться в сотни миллионов раз – от тихого шепота до рева ракетных двигателей. Такой огромный диапазон изменений акустических величин создает большие неудобства при сопоставлении их абсолютных значений. Использование логарифмических единиц оказывается очень удобным, так как

при этом существенно сужается диапазон численных величин. Второе, не менее важное обстоятельство, способствовавшее широкому применению децибел в акустике, объясняется замечательным свойством уха человека воспринимать звуки, интенсивность которых различается в миллионы раз. Громкость звука при оценке ее на слух возрастает примерно пропорционально логарифму интенсивности звука. Таким образом, уровни этих величин, выраженные в децибелах, довольно близко соответствуют громкости  $L_p$ , воспринимаемой ухом. Для большинства людей с нормальным слухом изменение громкости звука частотой 1 кГц ощущается при изменении интенсивности звука примерно на 26 %, т.е. на 1 дБ.

Если  $P_1$  и  $P_2$  – мощности двух произвольных источников звука, то громкость  $L_p$  определяется

$$L_p = 10 \lg \frac{P_2}{P_1},$$

или в случае заданных интенсивностей звука  $I_1$  и  $I_2$  двух этих источников соответственно имеем

$$L_J = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}. \quad (1.1)$$

Международным соглашением установлен нулевой уровень отсчета интенсивности звука –  $I_0=10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>. Эту ничтожную интенсивность, под действием которой амплитуда колебаний барабанной перепонки меньше размеров атома, условно принято считать порогом слышимости уха в области частот наибольшей чувствительности слуха. Совершенно ясно, что все слышимые звуки выражаются относительно этого уровня только положительными децибелами. Фактически порог слышимости для людей с нормальным слухом немного выше и находится в пределах от 5 до 10 дБ.

С учетом нулевого уровня формула (1.1) примет вид

$$L_J = 10 \lg \frac{I}{I_0}. \quad (1.2)$$

Значение интенсивности, вычисленное по формуле (1.2), принято называть уровнем интенсивности звука.

Подобным образом можно выразить и уровень звукового давления

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \quad (1.3)$$

где  $p$  – избыточное давление в среде по отношению к постоянному давлению  $p_0$ , существующему там до появления звуковых волн. В качестве нулевого уровня звукового давления  $p_0$  принято значение 20 мкПа.

Интенсивность  $I$  звука на расстоянии  $R$  от источника мощностью  $P$  определяется по формуле

$$I = \frac{P}{4\pi R^2}. \quad (1.4)$$

Уровень интенсивности  $L_{J2}$  того же источника на другом расстоянии  $R_2$  можно определить по формуле

$$L_{J2} = L_{J1} - 20 \lg \frac{R_2}{R_1}.$$

Если имеется несколько источников звука, то общий уровень интенсивности находится как сумма интенсивностей отдельных источников. Если уровень интенсивности одного из источников превышает уровни остальных более чем на 8 дБ, то можно учитывать только один этот источник, а действием остальных пренебречь.

Звуковое давление, меняющееся во времени по синусоидальному закону, человеческое ухо воспринимает как звук чистого тона. Более сложные периодические звуковые колебания воспринимаются на слух музыкальными тонами. Когда количество составляющих звука велико, а их частоты и амплитуды не связаны определенной зависимостью, то ухо воспринимает такой звук как шум. Большинство звуков имеют шумовой характер.

Звуки одинаковой интенсивности, но разных частот, и звуки разной интенсивности, но одинаковых частот, будут восприниматься по-разному. В связи с этим было введено понятие уровня громкости, которое определяет

уровень интенсивности звука с учетом частотных и динамических свойств уха. Единице, характеризующей уровень громкости, присвоено наименование – фон.

Окружающее пространство наполнено различными шумами. Оценка шума на слух всегда отличается от показаний приборов. Это связано с тем, что при равных уровнях громкости шума наиболее раздражающее действие на человека оказывают составляющие шума в диапазоне от 3 до 5 кГц.

Интенсивность звука представляет собой объективное физическое явление, которое может быть точно измерено. Громкость звука определяет эффект, который звук производит на слушателя, и является поэтому чисто субъективным понятием, так как зависит от состояния органов слуха человека и его личных свойств к восприятию.

Человек живет в среде, фактор шума которой играет не последнюю роль в его жизни. Доказано, что под влиянием шума, даже умеренной интенсивности, ухудшается работоспособность, особенно при умственном труде. Отрицательное влияние шума тем сильнее, чем выше его длительность воздействия и неоднородность спектрального состава в результате импульсных составляющих и отдельных включений чистого тона.

Длительное воздействие сильного шума с уровнем от 90 дБ и выше может вызвать у человека нарушения слуха, расстройство нервной системы и способствовать заболеваниям сердечнососудистой системы. Существует даже специальный термин «шумовая болезнь».

Для измерения шумовых характеристик используют специальные приборы – шумомеры. Шумомеры представляют собой автономный переносной прибор, позволяющий измерять непосредственно в децибелах уровни интенсивности звука в широких пределах – от 20 до 140 дБ.

