

Л.И.Макриненко

АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ



МОСКВА
СТРОЙИЗДАТ
1986

Макриненко Л.И. Акустика помещений общественных зданий. — М.: Стройиздат, 1986. — 173 с.: ил.

Изложены основные сведения об акустических характеристиках закрытых помещений. Описаны критерии оценки акустического качества помещений и методы масштабного моделирования, применяемые в архитектурной акустике. Рассмотрены вопросы проектирования с учетом акустических требований в зависимости от функционального назначения помещений. Приведены примеры акустических решений залов.

Для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций.

Табл. , ил., список лит.

Рецензент: зав. лабораторией архитектурной акустики Научно-исследовательского кинофотоинститута Госкино СССР (НИКФИ), канд. техн. наук *Э.Л. Виноградова*.

Печатается по решению секции литературы по строительным конструкциям редакционного совета Стройиздата.

ВВЕДЕНИЕ

В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1980—1990 годы и на период до 2000 года предусмотрено осуществлять в больших масштабах сооружения объектов культуры и спорта. Строительство новых и реконструкция существующих зданий общественного назначения как типовых, так и уникальных связано с необходимостью обеспечить в залах зданий оптимальные условия слышимости речи и звучания, что составляет одну из задач архитектурной акустики. Правильное акустическое решение особенно важно для залов, в которых основные мероприятия проходят без использования звуко-технических средств. Однако благоприятные акустические условия являются также весьма существенным фактором и в залах, где применяется система усиления звука.

На ранних этапах развития архитектурной акустики вопросы акустического решения залов в основном сводились к обеспечению в них оптимального времени реверберации. Однако последующие исследования и опыт эксплуатации залов показали, что учитывать только время реверберации недостаточно, особенно для оценки акустических условий в отдельных зонах слушательских мест. Это послужило толчком к разработке новых, локальных критериев акустического качества, связанных с диффузностью звукового поля, а также со структурой звуковых отражений. При этом разработка критериев стала вестись на основе исследований связи акустических параметров с субъективной оценкой. Параллельно с поисками новых акустических критериев и совершенствованием методов акустических измерений совершенствовались и методы акустических расчетов. Наряду с анализом распределения геометрических отражений появились методы расчета акустических параметров, учитывающие особенности начального участка реверберационного процесса. В связи с широким использованием техники моделирования возросли возможности прогнозирования акустического качества помещений. Дальнейшее развитие средств акустического решения помещений и на сегодняшний день является весьма актуальной задачей.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в области акустики помещений, задача обеспечения в залах комфортных акустических условий оказывается далеко не простой. Прежде всего это касается залов для музыкальных программ. Основная трудность здесь заключается в том, что пока еще не установлены достаточно прочные связи между акустическими характеристиками музыкальных залов и субъективной оценкой их акустического качества. Определенные сложности в решении акустики возникают также в связи с большими размерами залов, многоцелевым их использованием, а также необходимостью компромисса между акустическими и технологическими требованиями. Не следует также забывать, что успех акустического решения в значительной мере зависит от того, насколько учитываются при проектировании зала рекомендации акустиков. Невыполнение или частичное выполнение рекомендаций обычно приводит к акустическим недочетам зала.

В последние годы исследования в области акустики помещений получили особенно широкое развитие. В Советском Союзе ведущее место в проведении таких исследований принадлежит научно-исследовательскому институту строительной физики (НИИСФ). К числу наиболее важных следует отнести разработки института, связанные с методикой акустических измерений, особенно импульсных, с методикой масштабного и электроакустического моделирования, а также с вопросами прогнозирования и оценки акустического качества помещений различного назначения. Помимо научных

разработок большое значение имеет также непосредственное участие НИИСФ в проектировании и строительстве уникальных залов. Среди работ, выполненных с участием НИИСФ, следует отметить реконструкции большого зала Центрального Академического театра Советской Армии, залов Дома Союзов, Московской государственной консерватории, а также новые сооружения Универсального зала в Гаване, зала Московского детского музыкального театра, залов Дворца культуры в Зеленограде, спортивных залов "Олимпиады-80" и ряд других объектов.

В предлагаемой книге, учитывая современное состояние архитектурной акустики, сделана попытка осветить круг вопросов, связанных с обеспечением акустического комфорта в зальных помещениях общественных зданий. Рассмотрены акустические характеристики помещений, на основе которых разработано большинство объективных акустических критериев. Подробно проанализированы методы оценки акустического качества помещений для речевых и музыкальных программ. Значительное место в книге отведено методам и средствам акустического проектирования помещений, включая применение масштабного моделирования. Приведены примеры акустических решений залов, осуществленных в натуре.

Автор выражает глубокую признательность рецензенту канд. техн. наук *Э.Л. Виноградовой* за ценные замечания и советы.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ

Главной задачей архитектурной акустики является определение таких акустических характеристик звукового поля, обеспечение которых при проектировании помещения гарантировало бы его хорошую акустику. Правильно отражая поведение звука в замкнутом пространстве, эти характеристики должны иметь хорошую связь как с архитектурно-строительными параметрами помещения, так и с субъективной оценкой условий слухового восприятия звуковых программ. Звуковые процессы в помещениях рассматриваются, в основном, с трех теоретических позиций, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Первая — статистическая теория базируется на предположении идеально диффузного звукового поля в помещении. Основными статистическими величинами, используемыми в этой теории, являются средняя длина и среднее время пробега звука, а также средний коэффициент звукопоглощения. В результате развития статистической акустики разработан ряд расчетных методов, прочно вошедших в практику акустического проектирования. Прежде всего речь идет о классических формулах Сэбина, Эйринга и Миллингтона. В то же время следует отметить, что статистическая теория не учитывает особенностей звукового поля в данной точке помещения и слабо связана с его формой.

Вторая теория — геометрической акустики наиболее полно учитывает форму помещения. Разработанные на ее основе методы главным образом использовались для анализа распределения первых отражений от поверхностей помещения и служили важным дополнением к статистической теории. В последние годы геометрическая акустика (метод мнимых источников и метод прослеживания звуковых лучей) в сочетании с вычислительной техникой применяется также для расчета ряда акустических характеристик помещения, в частности его импульсного отклика. Однако при всей перспективности теории геометрической акустики ее применение ограничено, так как она не учитывает дифракционных явлений, неизбежных при отражении звука в реальных помещениях.

Третьей, физически наиболее точной является волновая теория акустики помещений. В соответствии с волновой теорией воздушный объем помещения рассматривается как линейная колебательная система с распределенными параметрами. Развитие этой теории способствовало более глубокому пониманию влияния помещения на излучаемый в нем сигнал. К сожалению, аналитическое решение волнового уравнения возможно только для помещений очень простых форм и при идеализации граничных условий. В случае реальных и сложных по форме помещений возникают практически непреодолимые трудности, связанные с необходимостью учета фактических условий отражения, поглощения и рассеяния звука на их границах, а также физических свойств звукового сигнала.

Отмеченные недостатки теоретических подходов к анализу звуковых процессов в помещениях, а также бурное развитие электроники привели к тому, что в архитектурной акустике очень важное место заняли экспериментальные методы исследования акустических характеристик помещений. На современном этапе развития архитектурной акустики основными характеристиками являются структура звуковых отражений, время реверберации и диффузность звукового поля.

1.1. СТРУКТУРА ЗВУКОВЫХ ОТРАЖЕНИЙ

Среди акустических характеристик зальных помещений наиболее важной является структура звуковых отражений, определяемая их уровнями и запаздыванием по отношению к прямому звуку, а также направлением прихода в точку приема. Как показали исследования, выполненные в СССР и за рубежом в последние десятилетия, структура отражений (особенно ранних) оказывает решающее влияние на качество восприятия как речевых, так и музыкальных программ. Эта характеристика, являясь локальной, тесно связана со всеми архитектурными параметрами помещения: с его размерами, формой, очертаниями и отделкой внутренних поверхностей. Развитие методов акустических измерений с использованием вычислительной техники позволило детально исследовать структуру звуковых отражений на основе регистрации импульсных откликов помещений.

В общем виде импульсный отклик помещения $p(t)$ определяется по формуле интеграла свертки:

$$p(t) = p_0(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_0(\tau) h(t - \tau) d\tau, \quad (1.1)$$

где $p_0(t)$ — входной сигнал (излучаемый в помещение звуковой импульс); $h(t)$ — импульсная переходная функция помещения (его реакция на δ -импульс); τ — переменная интегрирования.

Как известно, свойства линейной системы, какой является помещение, полностью описываются ее импульсной переходной функцией. Для определения импульсного отклика по формуле (1.1) в качестве входного сигнала могут быть приняты также человеческая речь или музыка. Если известна импульсная характеристика помещения, то осуществив с помощью средств вычислительной техники операцию, описываемую формулой (1.), мы можем получить выходной сигнал и прослушать его. Однако определение импульсной переходной функции $h(t)$ сталкивается с большими трудностями. Отмеченные недостатки существующих теоретических подходов не позволяют рассчитать эту характеристику для реального помещения. Экспериментальное определение $h(t)$ неосуществимо, так как излучить в помещение δ -импульс практически невозможно. В то же время импульсный отклик $p(t)$, расчет которого также затруднителен, может быть определен довольно просто в результате импульсных измерений.

Принцип проведения импульсных измерений сам по себе достаточно прост. Воздушный объем помещения возбуждается коротким звуковым импульсом, источник которого обычно располагается на сцене или на эстраде. Сигнал, принятый микрофоном в исследуемой точке помещения, усиливается и подается на осциллограф или записывается на магнитофон для последующей обработки. Импульсный отклик в данной точке помещения дает нам последовательность прихода импульсов, соответствующих прямому звуку и отдельным отражениям от поверхностей помещения. Распределение этих импульсов во времени определяется геометрией помещения и координатам точек приема и источника звука, а амплитуда и спектральный состав — звукопоглощающими и звукорассеивающими свойствами внутренних поверхностей. При импульсных измерениях (особенно в моделях помещений) нетрудно учесть и направление прихода наиболее интенсивных импульсов. Таким образом, с помощью импульсных измерений можно получить достаточно полное представление о структуре звуковых отражений в данной точке помещения.

Помимо связи с архитектурными параметрами помещения импульсные измерения позволяют учесть нестационарный характер натуральных звучаний (речь, музыка), поэтому для оценки акустического качества помещения более оправдано использование его импульсного отклика, нежели характеристик звукового поля, измеренных в стационарном режиме. Тем более, что многие из этих характеристик могут быть получены на основе импульсных измерений. Так, например, частотная характеристика передачи помещения, обычно измеряемая с помощью стационарных звуковых сигналов, может быть получена путем преобразования Фурье импульсного отклика. Импульсные измерения наиболее удобны для проведения испытаний уменьшенных моделей помещений (см. п. 4.5).

Характер импульсного отклика помимо свойств помещения (или его модели) будет также зависеть от параметров измерительного импульса и от характеристик приемника звука, в качестве которого используется микрофон со сферической диаграммой направленности. В зависимости от задачи импульсных измерений приемником может быть и направленный микрофон или микрофон головы человека со встроенными в нее микрофонами (искусственная голова). Интерференционные эффекты, существенно влияющие на структуру отклика, в основном, связаны с типом входного сигнала. Немаловажную роль в изменении характера структуры могут играть неидеальные частотные и переходные характеристики приемно-излучающих трактов.

Для возбуждения звукового поля помещения чаще всего используются широкополосные импульсы взрывного типа (выстралы, искровые разряды, разрывы тонких оболочек). Блок-схема импульсных измерений с использованием импульсов взрывного типа показана на рис. 1.1. Для регистрации отклика в настоящее время повсеместно применяются запоминающие осциллографы. При

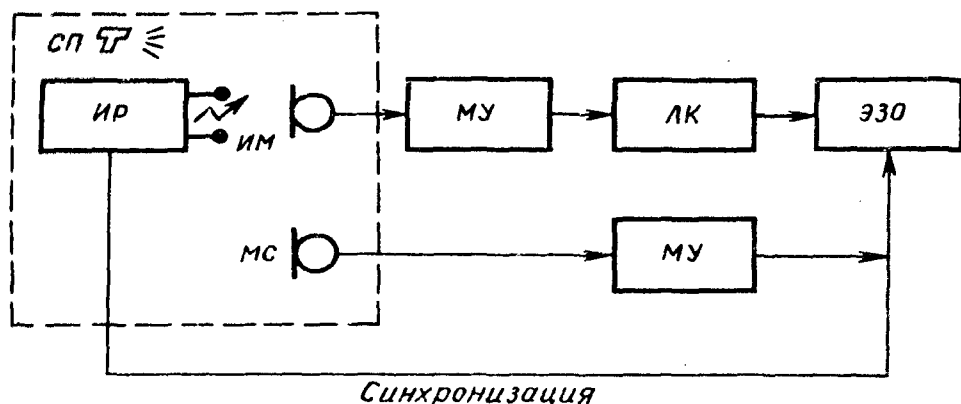


Рис. 1.1. Блок-схема импульсных измерений с использованием импульсов взрывного типа

СП — стартовый пистолет; ИР — искровой разрядник; ИМ — измерительный микрофон; МУ — микрофонный усилитель; ЛК — логарифмирующий каскад; ЭЗО — электронный запоминающий осциллограф; МС — микрофон синхронизации

использовании в качестве источника стартового пистолета запуск (синхронизация) ждущей развертки осциллографа осуществляется с помощью дополнительного микрофона, а в случае искрового разрядника для запуска обычно предусматривается специальная схема. На рис. 1.2 и 1.3 показаны форма и спектр звукового импульса, возникающего при выстреле из стартового пистолета. В качестве источника широкополосных импульсов может также использоваться громкоговоритель, который должен иметь сильное демпфирование резонансов подвижной системы для излучения коротких импульсов.

В зависимости от задачи измерений импульсы могут иметь соответствующую направленность и спектр. Например, при измерениях в речевых помещениях — направленность человеческого голоса и максимум спектра в области 1 кГц. При измерениях в музыкальных помещениях источник звука должен давать или ненаправленные импульсы или импульсы с характеристикой направленности отдельных музыкальных инструментов. Формирование спектра и направленности легче осуществить у импульсов, излучаемых громкоговорителем. Эти импульсы, кроме того, более стабильны.

Применение широкополосных импульсов малой длительности позволяет получить хорошее разделение отражений во времени и свести к минимуму интерференционные эффекты между отдельными отражениями. Однако при широкополосных импульсах практически невозможно осуществить частотный анализ структуры отражений. При фильтрации импульсного отклика структура отражений искажается за счет переходного процесса фильтра. Использование фильтра возможно только в том случае, если он

Рис. 1.2. Схема звукового импульса, создаваемого выстрелом из стартового пистолета

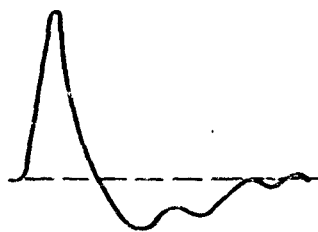
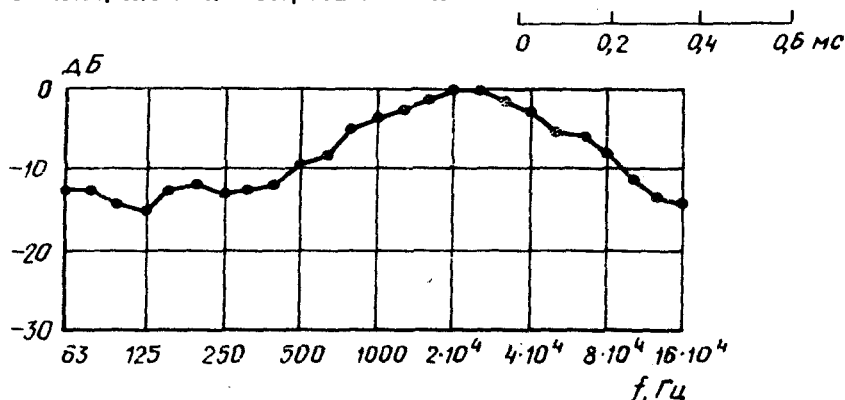


Рис. 1.3. Спектр звукового импульса, создаваемого выстрелом из стартового пистолета



имеет достаточно широкую полосу пропускания. Взрывные импульсы проходят через полосовые фильтры без искажения при соблюдении следующего соотношения между длительностью импульса $\tau_{\text{и}}$ и шириной полосы $\Delta f_{\text{и}}$:

$$\Delta f_{\text{и}} \geq \frac{4}{\tau_{\text{и}}} \quad (1.2)$$

Например, для искрового разряда ($\tau_{\text{и}} = 0,25$ мс) ширина полосы $\Delta f_{\text{и}} \geq 16$ кГц, для импульса пистолетного выстрела ($\tau_{\text{и}} = 0,5$ мс) $\Delta f_{\text{и}} \geq 8$ кГц и для импульса громкоговорителя ($\tau_{\text{и}} = 1$ мс) $\Delta f_{\text{и}} \geq 4$ кГц. При такой ширине полос частотный анализ уже теряет смысл, поэтому для частотного анализа структуры отражений используются узкополосные импульсы, основная энергия которых сосредоточена в пределах достаточно узкой полосы частот. Длительность таких импульсов значительно больше, чем длительность широкополосных импульсов. Следует отметить, что ширина спектра импульса $\Delta f_{\text{и}}$ и его длительность $\tau_{\text{и}}$ связаны уравнением неопределенности $\Delta f_{\text{и}} \tau_{\text{и}} = 1$. Чем больше длительность импульса, тем более он узкополосный. Однако при увеличении длительности импульса ухудшается временное разделение отражений, а за счет наложения отраженных импульсов друг на друга возникает интерференция между ними. Особенно сильно сказывается интерференция при использовании отрезков гармонического сигнала. Поэтому выбирая тип узкополосного импульсного сигнала, приходится искать компромисс между возмож-

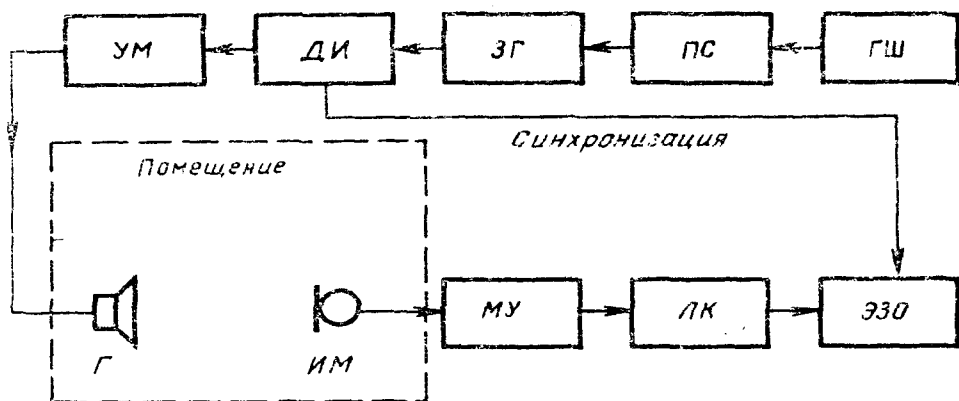


Рис. 1.4. Блок-схема импульсных измерений с использованием ЧМ импульсов

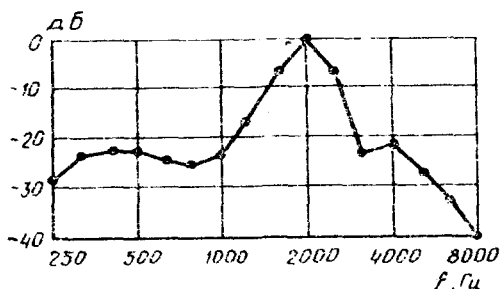
ГШ — генератор шума; ПС — полосовой спектрометр; ЗГ — звуковой генератор; ДИ — датчик импульсов; УМ — усилитель мощности; Г — громкоговоритель; ИМ — измерительный микрофон; МУ — микрофонный усилитель; ЛК — логарифмирующий каскад; ЭЗО — электронный запоминающий осциллограф

ностями временного и частичного разделения, при этом импульс должен обеспечивать минимальные интерференционные эффекты.

Среди ряда предложений, касающихся типа узкополосного импульса, следует отметить новый тип сигнала [4], представляющий собой отрезок гармонического колебания, модулированного по частоте случайным сигналом — фильтрованным белым шумом. Формирование частотно-модулированных (ЧМ) импульсов осуществляется следующим образом. широкополосный шум поступает на вход спектрометра, затем 1/3-октавные полосы шума подаются на вход частотного модулятора звукового генератора, на выходе которого получается модулированное гармоническое колебание. Далее из этого сигнала с помощью специального датчика вырезаются импульсы длительностью 10 мс с тактовым интервалом, превышающим время реверберации данного помещения. Эти импульсы усиливаются и излучаются в исследуемое помещение с помощью ненаправленного громкоговорителя. Приемная часть измерительного тракта состоит из ненаправленного микрофона, микрофонного усилителя, логарифмирующего каскада и запоминающего осциллографа, на экране которого фиксируется огибающая импульсного отклика помещения, полученная путем наложения 4–5 реализаций (осциллограмм). Использование огибающей отклика связано с тем, что из-за случайного характера модуляции отдельные осциллограммы, снятые при излучении ЧМ импульсов, несколько отличаются друг от друга. Блок-схема импульсных измерений с использованием ЧМ импульсов представлена на рис. 1.4. Необходимо отметить, что процедура измерений значительно упрощается, если в излучающем тракте использовать магнитные записи ЧМ импульсов.

Предложенный тип сигнала является достаточно узкополосным.

Рис. 1.5. Спектр звукового ЧМ импульса



Уровень спектральных составляющих ЧМ импульса в 1/3-октавной полосе, соответствующей несущей частоте, по крайней мере на 3 дБ выше уровня спектральных составляющих в соседних полосах частот. В виде примера на рис. 1.5 показан спектр ЧМ импульса (по звуковому давлению) для несущей частоты 2 кГц. Частотно-модулированные импульсы, как показали результаты измерений в натуре и в масштабных моделях, обеспечивают значительное снижение интерференции по сравнению с детерминированными сигналами (тон-импульсы, отклики полосовых фильтров). Некоторым недостатком метода является достаточно большая длительность импульса, затрудняющая разделение отражений во времени. Такая длительность, однако, не мешает при анализе структур с ярко выраженными отражениями или группами отражений (эхо, порхающее эхо). В этих случаях использование импульсов оказалось особенно ценным.

В настоящее время существуют два подхода к анализу структуры отражений, получаемой на основе импульсного отклика. Первый — это визуальный анализ структуры (импульсной осциллограммы), получаемой на экране осциллографа. Причем возможны три типа регистрации импульсного отклика: непосредственная регистрация отклика $p(t)$, регистрация квадрата отклика $p^2(t)$ и, наконец, получение на экране интегральной характеристики отклика:

$$E_{\tau_0}(t) = \frac{1}{\tau_0} \int_{t-\tau_0}^t p^2(\tau) d\tau, \quad (1.3)$$

где τ_0 — постоянная человеческого слуха, равная 35 мс.

На рис. 1.6 схематически изображены все три типа регистрации одного и того же импульсного отклика. Путем введения в приемный тракт логарифмирующего каскада осциллограммы откликов можно получить в логарифмическом масштабе. Визуальная оценка осциллограмм требует достаточно большого опыта, поэтому результат ее в определенной степени субъективен. Тем не менее такая оценка широко распространена в практике импульсных акустических исследований. Импульсная осциллограмма позволяет опытному специалисту судить об акустическом качестве места, на котором она получена. На основании осциллограмм могут быть выявлены также такие акустические дефекты, как эхо и порхаю-

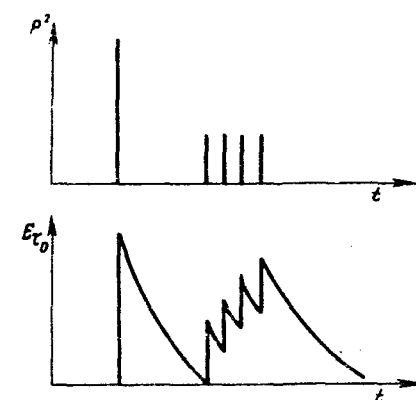
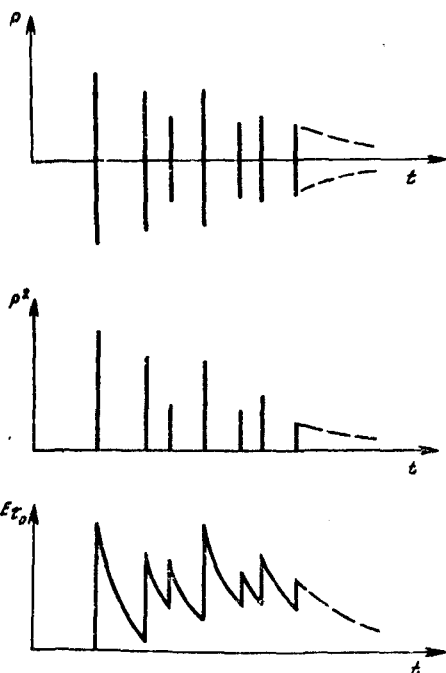


Рис. 1.7. Оценка опасности возникновения эха с помощью осциллограммы E_{τ_0}

Рис. 1.6. Типы регистрации импульсного отклика

щее эхо. При оценке явления эта особенно полезным оказываются осциллограммы $E_{\tau_0}(t)$. Как показано на рис. 1.7 поздние отражения небольшой интенсивности в силу инерции человеческого слуха суммируются и могут вызвать эхо.

Второй подход к анализу импульсных откликов связан с их количественной оценкой. Наибольшее число критериев определяется на основании функции

$$E(t) ; \int_0^t p^2(\tau) d\tau, \quad (1.4)$$

которая равна сумме квадратов звуковых давлений отдельных отражений, поступивших в точку приема к моменту времени t . Процедура, описываемая выражением (1.4), ранее осуществлялась с помощью аналоговых средств, требовавших разработки специальных электронных схем. В последние годы в зарубежной практике для нахождения $E(t)$, как правило, используется вычислительная техника, обеспечивающая оперативность обработки импульсных откликов и возможность непосредственного получения данных в виде таблиц и графиков.

Для цифровой обработки импульсных откликов в НИИСФ создан специальный комплекс на базе мини-ЭЦВМ "Электроника-100/и". Комплекс, блок-схема которого показана на рис. 1.8, работает следующим образом. Записанный на магнитофон сигнал импульсного отклика через согласующий усилитель и фильтр низких частот поступает на вход аналого-цифрового преобразователя

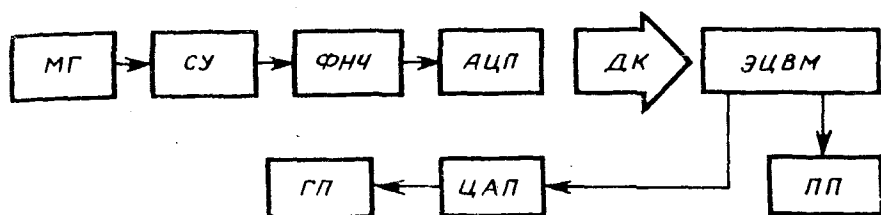


Рис. 1.8. Блок-схема комплекса цифровой обработки импульсных откликов

МГ — магнитофон; СУ — согласующий усилитель; ФНЧ — фильтр низких частот; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ДК — двоичный код, 11 разрядов; ЭЦВМ — электронная цифровая вычислительная машина "Электроника-100/и"; ГП — графопостроитель или самописец уровня; ЦАП — аналого-цифровой преобразователь; ПП — вывод на перфоленду и печать

(АЦП), в котором мгновенное значение напряжения, пропорциональное звуковому давлению, преобразуется в цифровой двоичный код. Преобразование производится периодически через интервалы времени дискретизации, задаваемые специальной программой, которая также предусматривает размещение массива данных в памяти ЭЦВМ. На начальном этапе работы комплекса период дискретизации был выбран равным 65,5 мкс, верхняя граничная частота анализируемого сигнала составляла 7620 Гц, а его максимальная длительность 1,5 с. Такие параметры в большинстве случаев вполне пригодны для обработки импульсных откликов, которая в созданном комплексе проводится по отдельной программе после размещения данных в памяти ЭЦВМ. Результаты обработки, в частности значения функции $E(t)$, выводятся на перфоленду и цифropечатающее устройство. Кроме того, с помощью аналого-цифрового преобразователя (ЦАП) можно вывести на самописец или графopостроитель функцию $E(t)$, а также анализируемый отклик $p(t)$ и отклик, возведенный в квадрат, $p^2(t)$. Значения функции $E(t)$ даются по отношению к полной энергии импульсного отклика

$$E_{\infty} = \int_0^{\infty} p^2(t) dt \approx \int_0^{1500 \text{ мс}} p^2(t) dt. \quad (1.5)$$

Обычно полной энергией отклика считается $E_{\infty} \approx \int_0^T p^2(t) dt$, где T — время реверберации помещения. Однако время, за которое накапливается практически полная энергия отклика, может быть значительно меньше T . Нетрудно установить, что при условии экспоненциальности реверберации 99% всей энергии поступает в точку приема за время, приблизительно равное 0,33 T . Таким образом, при длительности обработки сигнала 1,5 с практически полную энергию отклика можно получать даже при $T = 4,5$ с. Функция $E(t) / E_{1500}$ с увеличением времени возрастает, достигая единицы при $E(t) = E_{1500}$.

На рис. 1.9 в виде примера показана начальная часть этой функции, полученная при обработке на комплексе ЭЦВМ "Электрони-

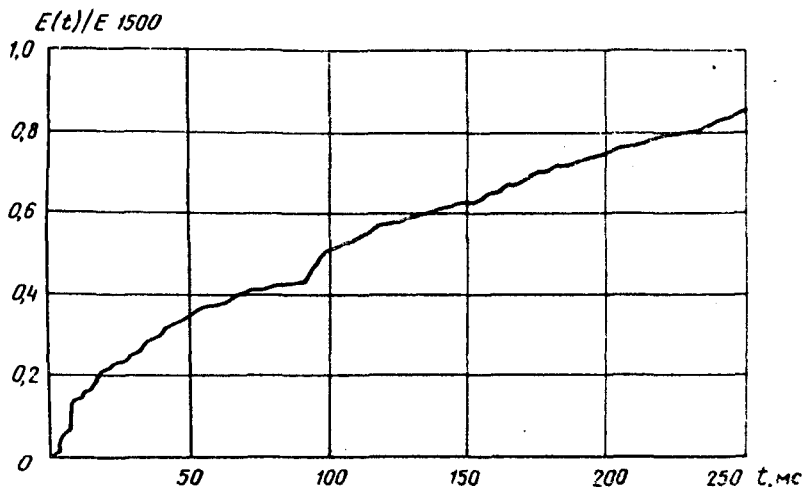


Рис. 1.9. Кривая нарастания энергии импульсного отклика

ка-100/и" импульсного отклика, снятого в одной из концертных студий Московского радиодома при излучении ЧМ импульсов с несущей частотой 500 Гц. На основе функции $E(t) / E_{1500}$ можно вычислить большинство импульсных критериев акустического качества. Критерии эти при работе комплекса вычисляются автоматически и выдаются на цифропечатающее устройство. Функция $E(t) / E_{1500}$, обычно называемая кривой нарастания энергии импульсного отклика, наглядно показывает формирование звукового поля в данной точке помещения. Нарастание энергии импульсного отклика может быть представлено в логарифмическом масштабе.

1.2. ВРЕМЯ РЕВЕРБАЦИИ

Время реверберации, введенное Сэбином еще в конце прошлого века, до сих пор остается одной из важнейших (хотя и не решающих) акустических характеристик помещения. Не давая достаточной информации об условиях слышимости на отдельных местах зала, время реверберации хорошо характеризует общую гулкость помещения. Ценным свойством времени реверберации является практическая возможность его успешного расчета при акустическом проектировании помещения. Необходимость определения времени реверберации возникает не только при оценке акустического качества залов, но и при решении других задач строительной акустики (измерение коэффициентов звукопоглощения, разработка и оценка мероприятий по шумозащите).

Широкое использование времени реверберации в акустике помещений привело к стандартизации метода измерения этого парамет-

ра. Наряду с международным стандартом ИСО 3382-75 во многих странах имеются свои национальные стандарты. В СССР измерение реверберации также регламентировано стандартом (ГОСТ 24146-80 "Зрительные залы. Метод измерения времени реверберации"). В соответствии с ИСО 3382-75 для применения импульсов время реверберации помещения должно быть не менее 1,5 с на частотах до 1000 Гц. Следует отметить, что в отечественном стандарте нет этого ограничения, так как данные измерений времени реверберации на импульсных и шумовых сигналах в нормируемом диапазоне частот имеют очень высокую корреляцию (коэффициент корреляции $R_k \geq 0,96$, доверительный интервал при доверительной вероятности 0,95 составляет 0,93-0,99).

Стандартное время реверберации, базирующееся на классическом определении Сэбина, хотя и является наиболее распространенным акустическим параметром, однако, как уже отмечалось, не объясняет различий в акустических условиях на отдельных местах зала. Флюктуации реверберационных кривых при стандартном методе измерения затрудняют их анализ, для получения достаточной точности при оценке времени реверберации приходится усреднять большое количество кривых. Кроме того, при стандартном методе исключается начальный участок реверберационного процесса (от 0 до минус 5 дБ), весьма важный для субъективной оценки реверберации. Все эти факторы побудили исследователей наряду с поисками параметров, основанных на различных способах обработки обычных реверберационных кривых, искать принципиально новые методы измерения времени реверберации. Наиболее удачным здесь следует признать "метод интегрированного импульсного отклика", теоретически обоснованный Шредером [42]. Суть теории Шредера состоит в том, что среднее по ансамблю квадратичных функций реверберационных спадов при шумовом измерительном сигнале $\langle S^2(t) \rangle$ во время t после начала реверберации равно в данной точке помещения квадрату его импульсного отклика на тонимпульс $g^2(t)$, интегрированному во времени от t до ∞ . Условием является идентичность спектров мощности тонимпульса и шумового измерительного сигнала. Математически это выражается следующим образом:

$$\langle S^2(t) \rangle = N_s \int_t^{\infty} g^2(\tau) d\tau = N_s \int_{-\infty}^{-t} g^2(-\tau) d\tau, \quad (1.6)$$

где $S(t)$ — сигнал, принятый в данной точке помещения при использовании в качестве измерительного сигнала фильтрованного белого шума; N_s — мощность шумового сигнала на единицу ширины полосы; $g(t)$ — комбинированный импульсный отклик, включающий фильтр, усилители, преобразователи и помещение между точкой излучения и точкой приема.

Метод интегрированного импульсного отклика по сравнению с прежними методами имеет то преимущество, что в результате одного измерения получают свободные от флюктуаций, точно воспроизводимые кривые реверберации $\langle S^2(t) \rangle$, которые не

зависят от системы регистрации. На основе таких кривых можно с большой точностью получить время реверберации и другие параметры реверберационного процесса. Правда, для практической реализации выражения (1.6) необходимы некоторые приемы. Например, интегрирование в пределах от $-\infty$ до $-t$. В этом случае нижняя граница интегрирования остается постоянной, требуется обратный ход импульсного отклика, который достигается с помощью обратного хода магнитной ленты.

Достаточно простое практическое решение метода Шредера предложил Куттруфф [31]. Если выражение (1.6) в соответствии с предложением Куттруффа представить в следующем виде:

$$\langle S^2(t) \rangle = N_S \left(\int_0^{\infty} g^2(\tau) d\tau - \int_0^t g^2(\tau) d\tau \right), \quad (1.7)$$

то нижняя граница интегралов не зависит от времени, и практическое осуществление измерительной схемы оказывается несложным. Блок-схема измерений, соответствующая предложению Куттруффа, показана на рис. 1.10. Создаваемые генератором короткие импульсы поступают на вход полосового фильтра, отклик которого усиливается и излучается в помещение с помощью громкоговорителя. Принятый импульсный отклик усиливается, проходит через фильтр, квадратор и поступает на вход интегратора. За время, равное или несколько меньшее времени реверберации помещения, интегратор накапливает напряжение, соответствующее величине первого интеграла в формуле (1.7). После этого в помещение снова излучается такой же, как и в первом случае, импульсный сигнал. Путем перемены полярности импульсного отклика в интеграторе напряжение, соответствующее второму интегралу формулы (1.7) непрерывно вычитается из накопленной величины. Результирующее напряжение, временная зависимость которого регистрируется самописцем, и дает процесс реверберации. Включение генератора импульсов, открытие входа интегратора, перемена знака импульсного отклика и пуск самописца осуществляются с помощью специальной схемы управления. Следует отметить, что на ход реверберационного процесса влияет динамический диапазон импульсного отклика, нижняя граница которого определяется прежде всего шумовым фоном помещения. Для надежной оценки времени реверберации на участке от 0 до -25 дБ необходимо, чтобы уровень суммарной энергии импульсного отклика превосходил уровень шумового фона не менее чем на 40 дБ. На рис. 1.11 в виде примера показаны реверберационные кривые, полученные в одной и той же точке помещения стандартным методом и методом интегрированного импульсного отклика.

По мнению авторов метода, новый метод должен полностью заменить стандартный не только из-за повышенной точности измерений, но и из-за возможности учесть начальный участок реверберационного процесса (первые 5–10 дБ спада уровня звукового давления), практически не анализируемый при стандартном методе. Как уже отмечалось, начальный участок играет важную роль в

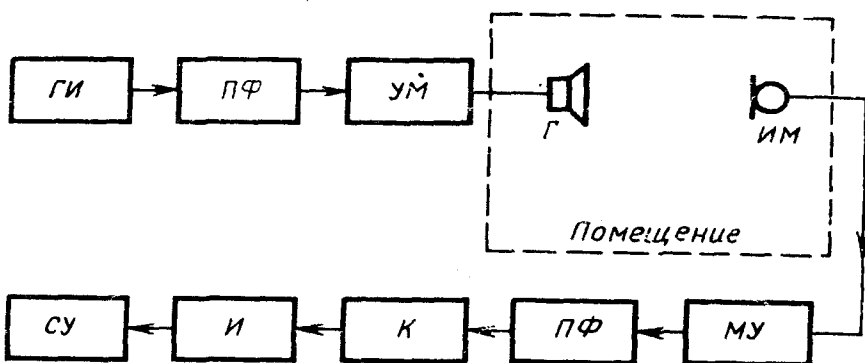
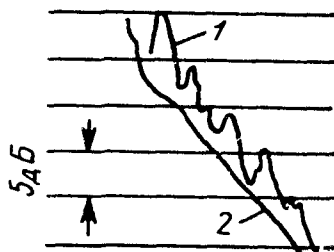


Рис. 1.10. Блок-схема измерений времени реверберации методом интегрированного импульсного отклика

ГИ — генератор импульсов; ПФ — полосовой фильтр; УМ — усилитель мощности; Г — громкоговоритель; ИМ — измерительный микрофон; МУ — микрофонный усилитель; К — квадратор; И — интегратор; СУ — самописец уровня

Рис. 1.11. Примеры уровнеграмм процесса реверберации

1 — стандартный метод измерения; 2 — метод интегрированного импульсного отклика



слуховом восприятии реверберации. Сглаженные реверберационные кривые позволяют легче распознать нарушение диффузности звукового поля, так как яснее видно изменение их наклона (провисание, изломы или выпуклости кривых).

Время реверберации, определяемое методом интегрированного импульсного отклика и называемое начальным временем реверберации, имеет несколько модификаций. Эти модификации отличаются друг от друга участком реверберационного процесса, по которому определяется начальное время реверберации путем экстраполяции спада до -60 дБ. Обычно участки берутся от 0 до -10 , -15 и -20 дБ, а соответствующее начальное время реверберации обозначается T_{10} , T_{15} и T_{20} . Начальное время реверберации, определенное по участку от 0 до -10 дБ, часто называют временем раннего спада EDT.

При условии идеальной диффузности звукового поля в помещении начальное время реверберации не должно зависеть от расположения микрофона и должно быть равно времени реверберации, определенному стандартным методом. Сравнительные измерения, выполненные в ряде театральных залов Москвы стандартным методом и методом интегрированного импульсного отклика (T_{10}), показали, что на практике идеально диффузное поле не реализуется.

ся. Практически во всех случаях (и особенно в передней зоне мест) начальное время реверберации оказалось меньше стандартного, кроме того, оно довольно сильно менялось при переходе из одной зоны мест зала в другую. Это связано с тем, что при измерении T_{10} учитывается начальный участок процесса реверберации, в формировании которого основная роль принадлежит прямому звуку и интенсивным ранним отражениям. В выражении (1.7) первый интеграл означает полную энергию импульсного отклика, а второй соответствует нарастанию энергии отклика. Их разность эквивалентна реверберационному спаду. Чем круче нарастание энергии импульсного отклика, т.е. чем интенсивнее прямой звук и малозапаздывающие отражения, тем круче реверберационный спад и соответственно меньше T_{10} . Вблизи источника звука (передняя зона мест) крутизна нарастания увеличивается за счет интенсивного прямого звука. Таким образом, начальное время реверберации T_{10} оказывается довольно тесно связано со структурой ранних отражений и является скорее локальным, нежели глобальным акустическим параметром. Для использования этого параметра необходимо дальнейшее накопление экспериментальных данных.

1.3. ДИФФУЗНОСТЬ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Начиная с ранних этапов развития архитектурной акустики большое внимание уделялось исследованиям диффузности звукового поля и методам ее измерения. Достаточно высокая степень диффузности длительное время считалась показателем хорошей акустики зала, особенно музыкального. Кроме того, по результатам измерений диффузности оценивалась справедливость статистической теории реверберации, основанной на предположении полной (идеальной) диффузности звукового поля. Под полностью диффузным звуковым полем подразумевается такое, в котором выполняются два условия: усредненная во времени плотность звуковой энергии во всех точках одинакова; все направления прихода звуковой энергии в какую-либо точку равновероятны и по любому направлению усредненный во времени поток звуковой энергии одинаков. Первое из этих двух условий называют однородностью, а второе — изотропностью звукового поля.

Степень диффузности звукового поля зависит от типа измерительного сигнала. При использовании синусоидального тона диффузность вообще неосуществима, так как количество одновременно возбуждаемых собственных колебаний будет в этом случае минимальным, а интерференционные эффекты максимальны. При таком, как правило, непригодном для акустических измерений типе сигнала нельзя говорить об однородности звукового поля. Сигналом, позволяющим возбудить максимальное число собственных колебаний и обеспечивающим минимальную интерференцию отраженных волн, является белый шум (частотные полосы белого шума).

Предпосылкой диффузности звукового поля служит достаточ-

ная плотность спектра собственных частот помещения. Известно, что с ростом частоты среднее расстояние между собственными частотами сокращается и распределение собственных частот становится случайным. Нижняя критическая частота f_k , выше которой выполняется условие случайного распределения, связана со временем реверберации T и объемом помещения V следующим соотношением:

$$f_k = 2000 \sqrt{T/V}. \quad (1.3)$$

Повышению диффузности звукового поля, как известно, способствует членение ограждающих поверхностей помещения, его надлежащая форма и пропорции. Трудности с обеспечением акустического комфорта, нередко возникающие в современных залах, не в последнюю очередь связаны с недостаточной диффузностью звукового поля, обусловленной слабым членением внутренних поверхностей помещений и их несоразмерностью.

Исследования диффузности звукового поля проводились в основном по двум направлениям. Одно из них было связано с проверкой выполнения условия изотропности (оценка диффузности направлений), а другое — с измерениями корреляции между звуковыми давлениями в двух точках помещения. Проверка условия однородности звукового поля при оценке диффузности, как правило, не проводилась, хотя, строго говоря, следовало бы убедиться в том, насколько удовлетворяются оба условия диффузности: однородность и изотропность.

Первая попытка количественной оценки изотропности звукового поля была предпринята Тиле [45]. Его метод основан на измерении величин, определяющих потоки звуковой энергии, приходящей в точку приема по разным направлениям. В качестве источника звука использовался ненаправленный громкоговоритель, излучавший воющий тон с частотой 2 ± 1 кГц при частоте модуляции 12 Гц. Приемником звука служил электродинамический микрофон, расположенный в фокусе параболического зеркала диаметром 1,2 м. Характеристика направленности такого приемника оказалась очень острой. При отклонении источника от оси приемника на 8° чувствительность последнего (в свободном поле) убывала вдвое.

Устанавливая количественную меру диффузности, Тиле использовал среднее значение интенсивности $\bar{I}$ и среднее абсолютное отклонение от нее $\Delta \bar{I}$.

$$\bar{I} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i = I_i, \quad (1.9)$$

где $\bar{I}_i$ — интенсивность в i -м направлении; n — число направлений.

$$\Delta \bar{I} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i - \bar{I}. \quad (1.10)$$

Приняв $m = \Delta \bar{I} / \bar{I}$ и обозначив через m_0 значение m , измеренное в свободном поле, Тиле выразил степень диффузности следующим образом:

$$d = 1 - m / m_0. \quad (1.11)$$

Нетрудно заметить, что в идеально диффузном поле при $m = 0$ $d = 1$, а в свободном поле $d = 0$. Способ, предложенный Тиле и основанный на использовании остронаправленного приемника звука, позволяет детально исследовать диффузность направлений. Однако этот способ, помимо трудоемкости обработки результатов измерений и невозможности учесть прямой звук, имеет один существенный недостаток — параболическое зеркало значительно искажает звуковое поле. Результаты измерений диффузности направлений по методу Тиле можно сравнивать только при условии применения одного и того же приемника звука.

Тисмер [46] внес усовершенствование в метод Тиле, позволившее исключить влияние прямого звука на оценку величины диффузности направлений. В дополнение к основному измерению изотропности звукового поля он ввел измерение отношения интенсивности прямого и отраженного звуков. Измеренное отношение далее сравнивается с величиной аналогичного отношения, теоретически рассчитанного для гипотетического звукового поля, состоящего из поля прямого звука и идеально диффузного поля.

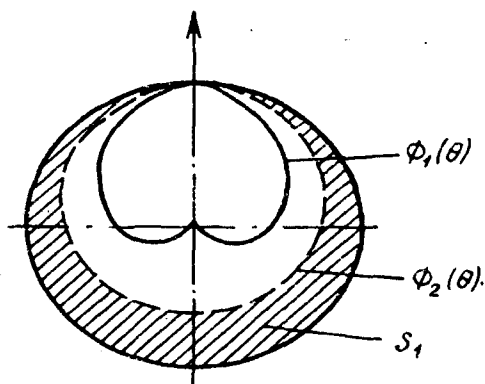
Оригинальный метод измерения изотропности звукового поля был предложен Фурдеевым и Чен-Туном [7]. Метод основан на сравнении собственной характеристики направленности $\Phi_1(\theta)$ направленного микрофона, измеренной в условиях свободного поля, с характеристикой направленности $\Phi_2(\theta)$ этого же микрофона, измеренной в исследуемом помещении. В идеально диффузном звуковом поле характеристика $\Phi_2(\theta)$ должна быть круговой независимо от вида $\Phi_1(\theta)$. Характеристика направленности $\Phi_2(\theta)$, полученная в реальном помещении, находится между кругом и характеристикой $\Phi_1(\theta)$, как это видно из рис. 1.12 (все три характеристики в направлении осевой чувствительности имеют величину единицы). Чем ниже диффузность звукового поля, тем характеристика $\Phi_2(\theta)$ ближе к характеристике $\Phi_1(\theta)$ и тем больше площадь S_1 . Эта площадь показывает, в какой мере звуковое поле в данной точке помещения отличается от идеально диффузного. В качестве меры диффузности предложена величина

$$d = 1 - S_1 / S_2, \quad (1.12)$$

где S_2 — площадь, заключенная между кругом единичного радиуса и характеристикой $\Phi_1(\theta)$.

Из выражения (1.12) следует, что в идеально диффузном поле $S_1 = 0$ и $d = 1$, а в свободном поле $S_1 = S_2$ и $d = 0$. Фактически измеряемые значения должны находиться в интервале $0 < d < 1$. Измерения рекомендуется проводить в горизонтальной и вертикальной плоскостях, используя ненаправленный источник звука и измерительный сигнал в виде полос белого шума. Результирующее d будет средним значением измеренных в двух плоскостях. На результаты измерений диффузности по данному методу (как и по методу Тиле) влияют прямой звук и степень направленности используемого микрофона.

Рис. 1.12. К оценке диффузности по методу Фурдюза и Чен-Туна



Наряду с измерениями изотропности звукового поля с использованием направленных приемников звука значительное место в исследованиях диффузности заняли корреляционные методы. Наиболее известными являются методы, основанные на измерении коэффициента корреляции

$$R_K = \overline{p_1(t) p_2(t)} / \sqrt{\overline{p_1^2(t)} \overline{p_2^2(t)}} \quad (1.13)$$

между стационарными сигналами $p_1(t)$ и $p_2(t)$, снятыми в двух точках помещения с помощью двух ненаправленных микрофонов. О степени диффузности можно судить, сопоставляя измеренную зависимость R_K от расстояния между точками приема с теоретической зависимостью, справедливой для идеально диффузного поля. Эта зависимость при возбуждении звукового поля узкополосным шумом, согласно [32], имеет вид:

$$R_K = \frac{\sin kr}{kr}, \quad (1.14)$$

где $k = \omega / c$ — волновое число; $\omega = 2\pi f$ — средняя круговая частота полосы; r — расстояние между микрофонами.

Однако непосредственное сравнение измеренной и теоретической зависимостей R_K затрудняется вследствие того, что средняя величина R_K , полученная в свободном поле при различной ориентации прямой, соединяющей оба микрофона, соответствует полученной по формуле (1.14) для идеально диффузного поля. В связи с этим Минаржик [36] предложил измерять среднее абсолютное значение коэффициента корреляции $|R_K|_{\text{ср}}$ при различных ориентациях прямой, соединяющей микрофоны. Зависимость этой величины от kr для идеально диффузного и свободного полей показана на рис. 1.13. Как видно из рисунка, первая значительная разница между средними абсолютными коэффициентами корреляции наступает при $kr = \pi$. Это соответствует расстоянию между микрофонами $r = \lambda / 2$. При таком расстоянии обеспечивается максимальная

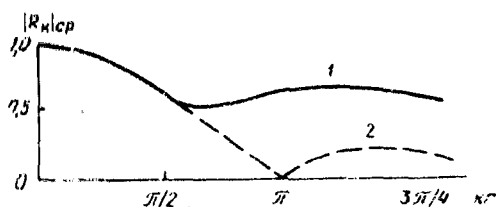


Рис. 1.13. Зависимость $|R_K|_{cp}$ от расстояния между точками измерений
1 — свободное поле; 2 — диффузное поле

чувствительность метода и возникает возможность проводить измерения, используя только одно расстояние между микрофонами, корректируемое в зависимости от частотной полосы измерений. Средний абсолютный коэффициент корреляции для свободного поля в этом случае будет $|R_{K1}|_{cp} = 2/\pi$. Степень диффузности звукового поля в соответствии с предложением Минаржика определяется следующим образом:

$$d = 1 - \frac{|R_{K2}|_{cp}}{|R_{K1}|_{cp}} = 1 - \frac{\pi}{2} |R_{K2}|_{cp}, \quad (1.15)$$

где $|R_{K2}|_{cp}$ — средний абсолютный коэффициент корреляции, измеренный в исследуемом помещении. Ясно, что в идеально диффузном поле $|R_{K2}|_{cp} = 0$ и $d = 1$. В свободном поле $|R_{K2}|_{cp} = |R_{K1}|_{cp} = 2/\pi$, т.е. $d = 0$. Следует отметить, что однозначные результаты по методу Минаржика получаются только при соблюдении особых условий измерений. Это затрудняет практическое использование метода.

Простой и удобный для практического использования метод оценки диффузности разработан в НИИСФ. В основе метода лежит предположение о существовании вероятностной связи между двумя условиями диффузности звукового поля — однородностью и изотропностью. При нарушении одного из этих условий со значительной вероятностью нарушается и другое. Это дает право вместо проверки изотропности пользоваться значительно более простой проверкой однородности.

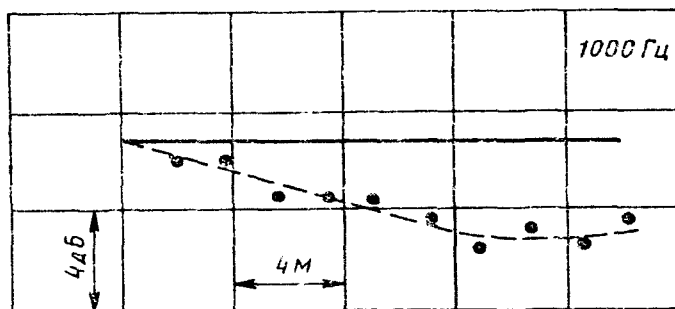
При оценке однородности по данному методу в различных точках помещения, расположенных в области преобладания отраженного звука, проводятся измерения уровней звукового давления при работе ненаправленного источника звука, излучающего полосы белого шума со средними геометрическими частотами 250 и 1000 Гц. Преобладание отраженного звука принято на расстояниях от источника, превышающих

$$r = 0,35 \sqrt{\frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}} S, \quad (1.16)$$

где S — общая площадь внутренней поверхности помещения, m^2 , $\bar{\alpha}$ — ее средний коэффициент звукопоглощения.

На этих расстояниях при полной диффузности отраженного звука уровень звукового давления должен в пределах точности изме-

Рис. 1.14. Изменение уровня звукового давления вдоль помещения



рений оставаться постоянным, а при неполной диффузности уровень должен меняться от зоны к зоне помещения. Обычно уровень звукового давления падает, хотя в случае наличия в помещении фокусирующих поверхностей он может и возрасти. В виде примера на рис. 1.14 показано изменение уровня звукового давления вдоль помещения. Жирная горизонтальная линия представляет уровень звукового давления для идеально диффузного звукового поля на расстоянии, превышающем g . Точками показаны измеренные уровни, а кривая дает сглаженное распределение уровней.

Однородность звукового поля в целом по залу характеризуется средним абсолютным отклонением δL от уровня, соответствующего полностью диффузному звуковому полю. Для оценки местной (локальной) однородности в отдельных зонах помещения принята крутизна dL/dx кривой спада уровня звукового давления (L — уровень звукового давления, x — расстояние от источника). Выбор крутизны в качестве показателя местной однородности был обусловлен опытом измерений, который свидетельствует о том, что с удалением от источника снижение уровня звукового давления замедляется, а изотропность улучшается.

Следует отметить, что между принятыми показателями однородности и параметрами, характеризующими изотропность звукового поля, имеется довольно значительная корреляция, подтверждающая обоснованность предложенного метода оценки диффузности. На рис. 1.15 в виде примера показана диаграмма рассеивания δL и ΔL_1 . Параметр ΔL_1 является усредненной по помещению разностью наибольшего и наименьшего уровней выходного напряжения, измеренных при пяти положениях направленного микрофона (вперед — к источнику, назад, вправо, влево и вверх).

Метод оценки диффузности звукового поля путем измерения его однородности помимо простоты имеет два существенных преимущества: в отличие от других способов он позволяет проводить измерения в заполненных помещениях и дает сведения о громкости в различных зонах помещения. Недостаток метода состоит в том, что получаемая с его помощью оценка изотропности поля является в значительной мере приближенной.

Рассмотренные методы оценки диффузности связаны с использованием стационарных измерительных сигналов и основаны на

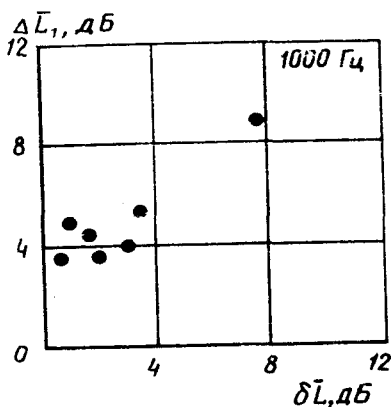


Рис. 1.15. Диаграмма рассеивания δL и ΔL_1

определении степени приближения исследуемого звукового поля к идеально диффузному. Ценность этих методов заключается главным образом в том, что, несмотря на присущие им недостатки, они все же позволяют судить о выполнении условия применимости классической теории реверберации. Попытки связать стационарную диффузность с субъективной оценкой акустического качества помещений или зон слушательских мест в них пока не привели к убедительным результатам: В смысле связи диффузности звукового поля с условиями слухового восприятия, очевидно, более важна нестационарная диффузность, характеризующая начальный участок реверберационного процесса. Однако на этом участке практически не может существовать идеальная изотропность. Это ясно показала работа Юниуса [26], исследовавшего изотропность при импульсном возбуждении звукового поля. Пространственное распределение потоков звуковой энергии в точке приема Юниус представил в виде пространственных моделей — "ежей", иглы которых соответствовали направлению прихода и интенсивности (энергии) звука. Распределение становится достаточно равномерным ("ежи сворачиваются") только на завершающем участке процесса послезвучания. В работе [3] также показано, что полная диффузность на начальном участке реверберации в реальных помещениях недостижима. Следует отметить, что это и не требуется. Наоборот, необходимо некоторое преобладание прямого звука для правильной локализации источника, а в музыкальных залах — выделение ранних боковых отражений, определяющих пространственность звучания. Таким образом, исследования нестационарной диффузности смыкаются с исследованиями структуры ранних отражений.

ГЛАВА 2. ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ПОМЕЩЕНИЙ

Акустическое качество помещения (зоны слушательских мест) в конечном итоге определяется субъективной оценкой условий слухового восприятия речевых выступлений и музыкальных программ. Если слушатели плохо понимают оратора или считают, например, звучание оркестра неясным или слишком громким, то это означает, что акустические условия в зале далеки от оптимальных, хотя некоторые объективные величины звукового поля данного помещения могут иметь оптимальные значения. Объективные параметры звукового поля надежно характеризуют акустику помещения лишь в том случае, когда между ними и субъективными критериями существуют достаточно прочные корреляционные связи. Такие связи в настоящее время установлены для помещений, предназначенных для прослушивания речи. В области акустики помещений, предназначенных для прослушивания музыки, поиски связей субъективных и объективных оценок по-прежнему остаются предметом исследований и одной из самых актуальных задач.

2.1. СУБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ РЕЧЕВЫХ ПРОГРАММ

Процесс слухового восприятия речи рассматривается главным образом, с позиции правильной передачи смысловой информации, заключенной в речевом сигнале. Отсюда основным субъективным фактором, определяющим качество передачи речи в помещении, является ее разборчивость. Для определения разборчивости речи применяются так называемые артикуляционные испытания, позволяющие получить разборчивость в процентах. В ходе испытаний в помещение с помощью диктора или фонограммы передается испытательный текст, а слушатели, находящиеся в помещении, записывают этот текст. Отношение правильно записанных на слух фонетических элементов к общему количеству переданных и определяет процент разборчивости.

В настоящее время в СССР для регламентации таких испытаний введен ГОСТ 25902-83. "Зрительные залы. Метод определения разборчивости речи". Помимо исследований, выполненных в СССР, при разработке стандарта использованы также данные исследований, проведенных Институтом техники звука и изображения (ЧССР, Прага). В отличие от обычных артикуляционных испытаний, при которых используются специально тренированные бригады слушателей, стандарт основан на привлечении нетренированных слушателей, имеющих, однако, опыт записи воспринимаемого на слух текста. Это позволяет приблизить условия испытаний к реальным.

Надежность результатов оценки разборчивости повышается, как известно, с увеличением числа слушателей. В то же время

увеличение количества слушателей приводит к организационным и экономическим трудностям, а также удлиняет время испытаний. Последнее обстоятельство неблагоприятно сказывается на результатах, так как вызывает снижение внимательности слушателей и дикторов вследствие их переутомления. В стандарте принята сравнительно небольшая группа слушателей (20 человек), позволяющая получить статистически надежные результаты. Для зала вместимостью более 2000 человек привлекаются 2 группы слушателей, а если вместимость зала более 5000 человек — 3 группы слушателей по 20 человек в каждой группе. Для сокращения времени испытаний в каждой группе проводится циклическая смена мест, при которой каждый слушатель с занимаемого им места переходит на место, порядковый номер которого на единицу больше. Слушатель, находящийся на последнем по порядку месте, переходит на первое место. Цикл заканчивается, когда все слушатели побывают на всех местах испытаний. Места, на которых определяется разборчивость, должны быть равномерно распределены по залу, а их количество должно соответствовать числу участвующих в испытаниях слушателей.

Большое влияние на результаты определения разборчивости речи оказывает не только количественный состав группы слушателей, но и другие факторы: образование, профессия, социальная принадлежность, а также память и сообразительность. Для уменьшения влияния этих факторов в стандарте в качестве испытательного текста используются артикуляционные таблицы слогов. Возрастной состав ограничен до 35 лет. Среднее значение слоговой разборчивости на данном слушательском месте $\bar{P}_c$ вычисляется по формуле:

$$\bar{P}_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{ci}, \quad (2.1)$$

где N — число слушателей, которых в соответствии со стандартом должно быть равным 20; P_{ci} — слоговая разборчивость на данном месте для отдельного слушателя, определяемая как отношение (в процентах) числа правильно записанных слогов к числу переданных (100 слогов).

Из значений P_{ci} , полученных на данном месте, должны быть исключены те, которые отличаются от $\bar{P}_c$ на величину, большую удвоенной среднеквадратичной ошибки. После этого $\bar{P}_c$ рассчитывается снова. Среднеквадратичная ошибка на данном месте определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_c - P_{ci})^2 / (N - 1)}. \quad (2.2)$$

Для ориентировочной оценки результатов испытаний в стандарте приведены классы средних значений разборчивости речи, указанные в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Класс	Условия слышимости	Средние значения слоговой разборчивости, %
I	Отличные	Свыше 90
II	Хорошие	" 80 до 90
III	Удовлетворительные	" 70 " 80
IV	Неудовлетворительные	" 70

Наряду с разборчивостью часто указываются и другие субъективные факторы, влияющие на качество восприятия речи. К ним относятся: громкость речи, эхо, порхающее эхо, нарушение локализации, тембровые искажения, повышенный уровень шума и плохие акустические условия в зоне расположения источника звука. Следует заметить, что громкость, эхо и шум являются факторами, которые непосредственно определяют разборчивость речи и косвенно оцениваются при субъективной оценке разборчивости.

2.2. ОБЪЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ

Накопленный опыт и результаты многочисленных исследований показали, что разборчивость речи в помещении определяют следующие акустические характеристики: уровень речевого сигнала, уровень шума, время реверберации и структура звуковых отражений. При этом для хорошей разборчивости требуется достаточно высокий уровень речи, низкий уровень шума, небольшое время реверберации и структура отражений, характеризующаяся наличием интенсивных ранних отражений при отсутствии поздних интенсивных отражений (типа эхо). Существующие в настоящее время методы объективной оценки разборчивости в той или иной степени связаны с перечисленными акустическими характеристиками. Эти методы можно разделить на две группы: аддитивную и мультипликативную.

Первая аддитивная группа базируется на том предположении, что результирующая разборчивость речи определяется суммой вкладов в отдельных частотных полосах, а величина вклада зависит от отношения сигнала к шуму в каждой полосе. К этой группе критериев относится индекс артикуляции [29]. Количество частотных полос, в пределах которых определяется отношение сигнала к шуму, составляет 20. Ширина полос выбрана с таким расчетом, чтобы вклад каждой полосы в результирующую разборчивость был одинаковым. Формула разборчивости чаще всего приводится в следующем виде:

$$AI = \sum_{i=1}^{20} AI_i, \quad (2.3)$$

где AI — индекс артикуляции ($0 \leq AI \leq 1$); AI_i — вклад в индекс в i -й полосе частот ($0 \leq AI_i \leq 0,05$).

$$AI_i \begin{cases} 0,05 \frac{(S/N)_i + k}{30} & \text{для } (S/N)_i + k \leq 30; \\ 0,05 & \text{для } (S/N)_i + k \geq 30, \end{cases} \quad (2.4)$$

где $(S/N)_i$ — отношение сигнала к шуму в дБ в i -й полоса частот; k — корректирующий фактор, учитывающий нестационарный характер речевого сигнала.

Отношение сигнала к шуму в отдельных полосах частот определяется по пиковым значениям речевого сигнала и по эффективным величинам шума. Причем в шум включаются все мешающие передаче речи сигналы: шумовой фон помещения, реверберационная составляющая речевого сигнала и шум электроакустического тракта. Неопределенность в оценке пиковых величин речи корректируется в индексе артикуляции с помощью постоянной k , значение которой по данным разных авторов колеблется от 0 до 6. В настоящее время предпочтение отдается величине, равной нулю.

Другие методы определения артикуляционного индекса основаны на измерении спектра речи и шума в октавных и 1/3-октавных полосах. Индекс определяется суммой с различными весами q разностей ΔL между пиковым уровнем речи и эффективным уровнем мешающего шума в соответствующих полосах:

$$AI = \sum_{i=1}^n q_i \Delta L_i \quad (2.5)$$

Величины q_i табулированы для любых частотных полос. При расчете с помощью таблиц поправок учитывается влияние абсолютного уровня речи, реверберации, а также частотных характеристик передачи электроакустических трактов. В работе [16] предложен упрощенный вариант расчета эффективного уровня шума, необходимого для последующего определения индекса артикуляции. При этом вычисляется так называемый "предпочтительный уровень шума" — среднее арифметическое уровней мешающего шума в октавных полосах 500, 1000, 2000 Гц. Данный метод обеспечивает удовлетворительную точность, если шум имеет равномерный широкополосный спектр.

Соотношение между артикуляционным индексом и разборчивостью речи для различных языков установлено экспериментально и задается обычно в графической форме. На рис. 2.1 показана зависимость слоговой разборчивости (английский язык) от индекса артикуляции. Для характеристики качества передачи речи установлены классы индексов артикуляции, приведенные в табл. 2.2. Индекс артикуляции благодаря своей относительной простоте довольно широко используется в практике, особенно в случае оценки разборчивости речи в залах, оборудованных системами звукоусиления. Метод артикуляционного индекса в США стандартизирован.

Рис. 2.1. Зависимость слоговой разборчивости P_c от индекса артикуляции AI

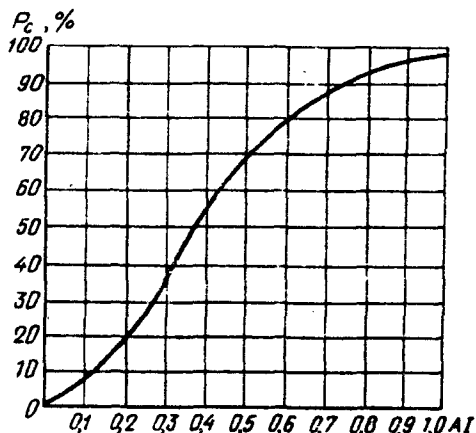


Таблица 2.2

Класс	Условия слышимости	Индекс артикуляции
I	Отличные	Свыше 0,7
II	Хорошие	" 0,5 до 0,7
III	Удовлетворительные	" 0,3 " 0,5
IV	Неудовлетворительные	" 0,1 " 0,3
V	Очень плохие	" 0,1

Несмотря на практическую ценность теория артикуляционного индекса имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего вызывает сомнение аддитивность вкладов, получаемых в отдельных частотных полосах, далее не учитывается то обстоятельство, что различные частотные "куски" речевого сигнала могут (по отношению к разборчивости) заменять друг друга в зависимости от условий передачи речи. И наконец, нет надежного решения вопроса измерения уровня речи и нестационарного шума.

Определение индекса артикуляции лишь в общем виде включает в шум маскировку сигнала процессом реверберации. Способом, позволяющим включить эту специфическую форму маскировки в аддитивную формулу разборчивости, является использование модуляционной передаточной функции MTF, предложенной Хоутгастом и Стинекеном [23]. Метод авторов основан на излучении в исследуемое помещение шумового сигнала с гармонической модуляцией (рис. 2.2) :

$$x_0 = I_0 (1 + \cos 2\pi F t). \quad (2.6)$$

Принятый в помещении сигнал:

$$x_1 = I_1 [1 + m' \cos 2\pi F (t + \tau)], \quad (2.7)$$

где $m'(F)$ — уменьшение глубины модуляции в принятом сигнале; τ — на-
бег фазы; зависимость величины $20 \lg m'$ от частоты модуляции F — моду-
ляционная передаточная функция.

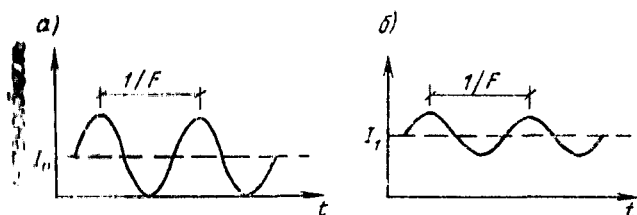


Рис. 2.2. Огибающая испытательного сигнала при измерении индекса передачи речи по методу Хоутгаста и Стипенена
а — излученный сигнал; б — принятый сигнал

Для установления связи MTF с разборчивостью речи предложена следующая методика. С частотой от 0,25 до 25 Гц через 1/3 октавы определяется 21 значение модуляционной передаточной функции MT_i . На основе этих значений индекс передачи речи IS вычисляется следующим образом, %:

$$IS = \sum_{i=1}^{21} \frac{1}{1 - 0,3 MT_i} \cdot \frac{100}{21}. \quad (2.8)$$

Экспериментально установленная связь индекса передачи речи IS с разборчивостью фонетически сбалансированных односложных слов показана на рис. 2.3. Дальнейшие работы этих авторов были посвящены вопросам расчета и использования MTF при оценке разборчивости [44]. Использование MTF представляется весьма перспективным, хотя и полученные с помощью MTF данные нуждаются в проверке, а сам метод в доработке.

Вторая мультипликативная группа формул разборчивости речи основана на том предположении, что отдельные факторы воздействуют на разборчивость отдельно, без существенной взаимосвязи. Согласно такому представлению результирующую разборчивость можно получить путем перемножения самостоятельных факторов, выражающих уменьшение разборчивости в результате действия отдельных влияний. Причем, естественно, что некоторые из факторов более существенны, другие менее существенны. Мультипликативный принцип используется главным образом в европейской школе, причем прежде всего для объективной оценки разборчивости речи, основанной на обработке импульсных откликов помещений с естественной акустикой.

В ходе развития мультипликативного принципа, исходя из практических соображений, количество факторов в формулах начали уменьшать, объединяя несколько параметров в один. Применительно к залам с естественной акустикой мультипликативная формула чаще всего представляется в виде двух* коэффициентов:

$$P_c = 96 K_L K_R, \quad (2.9)$$

где P_c — слоговая (логатомная) разборчивость, %; K_L — коэффициент, учитывающий влияние уровня речи и шума; K_R — коэффициент, учитывающий влияние реверберации.

* В случае передачи речи через систему звукоусиления в формуле появляется третий коэффициент, учитывающий влияние ширины передаваемой полосы частот.

Рис. 2.3. Зависимость разборчивости слов $P_{сл}$ от индекса передачи речи

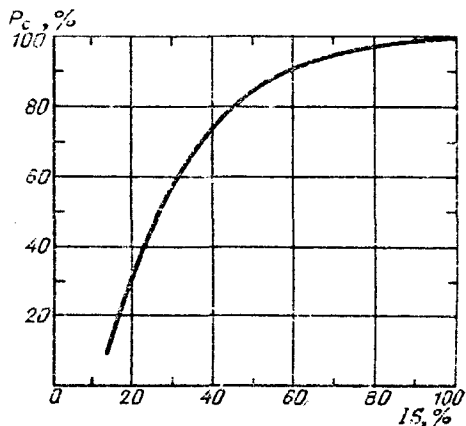
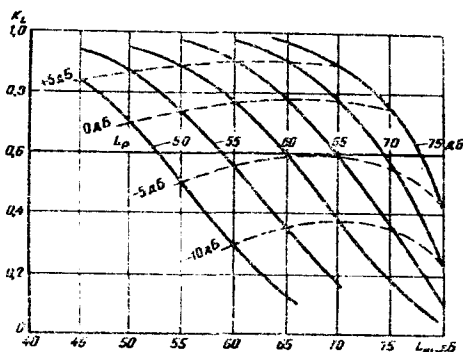
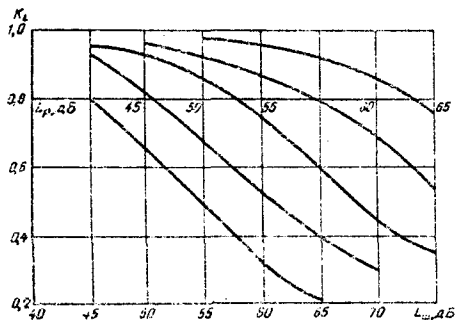


Рис. 2.4. Зависимость K_L от уровней речи L_p и шума $L_{ш}$ при спектре шума пустого зала

Рис. 2.5. Зависимость K_L от уровней речи L_p и шума $L_{ш}$ при спектре шума заполненного зала

	2.3
2.4	2.5



Коэффициент K_L определяется по специальным диаграммам, характеризующим зависимость разборчивости от уровней речи и шума. Уровни речи и шума на данном слушательском месте получаются путем измерений или расчета. Для русской речи можно рекомендовать диаграммы, полученные на основе экспериментов в синтезированных звуковых полях при спектрах шума, характерных для пустого и заполненного залов. Эти диаграммы, представленные на рис. 2.4 и 2.5, дают зависимость коэффициента K_L от уровня шума $L_{ш}$ при различных уровнях речи L_p в качестве параметра. Они свидетельствуют о довольно резком снижении разборчивости речи при уменьшении отношения речевого сигнала к шуму, причем снижение разборчивости гораздо значительнее при спектре шума, характерного для заполненного зала. Следует заметить, что разборчивость зависит не только от отношения речевого и шумового сигналов, но и от их абсолютных уровней. Это ясно видно из пунктирных кривых, соединяющих точки с одинаковым отношением сигнала к шуму (см. рис. 2.5). При низкочастотном спектре шума (см. рис. 2.4) в рассмотренном диапазоне уровней разборчивость возрастает при увеличении абсолютного уровня речи (шума). В случае спектра шума, характерного для заполненного зала

(см. рис. 2.5), обнаруживается явный оптимум уровня речи, при котором разборчивость максимальна. Так, например, при отношении речевого сигнала к шуму, равном 0 дБ, оптимальный уровень речи составляет 70 дБ, а при отношении — 10 дБ, максимальная разборчивость обеспечивается при уровне речи 65 дБ. Таким образом, в мультипликативных формулах (в отличие от аддитивных) учитываются не только отношение речевого и шумового сигналов, но и их абсолютные уровни.