Шумомеры имеют диапазон рабочих частот А, В, С и D, которые определяют различные частотные характеристики.

Характеристика А имитирует ухо примерно на уровне 40 фон и используется для измерения слабых шумов – до 55 дБ с простой частотной

зависимостью. Именно эту характеристику используют при многих измерениях, так как она хорошо согласуется с оценкой шума на слух при небольших уровнях громкости.

Характеристика В повторяет характеристику уха на уровне 70 фон и применяется при измерениях шумов в пределах от 55 до 85 дБ. Характеристика С используется в диапазоне от 40 до 8000 Гц при измерениях значительных уровней громкости – от 85 фон и выше. Характеристика D – вспомогательная, она представляет усредненную характеристику уха примерно на уровне 80 фон с учетом повышения его чувствительности в полосе от 1,5 до 8 кГц и применяется при оценке раздражающего действия шума большой интенсивности, например, самолетов.

При использовании шумомеров результаты измерений будут различаться в зависимости от частотной характеристики.

Санитарными нормами установлены пределы допустимого шума в различных помещениях. В зависимости от спектрального состава шума ориентировочная норма предельно допустимых уровней в дБ характеризуется следующими цифрами: высокочастотный шум от 800 Гц и выше – норма лежит в диапазоне от 75 до 85 дБ, среднечастотный от 300 до 800 Гц – от 85 до 90 дБ, низкочастотный (ниже 300 Гц) – от 90 до 100 дБ.

Установлены также суммарные уровни звука, измеренные по шкале А шумомера: жилые помещения – 30 дБ, аудитории и классы учебных заведений – 40 дБ, рабочие помещения административных зданий – 50 дБ, территории жилой застройки и площадки отдыха – 45 дБ.

В таблице 1.2 представлена оценка громкости на слух для различных источников шума.

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

В строительной или архитектурной акустике проводят расчеты залов различного назначения, определяя основные его параметры и характеристики.

Таблица 1.2 – Оценка громкости различных источников шума

Оценка громкости на слух	Уровень шума (уровень звукового давления), дБ	Источник и место измерения шума
Оглушительный	160	Повреждение барабанной перепонки Реактивные двигатели (вблизи) Болевой порог (звук воспринимается как боль) Гром над головой Шумный цех
	140-170	
	130	
	120	
	110	
Очень громкий	100	Симфонический оркестр Шумная улица
	90	
Громкий	70	Салон автобуса
		Крик
		Улица средней шумности Зал магазина
Умеренный	60	Спокойный разговор
Слабый	40	Шепот
		Читальный зал Шелест бумаги
Очень слабый	10	Тихий сад
	0	Порог слышимости

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

$$t_3 = \frac{l_{omp} - l_{np}}{0,34}, \quad (1.5)$$

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 1.2).

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 1.2 и 1.3).

Это устраняет неразборчивость звуков. При примыкании задней стены зала к потолку под углом  $90^\circ$  может возникнуть так называемое «театральное» эхо – отражение звука от потолка и стены в направлении к источнику звука, приходящее с большим запаздыванием. Для устранения этого недостатка изменяют угол между потолком и стеной (рисунок 1.3).

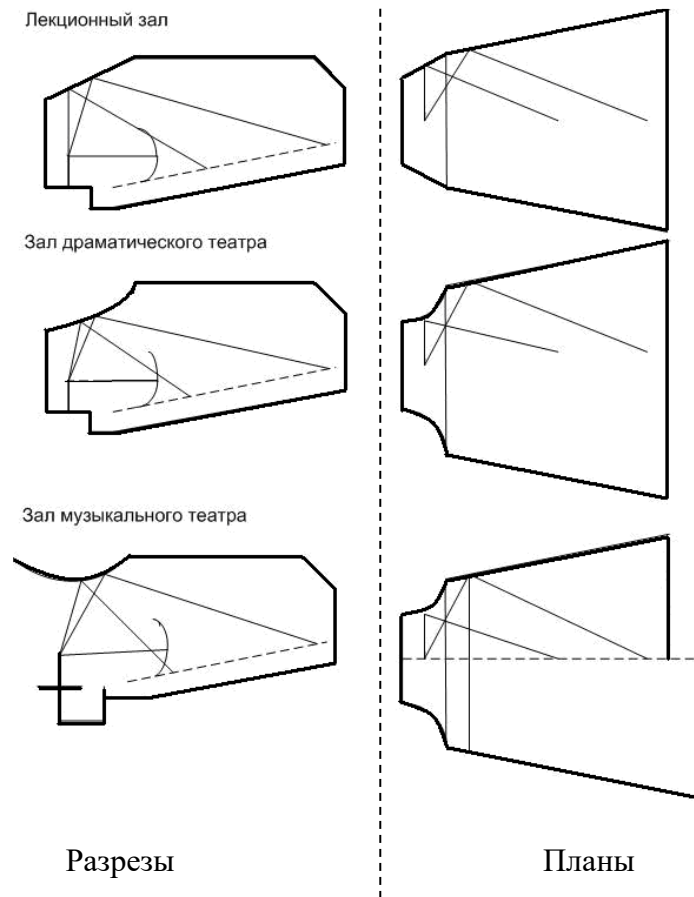


Рисунок 1.2 - Первые отражения от потолка, стен и отражателей для различных видов залов

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, приходящий по любому направлению звуковой энергии, постоянны.