Для определения коэффициента K_R существует ряд способов, основанных, как правило, на оценке импульсного отклика помещения. Наиболее известный из них базируется на предложенной Тиле [45] величине четкости, характеризующей отношение полезной энергии ко всей энергии импульсного отклика,

$$D = \frac{\int_0^{50 \text{ мс}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}. \quad (2.10)$$

К полезной энергии Тиле относит энергию прямого звука и энергию отражений, запаздывающих по отношению к прямому звуку не более чем на 50 мс. Коэффициент K_R в этом случае равен примерно $\sqrt[5]{D}$. Следует отметить, что сама по себе четкость D достаточно хорошо коррелирована с разборчивостью речи. На рис. 2.6 показана экспериментальная зависимость слоговой разборчивости от четкости. Наряду с достоинствами (простота и хорошая связь с разборчивостью) четкость имеет недостатки. К одному из них относится резкая временная граница, отделяющая полезную часть импульсного отклика от мешающей. Кроме того, слабо учитывается структура мешающей части отклика, в которой могут быть поздние отражения большой интенсивности. Эти отражения часто приводят к слышимому эху, снижающему разборчивость речи. Указанные недостатки в значительной мере ликвидированы в критерии, предложенном Низе [37] и названным "степенью эха". Низе ввел новую 33-мс границу между полезной и мешающей энергией, причем полезная энергия берется с весовой функцией, смягчающей резкую границу деления импульсного отклика. Мешающей же считается не вся энергия, а только энергия отражений, превышающих экспоненциальную кривую процесса реверберации данного помещения. Степень эха характеризуется следующим отношением:

$$\epsilon_N = E_S / (E_S + E_N), \quad (2.11)$$

где E_S — мешающая часть энергии импульсного отклика $p(t)$; E_N — полезная часть.

Обе части энергии определяются из выражений:

$$E_S = \int_0^{\infty} [|p(t)| - p_B B(t)]^2 dt, \quad (2.12)$$

$$E_N = \int_0^{33 \text{ мс}} [A(t) |p(t)|]^2 dt, \quad (2.13)$$

где p_B — начальное значение временной функции звукового давления $p(t)$ в области $t \geq 33$ мс; $B(t)$, $A(t)$ — весовые функции, схематически изображенные на рис. 2.7; причем

$$B(t) = e^{-\frac{t-33 \text{ мс}}{\tau}}, \quad (2.14)$$

где τ — постоянная времени, определяемая из времени реверберации, $\tau = 0,145 T$.

С учетом степени эха ϵ_N коэффициент K_R будет:

$$K_R = K_D \sqrt{1 - \epsilon_N}, \quad (2.15)$$

где K_D — коэффициент, зависящий от времени реверберации (по Кнудсену).

Янушка [24] модифицировал степень эха Низе, он ввел для мешающей части энергии новую весовую функцию

$$B(t) = \sqrt{\frac{2}{t_2} \int_0^{t_2} p(t)^2 dt} \sqrt{\frac{\tau e^{-(t-t_2)\tau} - \tau_0 e^{-(t-t_2)\tau_0}}{\tau - \tau_0}}, \quad (2.16)$$

где $t_2 = 33$ мс, постоянная времени человеческого уха, $\tau_0 = 23$ мс; τ — постоянная времени, зависящая от оптимального времени реверберации, с которым она связана соотношением $\tau = T / 13,8$.

Коэффициент K_R в этом случае (для чешской речи) связан с модифицированной степенью эха ϵ_J следующим образом:

$$K_R = \sqrt[8]{1 - \epsilon_J}. \quad (2.17)$$

Необходимо отметить еще два способа определения K , которые основаны на оценке импульсного отклика без его деления на полезную и мешающую части. В одном из них [6] используется так называемое время центра тяжести импульсного отклика t_s :

$$K_R = 1 - 10^{-5} (t_s / \text{мс})^2. \quad (2.18)$$

Время центра тяжести при измерении ненаправленным микрофоном определяется по формуле

$$t_s = \int_0^{\infty} t p^2(t) dt / \int_0^{\infty} p^2(t) dt, \quad (2.19)$$

а при использовании искусственной головы

$$t_s = \int_0^{\infty} t / p_L(t) p_R(t) / dt / \int_0^{\infty} / p_L(t) p_R(t) / dt, \quad (2.20)$$

где $p_L(t)$ и $p_R(t)$ — звуковые давления в левом и правом ушах искусственной головы.

Второй способ базируется на начальном времени реверберации T_{10} :

$$K_R = 1,55 - 0,3 T_{10} / \text{с}. \quad (2.21)$$

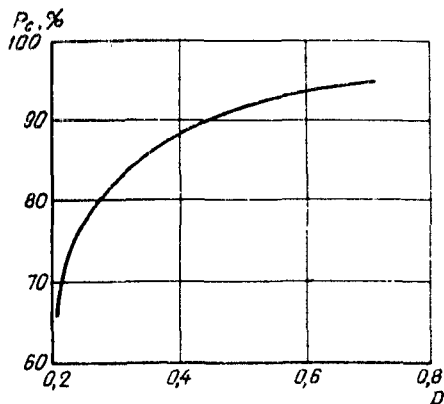


Рис. 2.6. Зависимость разборчивости слогов P_c от четкости D

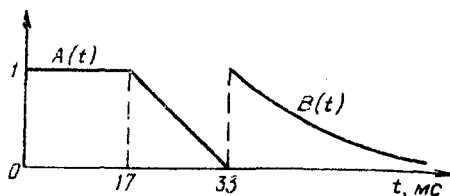


Рис. 2.7. Весовые функции $A(t)$ и $B(t)$

При различных способах определения K_R мультипликативные формулы расчета разборчивости дают значения, достаточно хорошо соответствующие результатам субъективных испытаний. Методика Янушки, например, для чешской речи позволяет определить слоговую разборчивость с точностью $\pm 5\%$ (отклонение от данных субъективной оценки составляет $\pm 5\%$). Главная трудность мультипликативных формул заключается в том, что лежащее в их основе предположение о независимости факторов вызывает возражение. В мультипликативных формулах также хуже учитывается спектр шума.

Завершая рассмотрение объективных методов оценки разборчивости речи в помещениях, следует упомянуть о предложении Лохнера и Бургера [34]. Это предложение также основано на делении импульсного отклика на полезную и мешающую части. Мешающими считаются отражения с запаздыванием более 95 мс. При определении полезной энергии, как и в критерии Низе, берется весовая функция (рис. 2.8). Критерий Лохнера и Бургера является аналогией отношения сигнала к шуму

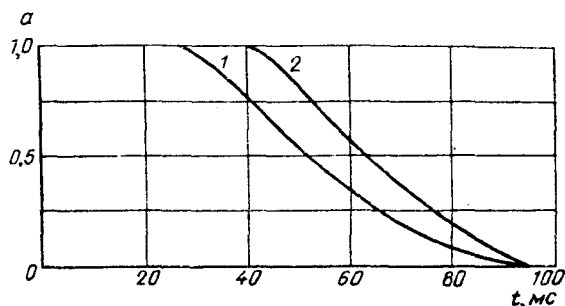
$$\Delta L = 10 \lg \left(\int_0^{95 \text{ мс}} a(t) p^2(t) dt / \int_{95 \text{ мс}}^{\infty} p^2(t) dt \right). \quad (2.22)$$

Величина слоговой разборчивости определяется с помощью графика в зависимости от абсолютных уровней речи и шума, а также от значения ΔL .

2.3. МЕТОДЫ И КРИТЕРИИ СУБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ МУЗЫКАЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Субъективная оценка помещений с музыкальными программами в отличие от речевых помещений вызывает ряд значительных трудностей. Это касается как методов проведения оценки, так и выбора субъективных критериев. Необходимо также указать

Рис. 2.8. Весовая функция $\alpha(t)$
 1 — уровень отражения равен
 уровню прямого звука;
 2 — уровень отражения на
 5 дБ ниже уровня прямого
 звука



на большой разброс индивидуальных оценок, характерный для музыкальных залов. Результаты субъективной оценки в значительной степени зависят от слушателей: их общего и музыкального образования, социальной принадлежности, профессии, вкусов и привычек, физического и психического состояния.

Первые попытки сформулировать впечатления от прослушивания музыки в залах были обычно связаны с опросом ведущих дирижеров и музыкантов. Метод анкетного опроса и сейчас нередко используется для того, чтобы получить представление об акустическом качестве зала в целом или отдельных зон слушательских мест. Анкеты обычно составляются с использованием понятий, употребляемых в архитектурной акустике. Оценка проводится как качественно, так и количественно.

В последние десятилетия стали развиваться методы субъективной оценки, основу которых составляют специально организованные тесты с привлечением группы экспертов. Субъективное тестирование проводится в настоящее время тремя способами: 1) когда слушатель находится в синтезированном звуковом поле, создаваемом в заглушенной камере с помощью электроакустической установки; 2) непосредственно в испытуемом зале; 3) на основе стереофонических записей, сделанных в испытуемом зале с использованием искусственной головы.

Первый способ позволяет легко менять параметры звукового поля: изменять уровни, запаздывание и направление прихода ранних отражений, вводить реверберацию, меняя ее величину и уровень, вводить частотные изменения в компоненты звукового поля. Подавая на вход электроакустической установки "сухую"* запись музыки, можно оперативно создавать звуковые картины и предъявлять их слушателю непосредственно друг за другом. При таком способе исключаются все посторонние (неакустические) влияния. Недостатками способа являются упрощенность картин звукового поля и невозможность сохранить информацию о направлении отдельных инструментов оркестра.

Второй способ, заключающийся непосредственно в прослушивании музыки в зале (и, особенно, при использовании оркестра), дает возможность оценить полную и реальную картину звукового

* Запись, сделанная в заглушенной камере.

поля. Этот способ, однако, не позволяет быстро менять звуковые обстановки, исследовать влияние отдельных параметров звукового поля и вызывает значительные организационные трудности. Кроме того, при непосредственном прослушивании музыки в зале сказывается ряд побочных факторов, влияющих на субъективную оценку (манера исполнения, вид интерьера, освещение, температура воздуха и т.п.).

Третий способ, основанный на прослушивании (через головные телефоны или громкоговорители в заглушенной камере) стереофонических записей, имеет по сравнению с непосредственным прослушиванием в зале большие организационные выгоды. К недостаткам способа относится проблема локализации источника звука, не решен до конца вопрос репродукции стереофонических записей. Так как головной телефон приспособляется на внешнее ухо, то характеристика передачи внешнего уха воздействует на звуковой сигнал дважды: один раз при записи через искусственную голову и другой раз — при репродукции. Следует, однако, отметить, что развитие техники искусственной головы дает основание надеяться, что в ближайшем будущем стереофонические системы с искусственной головой будут избавлены от указанных недостатков.

Возникают трудности в решении вопроса использования в зале оркестра и магнитных записей, проигрываемых со сцены через систему громкоговорителей. Громкоговорители дают точное воспроизведение звука в разных залах, но не обеспечивают того же звукового поля, что и оркестр. Оркестр (один и тот же при одном и том же дирижере) не обеспечивает идентичности исполнения. Возможный путь решения проблемы — разработка более совершенной системы громкоговорителей, имитирующих звук оркестра. Первые опыты в этом направлении уже сделаны.

Не менее важным, чем методика оценки, является выбор ее критериев оценки. Одна из первых попыток установить "словарь" критериев субъективной оценки акустики музыкальных залов была предпринята Беранеком [13]. На основании личного опыта, а также бесед с известными дирижерами, музыкальными критиками и музыкантами он предложил 18 субъективных критериев, предназначенных для характеристик акустики зала и связанных с теми или иными физическими величинами. Из общего числа восемь критериев Беранек относит к независимости, каждый из них может получить определенное количество баллов в пределах, зависящих от важности данного критерия. Наиболее важным критерием он считает интимность, связывая это понятие с впечатлением от прослушивания музыки в малых залах. Система из восьми независимых критериев, имеющих количественную оценку, дополнена отрицательными критериями (эхо, искажения и мешающие шумы). Наличие отрицательных факторов может снизить общее количество набранных баллов по всем критериям (100 баллов) наполовину. Таким образом, система построена на принципе аддитивности критериев. Это означает, что недостатки зала по

одним показателям могут быть в какой-то мере компенсированы достоинствами по другим. Такой подход вызывает существенное возражение, поскольку вопрос о независимости критериев Беранек решал не на базе экспериментальных, статистически проверенных данных, а на основе личного опыта и интуиции.

Несмотря на то что система оценки Беранека не получила распространения на практике, она послужила толчком для целого ряда работ, в которых субъективная оценка залов опиралась на результаты субъективных экспериментов и на использование статистических методов, направленных на уменьшение количества критериев. Некоторые из этих работ привели к трем и даже двум независимым субъективным факторам. Два фактора выделил Иошида [53], подвергнув анализу результаты субъективных тестов в зале. В качестве источника он использовал громкоговоритель и, по всей вероятности, музыкальные отрывки, записанные в обычных условиях (не в заглушенной камере). Два выделенных фактора Иошида интерпретировал как высшее качество исполнения и ясность звука. Результат, однако, вызывает сомнение, так как при независимости данных факторов едва ли слушательское место одновременно может иметь низкую оценку "ясности" и высокую оценку "высшего качества". К трем независимым субъективным факторам привела попытка Уилкенса [47], использовавшего концертное турне Берлинской филармонии под руководством Герберта фон Караяна. Перед концертами в пяти выбранных точках шести пустых залов с помощью искусственной головы были сделаны записи трех музыкальных отрывков различного стиля. Оценка записей проводилась через головные телефоны с помощью вопросника, содержащего 19 противоположных понятий (ясный — темный, слабый — сильный, мягкий — твердый и т.д.). Переход между понятиями оценивался слушателями количественно с помощью шести ступеней. Результаты этих тестов были обработаны с помощью факторного анализа, показавшего, что 19 субъективных понятий определяются тремя независимыми факторами. Первый фактор связан с силой звука и кажущейся шириной оркестра, второй — с ясностью звука и третий — с тембром звука. Среди результатов Уилкенса важно также отметить наличие двух типов вкуса у слушателей: одни предпочитали отрывки, отличавшиеся большей громкостью (даже за счет определенной потери ясности при фортиссимо), а другие отдавали предпочтение ясности, не допуская ее потери при большой громкости. Кроме того, как показала работа Уилкенса, сильное влияние на субъективную оценку оказывает выбор музыкального отрывка. Несколько неожиданным явилось то, что ни один из факторов прямо не связан с явлением реверберации, как это было у других авторов.

Рассматривая вопрос субъективной оценки качества звучания музыки в залах, необходимо упомянуть методику, разработанную по программе сотрудничества стран-членов СЭВ в области строительной акустики. Эта методика основана на непосредственном прослушивании в зале музыкальных отрывков, используемых

профессиональным симфоническим оркестром. При всех организационных сложностях такой способ является единственной возможностью получить полную и реальную картину звукового поля. Качество звучания оценивается специально отобранной группой слушателей, причем используется комплекс субъективных критериев. Дополнительную оценку акустического качества зала дают оркестранты.

Несмотря на отмеченную тенденцию к сокращению числа субъективных критериев, принятый в методике СЭВ комплекс субъективных понятий достаточно обширный. Это связано с тем, что в настоящее время еще нельзя выделить 3—4 фактора, которые позволили бы всесторонне охарактеризовать акустическое качество зала (зоны слушательских мест). В принятом комплексе ясность звучания музыки оценивается двумя критериями. Если их объединить (что вполне оправдано), то комплекс критериев для слушателей будет состоять из следующих понятий:

Реверберация (гулкость помещения). Понятие, характеризующее длительность процесса затухания звука на месте прослушивания. Субъективная оценка зависит от вида музыки (органная, симфоническая, камерная) и ее стиля.

Ясность. Понятие, характеризующее разделение звуков отдельных инструментов или групп инструментов как во времени, особенно при быстрых пассажах, так и в звуке одновременно играющих инструментов.

Пространственность. Понятие, характеризующее ощущение отношения между силой звука, приходящего к месту прослушивания из всех направлений (за исключением направления от источника), и силой звука, поступающего от источника. Пространственность — субъективный параметр, характеризующий ощущение закрытого пространства.

Громкость. Субъективное понятие, характеризующее громкость источника музыки при игре фортиссимо по отношению к некоторой ожидаемой громкости на месте прослушивания.

Баланс. Понятие, служащее для оценки громкости отдельных инструментов и групп инструментов по отношению к общей громкости оркестра. Здесь многое зависит от опыта слушателя, от его знания произведения и его способности исключить влияние манеры исполнения.

Тембр. Понятие, характеризующее восприятие отдельных составляющих спектра звука музыкального источника на месте прослушивания. Речь идет о том, в какой степени свойства помещения изменяют типичный тембр данного источника.

Общее акустическое впечатление. Понятие, охватывающее результат общей субъективной оценки акустических свойств помещения на месте прослушивания. При прослушивании в зале на общее акустическое впечатление могут повлиять и неакустические факторы.

Мешающие факторы. Понятие, включающее все причины, приводящие к ухудшению общего акустического впечатления на мес-

те прослушивания (за исключением уже указанных причин). Это могут быть явления акустического характера (эхо, порхающее эхо, нарушение локализации источника звука, тембровые искажения, шумы, несовершенное исполнение) и неакустического характера (плохой вид на эстраду, недостаточное освещение, неподходящая температура, сквозняк и др.).

Из перечисленных критериев для оркестрантов используются три: реверберация, общее акустическое впечатление и мешающие факторы. Эти критерии дополнены двумя факторами: слышимость собственного исполнения и взаимная слышимость. По всем критериям (за исключением мешающих факторов) как слушатели, так и исполнители осуществляют количественную оценку по 5-балльным шлакам.

Рассмотренный выше комплекс субъективных критериев в целом совпадает со словарем субъективных понятий, рекомендованным Рейхардтом. Отличие сравнительно небольшое. В комплексе СЭВ нет понятия нарастания звучания, а в словаре, составленном Рейхардтом, нет понятий реверберации, мешающих факторов и общего акустического впечатления.

Нарастание звучания характеризует процесс формирования звукового поля в точке прослушивания. При интенсивном прямом звуке и интенсивных ранних отражений говорят о жестком нарастании звучания. Если же прямой звук и ранние отражения слабы, то нарастание называют мягким. Обычно предпочтение отдается мягкому нарастанию. Слишком мягкое нарастание звучания в зале может быть, например, при расположении оркестра в оркестровой яме. Отсутствие понятия нарастания звучания в комплексе СЭВ компенсируется наличием понятия реверберации. Дело в том, что процессы нарастания и затухания звука тесно связаны друг с другом. Результаты субъективного тестирования [27] свидетельствуют об очень высокой корреляции оценок нарастания и реверберации (коэффициент корреляции $R_k = 0,98$).

Отсутствие в словаре Рейхардта понятия мешающих факторов объясняется тем, что, по его мнению, при современном уровне знаний и технических средств таких факторов вообще не должно быть. Что же касается общего акустического впечатления, то включение этого понятия в комплекс субъективных критериев представляется весьма полезным. Помимо интегральной оценки залов это даст возможность в дальнейшем выявить весовые коэффициенты, с которыми отдельные субъективные критерии участвуют в формировании общего акустического впечатления, т.е. позволить установить степень важности критериев.

2.4. СВЯЗЬ СУБЪЕКТИВНЫХ И ОБЪЕКТИВНЫХ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ МУЗЫКАЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Как уже отмечалось, для музыкальных залов пока еще не установлено однозначное соответствие между субъективными и объективными критериями. В значительной мере этому препятствует то,

что наряду с большим количеством критериев существует корреляция как между отдельными субъективными критериями, так и между отдельными объективными параметрами. Хотя исследования в области оценки музыкальных залов весьма далеки от завершения, результаты выполненных работ позволили установить между субъективными и объективными критериями определенные связи. Рассмотрение этих связей удобно провести с использованием комплекса субъективных критериев.

Реверберация, гулкость помещения. Вплоть до недавнего времени основным объективным показателем гулкости помещения являлось стандартное время реверберации T . В последующие годы стали использовать начальное время реверберации, полученное методом интегрированного импульсного отклика (см. п. 1.2). Довольно часто применяется T_{10} (EDT), хотя четкого оптимума для этого показателя еще не установлено. Предлагаемая оптимальная область T_{10} для частот 500–1000 Гц составляет 1,7–2,3 с. Эти значения практически совпадают с рекомендуемыми для стандартного времени реверберации. Следует отметить, что коэффициенты корреляции между T и T_{10} , установленные Готтлобом [22], оказались выше 0,9.

Начальное время реверберации во всех его модификациях, как уже было отмечено, в значительной степени зависит от положения приемника звука в помещении и является скорее локальным, чем глобальным критерием. Для практического использования этого показателя необходимы дальнейшие исследования.

Ясность, прозрачность звучания. Исследования Готтлоба, использовавшего упомянутую выше четкость по Тиле, выявили довольно хорошую связь между ясностью звучания и соотношением ранней и поздней энергии импульсного отклика. При этом вариации границы между ранней и поздней энергией от 50 до 100 мс давали сравнительно небольшие изменения в субъективном предпочтении.

Рейхардт, Абдель Алим и Шмидт [38] в качестве объективной меры ясности предложили использовать индекс ясности:

$$C_{80} = 10 \lg \left(\int_0^{80 \text{ мс}} p^2(t) dt / \int_{80 \text{ мс}}^{\infty} p^2(t) dt \right). \quad (2.23)$$

Выбор границы между ранней и поздней энергией в индексе ясности обусловлен тем, что отражения с запаздыванием до 80 мс повышают ясность, прозрачность звучания. Кроме того, время нарастания колебаний большинства музыкальных инструментов составляет примерно 100 мс. Это означает, что за 80 мс к слушателю поступает основная часть энергии колебаний, позволяя ему правильно определить проигрываемый тон.

Для C_{80} была установлена область оптимальных значений, равная $0 \pm 1,6$ дБ. Позднее Рейхардт и Леман [40], проведя более детальные исследования, дали различные значения C_{80} для передних и задних рядов зала (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Ступени качества	Значения C_{80} , дБ	
	Передние ряды	Задние ряды
Хорошее	от 3 до 8	от 0 до 5
Приемлемое	$> +8$ от -2 до 3	от 5 до 9
Неприемлемое	< -2	$> +9$ < -5

Как видно из приведенных в таблице данных, оптимальные значения C_{80} в передних рядах больше, чем в задних, причем в обоих случаях больше 0 дБ. Оптимальные значения C_{80} , по всей вероятности, еще нуждаются в уточнении. Так, например, результаты, полученные Исследовательским институтом техники звука и изображения (Прага ЧССР), свидетельствуют о том, что высокие субъективные оценки ясности могут быть и при $C_{80} < 0$ дБ.

Несмотря на то что индекс ясности является наиболее распространенным объективным критерием акустического качества музыкальных залов, он имеет недостаток, присущий критериям, основанным на резком разделении импульсного отклика на две части. В этом смысле использование весовых функций, предлагаемое в речевых критериях Низе, а также Лохнера и Бургера, представляется более правильным.

Параметром, не требующим резкой временной границы, является время центра тяжести t_s (2.19) и (2.20). В работе Уилкенса и Лемана [33] показано, что t_s хорошо коррелировано с ясностью звучания. В качестве максимального значения t_s указывается величина 140 мс. Отмечается, что для хорошей акустики концертного зала необходима достаточно высокая ясность, прозрачность звучания. Причем важным оказывается отношение слушателей к критерию ясности звучания: одни предпочитают большую ясность, а другие — меньшую. Для практического использования t_s необходима его оптимизация и исследование частотной зависимости. Следует отметить, что отсутствуют также данные о частотной зависимости C_{80} .

Пространственность, пространственное впечатление. Ощущение пространства чаще всего связывалось со временем реверберации или с соотношением энергии ранних и поздних отражений в импульсном отклике. Преобладание энергии поздних отражений приводит к увеличению пространственного впечатления. На это указывали Беранек и Шульц [14], предлагая для оценки музыкальных залов индекс реверберации

$$R = 10 \lg \left(\frac{\int_{50\text{ мс}}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50\text{ мс}} p^2(t) dt} \right). \quad (2.24)$$

Более поздние исследования [12] выявили очень важную роль

ранних боковых отражений в формировании пространственного впечатления. Было установлено, что ощущение пространства возрастает с увеличением энергии боковых отражений, причем отражения, приходящие по направлению оси максимальной чувствительности уха слушателя, вызывают наибольшее пространственное впечатление. Пространственный эффект не меняется, если запаздывание отражений находится в пределах 8–100 мс, а также в том случае, когда небольшое число интенсивных отражений заменяется большим количеством слабых отражений, общая энергия которых соответствует небольшому числу интенсивных отражений. Отражения от потолка не увеличивают пространственного впечатления, однако и не оказывают маскирующего действия на отражения от боковых стен. Потолочные отражения увеличивают индекс ясности C_{80} .

Субъективный эффект боковых отражений зависит от их частоты. На низких частотах у слушателя возникает ощущение будто бы со всех сторон он охвачен звуком. Это сопровождается увеличением кажущейся площади источника звука. На более высоких частотах (порядка 1000 Гц) субъективное ощущение в большей мере отвечает расширению источника звука. На частотах около 4 кГц эффект расширения звука уменьшается и для отдельного бокового отражения источник кажется смещенным в сторону от направления вперед.

Учитывая важную роль боковых отражений, можно ожидать хорошей связи пространственности с физическими параметрами, получаемыми на основе бинауральных импульсных откликов. Речь идет прежде всего об интерауральной когерентности, предложенной Готтлобом:

$$K_T = \frac{\int_0^{\tau} p_1(t) p_2(t) dt}{\sqrt{\int_0^{\tau} p_1^2(t) dt + \int_0^{\tau} p_2^2(t) dt}}, \quad (2.25)$$

где $p_1(t)$ и $p_2(t)$ — звуковые давления на левом и правом ушах искусственной головы.

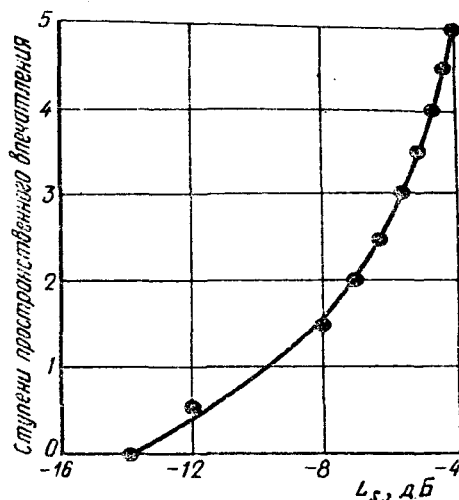
Наилучшую связь с субъективной оценкой Готтлоб установил используя лишь начальную часть импульсного отклика ($\tau = 100$ мс). Чем меньше было значение параметра K_T , тем большее предпочтение отдавалось звуковому полю.

Относительный уровень боковых отражений L_s предложен Барроном [12] в качестве индекса пространственного впечатления:

$$L_s = 10 \lg \frac{\sum_i E_i q(\varphi_i)}{E_D + \sum_i [1 - q(\varphi_i)]}, \quad (2.26)$$

где E_i — энергия отражения (Δt от 5 до 80 мс); $q(\varphi_i) = |\sin \alpha_i| \cos \beta_i$; E_D — энергия прямого звука (Δt от 0 до 5 мс); Δt — диапазон времени запаздывания; α_i — горизонтальный угол между направлением на источник звука и направлением прихода отражения; β_i — угол подъема (0° соответствует отражениям в горизонтальной плоскости).

Рис. 2.9. Зависимость пространственного впечатления от параметра



Верхний предел запаздывания, равный 80 мс, примерно соответствует граничной области между эффектами ранних отражений и эффектами реверберации, хотя L_s практически не меняется при увеличении времени запаздывания до 100 мс. Параметр L_s имеет хорошую корреляцию с пространственным впечатлением (рис. 2.9).

Весьма схож по смыслу с параметром L_s критерий Йордана [25], предложенный им в качестве объективной меры пространственного впечатления

$$L_J = 10 \lg \left(\frac{\int_{25\text{мс}}^{80\text{мс}} p_R^2(t) dt}{\int_0^{80\text{мс}} p_K^2(t) dt} \right). \quad (2.27)$$

Буквенными индексами в этом выражении обозначены виды диаграмм направленности микрофона, используемого для получения импульсных откликов помещений (К — круговая диаграмма, R — диаграмма направленности в виде восьмерки). При проведении измерений направленный микрофон располагается таким образом, чтобы ось его минимальной чувствительности была направлена на источник звука. Выражение под знаком интеграла характеризует отношение энергии, поступившей с боковых направлений за время от 25 до 80 мс, ко всей энергии, пришедшей в точку измерения за 80 мс. В упомянутой работе [25] показано, что оптимальное значение L_J находится в пределах от -5 до -7 дБ. Преимуществом этого параметра является относительная простота его измерения.

Следует также отметить предложенный Рейхардтом и Леманном [39] индекс пространственного впечатления

$$R_1 = 10 \lg \left[\left(\int_{25\text{мс}}^{\infty} p^2(t) dt - \int_{25\text{мс}}^{80\text{мс}} p^2(t) dt \right) / \left(\int_0^{25\text{мс}} p_1^2(t) dt + \int_{25\text{мс}}^{80\text{мс}} p_2^2(t) dt \right) \right], \quad (2.28)$$

где $p_k(t)$ — звуковое давление, принятое микрофоном с круговой диаграммой направленности; $p_R(t)$ — звуковое давление, измеренное направленным микрофоном, ориентированным на источник звука (угол раскрытия диаграммы направленности $+40^\circ\text{C}$). В качестве оптимальной области значений R_1 Леманн рекомендует 2–6 дБ.

Специалисты Дрезденского технического университета модифицировали индекс пространственного впечатления, предложив определять его на основе импульсных откликов, полученных с помощью искусственной головы

$$R_2 = 10 \lg \left[\left(\int_{25\text{мс}}^{\infty} p^2(t) dt - (\psi / \int_{25\text{мс}}^{80\text{мс}} p^2(t) dt) \right) / \left(\int_0^{25\text{мс}} p^2(t) dt + \psi / \int_{25\text{мс}}^{80\text{мс}} p^2(t) dt \right) \right], \quad (2.29)$$

где $p^2(t) = 1/2 [p_1^2(t) + p_2^2(t)]$; $p_1(t)$ и $p_2(t)$ — сигналы импульсного отклика, полученные соответственно с левого и правого ушей искусственной головы.

На основе исследований, выполненных в заглушенной камере Дрезденского технического университета, установлено, что коэффициент ψ зависит от величины энергии боковых отражений, приходящих в интервале от 25 до 80 мс. Для практического использования потребуется оптимизация как самого критерия R_2 , так и входящего в него коэффициента ψ .

Следует отметить, что объективные меры ясности C_{80} и t_S имеют также неплохую связь с пространственным впечатлением. Как показали исследования, выполненные в Институте техники звука и изображения (Прага, ЧССР), между C_{80} и пространственным впечатлением существует весьма значительная отрицательная корреляция (коэффициент корреляции $R_K = -0,83$). При этом оптимум C_{80} находится в области 0 дБ, т.е. близок к оптимуму индекса ясности, первоначально предложенному Рейхардтом, Абдель Алимом и Шмидтом [38]. Такая же тесная корреляционная связь (положительная) установлена между t_S и пространственным впечатлением. Оптимум для t_S находится между 120 и 140 мс. Эти результаты еще раз показывают, насколько значительна корреляция между отдельными объективными параметрами.

Заслуживающими внимания являются результаты исследований связи пространственного впечатления и физических параметров, полученные Кулем [30] в синтезированных звуковых полях и путем прослушивания натуральных стереофонических записей. Отметив сравнительно малую зависимость пространственного впечатления от времени запаздывания боковых отражений, автор указывает, что ощущение пространства возрастает при увеличении уровня музыки.

Громкость. В соответствии с результатами многочисленных исследований субъективное ощущение силы звука (громкость) прямо пропорционально плотности звуковой энергии в стационарном состоянии. Стационарная плотность звуковой энергии на слушательском месте может быть определена путем измерения уров-

ния звукового давления L_{ST} при возбуждении воздушного объема помещения стационарным звуковым сигналом (шумом) или путем измерения общей энергии импульсного отклика E_{∞} :

$$E_{\infty} = \int_0^{\infty} p^2(t) dt \approx \int_0^T p^2(\tau) dt, \quad (2.30)$$

где T — время реверберации помещения.

Второй способ имеет то преимущество, что величина E_{∞} измеряется при определении практически всех импульсных критериев акустического качества помещения. Так как при оценке акустического качества нас прежде всего интересует влияние самого помещения, то L_{ST} и E_{∞} обычно нормируются на величину, пропорциональную мощности источника звука.

Для оценки относительной громкости при стационарном возбуждении звукового поля удобно использовать так называемую характеристику передачи "сцена-место" [50], дБ,

$$SST = L_{ST} - L_p, \quad (2.31)$$

где L_{ST} — уровень звукового давления на слушательском месте при стационарном шумовом возбуждении звукового поля, L_p — уровень мощности источника, определенный в заглушенной камере. При измерении SST использовались 1/3-октавные полосы шума.

При импульсном возбуждении звукового поля для оценки относительной громкости обычно применяется следующее выражение:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{E_0}, \quad (2.32)$$

где E_0 — представляет собой величину, пропорциональную излучаемой при импульсном возбуждении мощности.

В соответствии с данными Дрезденского технического университета

$$E_0 = E_5 \left(-\frac{r}{5 \text{ м}} \right)^2, \quad (2.33)$$

где r — расстояние до точки приема, $E_5 = \int_0^{5 \text{ мс}} p^2(t) dt$.

Таким образом, выражение (2.32) приобретает вид:

$$\Delta L = 10 \lg \left[\int_0^{\infty} p^2(t) dt / \left(-\frac{r}{5 \text{ м}} \right)^2 \int_0^{5 \text{ мс}} p^2(t) dt \right]. \quad (2.34)$$

Измерения проводятся с помощью искусственной головы и сигналы, принятые левым и правым ухом, суммируются: $p^2(t) = p_1^2(t) + p_2^2(t)$. Приведем ориентировочные значения параметра ΔL .

Значение параметра
 ΔL , дБ

Субъективная оценка громкости

>0
 <-4
 >4

Нормальная
Недостаточная
Чрезмерная

Баланс. На первый взгляд этот субъективный фактор определяет только сыгранностью оркестра и умелой работой дирижера. Однако немалую роль здесь играют и объективные факторы: месторасположения исполнителя, характеристика передачи зала для каждого инструмента, а также акустические условия на сцене и в оркестровой яме.

В качестве объективной меры баланса между группой инструментов X и группой Y Дрезденским техническим университетом предложен индекс баланса

$$B' = 10 \lg \frac{E_{x200}}{E_{y200}} + B' \quad (2.35)$$

где E_{x200} / E_{y200} представляет собой отношение энергий импульсных откликов (с верхним пределом интегрирования 200 мс), полученных в соответствующем месте зала при расположении импульсных источников, имитирующих группы инструментов, на сцене в точках X и Y .

Источники звуковых импульсов должны иметь соответствующие диаграммы направленности и обеспечивать одинаковый уровень звука на расстоянии 1 м по главной оси излучения. Величина B'_{xy} является мерой относительного баланса групп X и Y . Эти величины берутся из табл. 2.4.

Таблица 2.4.

Группа Y	Группа X				
	A	B	C	D	S
A	—	—5,8	1,5	0	—2,8
B	5,8	—	7,3	5,8	3,8
C	—1,5	—7,3	—	1,5	—4,3
D	0	—5,8	1,5	—	—2,8
S	2,8	—3,0	4,3	2,8	—

П р и м е ч а н и е. A обозначает группу струнных инструментов, B — группу деревянных духовых инструментов, C — медных инструментов, D — басовых инструментов и S — певца.

Для оценки результатов расчетов индекса баланса B' рекомендуется следующая классификация этого критерия:

Индекс баланса, дБ A

$B' > 5$

$-5 < B' < 5$

$B' < -5$

Субъективная оценка баланса

Нарушен, группа X преобладает над группой

Оптимальный

Нарушен, группа Y преобладает над группой X

Тембр, окраска звучания. Окраска звучания определяется соотношением энергии низких и высоких частот в звуковом поле. Субъективная оценка тембра в значительной степени зависит от акусы слушателей. Одни предпочитают "светлое" звуковое поле (преобладание высоких частот), другие — "темное" звуковое поле (преобладание низких частот). Обычно окраска звучания до сих пор связывалась с частотной характеристикой времени реверберации $T(f)$, причем для музыкальных помещений считается весьма желательным подъем $T(f)$ в сторону низких частот. В качестве оптимального обычно рекомендуется такой подъем, при котором время реверберации на частоте 125 Гц возрастает примерно на 20% по сравнению со временем реверберации на частотах 500–1000 Гц.

Однако оценка тембра только по частотной характеристике времени реверберации оказалась недостаточной. Как показали исследования последних лет, не меньшее значение для оценки тембра имеет спектр прямого звука и ранних отражений, несущих большую часть энергии импульсного отклика. К сожалению, вопрос связи окраски звучания и частотной зависимости структуры отражений изучен еще довольно слабо. Исследованиям в этом направлении препятствует отсутствие данных о частотной зависимости большинства критериев, связанных со структурой ранних отражений. Некоторые дополнительные сведения о роли спектра ранней энергии может дать частотная характеристика времени начальной реверберации, особенно $T_{10}(f)$, так как этот параметр в весьма значительной степени определяется структурой ранних отражений. На связь частотной характеристики T_{10} с окраской звучания указывают Леманн и Уилкенс [33], отмечая, что частотная характеристика T_{10} должна быть слегка падающей в сторону высоких частот: наклон $T_{10}(f)$ порядка 0,1–0,2 с на октаву.

С точки зрения объективной оценки тембра значительный интерес представляет разработанный в НИИСФ метод контроля акустического качества мест музыкальных залов, основанный на частотном анализе звукового поля, возбуждаемого стационарным сигналом (розовым шумом). В соответствии с этим методом определяется величина A в зависимости от частоты. Эта величина для каждой полосы частот находится по формуле, дБ:

$$A = \underline{L} - L_1, \quad (2.36)$$

где $\underline{L}$ — уровень звукового давления в рассматриваемой точке помещения; L_1 — среднее значение уровней звукового давления, измеренных в точках сферы, описанной радиусом 1 м вокруг акустического центра громкоговорителя.