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 1.4).

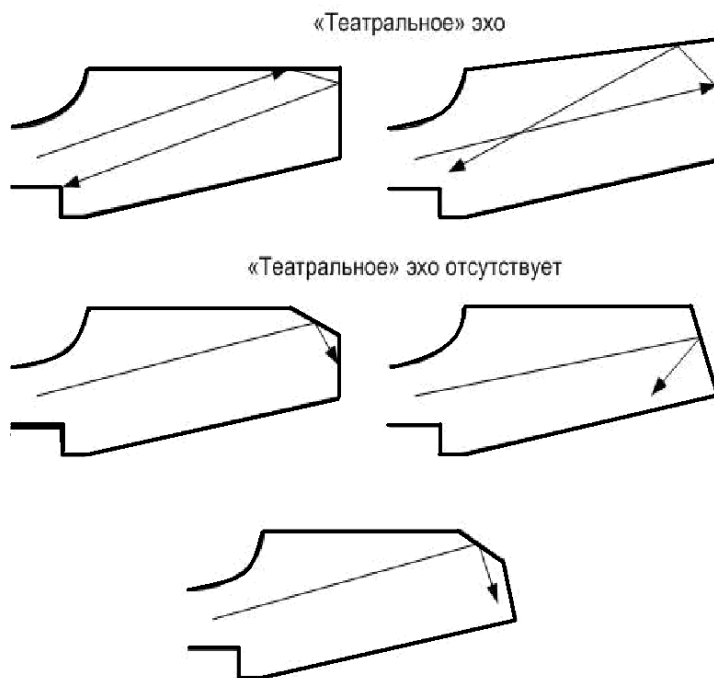


Рисунок 1.3 – Конструкция потолка и задней стены зала

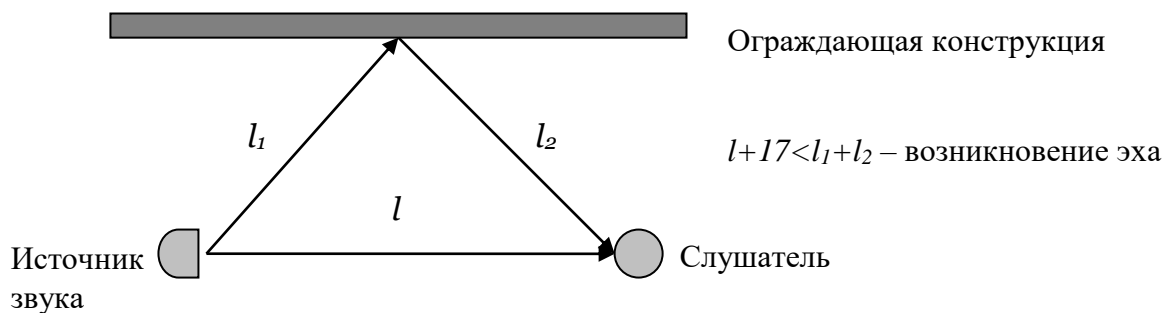


Рисунок 1.4 – Схема возникновения эха

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.

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 проверяется разборчивость речи.

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 1.3).

Таблица 1.3 – Рекомендуемые параметры различных залов

Вид зала	Максимальная вместимость, человек	Удельный объем, м <sup>3</sup> /человек	Максимальная длина (без авансцены), 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

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

$$1,3 \leq \frac{l}{e} \leq 1,6, \quad (1.6)$$

$$1,3 \leq \frac{e}{h} \leq 1,6.$$

Залы в плане обычно имеют форму трапеции с углом раскрытия боковых стен от  $5^\circ$  до  $12^\circ$ .

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).

На рисунке 1.5 представлена геометрия задней стены зала с балконом. Для его конструкции характерны следующие соотношения

$$a_1 / h_1 \leq 1,5, \quad (1.7)$$

$$a_2 / h_2 \leq 2,$$

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.

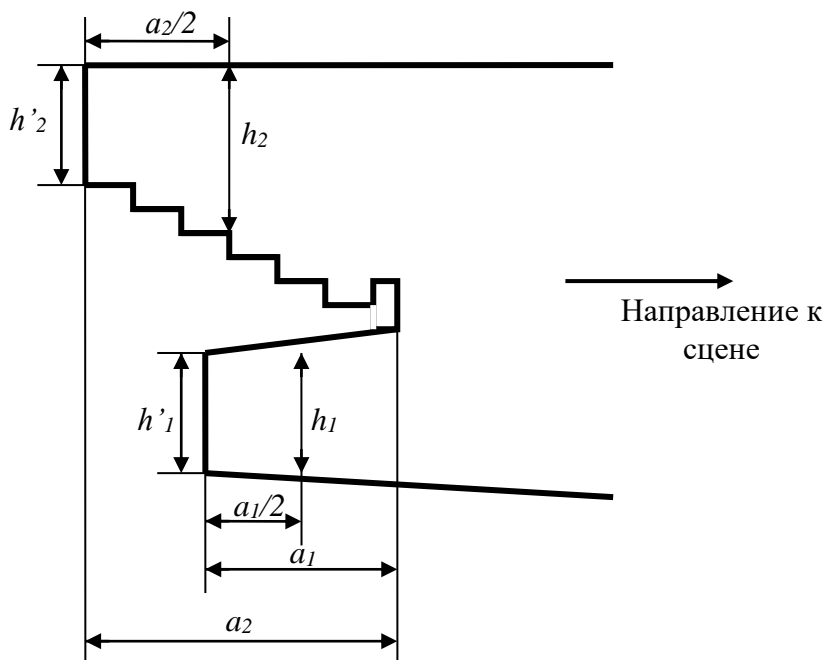


Рисунок 1.5 – Разрез части зала с балконом

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 1.5).

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.

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

На рисунке 1.6 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);  $\gamma$  – углы падения и отражения звукового луча.

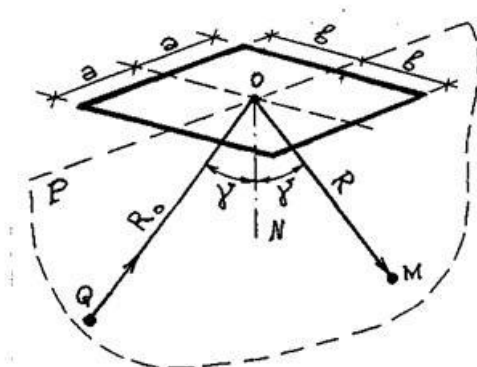
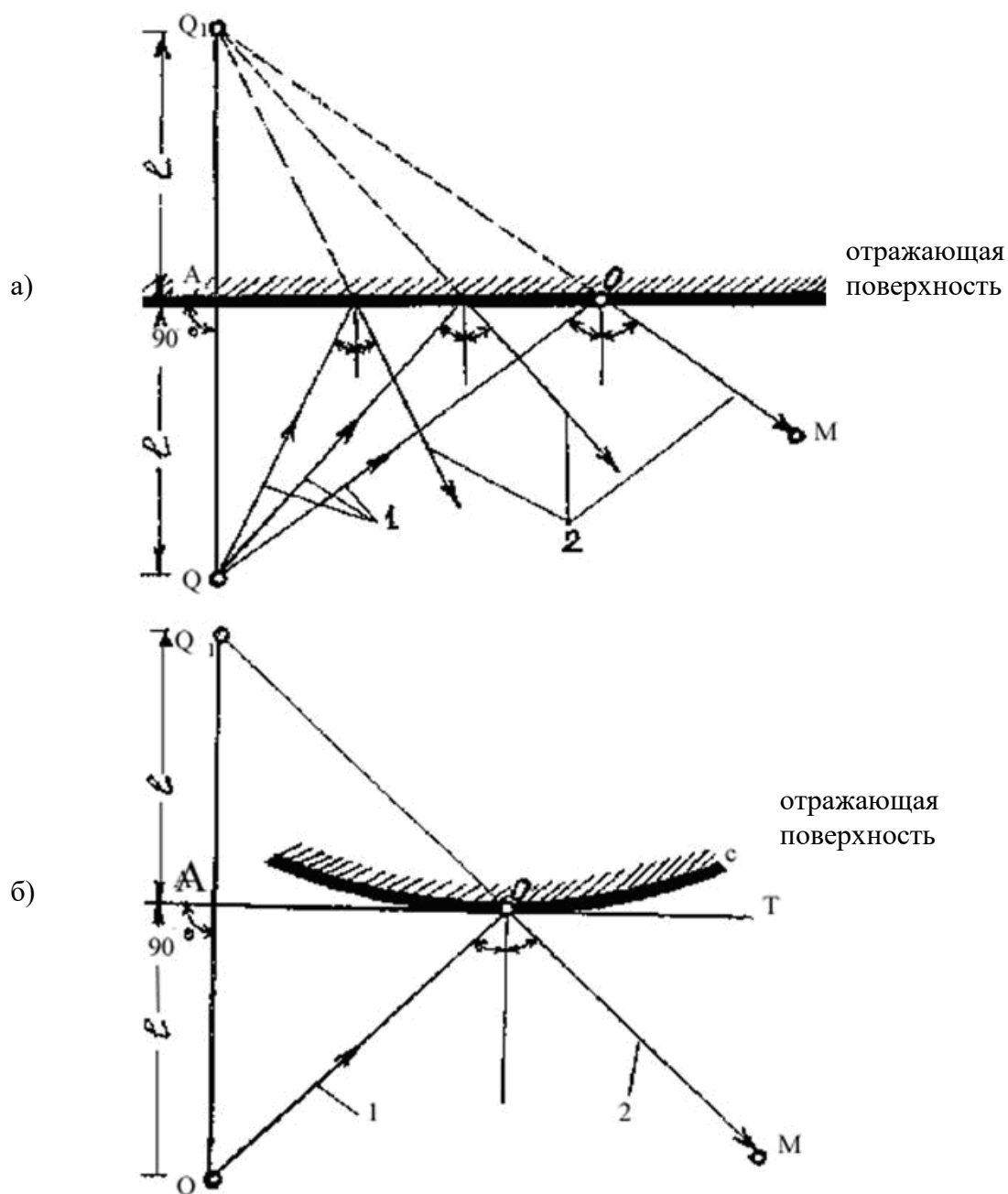