Уровни звукового давления измеряются с помощью ненаправленного микрофона в 1/3-октавных полосах частот в диапазоне 63–8000 Гц. Во время измерений громкоговоритель, направленность которого близка к направленности человеческого голоса, располагается на сцене зала.

В результате акустического обследования десяти наиболее известных музыкальных залов Москвы было установлено, что ха-

рактерным параметром $A(f)$ является ее форма $A_1(f)$, определяемая в виде зависимости

$$A_1(f) = A(f) - A_0, \quad (2.37)$$

где A_0 — среднее значение величин A , полученных в данной точке помещения во всем частотном диапазоне измерений.

Зависимость $A_1(f)$ хороших в акустическом отношении мест не должна существенно отклоняться от оптимальной кривой, представленной на рис. 2.10 (пределы допустимых отклонений показаны штриховкой). Значительные отклонения $A_1(f)$ от оптимальной кривой сопровождаются ухудшением субъективной оценки мест. Так, например, относительное снижение уровня низких частот сопровождается ощущением дефицита низких частот и уменьшением пространственного впечатления. Относительное снижение уровня высоких частот приводит к ухудшению ясности звучания. Наряду с $A_1(f)$ для оценки акустического качества места рекомендуется и второй параметр — величина A_0 . Значения A_0 хороших мест должны находиться в пределах оптимальной области, зависящей от объема помещения (рис. 2.11). Если, например, A_0 лежит значительно ниже указанной области, то это свидетельствует о недостаточной громкости и пространственности на данном месте зала. *прод-ие стр 84.*

Касаясь тембровых изменений прямого звука и ранних боковых отражений, необходимо упомянуть об эффекте дополнительного ослабления звука при его распространении над сидящими слушателями. Это дополнительное ослабление (к ослаблению, связанному со сферическим расхождением звуковой волны) максимально в области 150–200 Гц и достигает 15 дБ. Многие исследователи предлагают компенсировать этот эффект путем увеличения времени реверберации на низких частотах. Таким образом, возрастание времени реверберации на низких частотах является благоприятным по двум причинам: дает лучшую окраску звучания и оказывает благоприятное воздействие на пространственное впечатление, особенно в том случае, если боковые отражения низких частот сильно ослаблены из-за избыточного поглощения звука при его распространении над сидящими слушателями.

Общее акустическое впечатление. Этот субъективный критерий трудно связать с каким-либо объективным акустическим показателем. По всей вероятности, общее акустическое впечатление от оцениваемой звуковой обстановки определяется тем, в какой степени значения отдельных объективных критериев близки к оптимальным. Более четкую зависимость общего впечатления от физических величин удастся, очевидно, установить после того, как будут уточнены отдельные субъективные критерии, определяющие общее акустическое впечатление.

Не следует также забывать, что общее впечатление связано с отношением слушателей к музыке. Кроме того, при прослушива-

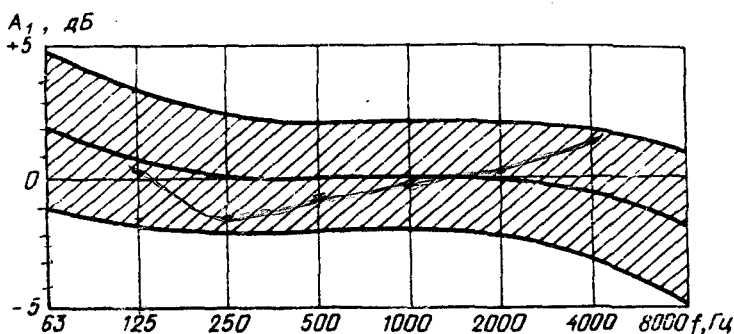


Рис. 2.10. Оптимальная форма характеристики $A(f)$

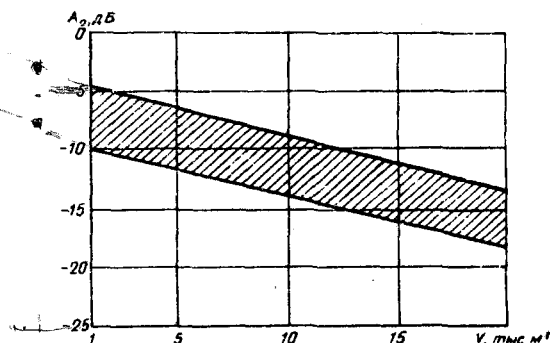


Рис. 2.11. Область оптимальных значений A_0 в зависимости от объема зала

нии музыки непосредственно в зале значительную роль играют факторы неакустического характера, которые отрицательно влияют на впечатления.

2.5. ОБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА МЕШАЮЩИХ АКУСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Эхо. Поздние звуковые отражения при определенных условиях могут вызвать эхо — заметное на слух повторение прямого звука. Заметность эха и его мешающее действие зависят от целого ряда объективных параметров. Наиболее важными из них являются время запаздывания и интенсивность отражения по отношению к прямому звуку, а также тип звукового сигнала. Взаимосвязь этих трех параметров характеризуют пороги заметности эха, показанные на рис. 2.12 и являющиеся усредненными по данным измерений многих авторов. Наиболее низкий порог — для речи, а наиболее высокий — для медленных скрипичных пассажей. Эхо, заметное при речевом сигнале, может совсем не мешать при исполнении музыкальных произведений.

На субъективную оценку эха влияют и другие физические параметры звукового поля. К ослаблению эха приводят достаточно интенсивные промежуточные отражения, расположенные (по времени запаздывания) между эхом и прямым звуком. Как отмечает Сантон [41], промежуточное отражение, равное по уровню

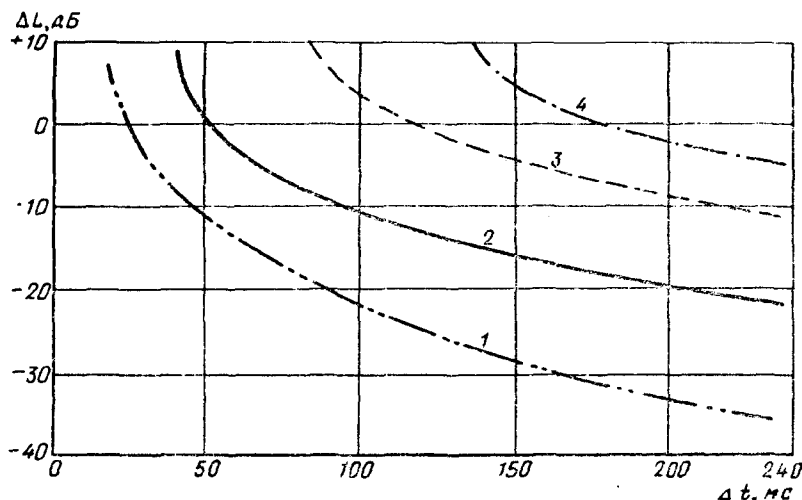


Рис. 2.12. Пороги заметности эха для различных звуковых сигналов
1 — речь; 2 — скрипка (быстрые пассажи); 3 — орган; 4 — скрипка (медленные пассажи)

прямому звуку и запаздывающее на 15–30 мс, повышает порог эха для речи на 10 дБ. Это отмечается и другими авторами [20]. Немаловажным условием для возникновения эха является и абсолютный уровень прямого звука, при увеличении которого порог заметности (мешающего действия) эха уменьшается [1]. Существенное значение для формирования эха имеет также спектр запаздывающего отражения. Исследования с использованием импульсных сигналов [51] позволили установить, что порог эха при высокочастотных импульсах ниже, чем при низкочастотных. Аналогичная тенденция наблюдалась и в результате исследований речевых сигналов [35]. И, наконец, немаловажным фактором, влияющим на порог эха, оказывает направление прихода позднего звукового отражения. Исследования мешающего действия эха на речевой сигнал показали, что при боковом падении звука порог эха примерно на 5 дБ ниже, чем при фронтальном [41].

Помимо перечисленных параметров, влияющих на эхообразование, необходимо учитывать критерии, которые позволили бы оценить заметность или мешающее действие поздних интенсивных отражений. Существующие критерии связаны, как правило, с тем или иным способом оценки осциллограмм импульсных откликов помещений.

Наиболее ранний объективный критерий предложен Болтом и Доком [17] в виде семейства порогов мешающего действия эха, представленного на рис. 2.13. В качестве критерия был взят процент слушателей, которым эхо мешало. Совмещая диаграмму, показанную на рис. 2.13, с осциллограммой импульсного отклика, по пересечению наиболее характерных отражений с соответствующими

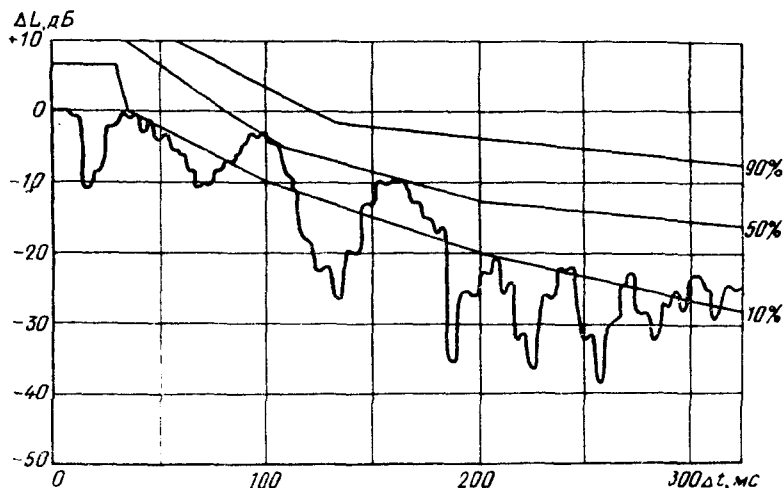


Рис. 2.13. Пороги мешающего действия эха по данным Болта и Дока

щим порогом можно определить, какому проценту слушателей будет мешать эхо. Практическое применение авторами этого критерия оказалось достаточно успешным. Однако критерий Болта и Дока, предложенный еще в 1950 г., до сих пор не получил широкого распространения. Это связано с тем, что данные, положенные в основу критерия, получены в помещении со временем реверберации $T = 0,8$ с. Для использования критерия при $T \geq 0,8$ с необходимо получить соответствующие пороги мешающего действия эха. Кроме того, критерий не учитывает влияния промежуточных отражений, а также того факта, что группа слабых отражений может восприниматься как слышимое эхо (наш слух интегрирует отражения).

Касаясь более поздних объективных критериев оценки эха, следует отметить предложение Ямомото [51]. При разработке критерия им была использована модель помещения в масштабе 1:10, в которую излучались шумовые импульсы длительностью 1 мс (10 мс в натуре). Импульсные отклики, записанные в модели на магнитную ленту, после транспонирования предъявлялись слушателям в заглушенной камере. Ямомото установил, что время появления слышимого эха зависит от частоты импульса. Для частоты 500 Гц оно составляет 45 мс, для частоты 1000 Гц — 35 мс и для частоты 2000 Гц — 25 мс. До указанных величин оценочная кривая, изображенная на рис. 2.14, остается горизонтальной, а затем имеет прямолинейный спад до пересечения с отражением. После пересечения снова появляется горизонтальный участок и снова спад. Крутизна спада δ зависит от абсолютного уровня отражения L ;

$$\delta = L / 300 \text{ мс.} \quad (2.38)$$

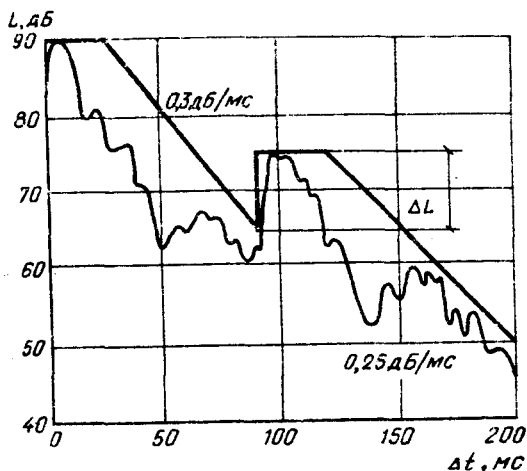


Рис. 2.14. Пример оценки заметности эха по методу Яомото (частота импульса 2000 Гц)

В качестве критерия эха для запаздываний до 200 мс Яомото предлагает величину ΔL (см. рис. 2.14), которая в зависимости от частоты не должна превышать следующих значений:

Частота, Гц		ΔL , дБ
500	< 3	4
1000	< 2	3
2000	$> 1,5$	2,5

Критерий Яомото помимо уровня и запаздывания эха учитывает его спектр и наличие промежуточных отражений. Вопросом остается действие группы слабых отражений.

Порхающее эхо. Многократное или порхающее эхо представляет собой периодическую последовательность эха. Порхающим обычно считается по крайней мере трехкратное эхо. Порхающее эхо возникает при отражении звука между двумя параллельными поверхностями. Особенно сильное порхающее эхо наблюдается при отражении звука между вогнутой и плоской поверхностью или между двумя вогнутыми поверхностями. На практике это может наблюдаться в помещениях со сводчатым или куполообразным покрытием и плоским горизонтальным полом.

Связи субъективной оценки порхающего эха и объективных характеристик звукового поля исследованы довольно слабо, причем практически отсутствуют объективные критерии оценки. Минимальный временной интервал (период), при котором возникает порхающее эхо, зависит от разницы в уровнях предыдущего и последующего отражений, а также от типа звукового сигнала. Для речи этот интервал близок к 50 мс, а для музыки — к 100 мс. Мешающее действие порхающего эха (как и однократного) уменьшается при наличии промежуточных отражений.

Нарушение локализации источника звука. Правильная локализация источника звука (совпадение зрительного образа со слуховым) особенно важна в речевых помещениях. В концертных залах

требование правильной локализации не столь жесткое, некоторое "рассеяние" звукового образа даже иногда желательно. Тем не менее сильное нарушение локализации недопустимо и в этом случае.

К нарушению локализации источника звука может прежде всего привести эхо, которое приходит по направлению, отличающемуся от направления прихода прямого звука. Слушатель воспринимает звук из двух направлений. Первое совпадает с направлением прихода прямого звука, а второе обычно соответствует направлению прихода эха. При значительной интенсивности эха (концентрация звуковых отражений) прямой звук может вообще не восприниматься слушателем. Однако для этого энергия отражений должна быть много больше энергии прямого звука. Так, например, при запаздывании порядка 20 мс энергия отражений должна превосходить энергию прямого звука в 100 раз.

В помещениях, не имеющих эха или сильной концентрации отражений, нарушения локализации обычно не наблюдается. Здесь следует упомянуть так называемый "закон первой волны" [20] в силу которого направление прихода звука определяется звуковым сигналом, первым поступившим к слушателю, т.е. прямым звуком источника. Правильная локализация источника звука сохраняется даже в том случае, когда энергия отражений в 10 раз превышает энергию прямого звука. Однако запаздывание этих отражений должно быть не более 30 мс.

Искажения тембра. Искажение первоначального звукового сигнала является недопустимым акустическим дефектом. Искажение тембра сигнала может, например, возникнуть при упомянутом эффекте порхающего эха, если период последовательности отражений меньше 20 мс (частота более 50 Гц). В этом случае звуковой сигнал получает выраженную тональную окраску, связанную с эффектом гребенчатой фильтрации. В частотной характеристике передачи помещения появляются периодические провалы, частота которых соответствует частоте последовательности запаздывающих отражений. Слушатель помимо основного сигнала воспринимает тон, частота которого равна частоте последовательности. Аналогичный эффект частот наблюдается при наличии в помещении членений с мелким регулярным шагом (например, отделке поверхностей деревянной рейкой, волнистой асбофанерой и т.п.). Такая отделка помещений вызывает периодические отражения звуковых импульсов, воспринимаемые на слух как неприятное подсвистывание.

К искажению тембра, излучаемого в зал звукового сигнала, приводит также отделка поверхностей звукопоглотителем с резко выраженным максимумом коэффициента звукопоглощения. При больших количествах такого звукопоглотителя может образоваться провал в частотной характеристике реверберации или частотной характеристике передачи помещения.

Мешающие шумы. В условиях эксплуатации помещений шумовой режим помещения определяется шумом, создаваемым публи-

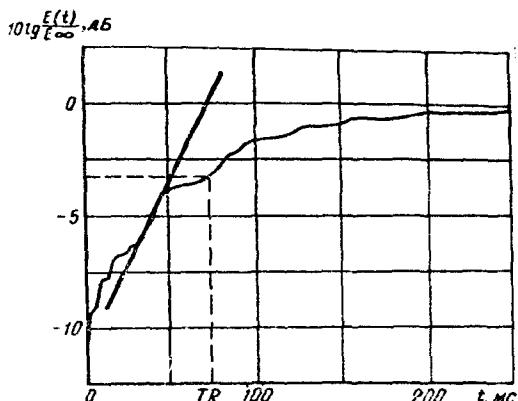
кой, и проникающими шумами. Шум, создаваемый людьми, находящимися внутри помещения, не нормируется, так как в основном зависит от их дисциплинированности и физического состояния (например, большое число простуженных в зале) или может быть связан с жестким полом помещения (шорох), с наличием жестких старых кресел (скрип), а также с плохой акустикой, вызывающей нервозность слушателей. Обычно уровень шума публики в паузах составляет 40–50 дБА.

Когда говорят о мешающих шумах, то, как правило, имеют в виду шумы, проникающие в зал из соседних помещений или с улицы, а также создаваемые различным инженерным оборудованием здания. Уровни этих шумов зависят от эффективности шумозащитных мероприятий (звукоизоляция ограждений помещений, виброизоляция инженерного оборудования, наличие глушителей шума в системах вентиляции и кондиционирования воздуха). Измерение шумовых характеристик помещений проводится в соответствии с ГОСТом. Измеренные уровни шума в октавных полосах частот в диапазоне 63–8000 Гц не должны превышать значений, указанных в СНиП 11-12-77. Уровень проникающего шума в концертных залах должен быть не более 35 дБА, а в остальных залах — не более 40 дБА. Существенное превышение допустимых уровней свидетельствует о серьезных ошибках в проектировании мероприятий по защите помещения от шума и является грубым акустическим дефектом. Особенно неприятны тональные шумы, так как ухо человека особенно чувствительно к периодическим сигналам.

Несовершенное исполнение. К существенному ухудшению качества восприятия речи и особенно музыки может привести несовершенство исполнения, связанное с отсутствием в исполнительской зоне необходимых акустических условий. Трудность здесь заключается в том, что нет четкого определения этих условий. Несмотря на очевидную важность, вопрос акустики сценической зоны изучен очень слабо.

Субъективная оценка акустических условий в сценической зоне зависит от возможности слышать собственное исполнение и исполнение партнеров, а также от реверберации (гулкости) помещения и наличия перечисленных мешающих факторов. Слышимость собственного исполнения и взаимная слышимость в настоящее время связываются в основном со структурой ранних отражений. Однако недостаточно ясно, какой должна быть эта структура в смысле запаздывания и уровня отражений. Требуются ли интенсивные малозапаздывающие отражения, обеспечивающие достаточно жесткое нарастание звука, или же возможно рассеяние отражений, приводящее к более мягкому нарастанию. Каким должен быть частотный состав ранних отражений и так ли важны для исполнителей боковые отражения. Все эти вопросы ждут своего решения. В качестве объективной меры — гулкости в исполнительской зоне (как и в слушательской) предлагается использовать стандартное или начальное время реверберации. Однако отсутствуют сведения о том,

Рис. 2.15. Кривая нарастания энергии импульсного отклика



какие значения и какая частотная характеристика времени реверберации предпочтительны для исполнителей. Неясно также, в какой степени существующие критерии объективной оценки мешающих факторов соответствуют требованиям исполнителей.

Почти все известные объективные критерии акустического качества помещений можно измерять в зоне исполнения. К сожалению, такие данные отсутствуют. Имеется лишь один объективный критерий, предложенный Йорданом, который характеризует акустические условия в исполнительской зоне. Он предложил индекс инверсии II , который определяется тремя способами. Один способ основан на измерении времени реверберации по раннему спаду T_{10} :

$$II_{EDT} = \bar{T}_{10} / \bar{T}'_{10}, \quad (2.39)$$

где $\bar{T}_{10}$ — среднее время реверберации по раннему спаду в зоне слушательских мест, $\bar{T}'_{10}$ — среднее время реверберации по раннему спаду в зоне исполнения.

Два других способа, которые также базируются на разработанных Йорданом критериях, связаны с процессом нарастания звуковой энергии в помещении. Это так называемые крутизна нарастания σ_R и время нарастания TR . Определение этих параметров поясняется на рис. 2.15. Крутизна нарастания

$$\sigma_R = -\frac{d}{dt} \left(10 \lg \frac{E(t)}{E_\infty} \right), \quad (2.40)$$

где $E(t) = \int_0^t p^2(\tau) d\tau$ соответствует процессу нарастания звуковой энергии, E_∞ — означает общую энергию импульсного отклика.

Касательная к кривой нарастания энергии импульсного отклика в точке $10 \lg [E(t) / E_\infty] = -5$ dB определяет крутизну. TR является временем, за которое звуковая энергия в процессе нарастания достигает половинного значения общей энергии импульс-

ного отклика. Перпендикуляр, опущенный из точки кривой нарастания, расположенной на уровне -3 дБ, дает величину TR .

Индекс инверсии с использованием крутизны нарастания

$$II_{\sigma_R} = \sigma'_R / \sigma_R, \quad (2.41)$$

где σ'_R — средняя крутизна нарастания в зоне исполнения; σ_R — средняя крутизна нарастания в слушательской зоне.

Индекс инверсии с использованием времени нарастания

$$II_{TR} = TR / TR', \quad (2.42)$$

где TR — среднее время нарастания в слушательской зоне; TR' — время нарастания в зоне исполнения.

Индекс инверсии Йордана, к сожалению, не получил широкого применения, так как отсутствует связь этого критерия с субъективной оценкой.

ГЛАВА 3. ИНЖЕНЕРНЫЕ СРЕДСТВА АКУСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

Акустическое решение вновь проектируемого или реконструируемого помещения зависит от его назначения и вместимости. Однако арсенал средств и методов, используемых при акустическом проектировании, является общим для помещений различного профиля. В этот арсенал обычно входят расчет геометрических отражений, разработка мероприятий по обеспечению диффузности звукового поля и расчет времени реверберации. Во многих случаях оказывается возможным также расчет некоторых критериев акустического качества. Дополнением расчетных методов, а часто и основным средством акустического решения помещения является применение техники моделирования. С помощью всех этих средств выбирается и корректируется объем помещения, его форма, а также очертания и отделка внутренних поверхностей. В результате достигаются акустические показатели, соответствующие назначению и объему помещения. Эти показатели, однако, могут быть в значительной мере обесценены при наличии в помещении мешающих акустических факторов, поэтому независимо от назначения помещения в нем должны быть обеспечены достаточно низкий уровень шума, отсутствие слышимого эха (порхающего эха) и сильных тембровых искажений.

3.1. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОТРАЖЕНИЙ

В инженерной практике расчет геометрических отражений (главным образом первых) является основным способом контроля правильности выбора формы помещения и очертаний его внутренних

поверхностей. Расчет включает проверку допустимости применения геометрических отражений, их построение, а также определение запаздывания и уровня отражений по отношению к прямому звуку. Данные расчета позволяют проанализировать как структуру первых отражений в отдельных точках (зонах) помещения, так и распределение этих отражений по всей площади слушательских мест. Расчет геометрических отражений необходим для оценки опасности возникновения в помещении эха и порхающего эха, а также для определения критериев акустического качества помещений.

При определенных условиях можно вместо звуковых волн рассматривать звуковые лучи, в направлении которых распространяются эти волны. Распределение таких лучей аналогично распространению световых лучей в геометрической оптике, и построение геометрических (лучевых) отражений широко применяется в архитектурной акустике. Законы геометрического отражения хорошо известны из оптики: падающий и отраженный от какой-либо точки поверхности лучи образуют равные углы (угол падения и угол отражения) с нормалью к отражающей поверхности в этой точке, и падающий и отраженный лучи лежат совместно с нормалью в одной плоскости (лучевая плоскость).

Допустимость применения геометрических отражений зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и точке приема. При этом отражающая поверхность должна быть достаточно жесткой и иметь поверхностную массу не менее 20 кг/м^2 в залах для музыкальных программ и не менее 10 кг/м^2 в залах для речевых программ. Коэффициент звукопоглощения поверхности для рассматриваемых частот не должен превышать 0,1. На рис. 3.1 отражающая поверхность взята в виде прямоугольного плоского отражателя со сторонами, равными $2a$ и $2b$, центр его совпадает с точкой геометрического отражения O , а сторона $2a$ параллельна лучевой плоскости P , в которой лежат падающий луч QO , отраженный луч OM и нормаль ON ; R_0 — расстояние от точки Q до точки O ; R — расстояние от точки O до точки M ; γ — углы падения и отражения. Если ввести безразмерные величины

$$u = a \cos \gamma \sqrt{-\frac{2}{\lambda} \left(-\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)},$$

$$v = b \sqrt{-\frac{2}{\lambda} \left(-\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)}, \quad (3.1)$$

где λ — длина звуковой волны.

то абсолютное отклонение фактического уровня звукового давления в точке приема M от уровня, соответствующего строго геометрическому отражению, не превысит, дБ,

$$\Delta L = 4,4 (1/u^2 + 1/v^2). \quad (3.2)$$

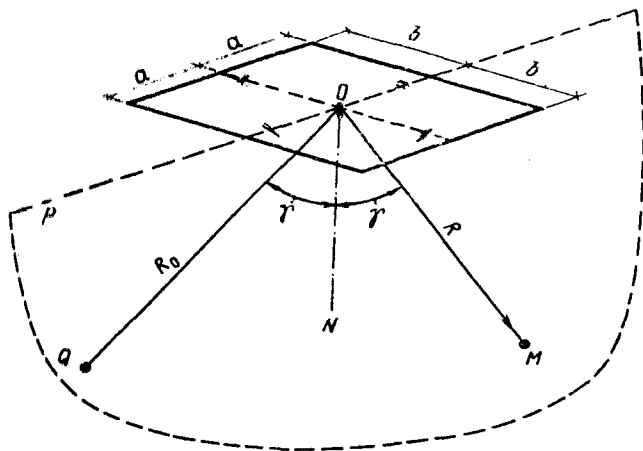


Рис. 3.1. Отражение звука от прямоугольного отражателя

Применение геометрических отражений можно считать допустимым, если ΔL не более 5 дБ, а наименьшая сторона отражателя не менее чем в 1,5 раза превышает длину волны λ .

Если форма и ориентировка отражателя отличается от показанных на рис. 3.1, то расчет значительно усложняется. При ориентировочной оценке отклонения от геометрической акустики можно использовать формулу (3.2), предварительно вписав в отражатель прямоугольник, удовлетворяющий рис. 3.1. Формула (3.2) применима и для отражателя, обладающего кривизной, если наименьший радиус кривизны не менее чем в 2 раза превышает длину волны λ .

Поверхности, дающие направленные отражения, следует проектировать таким образом, чтобы условия применимости геометрических отражений выполнялись, по крайней мере, для частот, превышающих 300–400 Гц, т.е. для звуковых волн длиной примерно 1 м и менее. Если условия применимости геометрических отражений выполнены, то их построение допустимо не только от центра отражателя, но и от других точек его поверхности, удаленных от краев отражателя не менее чем на половину длины волны λ . При заданном требовании $\lambda \leq 1$ м это означает, что точки геометрического отражения должны браться не ближе 0,5 м от краев отражающей поверхности.

При построении геометрических отражений от плоскости удобен прием, показанный на рис. 3.2. Здесь используется мнимый источник Q_1 , симметричный с действительным точечным источником Q по отношению к отражающей плоскости и находящийся по другую ее сторону. Прямые, проведенные от мнимого источника Q_1 , после пересечения ими отражающей плоскости удовлетворяют условию равенства углов падения и отражения, т.е. являются искомыми отраженными лучами, создаваемыми действительным источником Q . Метод мнимых источников применим и при построении отражений от криволинейных поверхностей. Если требуется найти отраже-

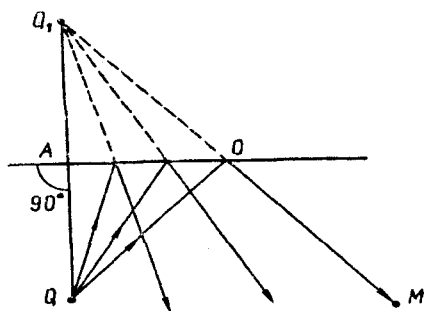


Рис. 3.2. Построение геометрических отражений от плоскости мнимого источника

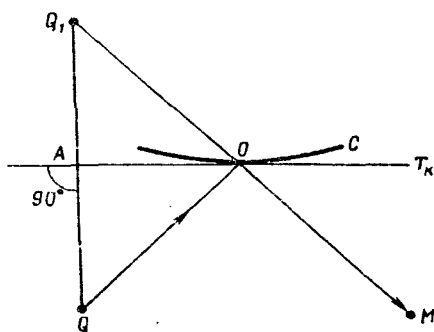


Рис. 3.3. Построение геометрического отражения от криволинейной поверхности мнимого источника

ние от какой-либо точки O кривой поверхности C (рис. 3.3) при заданном положении источника Q , то следует в точке O построить касательную плоскость T_K к поверхности. Мнимым источником в этом случае является точка Q_1 , симметричная источнику Q относительно касательной плоскости; продолжение OM прямой Q_1O после пересечения ее с поверхностью C является искомым отраженным лучом. Здесь для каждой точки O отражающей поверхности приходится находить свой мнимый источник Q_1 в отличие от случая плоскости, у которой для отражения от любой ее точки мнимый источник один и тот же (при заданном положении источника Q).

В основном при построении отражений рассматривается ход звуковых лучей, дающих нам направление распространения звуковых волн. Однако, пользуясь методом мнимых источников, можно построить и фронт отраженной звуковой волны в определенный момент времени $t = r/c$, где c — скорость звука, а r — пройденное им расстояние. Построение волнового фронта при отражении звука от плоской поверхности показано на рис. 3.4. Как показано на рисунке, фронт отраженной волны определяется окружностью, описанной радиусом r из мнимого источника Q_1 . Аналогичным образом строится волновой фронт при однократном и двукратном отражении звука от нескольких плоских поверхностей (рис. 3.5 и 3.6). При построении фронта волны после второго отражения (рис. 3.6) находятся мнимые источники второго порядка Q_2 и Q_2' и из этих источников радиусом r проводятся окружности, определяющие волновой фронт. Для построения волнового фронта отражений от криволинейных поверхностей (рис. 3.7 и 3.8) находятся мнимые источники Q_1' , Q_1'' , Q_1''' и соответствующие им отраженные лучи. Отложив на лучах от каждого мнимого источника расстояния, равные r , и соединив полученные точки, найдем фронт отраженной волны.

Рассмотренные приемы построения геометрических отражений относятся к случаям, когда лучевая плоскость параллельна одной

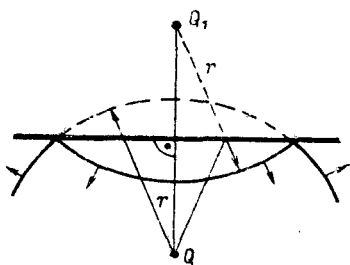


Рис. 3.4. Построение волнового фронта при отражении звука от плоскости

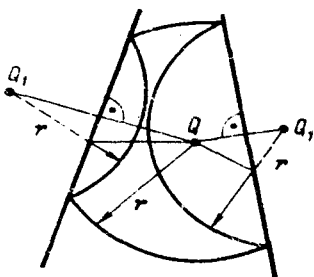


Рис. 3.5. Построение волнового фронта при однократном отражении звука от двух плоскостей

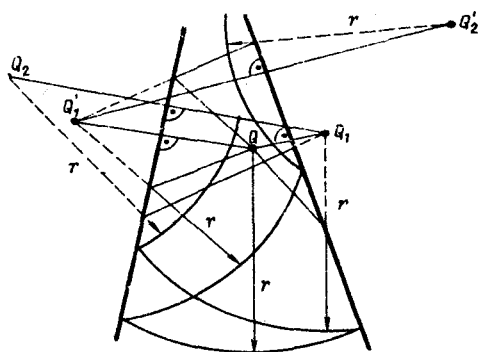


Рис. 3.6. Построение волнового фронта при двукратном отражении звука от двух плоскостей

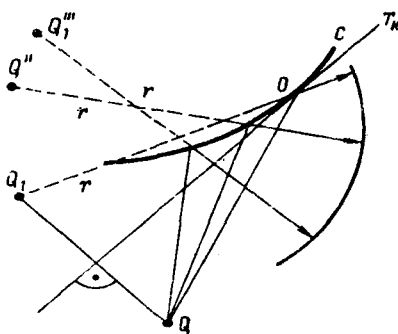


Рис. 3.7. Построение волнового фронта при отражении звука от выпуклой поверхности

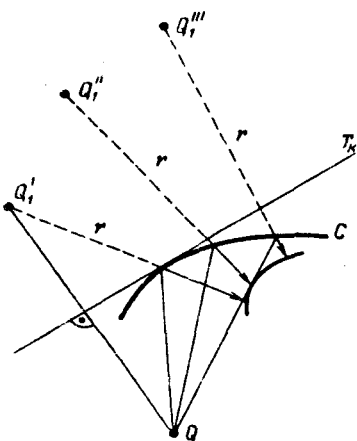
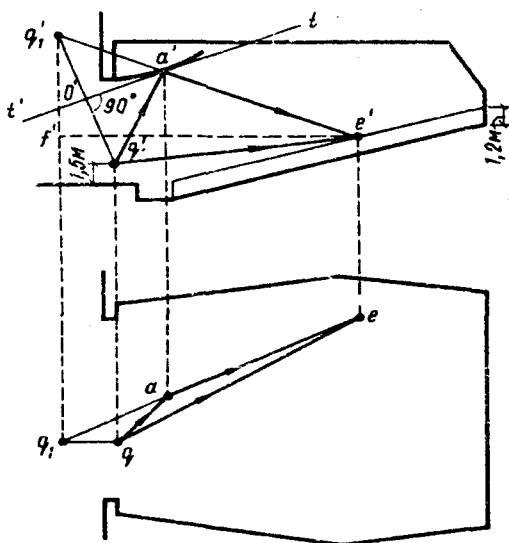


Рис. 3.8. Построение волнового фронта при отражении звука от вогнутой поверхности

3.6	3.7
3.8	

из плоскостей проекций (вертикальной или горизонтальной). Не представляет трудности построение отраженного луча и в тех случаях, когда лучевая плоскость не параллельна плоскости проекции, но ей параллельна нормаль к отражающей поверхности в точке отражения. Это равносильно тому, что касательная плоскость к отра-

Рис. 3.9. Построение геометрического отражения при касательной плоскости, перпендикулярной к плоскости проекций



жающей поверхности (в той же точке) перпендикулярна плоскости проекции.

Для примера на рис. 3.9 дано построение геометрического отражения, вызываемого отражателем, имеющим вид цилиндрической поверхности с произвольной криволинейной направляющей и с образующими, перпендикулярными к вертикальной плоскости проекции. Отражатель помещен вблизи полотна перед эстрадой зала. Точечный источник звука задан его проекциями q и q' . Требуется найти геометрическое отражение от некоторой точки отражателя, имеющей проекции a и a' . В данном случае касательная плоскость к поверхности отражателя в этой точке перпендикулярна вертикальной плоскости проекции; вертикальная проекция этой касательной плоскости есть прямая $t't'$. Прямые $q'a'$ и $q'a$ являются вертикальной и горизонтальной проекциями луча, исходящего из источника и достигающего точки отражения. Вертикальную проекцию мнимого источника q'_1 находим, опустив из точки q' перпендикуляр $q'o'$ на прямую $t't'$ и отложив на его продолжении отрезок $o'q'_1$, равный отрезку $q'o'$. Снося точку q'_1 на горизонтальную прямую, проходящую через точку q , находим горизонтальную проекцию мнимого источника q_1 . Продолжения прямых q_1a и $q'a$, лежащие вправо от точек a' и a , являются соответственно вертикальной и горизонтальной проекциями отраженного луча. Вертикальная проекция отраженного луча пересекает в точке e' расчетную поверхность амфитеатра (проходящую на 1,2 м выше его пола, соответственно положению ушей слушателей). Определив точку e' на горизонтальной проекции отраженного луча, находим горизонтальную проекцию e точки пересечения отраженного луча с расчетной поверхностью амфитеатра. Длина ломаной линии, имеющей проекции $q'a$ и $q'e$, равна полному ходу отраженного звука

иема с проекциями e и e' . Эта длина равна расстоянию от мнимого источника до точки приема. Прямая с проекциями q и q' дает ход прямого звука. Из рис. 3.9 легко найти и ход прямого и отраженного звука. Так, например, полный ход отраженного звука (от источника до точки приема) равен

$$r_1 = \sqrt{(q_1 e)^2 + (f' q_1')^2}, \quad (3.3)$$

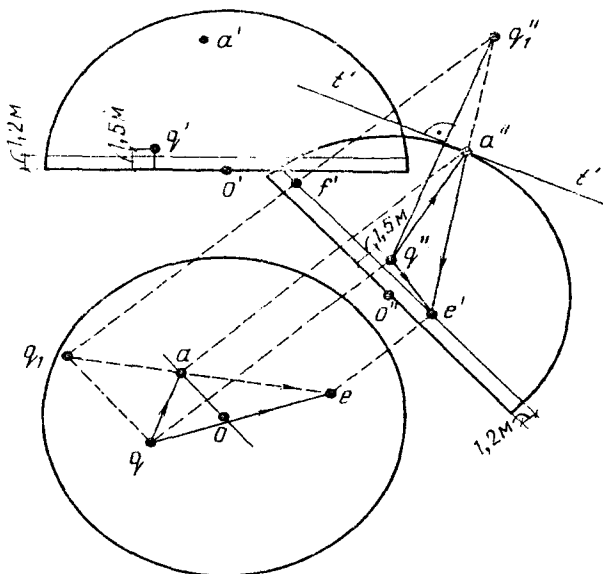
где f' — точка пересечения горизонтальной прямой, проведенной через точку e , с вертикальной прямой $q_1' q_1$.

Если касательная плоскость к отражающей поверхности не перпендикулярна ни к одной из плоскостей проекций, то для построения геометрического отражения необходимо при помощи обычных методов начертательной геометрии (замена плоскостей проекций, вращение) перейти к конфигурации, в которой касательная плоскость станет перпендикулярной к плоскости проекций. Такой случай показан на рис. 3.10. Заданы проекции q и q' точечного источника звука, а также проекции a и a' точки на поверхности купола, от которой требуется построить геометрическое отражение. Купол представляет собой полусферу с центром, имеющим проекции O и O' . Высота источника 1,5 м и высота расчетной поверхности 1,2 м над уровнем пола. Для построения геометрического отражения заменим заданную вертикальную плоскость проекции новой вертикальной плоскостью проекции, параллельной отрезку Oa . Плоскость, касательная к поверхности купола в заданной точке, будет перпендикулярна новой плоскости проекции. Проекцией касательной плоскости на новую плоскость проекции является прямая $t't'$. Далее, как и в предыдущем примере, строим вертикальную проекцию q_1 мнимого источника. Перенесем точку q_1' на прямую, проходящую через точку q и параллельную отрезку Oa , получим горизонтальную проекцию мнимого источника q_1 . Затем прямую $q_1' a'$ продолжаем до пересечения с расчетной поверхностью в точке e' , сносим точку e' на продолжение прямой $q_1 a$ и получаем горизонтальную проекцию e точки пересечения отраженного луча с расчетной поверхностью. Как и в первом примере, нетрудно найти полные ходы прямого и отраженного звуков. В соответствии с формулой (3.3) полный ход отраженного звука

$$r_1 = \sqrt{(q_1 e)^2 + (f' q_1')^2}.$$

Если для рассматриваемой точки построены геометрические отражения от поверхностей помещения, то не составляет труда определить и запаздывания этих отражений. К величине запаздывания интенсивных (геометрических) отражений предъявляются, как известно, определенные требования, зависящие от назначения помещения. Так, например, в речевых помещениях необходимо стремиться к тому, чтобы запаздывание первого отражения не превышало 20 мс (это относится и к временному интервалу между последующими отражениями).

Рис. 3.10. Построение геометрического отражения при касательной плоскости, не перпендикулярной к плоскостям проекций



Существует довольно простой способ, позволяющий определить, на какой части площади слушательских мест выполняются указанные требования. Этот способ заключается в построении линий равного запаздывания на чертежах помещения. В случае плоской отражающей поверхности расстояние от любой точки этой линии до мнимого источника звука будет больше расстояния до действительного источника на постоянную величину $r_{\Delta t} = c \Delta t$, где c — скорость звука, а Δt — предельное запаздывание отражения (в секундах). Построение линии равного запаздывания для плоского отражателя показано на рис. 3.11. Из мнимого источника Q_1 проводится окружность радиусом $r_{\Delta t}$. На окружности берется несколько произвольных точек (в данном случае точки M и K) и эти точки соединяются с точкой Q (действительный источник). Затем проводится прямая $Q_1 M$ до пересечения с перпендикуляром, восстановленным из середины отрезка QM , а прямая $Q_1 K$ — до пересечения с перпендикуляром, восстановленным из середины отрезка QK . Отрезок QP делится пополам. Соединив полученные точки $L_1 N$ и E плавной кривой, найдем линию равного запаздывания. В точках, лежащих выше кривой LNE (ближе к отражающей поверхности), запаздывание будет меньше заданного, а в точках, расположенных ниже, — больше заданного. Кривая LNE является гиперболой с фокусами в точках Q и Q_1 . Линию равного запаздывания можно построить и для криволинейной отражающей поверхности, используя для этой цели несколько мнимых источников.

Пример использования линий равного запаздывания дан на рис. 3.12. Способ построения линий равного запаздывания отражений от боковых стен (кривые def и mnc) соответствует методу, показан-

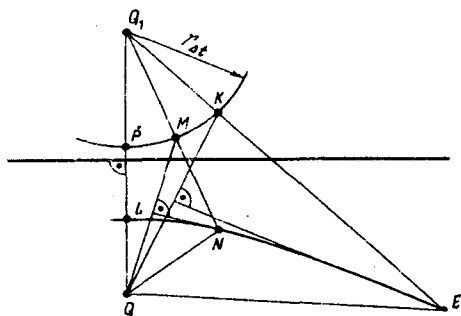


Рис. 3.11. Построение линии равного запаздывания при отражении звука от плоскости

ному на рис. 3.11. Для определения линии равного запаздывания отражений от потолка на продольном разрезе сначала строится кривая abc . Пересечение этой кривой с поверхностью слушательских мест дает радиус $R_{\Delta t}$. Проведя этим радиусом окружность из точки q , находим искомую линию. Зона слушательских мест, в которой запаздывание отражений больше заданного, на рисунке заштрихована.

Линии равного запаздывания являются результатом пересечения поверхности слушательских мест с поверхностью равного запаздывания (в случае плоских отражающих поверхностей поверхность равного запаздывания будет гиперболоидом вращения). При сильном подъеме слушательских мест, наклоне отражающих поверхностей или большой высоте источника построение линий равного запаздывания будет более сложным, чем это показано на рис. 3.12.

Следует упомянуть еще об одном графическом приеме, позволяющем определить, какие элементы внутренних поверхностей помещения дают в данную точку площади слушательских мест первые отражения, запаздывание которых Δt соответствует заранее заданной величине. Этот прием основан на известном свойстве эллипса, состоящем в том, что сумма расстояний от любой точки эллипса до его фокусов является постоянной величиной. Если точку расположения источника Q (рис. 3.13) и точку приема M рассматривать как фокусы эллипса, то указанная сумма расстояний будет равна $QM + r_{\Delta t}$, где QM — путь прямого звука, а $r_{\Delta t}$ — разность путей отраженного и прямого звуков для запаздывания Δt . Все элементы внутренних поверхностей помещения, лежащие внутри эллипса (рис. 3.13), будут давать первые отражения с запаздыванием меньше Δt , а элементы, лежащие вне эллипса, — с запаздыванием больше Δt . Построение эллипсов обычно делается в вертикальной и горизонтальной плоскостях проекций (в этих плоскостях должны лежать отрезок QM). В случае помещения со сложным объемно-планировочным решением такое построение может оказаться недостаточным и приходится для выбранных точек Q и M рассматривать эллипсоид вращения (вокруг его большой оси). Описанный прием часто также используется при анализе осцил-

В выражении (3.5) сумма расстояний r и r представляет собой расстояние от мнимого источника до точки приема. Обозначив это расстояние r_1 , на основании (3.4) и (3.5) можно написать выражение для относительного уровня геометрического отражения:

$$\Delta L = 10 \lg (E_R / E_D) = 10 \lg (r_d^2 \Phi_1^2 \beta / r_1^2 \Phi_d). \quad (3.6)$$

В случае ненаправленного источника

$$\Delta L = 10 \lg (r_d^2 \beta / r_1^2). \quad (3.7)$$

Несколько сложнее определяется относительный уровень геометрического отражения от криволинейной (выпуклой или вогнутой) поверхности. Если выделить на сферическом фронте волны некоторый участок, то при распространении волны в открытом пространстве или при ее отражении от плоской поверхности площадь этого участка увеличивается пропорционально r^2 , где r — расстояние от источника (действительного или мнимого). После отражения от криволинейной поверхности (см. рис. 3.7 и 3.8) фронт волны перестает быть сферическим, а площадь выделенного участка увеличивается или быстрее (выпуклая поверхность) или медленнее (вогнутая поверхность), чем при сферическом распространении. Таким образом, при одинаковом r равное количество энергии в первом случае приходится на большую площадь (рассеяние звука), а во втором случае — на меньшую площадь (концентрация звука). Степень рассеяния или концентрации отраженного звука на расстоянии от источника можно характеризовать следующим отношением:

$$k = S_0 / S_R, \quad (3.8)$$

где k — коэффициент концентрации ($k < 1$ при рассеянии, $k > 1$ при концентрации отраженного звука; S_0 — площадь участка сферического волнового фронта; S_R — площадь того же участка после отражения от криволинейной поверхности).

Плотность энергии геометрического отражения от криволинейной поверхности будет прямо пропорциональна k :

$$\epsilon_R = P_A \Omega \Phi_1^2 \beta K / 4\pi r_1^2 c. \quad (3.9)$$

Отсюда относительный уровень отражения при направленном источнике

$$\Delta L = 10 \lg (r_d^2 \Phi_1^2 \beta k / r_1^2 \Phi_d^2) \quad (3.10)$$

и при ненаправленном

$$\Delta L = 10 \lg (r_d^2 \beta k / r^2). \quad (3.11)$$

Так как $S_0 = S_{ед} r_1^2$, где $S_{ед}$ — площадь участка сферического фронта на расстоянии 1 м от источника, то выражения (3.10) и (3.11) можно представить в следующем виде:

$$\Delta L = 10 \lg (r_d^2 \Phi_1^2 S_{ед} \beta / \Phi_d^2 S_R) \quad (3.12)$$

и для ненаправленного источника:

$$\Delta L = 10 \lg (r_d^2 \beta S_{ед} / S_R). \quad (3.13)$$

Необходимо отметить, что для практики акустического проектирования важнее расчет относительного уровня отражений при $k > 1$, т.е. при концентрации отраженного звука. Именно концентрация отражений является причиной наиболее крупных акустических дефектов (эхо, порхающее эхо, нарушение локализации источника звука).

Для расчета ΔL можно путем геометрических построений найти участок S_R , в котором находится расчетная точка, а на отражающей поверхности выделить отражающую площадку, соответствующую S_R . Затем, определив углы, под которыми "видна" отражающая площадка из точки расположения источника, найти $S_{ед}$. Определение параметров, необходимых для расчета ΔL , иллюстрирует рис. 3.14. На нем показано построение отражения от вогнутой задней стены помещения, представляющей собой цилиндрическую поверхность. Точечный источник звука, имеющий проекции q и q' , расположен в плоскости, проходящей через середину цилиндрической поверхности и перпендикулярной к ее образующим. С помощью мнимых источников построен участок отраженного волнового фронта, в котором находится расчетная точка, проекции которой m и m' . Площадь этого участка S_R нетрудно подсчитать, как и площадь $S_{ед}$. Последняя подсчитывается по значениям углов γ и γ' .

В случае более сложных поверхностей (купол, эллипсоид, гиперболический параболоид) определение параметров для расчета более трудоемко, особенно, если необходимо детально проанализировать всю область концентрации, причем для различных положений источника. Однако эту процедуру можно с успехом выполнить на ЭВМ. Суть расчета, выполняемого с помощью ЭВМ, сводится к следующему. Источник звука принимается точечным, а система координат выбирается так, чтобы уравнение отражающей поверхности могло быть представлено в каноническом виде. Сферическая поверхность, описанная единичным радиусом вокруг точечного источника, разбивается на равные по площади участки (например, сферические четырехугольники). Площадь каждого из этих участков $S_{ед}$. На криволинейной отражающей поверхности определяются точки отражения лучей, исходящих из точечного источника и проходящих через узлы разбивки сферического волнового фронта. Затем для всех точек отражений находят координаты мнимых источников, после чего определяются точки пересече-

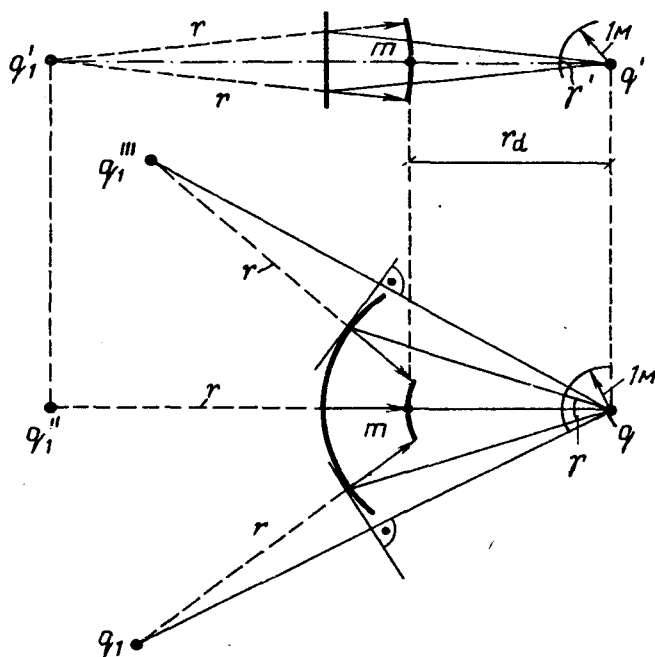


Рис. 3.14. К расчету ΔL при отражении звука от вогнутой цилиндрической поверхности

чения отраженных лучей (исходящих из мнимых источников) с расчетной поверхностью. Если соединить эти точки, то получается своеобразная звуковая карта, состоящая из четырехугольных элементов. Площадь каждого элемента можно считать равной S_d . Чем меньше площадь элементов на звуковой карте (гуще располагаются точки пересечения), тем выше степень концентрации. В ходе расчета на ЭВМ для каждого четырехугольного элемента звуковой карты определяются его площадь S , средний (по четырем вершинам) путь прямого звука, средний путь и среднее запаздывание отраженного звука, а также ΔL (в соответствии с формулой (3.13)). Помимо этих данных, выдаваемых на печать, с помощью графопостроителя могут быть вычерчены звуковые карты.

Пример звуковой карты, рассчитанной на ЭВМ M4030 и вычерченной на графопостроителе, показан на рис. 3.15. Карта получена для сферического купола (рис. 3.16) с центром кривизны, расположенным значительно выше расчетной поверхности. Высота источника звука Q и расчетной поверхности над уровнем пола помещения принята равной 1,5 м. Поверхность сферического волнового фронта была разбита на 306 участков ($S_{уд} = 2,018 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$). Как видно из рис. 3.15, звуковая карта даже при визуальном анализе может дать представление о степени концентрации в той или иной зоне расчетной поверхности. В зоне наиболее сильной концентрации (заштрихованный четырехугольник) в соответствии с расчетом $\Delta L = -1,5 \text{ дБ}$. Среднее запаздывание для этого четырехугольника составляет 115 мс.

Рис. 3.15. Звуковая карта для сферического купола, изображенного на рис. 3.16

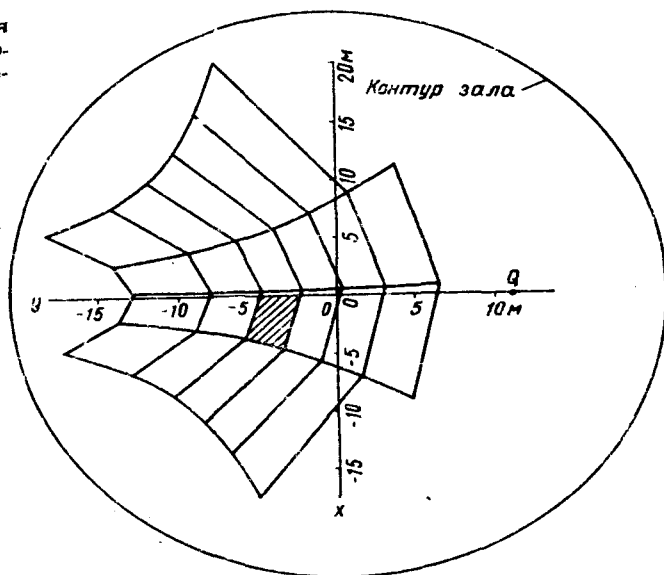
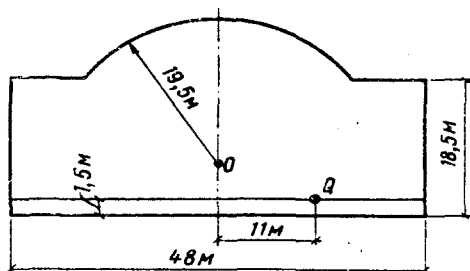


Рис. 3.16. Схематический разрез зала со сферическим куполом



Следует заметить, что при расчетах обычно не учитывается фактор, влияющий на плотность энергии прямого звука и отражений от боковых стен помещения. Речь идет о дополнительном ослаблении звука, распространяющегося над сидящими слушателями. Однако неучет этого фактора не ведет к значительной погрешности. Максимум избыточного ослабления, достигающий 15 дБ, наблюдается в области низких частот (150–200 Гц), т.е. в той области частот, которая обычно не рассматривается при расчете геометрических отражений. В области средних и высоких частот даже в случае расположения слушателей на горизонтальной поверхности избыточным затуханием можно пренебречь, если высота источника звука над уровнем голов слушателей не менее 1,5 м. Такая высота, как правило, обеспечивается в практике проектирования помещений. Уклон поверхности слушательских мест, обычно создаваемый в современных залах, может привести только к уменьшению затухания.

3.2. РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Оптимальное время реверберации проектируемого помещения обеспечивается путем соответствующего выбора его объема и внутренней отделки. Расчет времени реверберации производится исходя из намеченных в проекте объема и отделки помещения. Если оно оказывается меньше оптимального, то приходится увеличивать объем помещения и уменьшать звукопоглощение, а если больше — то убавлять по возможности объем и увеличивать звукопоглощение. В практике акустического проектирования время реверберации рассчитывается по классическим формулам, чаще всего по формуле Эйринга. Методика расчета времени реверберации достаточно подробно изложена в публикациях по акустике помещений, в частности, в рекомендациях НИИСФ по акустическому проектированию многоцелевых залов [8], поэтому представляется целесообразным, не останавливаясь на процедуре самого расчета, рассмотреть факторы, влияющие на его точность.

Приступая к расчету времени реверберации, следует учитывать, что формула Эйринга (как и другие классические формулы реверберации) справедлива только тогда, когда звуковое поле в помещении можно считать достаточно диффузным. В этом случае затухание звука подчиняется экспоненциальному закону, и спадание уровня звукового давления в процессе реверберации получается прямолинейным. Условиями обеспечения достаточно диффузного звукового поля являются отсутствие резкой разницы в основных размерах помещения, непараллельность стен, равномерное распределение звукопоглотителя и членение значительной части внутренних поверхностей. Несоблюдение этих условий ведет к нарушению диффузности звукового поля, при котором пользоваться формулой Эйринга невозможно. Прежде всего это касается помещений, в которых отношение наибольшего размера к наименьшему значительно превосходит 5. Процесс реверберации в таких помещениях существенно отклоняется от экспоненциального, а время реверберации отличается от рассчитанного по классическим формулам. В таких помещениях, называемых несоразмерными, понятие средней длины свободного пробега становится весьма условным. Правда, несоразмерные помещения нехарактерны для общественных зданий. Исключение составляют некоторые типы спортивных сооружений.

Однако и в соразмерных помещениях вполне возможны сильные нарушения диффузности, делающие непригодными классические формулы. Наиболее частой причиной нарушения диффузности является сплошная звукопоглощающая отделка потолка или двух противоположных стен. При такой отделке звуковые волны, распространяющиеся между звукопоглощающим потолком и поверхностью слушательских мест (или между противоположными звукопоглощающими стенами) затухают значительно быстрее. Уровнеграммы процесса реверберации в таких помещениях имеют обычно характерные провисание или излом. При этом начальный

участок крутой, а последующий спад уровня пологий. Время реверберации, определенное по начальному участку, оказывается значительно меньше рассчитанного по формуле Эйринга.

При сплошной звукопоглощающей отделке потолка зрительного зала может возникнуть несколько иная картина, если все стены помещения вертикальные, слабо расчленены и хорошо отражают звук. В таких помещениях звуковые волны, распространяющиеся в направлениях, близких к горизонтальным, затухают медленно, образуя горизонтальное реверберирующее поле. При этом уровнеграммы процесса реверберации обычно не имеют крутого начального участка, свидетельствующего о нарушении диффузного звукового поля. Несмотря на обычный характер реверберационных кривых, время реверберации оказывается значительно больше рассчитанного по формуле Эйринга. Не приносит успеха и использование формулы для двухмерного пространства

$$T = 0,128 F_{пл} / - L_{п} \ln (1 - \bar{\alpha}), \quad (3.14)$$

где $F_{пл}$ — площадь плана помещения, m^2 ; $L_{п}$ — ^{периметр} параметр плана, m ; $\bar{\alpha}$ — средний коэффициент звукопоглощения полосы периметра шириной 1 м.

Время реверберации, рассчитанное по этой формуле, оказывается намного больше измеренного. В качестве примера на рис. 3.17 приведены расчетные и измеренные частотные характеристики времени реверберации лекционного зала со звукопоглощающим потолком, вертикальные стены которого слабо расчленены и хорошо отражают звуки средних и высоких частот. Как видно из рисунка, в диапазоне 500—2000 Гц время реверберации, рассчитанное по формуле Эйринга, оказывается более чем на 50% меньше измеренного, рассчитанное по двухмерной формуле — более чем на 50% больше. Образование горизонтального реверберирующего поля (а следовательно, и нарушение диффузности) в указанной области частот ясно показали выполненные в лекционном зале измерения времени реверберации с использованием направленного микрофона. При горизонтальном положении микрофона реверберационные кривые (рис. 3.18, б) практически не отличаются от кривых, полученных по стандартной методике измерения времени реверберации (рис. 3.18, а). В обоих случаях время реверберации одно и то же. При вертикальном положении микрофона (вверх), когда за счет его направленности регистрируемый уровень горизонтальной реверберации уменьшается, нарушение диффузности звукового поля становится очевидным: реверберационные кривые характеризуются резким провисанием (рис. 3.18, в).

Явление горизонтальной реверберации, особенно часто наблюдаемое в спортивных залах, неблагоприятно не только из-за невозможности рассчитать время реверберации. Не менее важным является то, что звукопоглотитель в таких помещениях оказывается совершенно неэффективным. Имеются относительно простые средства, позволяющие значительно ослабить горизонтальную

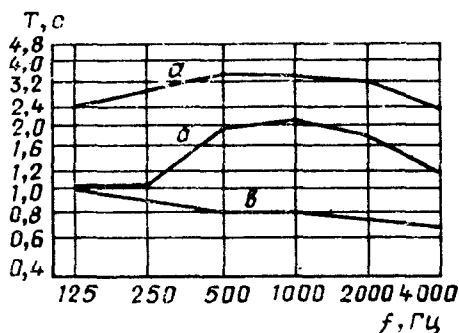
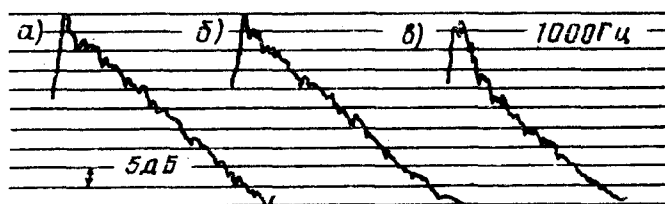


Рис. 3.17. Частотные характеристики времени реверберации
а — расчет по формуле для двухмерного пространства; б — данные измерений; в — расчет по формуле Эйринга

Рис. 3.18. Примеры полученных в зале уронеграмм процесса реверберации

а — ненаправленный микрофон;
б — направленный микрофон в горизонтальном положении;
в — направленный микрофон в вертикальном положении



реверберацию. Исследования, выполненные в НИИСФ на уменьшенных моделях помещений, показали, что даже при небольшом наклоне стен (порядка $2-3^\circ$) к звукопоглотителю время реверберации уменьшается примерно в 2 раза и достаточно хорошо совпадает с расчетом по формуле Эйринга. Аналогичный эффект достигается при помощи полуцилиндрических рассеивателей, располагаемых горизонтально на двух смежных стенках модели. При этом диаметр полуцилиндров и их шаг выбираются таким образом, чтобы обеспечивалось рассеяние звука в области частот измерений (средние частоты в пересчете на натуру). Интересно отметить, что вертикальное расположение рассеивателей (в виде пилястр) не дает эффекта. Время реверберации остается практически таким же, как и в случае гладких вертикальных стен.

Предполагается, что в соразмерном помещении при равномерном распределении звукопоглотителя по его поверхностям время реверберации не зависит от формы помещения. Однако такое предположение может не оправдаться, если поверхности помещения недостаточно расчленены. Связь формы помещения со временем реверберации можно проследить, используя такой показатель, как число звуковых отражений в единицу времени. Среднее число отражений в единицу времени, как известно, непосредственно входит в формулу Эйринга для расчета времени реверберации

$$T = -13,81 / \bar{N} \ln(1 - \bar{\alpha}), \quad (3.15)$$

где $\bar{N}$ — среднее число отражений в единицу времени; $\bar{\alpha}$ — средний коэффициент звукопоглощения.

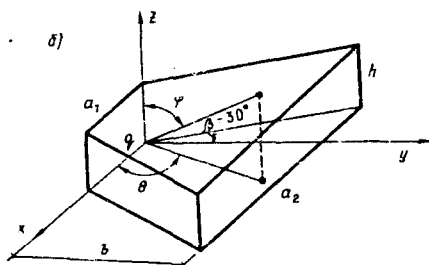
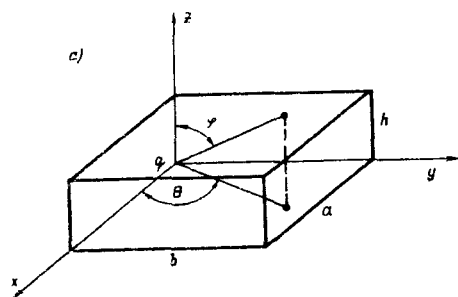


Рис. 3.19. Расчетные схемы помещений
а — прямоугольная форма; б — трапецевидная

В свою очередь

$$\bar{N} = cS / AV, \quad (3.15, a)$$

где c — скорость звука, м/с; S — общая площадь внутренних поверхностей помещения, м²; V — объем помещения, м³

Анализ числа отражений в единицу целесообразно провести для наиболее распространенных форм залов в плане — прямоугольной и трапецевидной. Оба помещения схематически изображены на рис. 3.19. Высота h , длина b и объем помещений одинаковые, внутренние поверхности плоские, звукоотражающие, угол $\beta = 30^\circ$. В точке q располагается ненаправленный источник звука.

Пучок звуковых лучей, исходящий из точки q под углами θ и φ (θ — азимут, φ — угол места) со скоростью c , имеет следующие составляющие скорости по трем координатным осям: $c \sin \varphi \cos \theta$; $c \sin \varphi \sin \theta$ и $c \cos \varphi$. Число отражений пучка за одну секунду будет:

$$\frac{c}{a} \sin \varphi \cos \theta + \frac{c}{b} \sin \varphi \sin \theta + \frac{c}{h} \cos \varphi. \quad (3.16)$$

Элементарный пространственный угол, соответствующий рассматриваемому пучку, будет $\sin \varphi d\varphi d\theta$. Проведя двойное интегрирование суммы (3.16) для φ и θ от 0 до $\pi/2$, получим общее число отражений в одну секунду N_1 для пучков лучей в прямоугольном помещении

$$N_1 = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \left(\frac{c}{a} \sin \varphi \cos \theta + \frac{c}{b} \sin \varphi \sin \theta + \frac{c}{h} \cos \varphi \right) \sin \varphi d\varphi d\theta = \frac{\pi c}{4} \frac{h + ah + ab}{V}. \quad (3.17)$$

Аналогичная операция, выполненная для φ от 0 до $\pi/2$ и для θ от 0 до $2\pi/3$, дает нам общее число отражений в одну секунду N'_1 для пучков лучей в трапецевидном помещении с углом $\beta = 30^\circ$:

$$N_1' = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \left(-\frac{c}{a} \sin \varphi \cos \theta + \frac{c}{b} \sin \varphi \sin \theta + \frac{c}{h} \cos \varphi \right) \sin \varphi d\varphi d\theta =$$

$$= \frac{\pi c}{4} \frac{(0,866 bh + 1,5 ah + 1,333 ab)}{V}. \quad (3.18)$$

Сравнивая результаты интегрирования выражений (3.17) и (3.18), нетрудно заметить, что они связаны некоторым коэффициентом K_Φ :

$$K_\Phi = \frac{N_1'}{N_1} = \frac{0,866 bh + 1,5 ah + 1,333 ab}{bh + ah + ab}. \quad (3.19)$$

Этот коэффициент, как показали расчеты, больше единицы и зависит от значений a , b и h . Причем при постоянных размерах помещений K_Φ растет с увеличением угла β . Таким образом, число отражений в единицу времени в трапециевидном помещении будет всегда больше, чем в прямоугольном, поэтому в трапециевидном помещении при рассмотренном положении источника и при прочих равных условиях следует ожидать меньшего времени реверберации, чем в прямоугольном.

Измерения времени реверберации в уменьшенных моделях помещений, соответствующих схемам рис. 3.19, полностью подтвердили результаты теоретического анализа. При гладких поверхностях моделей и различных вариантах достаточно равномерного размещения звукопоглотителя трапециевидная форма плана приводит к меньшему времени реверберации, чем прямоугольная (на 15—20%). При размещении на боковых стенах моделей звукорассеивающих элементов (полуцилиндры в виде пилястр) разница во времени реверберации полностью исчезает. Как и в случае исследования горизонтальной реверберации, измерения проводились на средних частотах (при пересчете на натуру), а параметры членений обеспечивали эффективное рассеяние звука именно в этой области частот.

Помимо диффузности звукового поля при расчете времени реверберации необходимо учитывать еще один важный фактор — добавочное звукопоглощение. Как показала практика проектирования и строительства залов, даже при обеспечении достаточно диффузного звукового поля, между расчетным и измеренным значениями времени реверберации нередко наблюдается значительное расхождение, причем, как правило, измеренное время реверберации оказывается меньше расчетного. Так как современная техника измерений исключает возможность значительных измерительных ошибок, то причину расхождения следует искать в неточности расчета.

При расчете времени реверберации в залах обычно используются коэффициенты звукопоглощения материалов и звукопоглощение предметов, полученные в реверберационных камерах. На результаты измерений в камере влияют ее размеры, степень диффуз-

ности звукового поля в ней, размеры и расположение испытуемых образцов, а также погрешности измерений времени реверберации. Это приводит к тому, что данные, полученные в различных камерах, значительно расходятся друг с другом и еще больше отличаются от данных, полученных в залах. Однако несмотря на значительный разброс, коэффициенты, найденные путем измерений в разных камерах, отнюдь не являются заниженными, поэтому пониженное время реверберации, измеренное в залах, нельзя объяснять неточностью измерения коэффициентов звукопоглощения реверберационным методом.

Разница между расчетным и измеренным временем реверберации, в значительной мере связана с тем, что в расчетах не учитывается ряд звукопоглотителей, существующих в помещениях и создающих некоторое добавочное звукопоглощение [5]. Такими звукопоглотителями являются осветительная арматура и другое оборудование зала; воздушные полости, соединенные различными узкими щелями и отверстиями с основным объемом помещения; щели в плинтусах, дверях, окнах, каменной кладке и прочих конструкциях, трещины в штукатурке; вентиляционные решетки; гибкие колеблющиеся элементы отделки помещения и т.п. Это дополнительное звукопоглощение удобно учитывать в виде среднего коэффициента добавочного звукопоглощения $\bar{\alpha}_2$. Умножая общую площадь внутренних поверхностей помещения на этот коэффициент, получаем добавочное, не учитываемое обычным расчетом звукопоглощение. Общий средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2$ складывается таким образом из полученного обычным расчетом среднего коэффициента $\bar{\alpha}_1$ и среднего коэффициента добавочного звукопоглощения $\bar{\alpha}_2$.

Измерения времени реверберации, выполненные НИИСФ в большом количестве залов многоцелевого назначения средней вместимости, позволили получить дополнительные сведения о добавочном звукопоглощении и уточнить значения коэффициента. Вычисление $\bar{\alpha}_2$, выполненное для трех частот (125, 500 и 2000 Гц), показало, что добавочное звукопоглощение имеет место во всех рассмотренных случаях и обнаруживает явно выраженную тенденцию к увеличению на низких частотах. В основном значения $\bar{\alpha}_2$ в исследованных залах, несмотря на неизбежный разброс, вызываемый индивидуальными особенностями помещений, группируются в сравнительно узкой области. Распределение этих значений $\bar{\alpha}_2$, как показал анализ, достаточно близко к нормальному (Гауссову) распределению случайной величины со средним значением $M\{\bar{\alpha}_2\}$ и средним квадратическим отклонением σ , указанными в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Частота, Гц	125	500	2000
$M\{\bar{\alpha}_2\}$	0,09	0,065	0,05
σ	0,018	0,015	0,013

Практически во всех рассмотренных залах значения $\bar{\alpha}_2$ не выходят за пределы $M\{\bar{\alpha}_2\} \pm 0,3 M\{\bar{\alpha}_2\}$.

Необходимо отметить, что после опубликования работ [5] появились иные способы учета добавочного звукопоглощения. Некоторый учет добавочного звукопоглощения предложен для концертных залов Беранеком [15] в виде сильно завышенных коэффициентов звукопоглощения твердых малопоглощающих звуковых материалов. Так, для поверхностей, отделанных обычной штукатуркой без трещин, он рекомендует принимать коэффициент звукопоглощения 0,12—0,19 на низких частотах и 0,07—0,09 на средних. Однако при таком способе учета добавочного звукопоглощения оно определяется только площадью малопоглощающих поверхностей, причем исчезает возможность учесть отмеченные выше причины добавочного звукопоглощения в каждом конкретном зале.

Костен [28] предлагает для больших концертных залов рассчитывать время реверберации по формуле Сэбина, считая условно, что все звукопоглощение зала сосредоточено только на площади, занятой слушателями (с некоторой добавкой на проходы) и имеющей приведенный коэффициент звукопоглощения a . Как справедливо отмечает Беранек, этот способ не позволяет учитывать характер отделки зала и пригоден лишь для ориентировочных подсчетов. Предлагаемые Костеном коэффициенты a были подсчитаны для восьми залов многоцелевого назначения средней вместимости. Эти коэффициенты были получены для разных частот, исходя из замеренного в заполненных слушателями залах времени реверберации. Область, в которой находятся вычисленные коэффициенты a , оказалась слишком широкой ($\pm 20\%$ от среднего значения), для того чтобы использовать такие коэффициенты в практических расчетах времени реверберации залов рассматриваемого типа. Следует отметить, что изменение коэффициентов Костена на 20% означает изменение на те же 20% общего звукопоглощения, в то время как при изменении $M\{\bar{\alpha}_2\}$ на 30% изменение общего звукопоглощения зала лежит примерно в пределах 10%. Кроме того, методика Костена не позволяет учесть индивидуальные особенности залов. При использовании же коэффициента добавочного звукопоглощения α_2 эти особенности учитываются, во-первых, при расчете $\bar{\alpha}_1$, а во-вторых, — путем уменьшения или увеличения $\bar{\alpha}_2$ в зависимости от характера отделки интерьера зала. Таким образом, наиболее правильной представляется оценка добавочного звукопоглощения при помощи его среднего коэффициента $\bar{\alpha}_2$.

Усредненные значения коэффициента $\bar{\alpha}_2$, приводимые в табл. 3.1, были получены для определенной категории помещений (залы многоцелевого назначения средней вместимости). Однако, как показал последующий опыт, эти значения можно с успехом использовать при расчете времени реверберации в помещениях различного назначения и вместимости. Исключение составляют спортивные залы, в которых добавочное звукопоглощение оказалось небольшим ($M\{\bar{\alpha}_2\} \approx 0,03$ на частоте 125 Гц и $M\{\bar{\alpha}_2\} = 0,01$

на частотах 500—2000 Гц). Это связано с тем, что условия, вызывающие добавочное звукопоглощение (например, многочисленные щели и отверстия на внутренних поверхностях, гибкие элементы отделки и оборудования), выражены в спортивных залах довольно слабо.

При практических расчетах времени реверберации помещений, имеющих воздушные пазухи, соединенные щелями и малыми отверстиями с основным объемом помещения, или большое количество гибких элементов отделки, специально не учтенных в расчете, усредненные значения $\bar{\alpha}_2$, представленные в табл. 3.1, следует увеличивать примерно на 30%. В тех случаях, когда указанные особенности у помещения выражены слабо, рекомендуемые средние значения следует, наоборот, примерно на 30% уменьшать.

В заполненных залах на точность расчета наряду с добавочным звукопоглощением может также оказать влияние погрешность в учете звукопоглощения, вносимого слушателями. Трудность здесь заключается в том, что звукопоглощение, вносимое слушателями, может изменяться в довольно широких пределах в зависимости от плотности размещения слушателей, от расчлененности поверхности мест на секторы, от типа кресел и одежды слушателей. Этим объясняется значительное несовпадение данных различных авторов.

По данным Беранеке [15] звукопоглощение слушателей и кресел наиболее правильно учитывать при помощи коэффициента звукопоглощения общей площади, занятой слушателями, со специальной добавкой на проходы. Но при площади пола, приходящейся на одно место, порядка 0,5 м² с одинаковым успехом может применяться и эквивалентное звукопоглощение, приходящееся на одного слушателя или на одно кресло, что проще для расчета. В большинстве случаев площадь на одно место составляет примерно 0,5—0,55 м², поэтому использование эквивалентного звукопоглощения слушателя или кресла вполне правильно. Это подтверждается и тем фактом, что коэффициенты добавочного звукопоглощения, рассчитанные для одних и тех же пустых и заполненных залов, практически совпадают. Расчеты проводились с использованием данных об эквивалентном звукопоглощении слушателей и кресел, приведенные в табл. 3 приложения.