Рисунок 1.6 – Отражающая поверхность и ход звуковых лучей

При построении геометрических отражений от плоскости удобен прием, показанный на рисунке 1.7, 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.

Метод мнимых источников применим и при построении отражений от кривых поверхностей (рисунок 1.7, 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 источнику  $Q$  относительно касательной. Отрезок  $OM$  (продолжение прямой  $Q_1O$ ) после пересечения с поверхностью  $c$  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.



а - отражение от плоскости; б - отражение от кривой поверхности  
(1 – падающие на поверхность лучи, 2 - отраженные лучи)

Рисунок 1.7 – Построение геометрических отражений звуковых лучей  
с помощью мнимого источника

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.

## 2 Лабораторный практикум

### 2.1 Лабораторная работа № 5.8. Исследование звукоизоляции ограждающих конструкций

**Цель работы:** исследование прохождения звуковых волн через внутренние и наружные ограждающие конструкции и расчет звукоизоляции ограждающих конструкций при различных условиях распространения звука.

**Приборы и материалы:** шумомер, измерительная рулетка.

#### 1 Методика расчета звукоизоляции

Если передача звуковой энергии в изолируемое помещение происходит в результате колебания конструкции, вызванного воздействием различного давления воздуха, то такой шум называется воздушным. Пути передачи шума от источника в изолируемое помещение могут быть прямыми (непосредственно через конструкцию, на которую падает звуковая волна) и косвенными (проникновение шума через другие конструкции, прилегающие к первой, на которую падает звуковая волна).

Проходящая через ограждающую конструкцию звуковая энергия распределяется следующим образом: отражается, передается материалу конструкции, переходит в тепловую энергию, проходит без изменения через поры и неплотности в конструкции. Отношение энергии, прошедшей через конструкцию, к энергии, падающей на нее, называется коэффициентом звукопередачи  $\tau$ . Изоляция  $I$  от воздушного шума (звукоизоляция) без учета косвенной передачи звука и передачи через поры и неплотности определяется по формуле

$$I = 10 \lg \frac{1}{\tau}, \text{ дБ.}$$

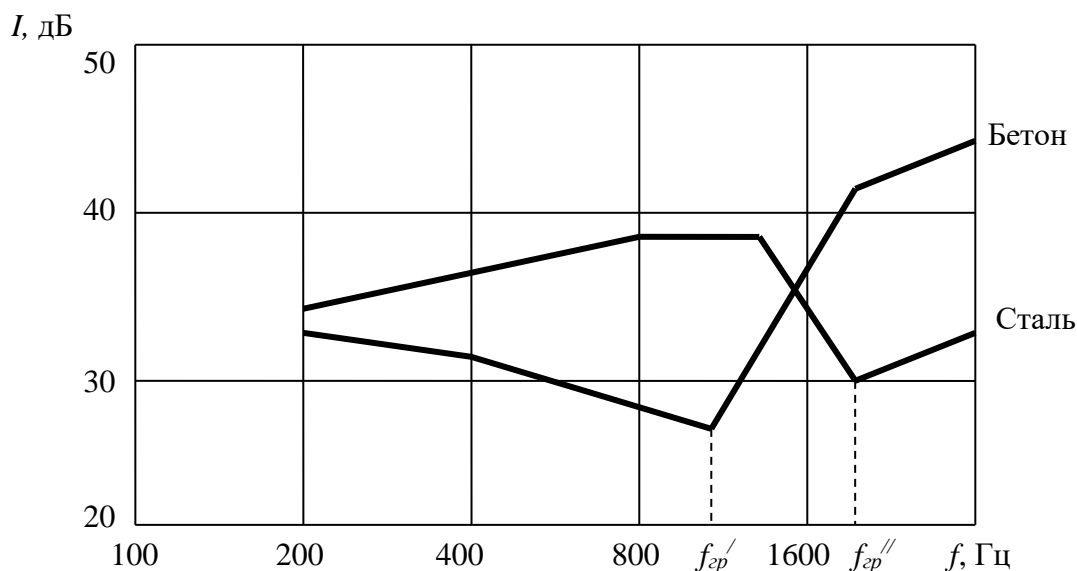
При  $\tau=0,01$  величина изоляции равна 20 дБ. Такую незначительную звукоизоляцию имеют двери между комнатами. Для обеспечения достаточной

звукоизоляции (порядка 50 дБ), которую должны иметь межквартирные стены и междуэтажные перекрытия, необходимо, чтобы через конструкцию проходило не более 0,00001 части звуковой энергии.