3.3. ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩАЯ ОТДЕЛКА И ЕЕ РАЗМЕЩЕНИЕ

Использование звукопоглощающей отделки при акустическом решении помещений общественных зданий в основном является средством снижения времени реверберации до рекомендуемого оптимума. Однако применять специальные звукопоглощающие материалы и конструкции следует очень осторожно. Прежде всего это касается помещений, в которых основные мероприятия проходят в условиях естественной акустики (лекционные залы, залы драматических и музыкально-драматических театров, оперные и

концертные залы). Введение значительного количества дополнительного звукопоглощения, вызываемое обычно завышенным объемом помещения, приводит (при постоянной мощности источника) к снижению уровня звукового давления на площади слушательских мест. Учитывая ограниченную мощность источников звука в помещениях с естественной акустикой, такое снижение является крайне нежелательным. При правильно выбранном объеме помещения, приходящемся на одно слушательское место, для достижения рекомендуемого времени реверберации обычно не требуется введения специальных звукопоглощающих материалов. В тех случаях, когда в соответствии с расчетом времени реверберации требуется небольшое увеличение общего звукопоглощения в помещении, то проще всего это достигается путем применения тонких деревянных панелей, увеличивающих звукопоглощение преимущественно на низких частотах, тканевых портьер и дорожек, поглощающих в основном средние и высокие частоты.

Если все же возникает необходимость в применении специальных звукопоглощающих материалов и конструкций, то их не следует размещать на участках внутренней поверхности помещения, дающих первые малозапаздывающие отражения к слушателям. Такие отражения необходимы практически во всех типах помещений. Выделение участков проводится при помощи построения геометрических отражений (при условии их допустимости). Используя метод мнимых источников, особенно просто определяются участки, дающие первые отражения к слушателям, на больших плоских поверхностях.

На рис. 3.20 показано построение такого участка на плоском наклонном потолке (q и q' — проекции источника; q_1 и q'_1 — проекции мнимого источника). Источник звука находится на эстраде в боковом положении, при котором искомый участок потолка (при учете также симметричного положения источника s) принимает наибольшие размеры. Участок партера, занятый слушателями, в плане заштрихован. Проведя из мнимого источника лучи к вершинам этого участка, находим вертикальные проекции a', b', c', d' точек пересечения этих лучей с потолком; после этого на горизонтальных проекциях лучей получаем горизонтальные проекции a, b, c, d тех же точек. Таким образом, многоугольник с горизонтальной проекцией $a'b'cd$ является искомым участком потолка, дающим первые отражения звука к слушателям. Учитывая также симметричное положение источника s , получим в плане общий участок потолка $aef d$, от которого могут попадать к слушателям первые отражения при этих двух положениях источника. Участок для обеспечения отражений от его краев должен быть увеличен по контуру путем добавления полосы шириной 0,5 м. Оставшийся, затушеванный в плане, участок потолка может использоваться для размещения звукопоглощающих материалов. Часть потолка, находящаяся над эстрадой, оставлена без отделки звукопоглотителями, так как окружающие эстраду поверхности следует

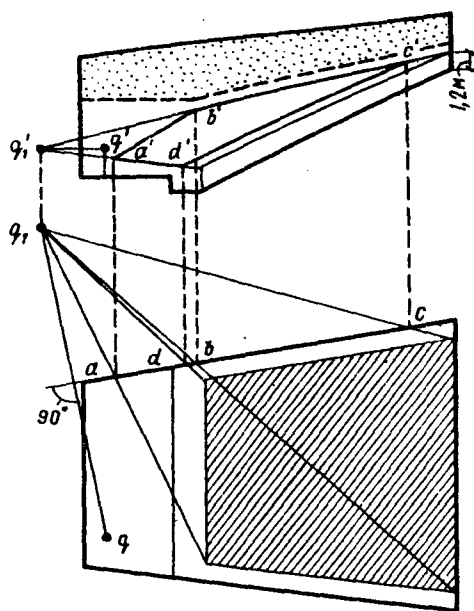
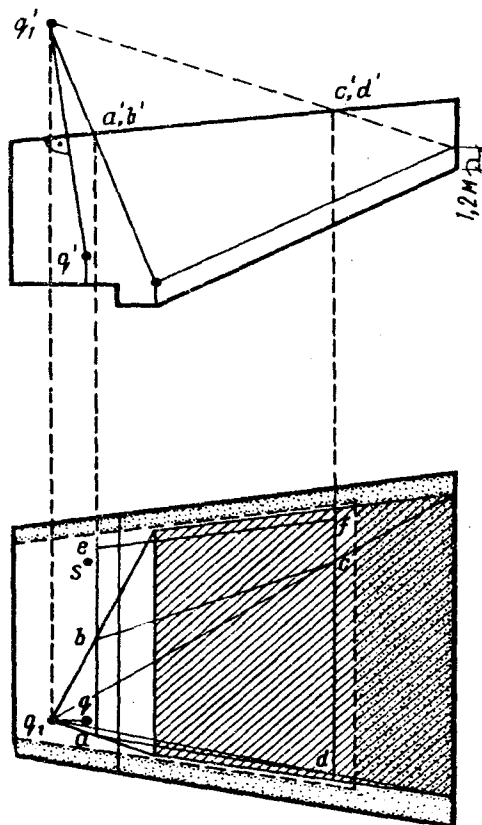


Рис. 3.21. Нахождение участка стен, пригодного для размещения звукопоглощающих материалов

Рис. 3.20. Нахождение участка потолка, пригодного для размещения звукопоглощающих материалов

делать малопоглощающими (это существенно и для того, чтобы ранние отражения приходили к самим исполнителям).

Аналогичным образом (рис. 3.21) найден участок плоской боковой стены, дающий первые отражения к слушателям. Здесь q , q' — горизонтальная и вертикальная проекции источника, а q_1 , q_1' — проекции мнимого источника. Теми же приемами, что и для потолка, находим в вертикальной проекции участок боковой стены $a'b'c'd'$, дающий первые отражения к слушателям. На затушеванном участке в верхней части стены можно размещать звукопоглощающие материалы. В части стены около пола размещение звукопоглотителя нецелесообразно из-за возможности его повреждения. Значительная часть стены около эстрады, как и часть потолка на рис. 3.20, оставлена без отделки звукопоглотителем.

Как видно из приведенных примеров, для размещения звукопоглощающих материалов остаются верхние части стен и поверхность по периметру потолка. Полная звукопоглощающая отделка потолка неприемлема и с точки зрения распределения первых отражений. Размещать звукопоглотитель целесообразно участками площадью 1–5 м², что несколько увеличивает эффективность

звукопоглотителя и дает некоторое рассеивание отраженного звука. Поверхности стен и потолка на балконе и под балконом не следует отделывать звукопоглощающими материалами. Сплошная звукопоглощающая отделка задней стены (в помещениях без балконов) может быть допущена в том случае, когда от нее поступают к слушателям отражения с большим временем запаздывания. В залах, оборудованных киноустановками (особенно многоканальными), за киноэкраном следует размещать эффективный звукопоглотитель. Сведения о звукопоглощающих материалах и конструкциях даны в табл. 1 и 2 приложения.

3.4. РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Если интерьер зала формирует плоские поверхности, то, используя методы геометрической акустики, можно с помощью ЭВМ рассчитать импульсный отклик помещения и получить некоторые критерии акустического качества. Такой подход, безусловно, является перспективным, хотя он далеко не всегда применим к реальным помещениям, поверхности которых могут включать криволинейные элементы. В практике акустического проектирования можно ограничиться более простыми расчетами, дающими тем не менее хорошие результаты. К ним, например, можно отнести разработанные в НИИСФ методы расчета разборчивости речи и характеристики передачи $A(f)$. При разработке этих методов модель звукового поля в стационарном режиме (режиме нарастания) принята в виде:

$$\epsilon = \epsilon_D + \epsilon_R + \epsilon_N, \quad \text{где } \epsilon \text{ — общая плотность звуковой энергии; } \epsilon_D \text{ — плотность энергии прямого звука; } \epsilon_N \text{ — плотность энергии первых звуковых отражений; } \epsilon_R \text{ — плотность диффузной звуковой энергии (за исключением прямого звука и первых отражений).}$$

Плотность энергии прямого звука определяется по формуле (3.4). Суммарная плотность энергии некоторого числа n первых отражений

$$\epsilon_R = \frac{P_A \Omega}{4\pi c} \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i^2 \beta_i}{(r_i + r_i'')^2} = \sum P_A \text{ — мощность звука}$$

где Φ_i — коэффициент направленности источника для угла между его акустической осью и направлением вектора r_i ; β_i — коэффициент отражения i -й поверхности помещения; r_i — расстояние от источника i -й отражающей поверхности; r_i'' — расстояние от i -й отражающей поверхности до точки приема.

Плотность диффузной звуковой энергии, постоянной по всему помещению, будет

$$\epsilon_N = \frac{4 P_A \bar{\beta}^2}{c S (1 - \bar{\beta})}$$

где $\bar{\beta}$ — средний коэффициент отражения; S — общая площадь внутренних поверхностей помещения.

В основу метода расчета разборчивости положена мультипликативная формула (2.9). Как уже было отмечено, эта формула получила наиболее широкое распространение в европейской практике, причем в основном для расчета разборчивости в помещениях с естественной акустикой. В таких помещениях особенно важны интенсивные мало запаздывающие отражения, хорошо учитываемые в мультипликативной формуле с помощью коэффициента K_R . О том, насколько важны интенсивные мало запаздывающие отражения в повышении разборчивости речи, свидетельствуют результаты исследований, выполненных в заглушенной камере НИИСФ с использованием установки электроакустического моделирования звуковых полей. Так, например, добавление двух интенсивных отражений с запаздыванием 20–30 мс и относительным уровнем –5 дБ в обедненную структуру (одно интенсивное отражение в интервале 50 мс) увеличивает разборчивость в среднем на 8%. Такое увеличение является весьма существенным и примерно соответствует ширине класса разборчивости (10%). Касаясь второго коэффициента K_L мультипликативной формулы, следует отметить, что, если приняты соответствующие меры по защите от проникающих шумов, то в залах обычно не наблюдается резких отличий в спектрах шума. Поэтому коэффициент K_L , определенный для двух типичных спектров (пустой и заполненной залы) может достаточно надежно характеризовать зависимость разборчивости от отношения сигнала к шуму. Тем самым, сглаживается основной недостаток мультипликативной формулы, заключающийся в слабом учете спектра шума.

Для определения коэффициента K_R используется четкость по Тиле. Учитывая (3.20), критерий четкости можно написать в следующем виде:

$$D = \frac{\epsilon_D + \epsilon_{R(50)}}{\epsilon_D + \epsilon_R + \epsilon_N}, \quad (3.21)$$

где $\epsilon_{R(50)}$ — суммарная плотность энергии первых звуковых отражений поступающих в точку приема с запаздыванием не более 50 мс.

Подставив выражения (3.4), (3.21) и (3.22) в формулу (3.23) и сделав несложные преобразования, получим

$$D = \left\{ \frac{\Phi_d^2}{r_d^2} + \sum_{i=1}^{n(50)} \frac{\Phi_i^2 \beta_i}{(r_i' + r_i'')^2} \right\} / \left\{ \frac{\Phi_d^2}{r_d^2} + \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i^L \beta_i}{(r_i' + r_i'')^2} + \frac{16 \pi \bar{\beta}^2}{\Omega S (1 - \bar{\beta})} \right\}. \quad (3.24)$$

Значения величин, входящих в формулу четкости, определяются по чертержам помещения с учетом его отделки, а также характеристики направленности источника звука (человеческого голоса).

Коэффициенты отражения принимаются усредненными в полосе частот 250—2000 Гц. При определении коэффициентов направленности и осевой концентрации источника используется то обстоятельство, что характеристику направленности человеческого голоса (см. рис. 3.22) в важном для разборчивости речи диапазоне частот можно приближенно записать аналитическим выражением:

$$\Phi_i(\theta) = \frac{1}{2} (1 + \cos \frac{\theta}{2}), \quad \text{X.H.} \quad (3.25)$$

где θ — угол между акустической осью источника и направлением на рассматриваемую точку.

Так как характеристику направленности человеческого голоса можно приближенно считать асимметричной, то коэффициент осевой концентрации легко рассчитать по формуле:

$$\Omega = 2 / \left(\int_0^\pi \Phi^2(\theta) \sin \theta d\theta \right), \quad \text{K.K.} \quad (3.26)$$

Из выражения (3.25) или из соответствующей диаграммы направленности легко определить необходимый для расчета Φ_i коэффициент направленности. Расчет коэффициента осевой концентрации по формуле (3.26) с учетом (3.25) дает величину $\Omega = 4,8$.

Зависимость коэффициента K_R от рассчитанной по формуле (3.24) величины четкости D принята в виде:

$$K_R = \sqrt[n]{D}, \quad (3.27)$$

Значение корня n оптимизировано на основе данных субъективной оценки разборчивости, полученных в ряде пустых зрительных залов. В результате оптимизации n расчетная мультипликативная формула приобрела вид:

$$P_c = 96 K_L^{10\sqrt{D}}, \quad (3.28)$$

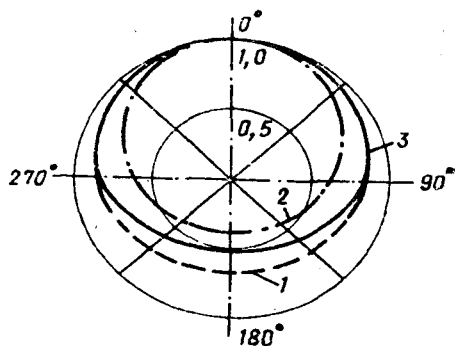
где D рассчитывается по формуле (3.24) с учетом $\Omega = 4,8$.

Коэффициент K_L определяется по диаграммам, представленным на рис. 2.4—2.5 и позволяющим получить K_L как для пустого, так и для заполненного помещений. При определении K по этим диаграммам уровень шума для пустого помещения принимается равным 40 дБ, а для заполненного 50 дБ. Средний уровень речи на расстоянии 1 м от говорящего (по оси излучения) составит обычно 70 дБ. Уровень речи в рассматриваемой точке K можно рассчитать по формуле, дБ:

$$L_K = 70 + 10 \lg \frac{\epsilon_K}{\epsilon_0}, \quad (3.29)$$

где ϵ_K — плотность энергии прямого звука и первых отражений (с запаздыванием не более 50 мс) в точке K ; ϵ_0 — плотность энергии прямого звука и первых отражений (с запаздыванием не более 50 мс) в точке, расположенной на расстоянии 1 м от источника по его оси.

Рис. 3.22. Диаграмма направленности человеческого голоса
1 — 250 Гц; 2 — 2000 Гц; 3 — диаграмма согласно формуле (3.26)



Оценка пригодности описанного метода расчета разборчивости была проведена путем сравнения расчетных данных с данными определения разборчивости, выполненными в соответствии с ГОСТ 25902—83 в достаточно большом числе помещений (зал заседаний Дома профсоюзов в Таллине, зал драматического театра в Смоленске, зал Центрального Академического театра Советской Армии, новый зал Московского театра драмы и комедии на Таганке и др.). Сравнение данных расчета и натурного определения разборчивости показало, что средняя абсолютная погрешность во всех случаях не превышает 3%. Этот результат свидетельствует о том, что метод расчета разборчивости речи позволяет надежно прогнозировать акустическое качество речевых помещений на стадии проектирования.

Для вывода формулы расчета характеристики передачи $A(f)$, учитывая принцип ее измерения (2.36), целесообразно от плотности звуковой энергии перейти к среднему квадрату звукового давления. Плотность энергии прямого звука и средний квадрат звукового давления связаны соотношением:

$$\epsilon_D = \bar{p}^2 / \rho c^2, \quad (3.30)$$

где $\bar{p}^2$ — средний квадрат звукового давления; ρ — плотность воздуха.

Подставив (3.30) в формулу (3.4), получим

$$\bar{p}_D^2 = P_A \Omega \Phi_d^2 \rho c / 4 \pi r_d^2. \quad (3.31)$$

Для прямого звука на расстоянии 1 м от источника по его оси

$$\bar{p}_1^2 = P_A \Omega \rho c / 4 \pi. = 56,3 \quad (3.32)$$

Осюда

$$\bar{p}_D^2 = \bar{p}_1^2 \Phi_d^2 / r_d^2. \quad (3.33)$$

Аналогично можно сделать переход к среднему квадрату звукового давления, создаваемому первыми отражениями,

$$\bar{p}_R^2 = \bar{p}_1^2 \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i^2 \beta_i}{(r_i' + r_i'')^2} \quad (3.34)$$

и к среднему квадрату звукового давления, соответствующему диффузной составляющей звукового поля,

$$\bar{p}_N^2 = \bar{p}_1^2 16 \pi \bar{\beta}^2 / [\Omega S (1 - \bar{\beta})]. \quad (3.35)$$

Средний квадрат звукового давления в рассматриваемой точке будет

$$\bar{p}^2 = \bar{p}_D^2 + \bar{p}_R^2 + \bar{p}_N^2 \quad (3.36)$$

Величина $10 \lg \bar{p}^2 / \bar{p}_1^2$ является первым членом правой части в формуле (2.36), т.е. расчетным уровнем звукового давления в данной точке помещения, который должен рассчитываться для каждой полосы частот. Второй член правой части формулы (2.36) является средним значением уровня звукового давления звука на расстоянии 1 м от центра излучения в соответствующей полосе частот. Проводя операцию усреднения по всей площади излучения на основании формулы (3.32), получим:

$$\bar{p}_{1cp}^2 = \bar{p}_1^2 / \Omega \quad (3.37)$$

или

$$L_1 = 10 \lg \bar{p}_{1cp}^2 / p_0^2. \quad (3.38)$$

Для расчета А в соответствии с формулой (2.36) необходимо привести следующее:

$$A = 10 \lg \frac{\bar{p}^2}{p_0^2} = 10 \lg \frac{\bar{p}_{1cp}^2}{p_0^2} = 10 \lg \frac{\bar{p}^2}{\bar{p}_{1cp}^2}. \quad (3.39)$$

Отсюда окончательно получим:

$$A = 10 \lg \left\{ \frac{\Omega \Phi_d^2}{r_d^2} + \Omega \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i^2 \beta_i}{(r_i' + r_i'')^2} + \frac{16 \pi \bar{\beta}^2}{S (1 - \bar{\beta})} \right\}. \quad (3.40)$$

Сравнение результатов расчета по формуле (3.40) с данными измерений, выполненных в ряде музыкальных залов Москвы, показало в целом их достаточно хорошее соответствие.

Расчет характеристики А (f), как и ее измерение, желательно проводить для всех 1/3 октавных полос в диапазоне 63—8000 Гц. Однако, учитывая, что коэффициенты звукопоглощения материалов и конструкций приводятся обычно только для частот 125,

250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц, в практических расчетах можно ограничиться только этими частотами. На основании расчета характеристики $A(f)$ определяются ее параметры $A_1(f)$ и A_0 , значения которых сравниваются с областями оптимальных значений (см. рис. 2.10 и 2.11).

3.5. УСТРАНЕНИЕ МЕШАЮЩИХ АКУСТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Мешающие акустические факторы довольно подробно рассмотрены в п. 2.5. Наиболее крупными из них являются эхо, порхающее эхо и высокий уровень проникающих шумов. Эти факторы способны ухудшить или даже сделать невозможным восприятие полезного звукового сигнала. Кроме того, эхо является основной причиной нарушения правильной локализации источника звука, а порхающее эхо может привести к искажению тембра звука. Меры по предотвращению перечисленных дефектов необходимо принять на стадии проектирования, так как в готовом зале их устранение является трудной, а порой и невыполнимой задачей.

Наибольшую опасность с точки зрения образования эха представляют вогнутые поверхности, концентрирующие отраженный звук в небольшой области зала (рис. 3.23). Если центр кривизны этой поверхности находится вблизи расположения источника звука, то концентрация получается особенно сильной (коэффициент $H \gg 1$), а область концентрации перемещается с перемещением источника звука. Концентрация отраженного звука при его большом запаздывании приводит к сильному эху, но и при меньшем запаздывании получается неприятная местная неравномерность звукового поля. При проектировании зала лучше всего избегать вогнутых поверхностей. Если вогнутые поверхности все-таки заложены в проект, то необходимо принять меры по ликвидации или, по крайней мере, ослаблению их вредного действия. Средствами борьбы с концентрацией отраженного звука является изменение геометрии вогнутой поверхности, ее звукопоглощающая отделка или членение. Возможны различные варианты этих средств. Проектирование помещений с вогнутыми поверхностями следует вести с привлечением специалистов-акустиков. Весьма полезным, а порой и необходимым, является здесь применение техники масштабного моделирования.

Изменение геометрии вогнутой поверхности означает в основном изменение расположения центра ее кривизны по отношению к положению источника звука. Обычно рекомендуют располагать центр кривизны вогнутой поверхности на расстоянии от нее, превышающем не менее чем в 2 раза расстояние от поверхности до источника звука (рис. 3.24). Однако двухкратное превышение в ряде случаев может оказаться недостаточным, особенно при сложности промежуточных отражений, приходящих в рассматриваемую зону помещения. Так, например, если вогнутой поверхностью является задняя стена или барьер балкона (см. рис. 3.24), то ин-

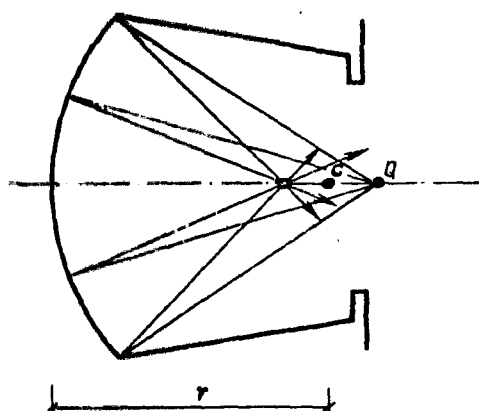


Рис. 3.23. Концентрация звука, отраженного от вогнутой задней стены (центр кривизны расположен вблизи источника)

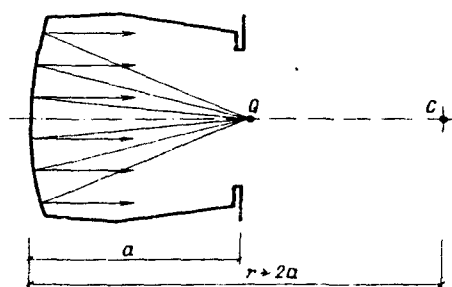


Рис. 3.24. Допустимое положение центра кривизны вогнутой задней стены

тенсивность отраженной волны при $r = 2a$ будет убывать значительно медленнее, чем при сферическом распространении. Такое отражение, имея значительное запаздывание, может вызвать эхо на сцене и в первых рядах партера, так как эти зоны помещения бывают обычно лишены интенсивных промежуточных отражений. Достаточно простым способом ослабления эха в данном случае является наклон задней стены к поверхности слушательских мест. Угол наклона подбирается таким образом, чтобы отраженный от стены звук попадал к слушателям последних рядов с возможно меньшим запаздыванием.

Это на сцене и в первых рядах может быть также вызвано отражением от угла между вогнутой задней стеной и потолком зала (рис. 3.25). В этом случае для ослабления эха можно использовать различные типы примыкания потолка к задней стене, показанные на рис. 3.26. Изображенные варианты, разумеется, применимы и при решении примыкания потолка к задней стене на балконе и под балконом. Следует отметить, что эхо на сцене и в передней зоне зала возможно и при плоской задней стене. Однако такое эхо обычно не является ощутимой помехой и легко устраняется с помощью показанных приемов (см. рис. 3.26).

Ослабления концентрации отраженного звука можно добиться путем звукопоглощающей отделки вогнутой поверхности. Однако применение звукопоглотителя может оказаться нежелательным, если оно приводит к уменьшению времени реверберации помещения по сравнению с оптимальным. Для эффективного ослабления концентрации часто требуется звукопоглотитель с такими высокими коэффициентами звукопоглощения, обеспечить которые бывает довольно трудно. Это можно продемонстрировать на примере купола (см. рис. 3.16). Расчетный относительный уровень отражения ΔL от этого купола в зоне наибольшей концентрации составляет $-1,5$ дБ, а запаздывание $\Delta t = 115$ мс. При таких значениях

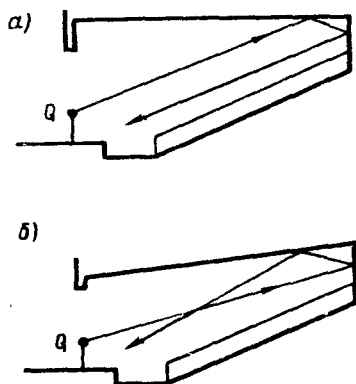


Рис. 3.25. Отражение звука от угла между потолком и задней стеной
а — прямой угол; б — острый угол

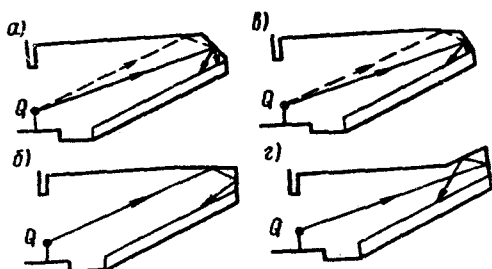
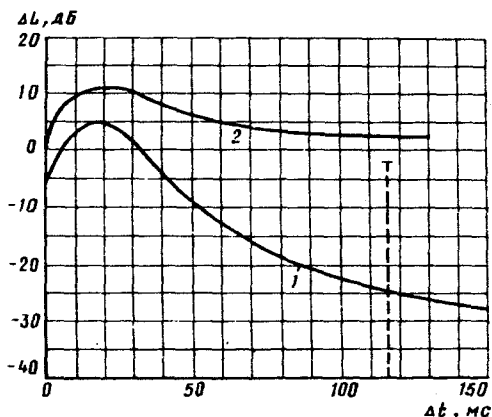


Рис. 3.26. Рациональные типы примыкания потолка к задней стене
а — наклон задней стены; б — наклон примыкающего к стене участка потолка; в — наклон участка потолка и задней стены; г — острый угол между потолком и задней стеной

Рис. 3.27. Оценка заметности эха при отражении звука от купола, изображенного на рис. 3.16

1 — порог заметности эха;
2 — порог мешающего действия эха



ΔL и Δt отражение от купола будет восприниматься как сильное эхо, близкое по громкости к прямому звуку (рис. 3.27). Для ослабления эха до порога заметности необходимо снизить его уровень примерно на 20 дБ. Такое снижение только за счет звукопоглощающей отделки купола потребовало бы обеспечить коэффициент звукопоглощения $\alpha = 0,99$ в широком диапазоне частот. Практически это осуществить чрезвычайно сложно. Если в рассмотренном примере, не меняя высоты помещения, увеличить радиус купола и расположить центр его кривизны вблизи расчетной поверхности, то ΔL возрастет до 20 дБ. Борьба с таким сильным эхом без изменения геометрии купола уже невозможно.

Третьим, причем достаточно эффективным средством ослабления концентрации является членение вогнутой поверхности. Выбирая членение, необходимо учитывать, что хорошо рассеиваются звуковые волны, длина которых близка к размерам элемента членения. Особенно выгодны для этой цели элементы, имеющие криво-

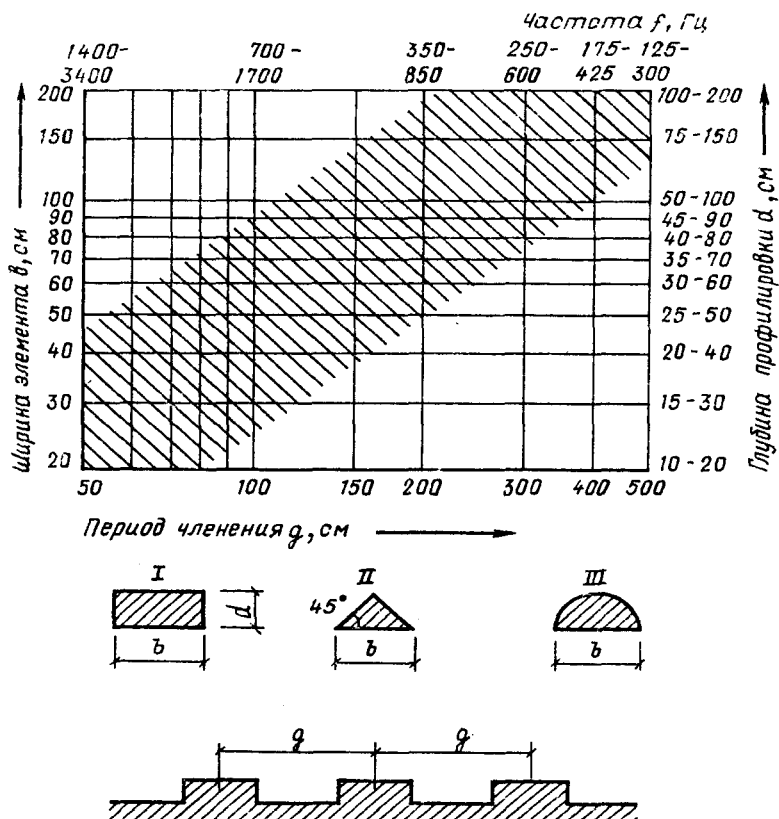


Рис. 3.28. Ориентировочные размеры периодических членений, обеспечивающие рассеяние отраженного звука разных частот

линейное выпуклое сечение, которые рассеивают также и более короткие волны. При периодически расположенных элементах рассеивание звука зависит не только от формы и размеров их сечений, но и от их шага (рис. 3.28). Заштрихованная область на рисунке показывает примерные пределы, в которых лежат размеры пилястр и их шаг, дающие существенное рассеивание отраженного звука в указанных на этом рисунке областях частот. Пилястры выпуклого и треугольного сечения (тип II и тип III) рассеивают также и более высокие частоты по сравнению с получающимися из рисунка. Мелкие элементы размером 10–20 см рассеивают лишь частоты выше 1000 Гц. Эффективное рассеивание в области частот 200–600 Гц дают пилястры с размерами 1–2 м по ширине и 0,5–1 по глубине при шаге членения 2–4 м. Если их очертание подвергнуть дальнейшему членению, т.е. придать крупным элементам дополнительную мелкую детализацию или сделать их выпуклой формы, то будет достигнуто рассеивание в широком диапазоне звуковых частот. Пилообразные членения глубиной 12–15 см и с шагом

1,2—1,5 м являются эффективными, начиная с 600 Гц. Рассеивающий эффект членений улучшается, если их шаг нерегулярен, т.е. расстояния между смежными членениями неодинаковы по всей поверхности. Членение с мелким регулярным шагом 5—20 см вызывает периодические отражения коротких импульсов (например, ударов, хлопков и т.п.), в результате чего возникает неприятное подсвистывание, искажающее звук, поэтому отделок с таким членением следует избегать.

Концентрация звука является также причиной возникновения интенсивного порхающего эха. Этот эффект, возникающий при многократном отражении звука между параллельными гладкими плоскостями (обычно между боковыми стенами помещения), усиливается, если напротив плоскости размещается вогнутая поверхность. Еще более интенсивным бывает порхающее эхо при расположении двух вогнутых поверхностей друг против друга. Увеличение радиуса кривизны вогнутых поверхностей или небольшое отклонение противоположных стен от параллельности (в пределах 5°) не дает существенного ослабления порхающего эха. Большого успеха здесь можно добиться путем звукопоглощающей отделки (если она требуется также и для снижения времени реверберации) или путем расчленения, по крайней мере, одной из противоположных поверхностей.

Уровни проникающих шумов в зальных помещениях не должны превышать значений, указанных в СНиП II-12-77. Для того чтобы выполнить это требование, при проектировании помещения, как правило, оказывается необходимым предусмотреть ряд шумозащитных мероприятий. Методы расчета и проектирования этих мероприятий достаточно подробно изложены в ряде руководств и рекомендаций [9, 10, 11], разработанных в соответствии со СНиП II-12-77, поэтому ограничимся только перечислением основных вопросов шумозащиты, на которые необходимо обратить внимание при акустическом решении помещения.

Особенно важное значение с точки зрения шумозащиты, имеет расположение здания и его внутренняя планировка. Крайне нежелательно располагать здание, в котором имеется зал, на шумной магистрали. Если такое расположение все же неизбежно, то здание должно отступать от красной линии. Внутренняя планировка здания должна быть такова, чтобы зал находился как можно дальше от шумных проездов и других сильных источников шума, а между залом и улицами размещались вспомогательные помещения (фойе, вестибюли и т.п.), защищающие зал от непосредственного проникания уличного шума. Если зал имеет окна, то они не должны быть обращены в сторону шумных проездов и их следует устраивать с двойными плотными переплетами. При разработке внутренней планировки здания необходимо строго следить за тем, чтобы помещения с шумным оборудованием (например, вентиляционные камеры с вентиляторами, насосные, холодильные установки, шахты лифтов и их машинные помещения, трансформаторные, котельные, туалеты и т.п.) не примыкали к залу и другим поме-

щениям, требующим защиты от шума. Если окружающие зал помещения нуждаются по своему характеру в защите от шумов, то должна быть обеспечена изоляция этих помещений от проникающего из зала звука. Для повышения звукоизоляции между залом и фойе входы в зал должны иметь плотно закрывающиеся двери. Лучшая звукоизоляция достигается путем устройства тамбуров с двумя дверями. Устройство тамбуров или коридоров, отделяющих зал от фойе, особенно рекомендуется, если предполагается использование фойе (например, для оркестра) одновременно с залом.

Современные залы, как правило, оборудуются установками вентиляции и кондиционирования, которые являются наиболее распространенными источниками проникающих шумов. При проектировании установок вентиляции или кондиционирования воздуха для изоляции зала от их шума должны быть соблюдены следующие основные мероприятия:

- а) монтаж вентиляторов, насосов и компрессоров совместно с их двигателями на амортизаторах для изоляции колебаний, передающихся строительным конструкциям здания;

- б) устройство вставок из прорезиненной ткани в местах присоединения воздухопроводов к вентиляторам и вставок из резинового шланга в местах присоединения трубопроводов к насосам;

- в) устройство глушителей для заглушения аэродинамических шумов, распространяющихся по воздуховодам;

- г) ограничение скорости воздуха для снижения шумообразования в воздуховодах и решетках;

- д) надлежащая звукоизоляция ограждающих конструкций помещений, в которых расположены вентиляторы и насосы.

В залах, оборудованных киноустановками, при демонстрации фильмов шум кинопроекторов может мешать зрителям, для изоляции зала от этого шума проекционные окна должны иметь стекла толщиной не менее 6 м, герметически закрывающие оконный проем при помощи резинового уплотнения по контуру. Смотровые окна должны иметь два таких стекла. В оконном проеме торцы стены между этими стеклами рекомендуется отделять звукопоглощающим материалом. Проекторы следует устанавливать на резиновых амортизаторах, ослабляющих звуковые колебания, передающиеся полу. Потолок кинопроекторной для снижения шума рекомендуется отделять звукопоглощающим материалом.

ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ УМЕНЬШЕННЫХ МОДЕЛЕЙ В АКУСТИКЕ ПОМЕЩЕНИЙ

Использование уменьшенных моделей помещений для решения вопросов акустики имеет довольно длительную историю. Первыми в акустике помещений стали использоваться водяные и оптические модели. Водяные модели дают только двухмерную картину распространения звука, причем в силу дисперсии волн на поверхности

жидкости эта картина получается размытой. Оптические модели из-за огромной скорости света и малой длины видимых световых волн применимы только для исследования установившихся звуковых процессов, причем на очень высоких частотах. В акустике помещений, как известно, основное значение имеют неуставившиеся (переходные) процессы. В настоящее время оба типа моделей почти не применяются.

В послевоенные годы начали развиваться методы исследования звуковых воздушных колебаний в уменьшенных моделях помещений. Несмотря на практическую невозможность точного соблюдения условий подобия при масштабном моделировании, исследования на уменьшенных моделях дают достаточно близкую к реальной картину поведения звука в помещениях. Особенно эффективным оказалось масштабное моделирование при решении практических задач архитектурной акустики. Использование уменьшенных моделей получило широкое распространение в акустических лабораториях многих стран.

Послевоенное развитие архитектурной акустики характеризуется применением электроакустического моделирования и попытками использовать ЭВМ для моделирования акустики помещений. Оба метода имеют ряд ограничений, затрудняющих их широкое внедрение в практику акустического проектирования. Электроакустическое моделирование звуковых процессов в заглушенной камере стало в основном инструментом проведения субъективных акустических исследований. Расчет импульсного отклика помещения на ЭВМ, несмотря на безусловную перспективность, сталкивается с существенными математическими сложностями, полностью преодолеть которые не удалось до сих пор.

4.1. УСЛОВИЯ ПОДОБИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

Условия подобия звуковых колебаний в помещении и его модели изучены в настоящее время достаточно хорошо. Если модель геометрически подобна помещению-оригиналу и выполнена в линейном масштабе n_L (например $n_L = 1/20$), то при соблюдении соответствующих начальных и граничных условий в воздушном объеме модели можно ожидать подобия акустических процессов. Масштаб времени этих процессов n_t равен линейному масштабу n_L . Из условия $n_t = n_L$ вытекает, что в модели подобие осуществляется на частоте $f_M = f_{op} n^{-1}$, (f_{op} — частота в помещении-оригинале). Например, при $n_L = 1/20$ получим $f_M = 20 f_{op}$.