Изоляция от воздушного шума определяется в диапазоне частот от 100 до 3200 Гц. Этот диапазон разделяется на октавные полосы со средними частотами 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 Гц, каждая из которой разбивается на три части. По октавным частотам производят расчеты.

Ограждающие конструкции можно разделить на акустически однородные (один материал) и неоднородные (многослойные).

При передаче энергии звуковой волны поверхности однослойных конструкций в ней возникает колебательное движение, которое зависит от ее массы и частоты падающей волны. На определенных частотах длина изгибной волны (колебаний) может совпасть с длиной звуковой волны. Данное явление называется волновым совпадением. При волновом совпадении резко возрастает передача звука через конструкцию. Частота звуковой волны, при которой наблюдается данное явление, называется граничной частотой  $f_{зр}$  (рисунок 2.1).



$f_{зр'}$  — граничная частота для бетона;  $f_{зр''}$  — граничная частота для стали

Рисунок 2.1 – Частотные характеристики изоляции от воздушного шума

Средние значения звукоизоляции  $I_{cp}$  однородных конструкций приблизительно определяют в зависимости от их поверхностной плотности  $Q$ :  
при  $Q \leq 200$  кг/м<sup>2</sup> по формуле

$$I_{cp} = 13,5 \lg Q + 13, \quad (2.1)$$

при  $Q \geq 200$  кг/м<sup>2</sup> по формуле

$$I_{cp} = 23 \lg Q - 9. \quad (2.2)$$

Увеличение звукоизоляции и одновременное снижение массы конструкций решается созданием многослойных ограждений.

Конструкции с проемами (окнами и дверями) из-за меньшей поверхностной плотности и малой герметичности всегда имеют худшую звукоизоляцию. При этом общая звукоизоляция  $I_{общ}$  определяется по формуле

$$I_{общ} = I_{cp} - 10 \lg \frac{S + 10^{\frac{I_{cp}-I_1}{10}} S_1}{1 + \frac{S}{S_1}}, \quad (2.3)$$

где  $I_{cp}$  – среднее значение звукоизоляции глухой части конструкции, дБ;

$I_1$  – звукоизоляция проемов – окон или дверей, дБ;

$S$  – площадь глухой части конструкции (от общей площади вычитается площадь соответствующего проема), м<sup>2</sup>;

$S_1$  – площадь проемов, м<sup>2</sup>.

Например, снижение уровня звука наружными ограждениями со световыми проемами должно быть больше 24 дБ.

При наличии нескольких источников шума, расположенных за различными ограждающими конструкциями, общий уровень звукового давления  $L_{общ}$  в рассматриваемом помещении определяется по формуле

$$L_{общ} = 10 \lg \sum_n S_n 10^{\frac{L_n - I_{on}}{10}} - 10 \lg \sum_n \alpha_n S_n, \quad (2.4)$$

где  $L_n$  – уровни звукового давления за ограждающими конструкциями, дБ;

$I_{on}$  – звукоизоляция конструкций, дБ;

$\alpha_n$  – коэффициенты звукопоглощения конструкций;

$S_n$  – площади конструкций, м<sup>2</sup>;

$n$  – количество конструкций.

Приближенные значения звукоизоляции  $I_o$  ограждающих конструкций приведены в таблице 2.1. Примеры расчетов рассмотрены в дополнительном материале к лабораторной работе.

Таблица 2.1 – Звукоизоляция ограждающих конструкций

Вид ограждающих конструкций	$I_o$ , дБ
Наружная стена	50
Окно	30
Внутренняя стена	40
Дверь	20

## 2 Порядок выполнения работы

### Задание 1

1 Получить дополнительный материал к лабораторной работе и ознакомиться с инструкцией по эксплуатации шумомера.

2 Включить прибор и убедиться в появлении информации на экране.

3 По инструкции установить режим измерения.

4 Измерить звуковой уровень  $L_1$  при закрытой форточке, двери и тишине в лаборатории. Результат измерения занести в таблицу 2.2.

1. Далее измерения звуковых уровней производить в следующей последовательности:

1) при закрытой форточке, двери, но во время разговоров в лаборатории (показание  $L_2$ );

2) при открытой форточке, закрытой двери и тишине в лаборатории (показание  $L_3$ );

3) при открытой форточке, закрытой двери и во время разговоров в лаборатории (показание  $L_4$ );

4) при закрытых форточке и двери, тишине в лаборатории во время перемены (показание  $L_5$ );

5) при закрытой форточке, открытой двери, тишине в лаборатории во время перемены (показание  $L_6$ ).

6. Измерения по пунктам задания 4 и 5 повторить три раза, найти средние значения звуковых уровней и занести все результаты в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Измерение звукового уровня

№	Средний уровень звука, дБ					
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
1						
2						
3						
Сред. значен.						

7 Определить звукоизоляцию световых проемов  $I_c=L_3-L_1$  и дверного проема  $I_d=L_6-L_5$ .