Соблюдение начальных условий не вызывает трудностей, так как при моделировании обычно рассматриваются переходные процессы, начинающиеся из состояния покоя. Этому состоянию как в оригинале, так и в модели соответствуют колебательные смещения и скорости, равные нулю. Для установившихся акустических процессов начальные условия не требуются.

Гораздо сложнее вопрос соблюдения граничных условий. В тех

случаях, когда поверхности помещения-оригинала выполнены из изотропных материалов типа упругого тела с потерями в виде внутреннего трения, эти материалы могут быть охарактеризованы комплексными модулем Юнга $E_j (1 + i \eta_1)$ и модулем сдвига $G (1 + i \eta_2)$. Здесь граничное условие подобия, сводится к тому, что конструкции этих ограждающих поверхностей должны быть выполнены у модели в масштабе и комплексные модули модели и оригинала должны быть равны на соответственных частотах. Последнее требование сводится в основном к тому, чтобы коэффициенты потерь η_1 и η_2 модели равнялись тем же коэффициентам потерь оригинала на соответственных частотах, т.е. в модели на частотах $f_m = f_{op} n_1^{-1}$. Практически это требование удовлетворяется лишь у некоторых материалов (бетон, кирпичная кладка) и в некотором частотном диапазоне, когда коэффициенты потерь почти не зависят от частоты. К тому же изготовление поверхностей модели из этих материалов практически трудно осуществимо. Модели обычно делают не из материала помещения-оригинала.

Если поверхности помещения-оригинала могут быть охарактеризованы комплексным импедансом Z_{op} , не зависящим от угла падения звуковых волн (локально реагирующая поверхность), то граничное условие для внутренних поверхностей модели сводится к равенству импедансов поверхностей оригинала и модели на соответствующих частотах f_{op} и f_m :

$$Z_m (f_{op} n_1^{-1}) = Z_{op} (f_{op}). \quad (4.1)$$

Практически удалось добиться приближенно такого равенства импедансов модели и оригинала лишь для одной пары соответственных частот. Для импеданса, зависящего от угла падения, выполнение подобия становится практически неосуществимым.

Вследствие трудности практически осуществить подобие граничных условий обычно подбирают у внутренних поверхностей модели реверберационные коэффициенты звукопоглощения таким образом, чтобы они приближенно равнялись этим же коэффициентам у помещения-оригинала на соответственных частотах $f_m = f_{op} n_1^{-1}$. Задание акустических свойств поверхностей помещения в виде коэффициентов звукопоглощения, разумеется, не является граничным условием, необходимым для существования и единственности решения волнового уравнения в замкнутом воздушном объеме. Вопрос об искажениях, вносимых заданием для поверхностей модели коэффициентов звукопоглощения вместо точных граничных условий, пока совершенно не исследован, и работа в этом направлении крайне необходима.

Следующим весьма серьезным затруднением является необходимость обеспечить подобие поглощения звука в воздухе. Ослабление интенсивности звука в волне, проходящей расстояние x , может быть охарактеризовано множителем e^{-mx} , где m — показатель затухания, его размерность m^{-1} . Этот показатель складывается из двух показателей m_1 и m_2 . Первый из них обусловлен вяз-

костью и теплопроводностью воздуха. Этот показатель пропорционален квадрату частоты f и зависит от ряда физических параметров, являющихся функцией температуры воздуха. По экспериментальным данным

$$m_1 = (33 + 0,2 t^0) 10^{-12} f^2, \quad (4.2)$$

где t^0 — температура воздуха.

При температуре воздуха 20°C $m_1 = 37 \cdot 10^{-12} f^2$. Второй показатель m_2 связан с релаксационными внутримолекулярными колебаниями атомов двухатомных молекул газов, из которых состоит воздух. Это поглощение обычно называется молекулярным. Показатель затухания m_2 определяется выражением:

$$m_2 = A(t^0) / \left(\omega \tau' + \frac{1}{\omega \tau'} \right), \quad (4.3)$$

где τ' — время релаксации процесса (т.е. время убывания давления в e раз); ω — круговая частота; $A(t^0)$ — коэффициент, зависящий от температуры воздуха, при температуре 20°C $A = 12,5 \cdot 10^{-6}$.

Показатель затухания m_2 достигает максимума при $\omega = 1/\tau$. Эта частота должна определяться экспериментально, так как время релаксации заранее неизвестно. Большое влияние на величину m_2 оказывает относительная влажность воздуха.

Учитывая значительное число факторов, влияющих на поглощение звука в воздухе, коэффициент m определялся различными учеными экспериментальным путем. Полученная Винклером [48] экспериментальная зависимость m от относительной влажности для разных частот представлена на рис. 4.1. Из приводимых кривых видно, что поглощение звука в воздухе растет с частотой, а максимум поглощения перемещается в сторону более высокой относительной влажности. На рис. 4.2 показана идеализированная зависимость m от частоты при относительной влажности в качестве параметра. Для идеально сухого воздуха m определяется классической составляющей m_1 , которая соответствует выражению (4.2). При увлажнении воздуха m возрастает и в основном определяется молекулярным поглощением. В области относительных влажностей от 3 до 40% зависимость m от частоты нерегулярная. При относительных влажностях более 40% m пропорционален квадрату частоты и уменьшается с увеличением влажности.

Из основного условия подобия $n_t = n_l$ вытекает, что при заданных температуре и влажности подобие поглощения в воздухе соблюдается в том случае, если показатели затухания $m_{ор}$ в помещении-оригинале на частоте $f_{ор}$ и m_m в модели на соответственной частоте $f_m = f_{ор} n_l^{-1}$ будут связаны соотношением $m_m = m_{ор} n_l^{-1}$. Для этого требуется, чтобы показатель затухания звука в воздухе m был прямо пропорционален частоте. В действительности, как видно из приведенных данных, показатель затухания растет при увеличении частоты гораздо быстрее. При модельных измерениях

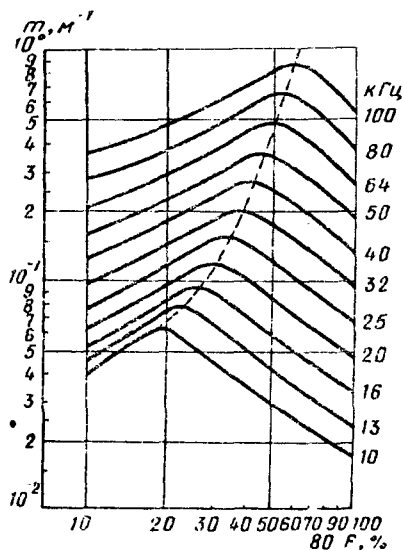


Рис. 4.1. Зависимость затухания звука в воздухе m от относительной влажности F (при 20°C) и частоты

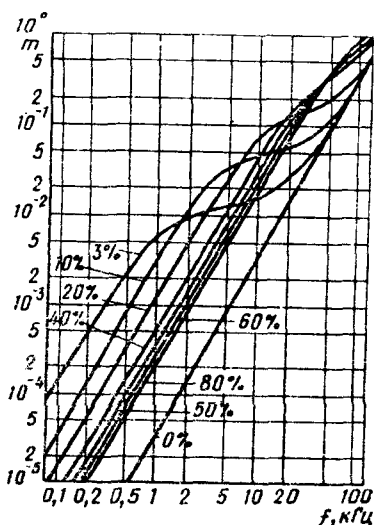


Рис. 4.2. Зависимость показателя затухания звука в воздухе m от частоты для различной относительной влажности

переходном режиме влияние поглощения звука можно исключить (см. п. 4.5). В случае стационарных или натуральных сигналов влияние поглощения возможно только уменьшить, используя для этого почти полное высушивание воздуха в модели или повышение его относительной влажности почти до 100%. Этой же цели можно достичь путем замены воздуха в модели другим газом с меньшим показателем затухания. Так при замене воздуха азотом остается только классическое поглощение, а молекулярное практически отсутствует вплоть до 100 кг.

4.2. МАСШТАБ И МАТЕРИАЛЫ МОДЕЛЕЙ

При изготовлении модели помещения для акустических исследований приходится решать два основных вопроса. Первый из них — это выбор масштаба моделирования, и второй — подбор материалов, имитирующих ограждающие поверхности помещения-оригинала, включая поверхность слушательских мест.

Обычно применяются масштабы от 1:8 до 1:40. Выбор масштаба моделирования зависит от задач исследований и от размеров моделируемого помещения. Масштабы 1:30 — 1:40 применяются в тех случаях, когда требуется получить качественное представление о структуре звуковых отражений в ограниченном сверхдиапазоне частот. Масштабы 1/8 — 1/10 используются при необходимости детального исследования звуковых процессов в широком

диапазоне частот, а также при проведении субъективной оценки акустического качества моделируемого помещения. Модели в этих случаях получаются громоздкими и дорогостоящими, а их переделка в ходе исследований является трудоемкой задачей. Разумным компромиссом является масштаб $n_1 = 1/20$. Так как верхним пределом модельного диапазона частот, учитывая поглощение звука в воздухе и аппаратурные возможности, считают 100 кГц, то при таком масштабе в натуре будут охвачены частоты до 5 кГц. Для измерения основных объективных акустических параметров этого вполне достаточно. Детали интерьера размером менее 5 см будут сказываться на частотах выше 5 кГц и поэтому в модели не воспроизводятся. Если измерения в модели $n_1 = 1/20$ ведутся на частотах до 80 кГц или только до 40 кГц, то можно не учитывать и более крупные детали интерьера. Модель в масштабе $n_1 = 1/20$ получается достаточно простой и дешевой, а замена отдельных элементов (перестройка) модели в процессе исследования не вызывает трудностей. Масштаб $n_1 = 1/20$ принят в качестве основного при модельных исследованиях, выполняемых в НИИСФ.

Основным условием подбора материалов при моделировании является подобие коэффициентов звукопоглощения соответствующих поверхностей помещения-оригинала и модели. С точки зрения подбора материалов внутренние поверхности любого помещения следует разделить на три группы: звукоотражающие поверхности; поверхности, обработанные звукопоглотителем; поверхность слушательских мест.

К первой группе относятся оштукатуренные поверхности (по твердому основанию или металлической сетке), поверхности, выполненные из массивного дерева, бетона, естественного камня, облицовочного кирпича, гипсовых неперфорированных плит, керамики и т.п. Коэффициенты звукопоглощения таких поверхностей в диапазоне 100–5000 Гц составляют обычно 0,02, не превышая 0,05. Получить такие же коэффициенты в частотном диапазоне модели принципиально невозможно. Дело в том, что каждая твердая поверхность обеспечивает некоторое минимальное звукопоглощение, возрастающее с частотой:

$$\alpha_{\min} = 1,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{f}. \quad (4.4)$$

Эта зависимость, показанная на рис. 4.3, является границей, ниже которой в модели уже нельзя получить коэффициенты звукопоглощения. На этом же рисунке дана частотная характеристика α гладкой гипсовой поверхности и лакированной фанеры. Коэффициенты звукопоглощения лакированного гипса, оргстекла, стекла и полистерола сравнительно мало отличаются друг от друга и близки к $\alpha_{\min}$. Таким образом, имитируя отражающие поверхности помещения-оригинала, приходится принимать существенно большие коэффициенты звукопоглощения. Так, поверхность, выполненная из штукатурки, окрашенной масляной краской, обеспечивает $\alpha = 0,02$ на частоте 2000 Гц. Выполнив эту поверхность в модели из

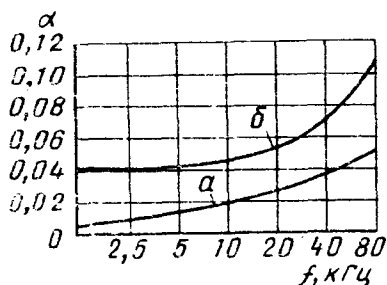


Рис. 4.3. Частотные характеристики коэффициентов звукопоглощения α твердых поверхностей: а — минимальное звукопоглощение; б — гипсовая поверхность и лакированная фанера

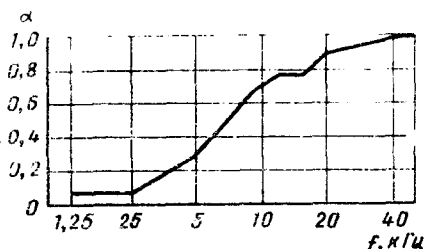


Рис. 4.4. Частотная характеристика коэффициента звукопоглощения α слоя поролона толщиной 3 мм

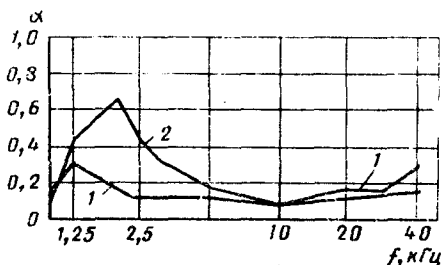


Рис. 4.6. Частотные характеристики коэффициентов звукопоглощения α резонирующих панелей, расположенных на 6 мм от стены: 1 — поверхностная масса 730 г/м²; 2 — поверхностная масса 150 г/м²

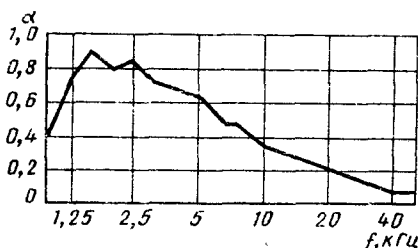


Рис. 4.5. Частотная характеристика коэффициента звукопоглощения α слоя поролона толщиной 12 мм, покрытого пленкой толщиной 50 м

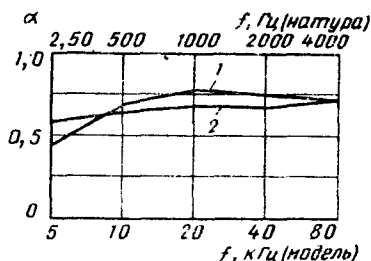


Рис. 4.7. Частотные характеристики коэффициентов звукопоглощения α площади занятых слушательских мест и слоя ваты ($n_z = 1/20$): 1 — занятые слушательские места, плотность раскладки 0,6 м² на место; 2 — слой хлопковой ваты толщиной 9 мм

оргстекла, получим на соответственной частоте 20 кГц ($n_z = 1/20$) $\alpha \approx 0,04$, т.е. в 2 раза больше. Однако при имитации отражающих поверхностей такое большое отличие коэффициентов звукопоглощения не имеет существенного значения. Если плотность энергии в падающей звуковой волне ϵ_0 , то после n отражений плотность $\epsilon_n = \epsilon_0 (1 - \alpha)^n$. В случае, например, $n = 5$ разница в уровнях отражений при $\alpha = 0,02$ и $\alpha = 0,04$ составит примерно 0,5 дБ.

При имитации поверхностей второй группы такая разница в коэффициентах звукопоглощения уже недопустима. Если, на-

пример, $\alpha = 0,6$ и $\alpha = 0,75$ (20% разница), то при $n = 5$ разница в уровнях отражений составит уже 10 дБ. Поэтому при подборе звукопоглощающих материалов для внутренних поверхностей моделей необходимо стремиться к тому, чтобы коэффициенты звукопоглощения эффективных модельных звукопоглотителей не отличались от наружных более чем на 10%. Так как связь механических параметров (сопротивление продуванию, структурный фактор, жесткость) с акустическими свойствами большинства типов звукопоглощающих материалов известна, то теоретически наиболее правильный путь подбора — это создание модельных материалов с требуемой величиной и частотной зависимостью α . Однако специальное создание модельных материалов по заданным параметрам оказывается практически трудно осуществимым делом, поэтому обычно поступают гораздо проще. Из обычных материалов (ткани, войлок, вата, поролон и т.п.) на основе измерений α в модели реверберационной камеры (масштаб модели камеры равен масштабу моделирования) выбирают те, которые обеспечивают требуемую величину и частотную зависимость α . Причем материал для модели может быть решен на другом принципе, чем натурный. Достаточно обширный каталог материалов (около 60 типов) с разнообразными коэффициентами звукопоглощения, близкими (на соответственных частотах) к коэффициентам звукопоглощения материалов, используемых в реальных помещениях, был разработан Бребеком. На рис. 4.4—4.6 в виде примеров представлены частотные характеристики α некоторых материалов, предложенных Бребеком [18].

Для имитации поверхности слушательских мест в моделях масштаба $n_1 = 1/20$ удачным оказался слой ваты, толщиной около 10 мм. Частотная характеристика α такого слоя показана на рис. 4.7. Здесь же дана частотная характеристика α площади слушательских мест (места заняты) [21]. Видно очень хорошее совпадение обеих характеристик. При имитации поверхности, занятой слушателями, возникает также вопрос рассеяния звука головами слушателей. Следует отметить предложение имитировать головы слушателей с помощью металлических болванок [6].

4.3. ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ЗВУКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наряду с поглощением звука в воздухе и свойствами ограждающих поверхностей модели большое влияние на результаты измерений оказывают характеристики источника и приемника звука. Различие в характеристиках натуральных и модельных преобразователей наиболее ярко проявляется при снятии импульсных осциллограмм. Причем особенно важны характеристики направленности преобразователей. Амплитуды отдельных отражений в импульсном отклике кроме времени пробега, формы и отделки поверхностей модели зависят от того, с каким относительным уровнем был в соответствующем направлении излучен импульс и какова чувствительность микрофона в направлении прихода этого импульса в 4—507

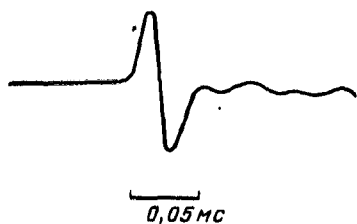


Рис. 4.8. Форма искрового импульса

Рис. 4.10. Диаграмма направленности искрового разрядника
 ■ — ■ горизонтальной плоскости;
 б — в вертикальной плоскости

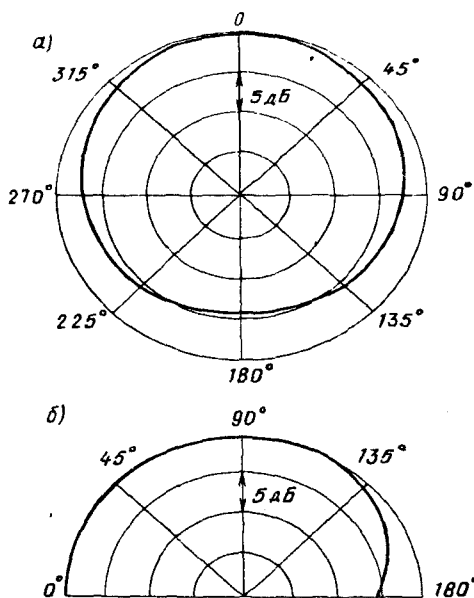
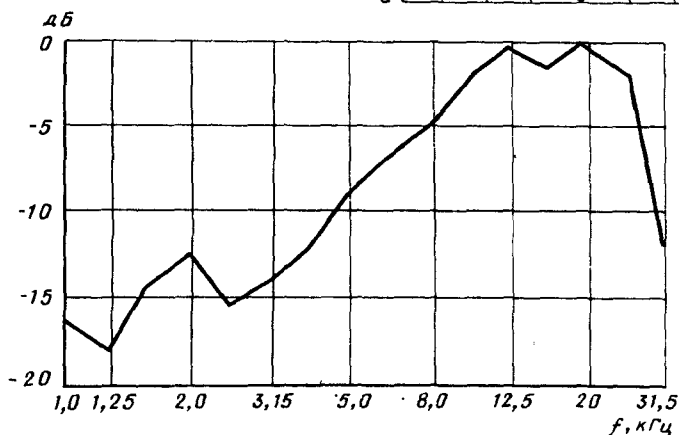


Рис. 4.9. Спектр искрового импульса



точку приема. Таким образом, помимо геометрического подобия помещения и модели, подобия коэффициентов звукопоглощения внутренних поверхностей требуется и подобие диаграмм направленности преобразователей. К источникам и приемникам звука для модельных измерений предъявляются и другие требования. Источник должен обладать достаточно высокой отдачей, малой неравномерностью частотной характеристики в заданном диапазоне частот и небольшой длительностью переходных процессов, а приемник — достаточной чувствительностью. В целом преобразователи являются наиболее слабым звеном измерительных трактов, применяемых для исследований в моделях. Остальные элементы трактов обычно не вызывают трудностей.

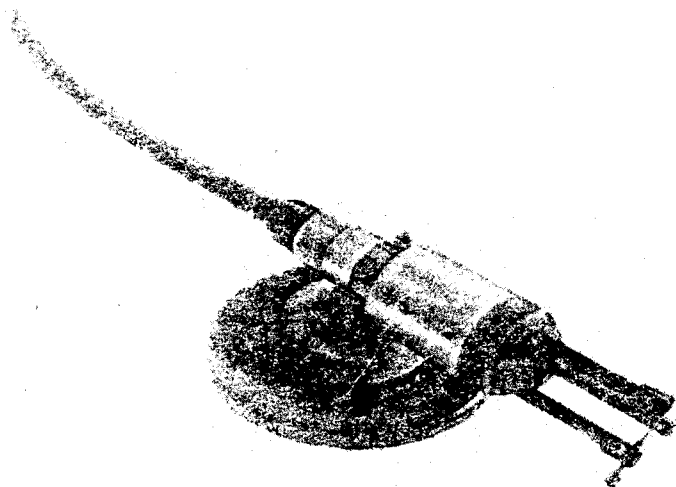


Рис. 4.11. Разрядная часть генератора искровых импульсов, установленная в модели зала

Как и в природе, при модельных измерениях чаще всего используются источники со сферической диаграммой направленности. Такую диаграмму при достаточно высокой мощности излучения имеют искровые разрядники. Несмотря на нестабильность и широкополосность излучаемых импульсов, искровые разрядки оказались настолько удобными в работе, что их широко применяют как в нашей стране, так и за рубежом. Генератор искровых импульсов, действующий в НИИСФ, имеет по сравнению с обычными схемами искровых разрядников ряд преимуществ. К этим преимуществам относятся стабильность работы схемы, возможность ступенчатой регулировки мощности разряда, возможность работы генератора как в автоматическом, так и в ждущем режимах, дистанционное управление, а также электронный запуск ждущей развертки осциллографа, позволяющий отказаться от дополнительного микрофонного тракта. Ступенчатое увеличение мощности разряда позволяет изменять длительность излучаемых импульсов от 0,06 до 0,10 мс и сдвигать максимум спектра примерно с 20 до 10 кГц. Форма и спектр импульса при минимальной мощности разряда представлены на рис. 4.8 и 4.9. Диаграмма направленности излучения, как видно из рис. 4.10, достаточно близка к сферической. Разрядная часть генератора показана на рис. 4.11.

Помимо искровых разрядников в качестве источников звука при масштабном моделировании используются различного типа электроакустические преобразователи: электродинамические, электростатические, магнитострикционные и др. [52]. Наиболее подходящими являются электростатические излучатели. Эти излу-

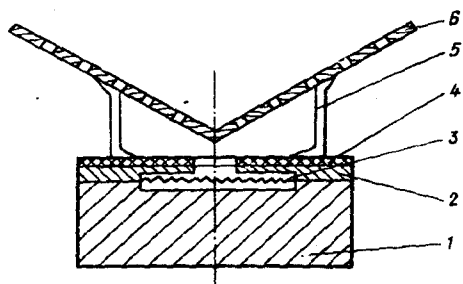


Рис. 4.12. Схематический разрез VLD-12 с маской и перфорированным конусом

1 — постоянный магнит; 2 — демпфирующая прокладка из поролона; 3 — гофрированная ленточка; 4 — маска из гетинакса; 5 — стойка крепления корпуса; 6 — перфорированный конус

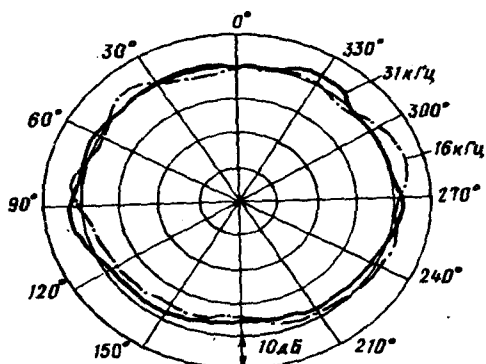


Рис. 4.13. Диаграмма направленности VLD-12 с маской $\varnothing 12$ и перфорированным конусом

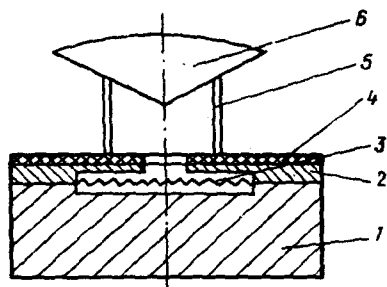


Рис. 4.14. Схематический разрез VLD-12 с маской и сплошным коническим рассеивателем

1 — постоянный магнит; 2 — демпфирующая прокладка из поролона; 3 — гофрированная ленточка; 4 — маска из гетинакса; 5 — стойка для крепления конуса; 6 — конический рассеиватель из алюминиевого сплава

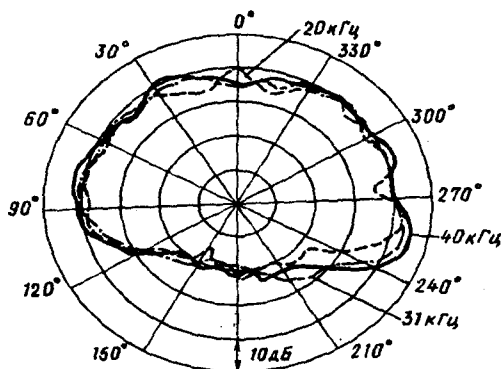


Рис. 4.15. Диаграмма направленности VLD-12 с маской $\varnothing 12$ и сплошным коническим рассеивателем

чатели, хорошо излучающие требуемые для моделирования высокие частоты, состоят из металлического электрода (обычно плоского) с шероховатой рельефной или иной неровной поверхностью. Поверх электрода натягивается тонкая синтетическая пленка, покрытая снаружи распыленным металлом, который служит вторым электродом. Вследствие неровности поверхности первого электрода под пленкой образуются небольшие воздушные объемы, кото-

рые совместно с электродами действуют как множество параллельно работающих миниатюрных электростатических излучателей. Часто устраиваются и приемники звука такого типа. Для измерений в стационарном режиме в качестве источника звука иногда применяются газовые сопла.

Достаточно простой излучатель для измерений звука в моделях был создан в НИИСФ. Основой послужил серийный ленточный громкоговоритель VLO-12 (НРБ), обеспечивающий эффективное излучение частот от 2,5 до 40 кГц. С громкоговорителя был удален рупор, а ленточка закрыта маской из гетинакса с отверстием диаметром 12 мм (при меньшем диаметре не удавалось получить требуемое для измерений отношение сигнала к шуму). Для демпфирования излучателя к нижней поверхности маски был приклеен слой поролона. Перед маской был установлен рассеиватель в виде перфорированного корпуса из плотного ватмана. Отверстия перфорации диаметром 6 мм располагались по углам квадрата со стороной 18 мм. Схематический разрез излучателя показан на рис. 4.12. Диаграмма направленности, измеренная на 1/3-октавных полосах шума со среднегеометрическими частотами 16 и 31 кГц, представлена на рис. 4.13, из которого видно, что излучатель обеспечивает на этих частотах практически ненаправленное излучение. Однако громкоговоритель дает значительный переходный процесс и поэтому используется только для измерений в стационарном режиме. Для работы в импульсном режиме перфорированный корпус заменяется сплошным коническим рассеивателем. На основании экспериментов был выбран конус с диаметром основания 54 мм и высотой 18 мм, вершина конуса располагалась на расстоянии 30 мм от центра отверстия в маске. Схематический разрез излучателя со сплошным металлическим рассеивателем, выполненным из алюминиевого сплава, показан на рис. 4.14. На рис. 4.15 представлены диаграммы направленности этого варианта излучателя для 1/3-октавных полос шума со средними частотами 20, 31 и 40 кГц. Как видно из рисунка, ненаправленное излучение удалось получить только в переднем полупространстве. Это, естественно, ограничивает применение излучателя. Однако при расположении источника на сцене зала, имеющего сценическую коробку, излучение в заднее полупространство не оказывает значительного влияния на формирование звукового поля в зоне слушательских мест. На рис. 4.16 показаны осциллограммы ЧМ импульсов, полученные на выходе усилителя мощности и на выходе микрофонного усилителя после излучения импульсов VLO-12 с маской и сплошным коническим рассеивателем. Длительность импульсов составляла 0,5 мс, а несущие частоты были соответственно равны 10, 16 и 31 кГц. На осциллограммах видно некоторое изменение формы излученных импульсов. Однако существенного увеличения их длительности за счет переходного процесса не наблюдается. Это свидетельствует о пригодности созданного излучателя для импульсных измерений в моделях помещений.

В качестве приемника звука при измерениях в моделях чаще всего используется конденсаторный микрофон фирмы "Брюль и

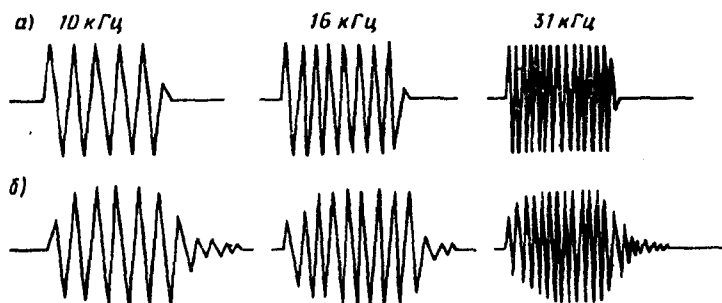


Рис. 4.16. Осциллограммы импульсов длительностью 0,5 мс с разными несущими частотами

а — на выходе усилителя мощности; б — на выходе микрофонного усилителя после излучения импульсов громкоговорителем ВЛД -12 с маской и сплошным коническим рассеивателем

Кьер" (Дания) типа 4136 диаметром капсюля 1/4. Этот микрофон имеет достаточно равномерную частотную характеристику в широком диапазоне частот (неравномерность по звуковому давлению + 2 дБ в диапазоне 0,1–70 кГц) и малые переходные процессы, позволяющие проводить импульсные измерения. На высоких частотах микрофон все же обладает значительной направленностью. Так на частоте 40 кГц отклонение диаграммы направленности от сферической составляет 6 дБ. Применяя корпусную насадку УА 0053, можно уменьшить отклонение примерно до 4 дБ. Уменьшение диаметра капсюля микрофона позволило бы приблизить его диаграмму направленности на высоких частотах к сферической. Однако с уменьшением диаметра диафрагмы падает чувствительность микрофона. Так, у самого миниатюрного из серийно выпускаемых микрофонов фирмы "Брюль и Кьер" типа 4138 (диаметр диафрагмы 1/8) чувствительность составляет только ~ 1 мВ/Паскаль, что не позволяет обеспечить необходимое для измерений на моделях отношение сигнала к шуму. Способом, позволяющим значительно уменьшить влияние диаграммы направленности, является вертикальное размещение микрофона в исследуемой модели. Однако для этого в полу модели необходимо иметь соответствующие отверстия и наружный доступ к этим отверстиям.

Своеобразные источник и приемник звука для измерений на моделях предложены Винклером [49]. Источником звука служит обычный искровой разряд. Однако электроды размещаются в углублении, сделанном в голове макета фигуры человека. Макет выполнен из оргстекла в масштабе моделирования $n = 1/20$. В результате получен импульс со спектром мощности, в котором плотность частотных составляющих (с учетом транспозиции) соответствует их значимости для разборчивости немецкой мужской речи. Направленность источника близка к направленности голоса человека. Приемник звука был выполнен в виде двух электростатических

микрофонов типа Зелля, встроенных в металлический макет головы человека. Направленность каждого микрофона имитировала направленность уха.

4.4. СУБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА АКУСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИХ МОДЕЛЕЙ

Использование уменьшенных моделей для субъективной оценки акустического качества помещений было предложено Шпандеком еще в 1934 г. Сущность предложения заключается в следующем. Звуковой сигнал (речь или музыка) записывается на магнитную ленту. Записанный сигнал проигрывается со скоростью увеличенной в n_z^{-1} раз (n_z — масштаб моделирования), и излучается в модели помещения. В модели помещения излученный звуковой сигнал записывается также с увеличенной в n_z^{-1} раз скоростью. Проигрывая эту запись с нормальной (т.е. уменьшенной в n_z^{-1} раз) скоростью, можно воспроизвести звуковой процесс в помещении-оригинале. Однако в то время, когда Шпандек предложил метод субъективного моделирования, для его реализации еще не было технических возможностей. Только в 50-е годы Шпандеку удалось осуществить свой замысел [43]. Созданный им и его сотрудниками измерительный тракт обеспечивал хорошую запись и воспроизведение частот вплоть до 100 кГц с динамическим диапазоном 45 дБ.

Модель исследуемого помещения изготавливалась в масштабе $n_z = 1/10$. При этом основным условием было подобие времени реверберации помещения-оригинала $T_{ор}$ и модели T_m ($T_m = n_z \times T_{ор}$). Для обеспечения такого подобия проводился тщательный подбор материалов для внутренних поверхностей модели. Коэффициенты звукопоглощения материалов для моделей измерялись в модели реверберационной камеры.

Уменьшение влияния звукопоглощения воздуха в модели достигалось путем осушения воздуха до относительной влажности 3%. Осушение осуществлялось с помощью рециркуляционной установки, в которой воздух прогонялся через наполненный силикагелем цилиндр. Установка обеспечивала стократный обмен воздуха модели в час. При насыщении силикагеля водяным паром в работу включался второй цилиндр, а первый ставился на осушку, которая осуществлялась с помощью электронагревателя. С задачей осушения воздуха в значительной степени связан выбор масштаба модели $n_z = 1/10$. По расчетам Шпандека максимально достижимое осушение до 3% при более мелком масштабе модели уже не обеспечивает достаточного снижения поглощения в воздухе вблизи верхней границы частот, которая для помещения-оригинала составляет 10 кГц. Модель помещения вместе с рециркуляционной установкой была заключена в оболочку из синтетического материала. Все манипуляции с источником и приемником звука внутри модели осуществлялись без нарушения герметичности оболочки с помощью специальных устройств, управление которыми находилось снаружи оболочки. Места пересечения этих устройств с оболочкой

уплотнялись с помощью сальников. Следует заметить, что требование герметичности модели не снимается и при других способах уменьшения поглощения (увлажнение воздуха или его замена другим газом).

Процедура субъективной оценки акустического качества помещения с помощью его модели состояла в следующем. В сильно заглушенном помещении, в котором практически отсутствовала реверберация, делалась магнитная запись речевого или музыкального отрывка при скорости магнитной ленты 0,19 м/с. Эта "сухая" запись воспроизводилась со скоростью 1,9 м/с и излучалась в модель с помощью специального громкоговорителя, выполненного в виде додекаэдра, в грани которого вмонтированы 12 электростатических излучателей типа Зелля. Для воспроизведения низких частот (модельного диапазона) в основании додекаэдра располагались два небольших электродинамических громкоговорителя. Такой излучатель, обычно располагавшийся на сцене модели, обеспечивал практически ненаправленное излучение в диапазоне от 1 до 100 кГц (в реальном помещении это соответствует диапазону от 0,1 до 10 кГц). Далее в различных точках модели при скорости 1,9 м/с делались стереофонические записи сигнала с помощью модели искусственной головы. Эта модель представляла собой держатель в виде уменьшенной в 10 раз головы человека, в которую соответственно положению ушей были встроены два электростатических микрофона типа Зелля. Сделанные в модели записи прослушивались при скорости 0,19 м/с через головные телефоны. Субъективный эффект от такого прослушивания оказался подобным эффекту субъективного восприятия речи или музыки в помещении-оригинале. Прослушивание записей можно также организовать в заглушенной камере при помощи двух громкоговорителей, что дает более правильное слуховое впечатление. В этом случае, однако, требуется введение коррекции для исключения воздействия правого громкоговорителя на левое ухо и левого на правое. Для осуществления такой коррекции необходимо вводить в излучающий тракт специальные сложные переходные функции.

Разработанный Шпандеком и его сотрудниками метод субъективного моделирования нашел применение в лабораториях японской радиовещательной компании NHK [52]. Модели выполнялись в масштабе $n_L = 1/10$, комбинация электростатических и электродинамических излучателей позволяла охватить диапазон частот от 0,5 до 100 кГц. Воздух в модели осушался до относительной влажности 2%. Метод использовался при акустическом проектировании ряда театральных и многоцелевых залов Японии. В связи с этим были разработаны звукопоглощающие материалы для моделей, в том числе для моделирования кресел со слушателями и без них. С успехом был применен метод Шпандека и при акустической реконструкции одной из студий BBC в Англии [19]. Модель была выполнена в масштабе $n_L = 1/8$. Малонаправленное излучение в диапазоне 0,4–100 кГц обеспечивалось с помощью комбинации излучателей, причем для самых высоких частот были

взяты 45 электростатических излучателей, расположенных на части полусферической поверхности. В качестве приемника использовался 1/4" конденсаторный микрофон (стереофоническая запись не производилась). Уменьшение поглощения звука в воздухе модели достигалось также путем осушения. "Сухая" запись музыки воспроизводилась и записывалась в студии и ее модели (воспроизведение и запись в модели велись с указанным выше изменением скоростей). Прослушивание записей, сделанных в студии и модели, показало их достаточное субъективное сходство. В результате исследований были предложены мероприятия по улучшению акустического качества студии.