## Задание 2

1 С помощью рулетки измерить линейные размеры помещения и вычислить площадь ограждающих конструкций. Значения площади записываются в таблицы 2.3, 2.4, 2.5 в соответствии с расчетом.

2 Определить звукоизоляцию стены с дверью (формулы 2.1-2.3). Результаты занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Вычисление звукоизоляции стены с дверью

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$a$ , м	$Q$ , кг/м <sup>2</sup>	$I_{cp}$ , дБ	$S$ , м <sup>2</sup>	$S_1$ , м <sup>2</sup>	$I_1$ , дБ	$I_{общ}$ , дБ

3. Определить звукоизоляцию от внешнего воздушного шума наружной стены со световыми проемами (формулы 2.1-2.3). Результаты занесите в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Вычисление звукоизоляции наружной стены со световыми проемами

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$v$ , м	$Q$ , кг/м <sup>2</sup>	$I_{cp}$ , дБ	$S$ , м <sup>2</sup>	$S_1$ , м <sup>2</sup>	$I_1$ , дБ	$I_{общ}$ , дБ

3. Рассчитать по формуле 2.4 общий уровень звукового давления  $L_{общ}$  в помещении. Уровни звукового давления  $L_n$  за ограждающими конструкциями определить по таблице 1.2, величины звуковой изоляции  $I_{on}$ : для наружной стены – из таблицы 2.4 ( $I_{общ}$ ), внутренней боковой стены – по таблице 2.1, внутренней стены с дверью – из таблицы 2.3 ( $I_{общ}$ ), для светового и дверного проемов – из пункта 7 первого задания ( $I_c$  и  $I_d$  соответственно).

Результаты занести в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Вычисление общего уровня звукового давления

Характеристики конструкций	$L_n$ , дБ	$I_{on}$ , дБ	$S_n$ , м <sup>2</sup>	$\alpha_n$	$L_{общ}$ , дБ
Ограждающие конструкции					
Наружная стена				0,02	
Внутренние боковые стены				0,02	
Внутренняя стена с дверью				0,02	
Окна				0,15	
Дверь				0,1	

4. На основе полученных в первом и во втором заданиях результатов сделать вывод о звукоизоляции исследуемого помещения.

### 3 Контрольные вопросы

- 1 Объясните возникновение звуковых волн.
- 2 От каких величин зависит скорость распространения звуковых волн в воздухе?
- 3 Объясните восприятие ухом человека различных по частоте звуковых колебаний.

4 Что такое децибел?

5 Назовите пределы частот звуковых волн, воспринимаемых человеком.

6 Напишите формулы для определения уровней интенсивности звука и звукового давления.

7 Каким образом звуковые колебания проходят через ограждающие конструкции?

8 Что такое граничная частота?

9 От чего зависит звукоизоляция ограждающих конструкций?

## **2.2 Лабораторная работа № 5.9. Акустический расчет залов различного назначения**

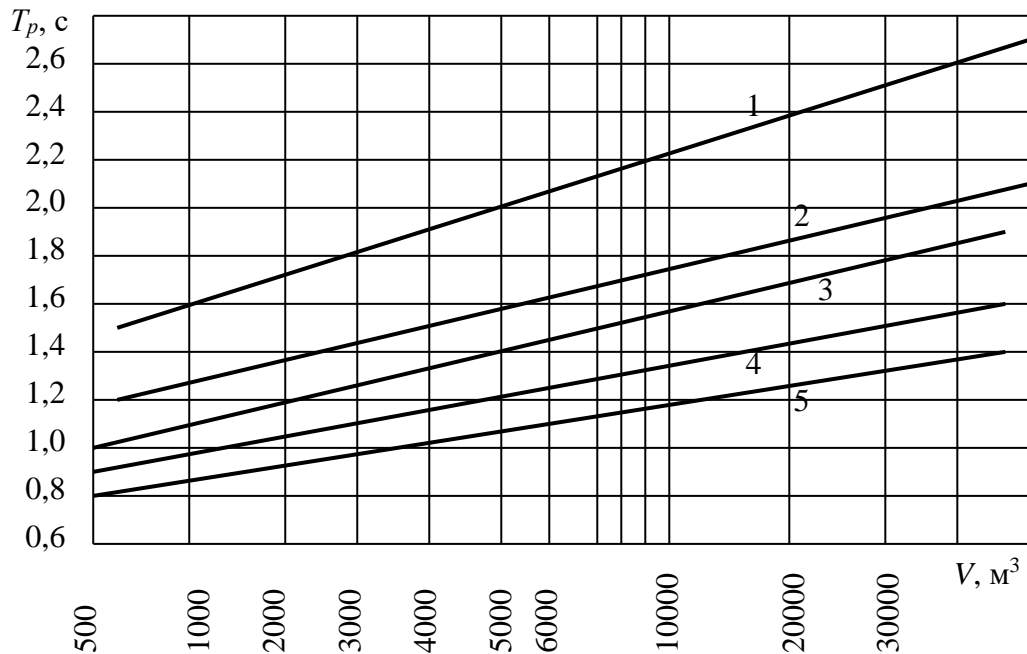
**Цель работы:** расчет акустических характеристик залов различного назначения и выбор соответствующего проектного решения.

### **1 Методика расчета акустических характеристик зала**

Если время запаздывания первых отражений определяется графическим способом (лучевой эскиз), то время реверберации рассчитывается по выбранным конструкциям зала. 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 2.2. 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 %.



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

Рисунок 2.2 – Рекомендуемое время реверберации на средних частотах

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).

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

Расчет времени реверберации проводится в следующем порядке.

1 Расчет общей эквивалентной площади звукопоглощения (ЭПЗ).

Общая ЭПЗ для выбранной частоты находится по формуле

$$A_{\text{общ}} = \sum \alpha_i S_i + \sum A_k + \alpha_d S_{\text{общ}}, \quad (2.5)$$

где  $\sum \alpha_i S_i$  – сумма произведений площадей  $S$  (м<sup>2</sup>) отдельных поверхностей на их коэффициент  $\alpha$  звукопоглощения для данной частоты ( $i$  – количество поверхностей);

$\sum A_k$  – сумма ЭПЗ слушателей и кресел, которая рассчитывается по формуле (2.6), м<sup>2</sup>;

$\alpha_d$  – 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;

$S_{\text{общ}}$  – площадь всех внутренних поверхностей помещения (стены, потолок, пол, сцена), м<sup>2</sup>.

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

$$\sum A_k = 0,7NA_c + 0,3NA_{\text{с/с}}, \quad (2.6)$$

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  $A_{б/c}$  – 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  $\alpha_{ср}$  звукопоглощения внутренней поверхности зала на выбранной частоте

$$\alpha_{ср} = \frac{A_{общ}}{S_{общ}}. \quad (2.7)$$

## 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

$$T = \frac{0,163V}{\varphi(\alpha_{ср})S_{общ} + nV}, \quad (2.8)$$

где  $V$  – объем зала, м<sup>3</sup>;

$\varphi(\alpha_{ср})$  – 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 (2.8) 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 План акустического расчета зала

1 Определение воздушного объема зала и его линейных размеров (формула 1.6, рисунки 1.2 и 1.3, таблицы 1.3 и 2.6).

2 Корректировка объема зала.

3 Расчет размеров балкона и подъема зрительных мест (формула 1.7, рисунок 1.5, таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Данные для акустического расчета зала

Параметры	Норматив
Удельный объем	Таблица 1.3
Угол раскрытия боковых стен	5-12°
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	8-9
-музыка	10-12
Теоретическое время реверберации	Рисунок 2.2
Допустимое время запаздывания, мс:	
-речь	20-25
-музыка	30-35
-многофункциональные залы	25-30

- 4 Построение плана и разреза зала.
- 5 Построение лучевого эскиза (рисунок 1.7). Корректировка конфигурации потолка, выбор членения и звукопоглощения.
- 6 Определение времени запаздывания звука (формула 1.5).
- 7 Расчет времени реверберации (пункт 1 данной лабораторной работы).
- 8 Вывод. Сравнение расчетных значений с нормируемыми. Описание акустики зала. Рекомендации по корректировке размеров зала, выбору отделочных материалов ограждающих конструкций и их членения.

В таблице 2.6 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 примеры расчета залов различного назначения.

### **3 Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Получить вариант задания для акустического расчета зала (таблица 2.7) и дополнительный материал к лабораторной работе.
2. Согласно пункту 2 данной лабораторной работы произвести акустический расчет зала.
3. В выводе сравнить расчетные и теоретические параметры и дать рекомендации по их корректировке, устранению недостатков (если необходимо), а также по выбору отделочных материалов ограждающих конструкций и внутреннему виду зала.

Таблица 2.7 – Варианты задания

№ варианта	Назначение зала	Число зрителей
1	Драматический театр	900
2	Лекционная аудитория	200
3	Зал для симфонической музыки	1000
4	Конференц-зал	100

#### **4 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.

#### **Библиографический список**

1. Архитектурная физика: Учеб. для вузов. Спец. «Архитектура» / В.К.Мицкевич, [и др.]. / Под ред. Н.В.Оболенского. – М.: Архитектура – С, 2005. – 448 с.
2. Жабыко, Е.И., Акустическое проектирование залов многоцелевого назначения: учеб. пособие/ Е.И., Жабыко, Н.И. Рублевская. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. – 89 с.
3. Детлаф, А.А. Курс физики: учеб. пособ. для студентов высших технических учебных заведений. Рек. МО. - 9-е изд., стер. / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. - М.: Академия, 2014. - 720 с.: ил.
4. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. – М.: Изд-во стандартов, 2011.
5. ГОСТ 12.1.036-81. Шум. Допустимые уровни в жилых и общественных зданиях. - М. 2001.

Учебное издание

**Тинина** Елена Валериевна

**СТРОИТЕЛЬНАЯ АКУСТИКА**

*Лабораторный практикум*

Подписано в печать \_\_\_\_\_ Тираж 30 экз.

Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета  
390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53