Для осуществления моделирования по методу Шпандека необходимы весьма трудоемкие в изготовлении крупномасштабные модели ($n_z = 1/8 - 1/10$) с оборудованием для осушения воздуха. Герметизация модели не позволяет оперативно проводить в ней необходимые изменения (менять расположение отражающих поверхностей и звукопоглощающих материалов, вносить рассеивающие элементы и т.п.). Очень высокие требования предъявляются ко всему измерительному тракту, особенно к преобразователям. Все это затрудняет проведение исследований и делает их дорогостоящими. Тем не менее сторонники метода считают, что сложности и затраты оправдываются возможностью прослушивать речь и музыку в проектируемом зале и вносить в проект необходимые изменения. При необходимости прослушать такие акустические дефекты, как эхо или порхающее эхо, в качестве источника можно использовать искровой разрядник. Запись импульсного отклика модели помещения ведется с повышенной скоростью, а прослушивание — с замедлением скорости в n_z^{-1} раз. В этих случаях масштаб модели может быть меньше $n_z = 1/10$.

Субъективную оценку акустического качества проектируемого помещения можно также проводить, комбинируя масштабное и электроакустическое моделирование. Такой метод развивается в настоящее время в НИИСФ. В модели помещения, выполненной в масштабе $n_z = 1/20$, проводятся импульсные измерения с использованием искровых и ЧМ импульсов (см. п. 4.5). В результате этих измерений в различных точках модели определяются следующие параметры импульсного отклика: уровни, запаздывание, спектральный состав и направление прихода наиболее интенсивных отражений, а также время реверберации помещения. Затем с помощью многоканальной электроакустической установки для каждой точки импульсных измерений формируется звуковая картина, соответствующая значениям указанных параметров. Эта картина представляется слушателям для оценки. Данная установка помимо прямого звука позволяет имитировать до пяти дискретных отражений и вводить реверберацию. При этом для каждого отражения можно установить соответствующие уровень, время запаздывания и направление прихода, а также провести требуемую частотную коррекцию. Блок-схема установки приведена на рис. 4.17. Сигнал (сухая запись речи или музыки) поступает на коммутационный щит на-

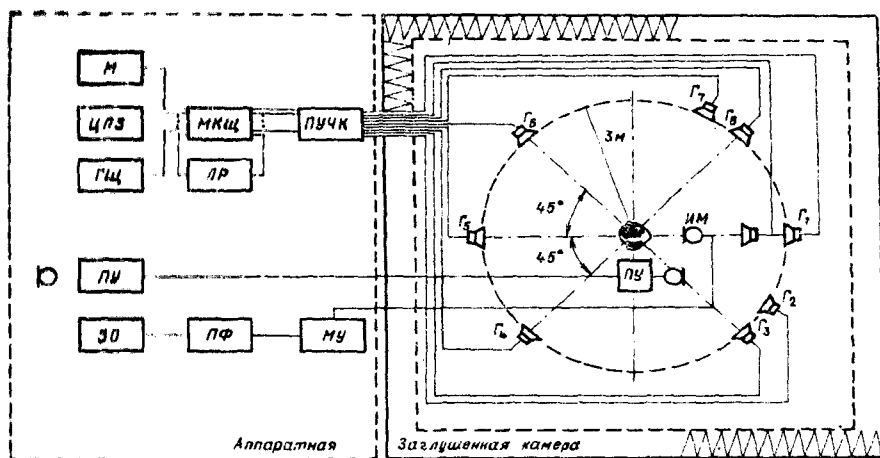


Рис. 4.17. Блок-схема электро-акустической установки моделирования звуковых полей в заглушенной камере

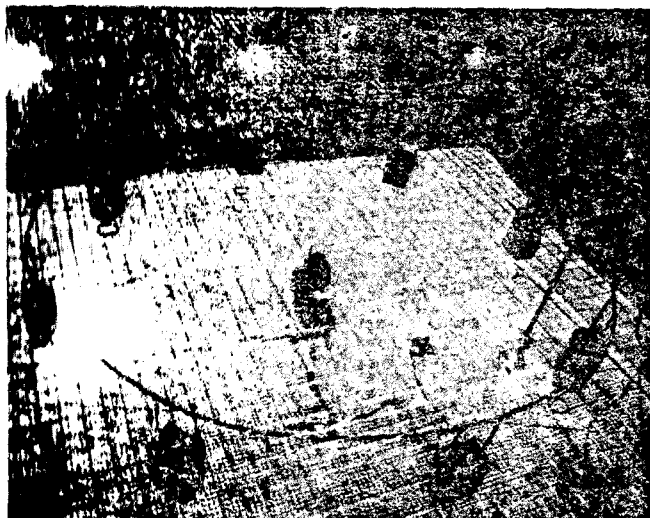


Рис. 4.18. Расположение громкоговорителей и слушательского места в заглушенной камере

посредственно или через линию задержки, имеющую на выходе шесть каналов, в каждом из которых время задержки может быть установлено в пределах от 1,6 до 300 мс. Далее сигналы идут на пульт усиления и частотной корреляции, причем сигнал, имитирующий реверберацию, предварительно проходит через листовой ревербератор, который обеспечивает изменение времени реверберации на частоте 500 Гц от 1 до 4 с. На пульте осуществляется усиление, частотная корреляция и слуховой контроль сигнала в отдельных каналах. С пульта сигналы подаются на громкоговорители, расположенные в заглушенной камере вокруг испытуемого. В любой

канал установки можно подавать или подмешивать шумовой сигнал с генератора шума. Предусмотрена также возможность переговоров испытуемого с оператором, находящимся в аппаратной. Контроль сигнала в точке прослушивания осуществляется с помощью специального контрольно-измерительного тракта.

Общий вид камеры с громкоговорителями показан на рис. 4.18, а схема расположения громкоговорителей в заглушенной камере см. рис. 4.17. Громкоговоритель 1 имитирует прямой звук, громкоговорители 2 и 8 имитируют отражения от боковых стен, громкоговоритель 5 — отражение от задней стены, а громкоговоритель 9 — отражение от потолка. Громкоговорители 3, 4, 6 и 7 воссоздают реверберирующий звук. Если прямой звук подавать непосредственно на коммутационный щит, минуя линию задержки, то можно освободить один ее выходной канал для имитации еще одного (пятого) дискретного отражения.

4.5. АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В УМЕНЬШЕННЫХ МОДЕЛЯХ

Субъективная оценка акустического качества помещений по методу Шпандека является все же сложным и дорогостоящим мероприятием. Объективная оценка осуществляется гораздо проще и оперативнее, так как в основном может проводиться в меньших моделях без осушения (увлажнения) воздуха или его замены другим газом. Кроме того, при объективной оценке требования к измерительному тракту менее жесткие, поэтому в практике акустического проектирования уменьшенные модели используются главным образом для объективных акустических измерений. Как и в натурных условиях, основу модельных акустических измерений составляют импульсные измерения, в результате которых получают большинство объективных критериев акустического качества помещений.

Наиболее часто в ходе модельных импульсных измерений проводится визуальный анализ импульсных осциллограмм $p(t)$, для получения которых используются как широкополосные (искровые), так и узкополосные (например, частотно-модулированные) импульсы. Блок-схемы измерений практически не отличаются от используемых в натуре (см. рис. 1.1 и 1.4). При модельных измерениях применяются соответствующие источники и приемники звука (см. п. 4.3). Осциллограммы $p(t)$, снимаемые обычно в логарифмическом масштабе, особенно удобны в случае модельных измерений. Закрывая те или иные поверхности модели звукопоглотителем, можно выяснить, какие именно поверхности дают сильно запаздывающие отражения, вызывают концентрацию отраженного звука или другие дефекты структуры отражений. Изменив очертание какой-либо поверхности модели или внося в модель новую отражающую поверхность, можно оперативно проверить достигаемый эффект. Как и в натурных импульсных измерениях, вводя в приемный тракт (см. блок-схему рис. 1.1 и 1.4) дополнительные элементы (квадратер, инерционный элемент,

интегратор), можно получить осциллограмму $p^2(t)$, сглаженную осциллограмму и, наконец, осциллограмму текущего квадрата звукового давления $E(t) = \int p^2(\tau) d\tau$, а отсюда и целый ряд объективных акустических критериев. Для измерения стандартного времени реверберации в моделях также применимы блок-схемы (см. рис. 1.1 и 1.4) с соответствующими преобразователями и логарифмирующими ячейками. В случае использования при измерении времени реверберации искровых импульсов в приемный тракт вводится фильтр. Практически все объективные импульсные параметры, измеряемые в натуре (см. гл. 3), могут быть измерены в модели $n_z = 1/20$. При измерениях в стационарном режиме (распределение уровней звукового давления, диффузность направлений, частотная характеристика передачи) к модели помещения предъявляются те же требования, что и при субъективной оценке по методу Шпандека.

Применение импульсных сигналов в моделях имеет то преимущество, что она позволяет исключить влияние поглощения звука в воздухе. При стационарных или натуральных сигналах возможно только ослабить влияние поглощения. Реальное затухание звука в воздухе значительно превышает затухание, требуемое для соблюдения условия подобия $m_m = n_z^{-1} m_{ор}$. Величина этого превышения зависит от частоты и расстояния, пройденного звуком. На рис. 4.19 для разных частот дана зависимость превышения N от времени пробега звуковой волны [48]. График построен для температуры 20°C , причем штриховкой показана область изменения N при относительной влажности от 40 до 80%.

При импульсных измерениях с использованием узкополосных импульсных сигналов (например, с помощью ЧМ импульсов) влияние поглощения звука в воздухе исключается очень просто. На снятой осциллограмме проводится, как показано на рис. 4.20, наклонная прямая, проходящая через точки A и B . Точка A определяется уровнем прямого звука. Для нахождения точки B на горизонтальной оси берется произвольная точка B_1 , соответствующая времени запаздывания t_1 . Из этой точки опускается перпендикуляр к горизонтали, на котором откладывается величина превышения N_1 . Эта величина находится по графику (рис. 4.19) для данной частоты и времени запаздывания t_1 . Уровни отражений берутся не относительно уровня прямого звука, а относительно уровня, определяемого этой наклонной прямой. При измерении времени реверберации в модели поправка, учитывающая влияние поглощения звука в воздухе, может быть введена в соответствии с рис. 4.21. На этом рисунке T_m — время реверберации, измеренное в модели на данной частоте, а N — величина превышения, определяемая по рис. 4.19 для данной частоты и измеренного времени реверберации T_m . Истинное значение времени реверберации T_M будет

$$T_M = 60 T_m / (60 - N). \quad (4.5)$$

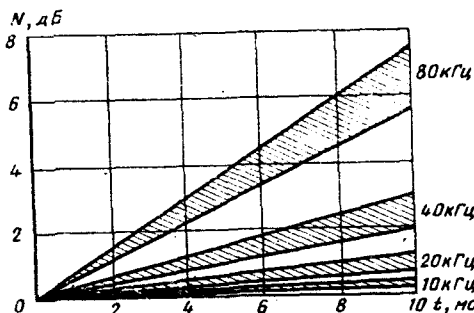


Рис. 4.19. Поправка на затухание звука в воздухе модели на высоких частотах в зависимости от времени пробега звуковой волны и частоты

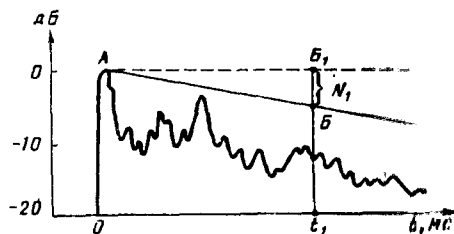
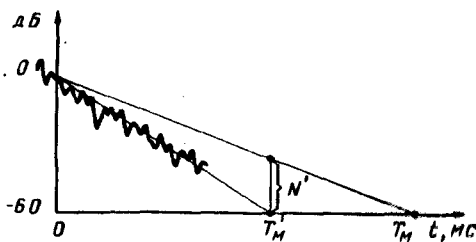


Рис. 4.20. Введение поправки на затухание звука в воздухе модели при импульсных измерениях

Рис. 4.21. Введение поправки на затухание звука в воздухе модели при измерении времени реверберации. Graph showing correction N' (dB) vs time t (ms) for a reverberation time measurement. The curve shows a linear decay over time.



При использовании широкополосных (искровых) импульсов для проведения импульсных измерений в моделях простая коррекция уже невозможна. Отдельные спектральные составляющие будут в этом случае ослабляться по-разному. Если анализируется только начальная часть импульсного отклика (первые 5 мс или 100 мс в натуре при $n = 1/20$), то как показано на рис. 4.19, ошибка в определении уровня отражений будет сравнительно небольшой, особенно если максимум спектра импульса располагается не выше 20 кГц. При анализе поздней части импульсного отклика, а также при измерении критериев, основанных на соотношении ранней и поздней частей импульсного отклика, ошибка будет уже значительной. В этих случаях следует вводить предложенную Винклером [48] компенсацию, которая представляет собой специальный усилитель, обеспечивающий на каждой частоте рост усиления пропорционально времени пробега звуковой волны в соответствии с графиком рис. 4.19. Схема компенсации требуется и при измерении критериев с использованием узкополосных импульсов, например, ЧМ импульсов. При измерениях времени реверберации с использованием широкополосных (искровых) импульсов и полосовых фильтров влияние поглощения звука в воздухе учитывается расчетным путем.

ГЛАВА 5. АКУСТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ НАЗНАЧЕНИЯ

Залыные помещения в зависимости от вида звуковых программ, для которых они предназначены, можно разделить на три основные группы: помещения для речевых программ, помещения для музыкальных программ и помещения с совмещением речевых и музыкальных программ. Как было показано в гл. 2, акустические требования, предъявляемые к речевым помещениям, определены достаточно четко. Имеются надежные методы прогнозирования и оценки их акустического качества, поэтому и акустическое решение помещений для речевых выступлений не вызывает значительных трудностей. Гораздо сложнее является проектное решение помещений, предназначенных для музыкальных исполнений, так как существующие методы оценки и прогнозирования их акустики еще далеки от совершенства. Большие трудности возникают при проектировании помещений, где будут исполняться речевые и музыкальные программы. Акустические требования, предъявляемые к помещению с этими видами программ, не только различны, но и в значительной мере противоположны. При рассмотрении вопросов акустического решения перечисленных групп помещений не включены способы предотвращения мешающих акустических факторов. Мешающие факторы должны быть устранены в любом помещении, независимо от его назначения (см. п. 2.5).

5.1. ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РЕЧЕВЫХ ПРОГРАММ

В. В. Ветеркин

Основным показателем акустического качества данной группы помещений, как уже отмечалось, является разборчивость речи. В гл. 2 были рассмотрены методы оценки разборчивости, а в п. 3.4 дана методика ее расчета. Требование высокой разборчивости речи для практики акустического проектирования означает необходимость добиться в помещении небольшого времени реверберации и обеспечить слушательские места интенсивным прямым звуком и интенсивными малоотражающими отражениями. Выполнение этих условий, как правило, гарантирует хорошее восприятие речевых программ. Применение масштабного моделирования целесообразно лишь в тех случаях, когда внутренние поверхности помещений сильно расчленены или включают большие вогнутые элементы.

Рекомендуемое время реверберации на средних частотах (500–1000 Гц) в зависимости от объема помещения, предназначенного для речевых выступлений, показано на рис. 5.1. Представленные на рисунке зависимости получены на основе анализа различных литературных данных и включены в настоящее время в рекомендации СЭВ по акустическому проектированию залов. На частотах ниже 500 Гц целесообразно сохранение значений времени реверберации, показанных на рис. 5.1. Допустимо также некоторое увели-

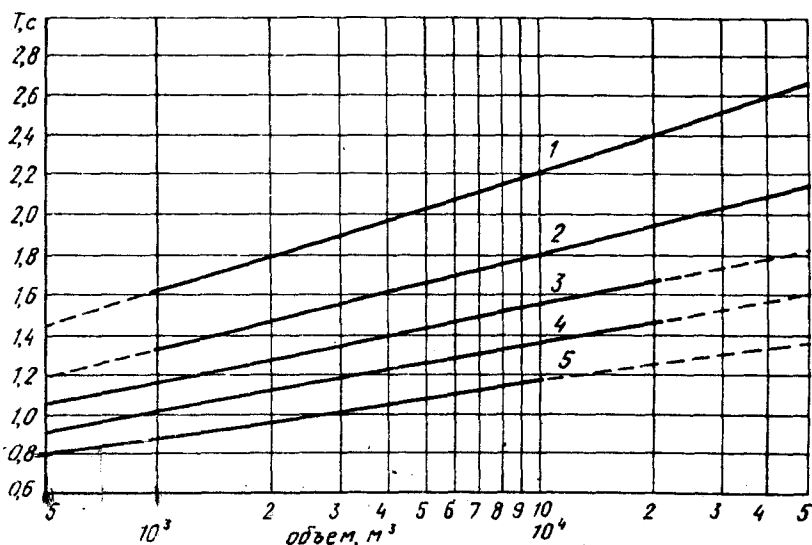


Рис. 5.1. Рекомендуемое время реверберации на средних частотах (500–1000 Гц) для залов различного назначения в зависимости от их объема

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

чение этих значений с таким расчетом, чтобы время реверберации на частоте 125 Гц возрастало не более чем на 30% по сравнению со временем реверберации на частоте 500 Гц. Следует отметить, что время реверберации, соответствующее рис. 5.1, обеспечивается без применения значительного количества специальных звукопоглотителей, если объем, приходящийся на одно место, не превышает 5 м³ (рекомендуется 4–5 м³). При этом, как и в помещениях иного назначения, целесообразно использование мягких (полумягких) кресел с тем, чтобы время реверберации меньше зависело от степени заполнения помещения слушателями.

Решая задачу обеспечения слушательских мест интенсивным прямым звуком, приходится учитывать влияние нескольких факторов. Прежде всего интенсивность прямого звука уменьшается по мере удаления точки приема от источника звука. Кроме того, прямой звук при распространении над сидящими слушателями претерпевает дополнительное ослабление за счет скользящего звукопоглощения, а на высоких частотах — вследствие экранирующего действия голов слушателей. Большую роль играет также характеристика направленности голоса оратора (артиста).

Влияние скользящего поглощения и экранировки слушателями друг друга значительно уменьшается при достаточно большой высоте сцены над уровнем пола первого ряда и профиле пола зала

(в партере и на балконах), обеспечивающем хорошую видимость происходящего на сцене. Высоту сцены целесообразно выбирать не менее 1 м, так как в этом случае высота источника звука над уровнем голов слушателей первого ряда получается не менее 1,5 м. При такой высоте источника влияние скользящего поглощения будет небольшим.

Несколько сложнее решаются вопросы удаления слушателей от источника звука и влияния направленности человеческого голоса. С точки зрения максимального приближения слушателей к источнику звука наиболее целесообразной является веерообразная форма плана помещения. Однако при такой форме зала на боковых местах интенсивность прямого звука резко падает вследствие направленности человеческого голоса (аналогичные явления наблюдаются также в широких помещениях). Кроме того, при веерообразной форме зала слушатели лишаются боковых отражений, а задняя стена помещения может вызвать эхо. Более рациональный путь сокращения расстояния между слушателями и исполнителями — это устройство балконов, которые особенно целесообразны при вместимости зала более 600 человек.

Помимо сокращения длины зала, устройство балконов повышает диффузность звукового поля на низких частотах, на которых обычные элементы отделки не дают достаточного рассеивания. На балконах меньше сказывается влияние скользящего звукопоглощения и обеспечивается, как правило, небольшое запаздывание первых звуковых отражений. Проектируя балконы, необходимо следить за тем, чтобы отношение выноса балкона a_1 к средней высоте подбалконной паузы h_1 не превышало 1,5 (рис. 5.2). Это требование относится и к устройству лож. Для паузы над балконом (если нет вышележащего балкона) отношение a_2 / h_2 может быть увеличено до 2. При соблюдении этих требований можно рассчитывать на благоприятные акустические условия на местах, расположенных на балконе и под ним.

Очень важным условием является обеспечение слушательских мест интенсивными мало запаздывающими отражениями (интенсивными обычно считаются геометрические отражения от внутренних поверхностей помещения). Такие отражения становятся необходимыми на слушательских местах, расположенных на расстояниях от источника звука, превышающих 8 м. При этом желательно, чтобы запаздывание первого отражения, приходящего вслед за прямым звуком, на этих местах не превышало 20 мс. Временные интервалы между последующими интенсивными отражениями также не должны быть больше 20 мс. Если считать, как это принято, границей полезности отражений 50 мс, то указанные требования означают, что на любое слушательское место, удаленное от источника звука более чем на 8 м, должно приходить не менее двух интенсивных отражений. При проектировании помещения следует стремиться к тому, чтобы число интенсивных отражений, приходящих в интервале первых 50 мс, было, по возможности, большим, особенно на удаленных от источника звука местах.

Лекционные залы. Вместимость лекционного зала, как пока-

зывает опыт, не должна превышать 400 мест, а его длина — 20 м. При максимальном объеме на одно место, составляющем 5 м³, указанному пределу вместимости соответствует общий объем помещения, равный 2000 м³. В практике имеются примеры удачно решенных лекционных залов на 500 и более мест, эксплуатируемых в условиях естественной акустики. Однако при вместимости зала более 400 слушателей, как правило, становится необходимым усиление речи лектора.

При проектировании небольших лекционных залов (до 200 мест) условия, обеспечивающие хорошую разборчивость речи, выполняются довольно просто. Приемлемым решением в этих случаях является плоский горизонтальный потолок и прямоугольная форма плана. В более крупных лекционных залах устройство плоского горизонтального потолка уже нецелесообразно. Отражения от передней части такого потолка попадают в первые ряды слушательских мест, для которых достаточная разборчивость обеспечивается прямым звуком. Кроме того, ряды мест в больших лекционных залах обычно круто поднимаются к задней стене, в результате чего при горизонтальном потолке высота в передней части помещения, а следовательно, и запаздывание отраженного от потолка звука получаются слишком большими. Задняя часть горизонтального потолка вместе с вертикальной задней стеной служит причиной неблагоприятного обратного отражения к источнику (см. рис. 3.25).

Распределение звука, отраженного передней частью потолка, можно улучшить путем устройства скоса или специального звукоотражателя, подвешиваемого под потолком (рис. 5.3, а). Для улучшения распределения звука, отраженного задней частью потолка, целесообразно использовать один из вариантов примыкания потолка к задней стене (см. рис. 3.26). Эти варианты помимо ослабления обратного отражения позволяют значительно улучшить разборчивость на задних местах, так как отраженный звук попадает на эти места с небольшим запаздыванием.

В больших лекционных залах весьма существенной становится и форма плана. При плоских параллельных боковых стенах отражения от их участков, прилегающих к зоне расположения источника звука, попадают в передние ряды слушательских мест, причем часто с большим запаздыванием по отношению к прямому звуку. Как и в случае плоского горизонтального потолка, положение улучшается, если участки боковых стен в передней зоне помещения скашиваются, как это показано на рис. 5.3, б. Ориентация скошенных участков подбирается таким образом, чтобы отражения от каждого из них попадали в противоположный дальний угол зала. Оставшимся участкам боковых стен также целесообразно придать небольшой скос (10–12°). Это увеличит долю отраженного звука, поступающего на удаленные от источника места, и ослабит эффект порхающего эха. При значительной длине зала очень полезно устройство потолка, концентрация отражений от которого усиливается по мере удаления от источника звука (рис. 5.4).

Залы драматических театров. В отличие от лекционных залов

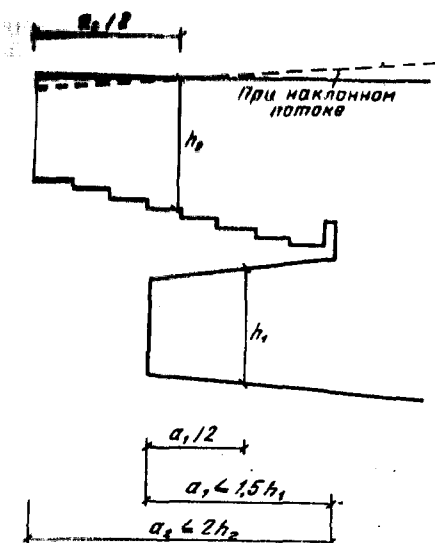


Рис. 5.2. Пазухи над и под балконом

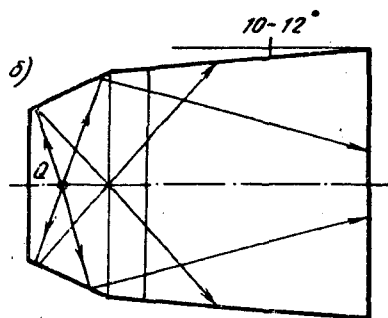
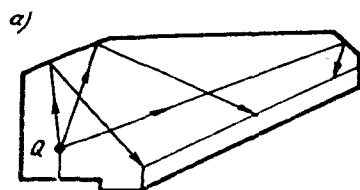
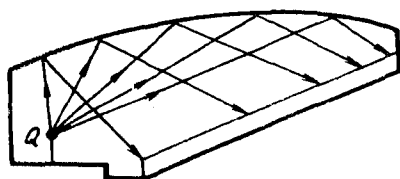


Рис. 5.3. Рекомендуемая форма лекционного зала
а — продольный разрез; б — план

Рис. 5.4. Целесообразная форма потолка при значительной длине лекционного зала

источники звука (актеры) в драматических театрах, как правило, располагаются в пространстве колосниковой сцены, оборудованной мягкими декорациями и связанной с залом сравнительно небольшим сценическим проемом. Поэтому большая доля излучаемой актерами звуковой энергии теряется в сценической коробке, и лишь меньшая доля попадает в зрительный зал. При этом из-за направленности человеческого голоса излучаемая в зал доля звуковой энергии становится еще меньше в тех случаях, когда актер отворачивается от зала. В то же время актеры обладают по сравнению с лекторами гораздо более сильными и хорошо поставленными голосами, и, что особенно важно, во время спектакля уровень шума в зале театра обычно ниже, чем в лекционном помещении, так как внимание слушателей приковано к происходящему на сцене. Последние два фактора позволяют компенсировать неблагоприятные условия излучения звука и делать залы театров значительно больших размеров, чем лекционные. Максимальная вместимость зала драматического театра составляет 1200 слушателей, а наибольшее расстояние от последнего ряда до плоскости портала — 27 м. Следует, естественно, стремиться к тому, чтобы сократить указанное предельное расстояние. Наиболее рациональным способом, как уже отмечалось, является устройство балконов. В качестве макси-

мального объема зала драматического театра, соответствующего предельной вместимости, можно рекомендовать 6000 м³.

Как и в случае большого лекционного зала, плоский горизонтальный потолок и плоские параллельные боковые стены не являются оптимальным решением. Помимо отмеченных выше недостатков такое решение при расположении источника в глубине сцены может привести к отсутствию первых отражений на значительной площади слушательских мест (рис. 5.5). Средства улучшения распределения отражений от потолка и боковых стен аналогичны изображенным на рис. 5.3. Однако в отличие от лекционного помещения в зале драматического театра скошенные участки потолка и стен следует делать выпуклыми с тем, чтобы слушательские места обеспечивались первыми отражениями при расположении источника как на авансцене, так и в глубине сцены (рис. 5.6). Примыкающие к portalу участки потолка и стен не следует подвергать сильному членению, в них также не должно быть крупных отверстий. При размещении осветительной галереи необходимо следить за тем, чтобы в поле первых отражений от козырька над порталом и от последующей части потолка не было разрывов. Более удаленные от портала участки боковых стен также целесообразно скашивать, как это показано на рис. 5.6, б.

Часто поверхности стен и потолка театральных залов, дающие первые отражения к слушателям, решаются в виде отдельных элементов (секций). В этих случаях необходимо стремиться к тому, чтобы отражения от соседних элементов перекрывали друг друга. Достаточно просто решается вопрос перекрытия отражений при выпуклой форме соседних элементов. Размеры элементов, от которых строятся отражения, должны удовлетворять условиям применимости геометрических отражений. Эти элементы также не должны иметь больших отверстий и сильных членений. На рис. 5.7 в виде примера показано распроектированное в практике проектирования расчленение потолка поперечными секциями. Вариант расчленения, изображенный на рис. 5.7, а, неудачен, так как отражения от смежных секций не перекрывают друг друга, вследствие чего образуются зоны, лишенные геометрических отражений. Варианты, показанные на рис. 5.7, б и в, не имеют этого недостатка, геометрические отражения от соседних секций перекрывают друг друга.

Существенное значение для акустики зала драматического театра, как и любого зала с колосниковой сценой, имеет оборудование сцены. Увеличение количества мягких кулис и декораций на сцене может несколько уменьшить время реверберации зала. Напротив, использование в основном твердых (фанерных) декораций несколько увеличивает время реверберации зала. Кроме того, фанерные декорации могут дать в зал полезные звуковые отражения. Для этого, однако, декорации должны размещаться не слишком далеко от основного места действия (не более 7 м) и не должны иметь больших вогнутых поверхностей.

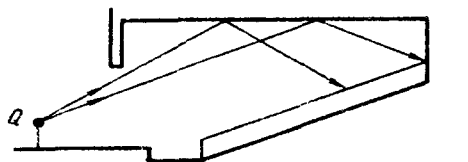


Рис. 5.5. Распределение первых отражений от плоского горизонтального потолка и параллельных боковых стен

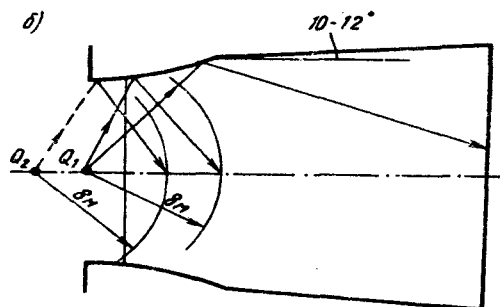
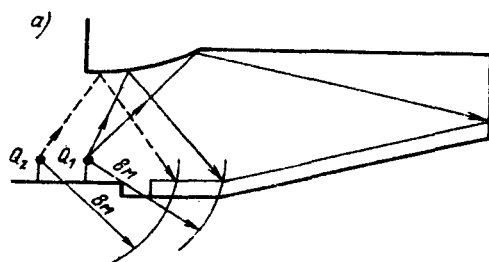
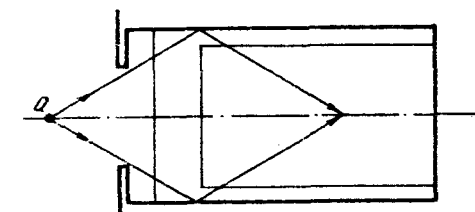


Рис. 5.6. Звукоотражающие поверхности в передней части потолка и боковых стен
а — продольный разрез; б — план

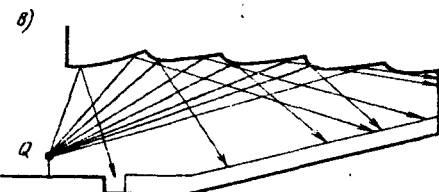
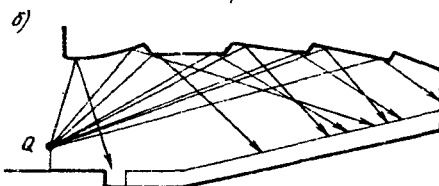
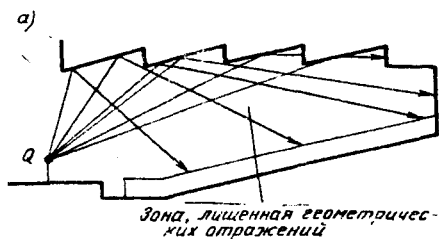


Рис. 5.7. Расчленение потолка поперечными сечениями
а — неудовлетворительные очертания сечений; б и в — удовлетворительные очертания сечений

5.2. ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ МУЗЫКАЛЬНЫХ ПРОГРАММ

В помещениях, предназначенных для музыкальных исполнений, необходимо обеспечить большое время реверберации, усиливающее пространственное впечатление при восприятии музыки. Кроме того, требования к структуре звуковых отражений здесь не столь однозначны, как в помещениях для речевых программ. Если для

разборчивости речи увеличение интенсивности прямого звука и малозапаздывающих отражений является весьма положительным фактором, то для восприятия музыки это может оказаться нежелательным, так как приведет к слишком большой ясности звучания, при которой снижается пространственное впечатление. В свою очередь рост пространственного впечатления может вызвать некоторую потерю ясности звучания. Положение осложняется еще тем, что слушателей, как отмечалось, можно разделить на две группы. Одни из них предпочитают большую ясность звучания, другие отдают предпочтение большей пространственности и громкости. Качество восприятия музыки в значительной мере также зависит от того, в каких акустических условиях находятся исполнители (певцы и музыканты). Все это делает акустическое проектирование помещения с музыкальными программами довольно сложной задачей, решение которой значительно облегчает использование техники масштабного моделирования. Весьма полезным оказывается также расчет характеристики $A(f)$, а в случае зала оперного театра — расчет разборчивости речи.

Концертные залы. Оптимальное время реверберации концертного зала помимо его объема зависит от вида музыкального исполнения (см. рис. 5.1). Самое большое время реверберации требуется для органной музыки, несколько меньше — для симфонической и сравнительно небольшое — для камерной музыки. При этом определенную роль играет и характер исполняемой музыки: для музыки барокко предпочтительнее меньшая реверберация, а для романтической музыки — большая. Частотная характеристика времени реверберации во всех случаях должна быть с некоторым подъемом в сторону низких частот. Обычно рекомендуется, чтобы время реверберации на частоте 125 Гц увеличивалось на 20% по сравнению со временем реверберации на частоте 500 Гц.

Вид музыкальной программы приходится учитывать не только при определении оптимального времени реверберации, но и при выборе основных архитектурно-строительных параметров зала. В концертном зале, предназначенном преимущественно для органной музыки, объем на одно место должен составлять 10–12 м³, в зале с обычной программой симфонического оркестра — 8–10 м³ и в зале для камерной музыки — 6–7 м³. Современный зал для симфонических концертов обычно проектируется на 1500–2000 мест, причем 2000 мест считается верхней границей вместимости. Объемы, соответствующие этим вместимостям, составляют 12 000–20 000 м³. Примерно в этих пределах находятся объемы концертных залов, имеющих очень хорошую репутацию (табл. 5.1). Следует отметить, что в мировой практике имеются примеры прекрасных в акустическом отношении залов, вместимости и объемы которых превышают указанную границу. К числу таких залов относятся, например, Бостонский симфонический зал, зал филармонии в Западном Берлине, а также зал театра Колон в Буэнос-Айресе, часто используемый для симфонических концертов. В качестве верхних пределов вместимости и объема залов

камерной музыки рекомендуется соответственно 400 мест и 3000 м³. Определенные ограничения накладываются также на длину концертного зала, которая в зале для симфонической музыки не должна превышать 45 м, а в зале камерной музыки — 20 м.

При выборе времени реверберации, объема и высоты зала весьма полезно учитывать тот факт, что в концертных залах, отличающихся хорошей акустикой, между этими параметрами существует оптимальное соотношение:

$$(V/T_{500})^{1/3} / h_{\max} = 1,25, \quad (5.1)$$

где T_{500} — время реверберации заполненного зала на частоте 500 Гц, с;
 $h_{\max}$ — наибольшая высота зала, м.

Т а б л и ц а 5.1

Название зала	Год строительства	Объем м ³	Количество мест	Объем на одно место, м ³	Время реверберации на средних частотах, с
1	2	3	4	5	6
Колонный зал Дома Союзов в Москве	1814	12 500	1600	7,8	1,72
Зал музыкального общества в Вене	1870	15 000	1680	8,9	2,05
Городское казино в Базеле	1876	105 500	1400	7,5	1,7
С.Энсерью-Холл, Глазго	1877	16 100	2133	7,6	1,9
Концертный зал в Амстердаме	1887	18 700	2206	8,5	2,0
Бостонский симфонический зал	1900	18 740	2631	7,1	1,8
Большой зал в Московской консерватории	1901	1700	1800	10,5	1,8
Концертный зал в Гетеборге	1935	11 900	1370	8,7	1,7
Зал филармонии в Ливерпуле	1939	13 500	1955	6,9	1,5
Колстон-Холл в Бристоле	1951	13 450	2180	6,2	1,7
Лидегалле, Штутгарт	1956	16 000	2000	8,0	1,62
Зал Бетховена в Бонне	1959	15 700	1407	11,2	1,7
Зал филармонии в Западном Берлине	1963	24 200	2200	11	2,2
Концертный зал "Новый Гевандхауз" в Лейпциге	1981	21 000	1900	11	2,0

Форма, основные размеры и очертания внутренних поверхностей зала должны выбираться с таким расчетом, чтобы, по возможности, на всей площади слушательских мест рассчитанные или измеренные величины акустических критериев не выходили за пределы областей оптимальных значений (см. п. 2.4). Прежде всего это касается наиболее распространенных в настоящее время критериев — индекса ясности S_{80} и критериев, характеризующих пространственное впечатление. Как явствует из анализа этих критериев, повышения ясности звучания при одновременном увеличении пространственного впечатления можно добиться, увеличив энергию боковых отражений в области запаздываний от 25 до 80 мс.

С точки зрения обеспечения слушателей боковыми отражениями очень выгодными являются старые залы, имеющие, как правило, прямоугольную форму, небольшую ширину и значительную высоту. Средние ширина и высота старых концертных залов составляет соответственно 20 и 17 м. В таких залах в интервале запаздываний 25—80 мс к слушателям поступают, главным образом, отражения от боковых стен, причем направления прихода этих отражений значительно отличаются от направления прихода прямого звука. Следует также отметить, что запаздывание первых отражений от стен в старых залах меньше запаздывания отражений от потолка. Совсем иная картина наблюдается в новых концертных залах, ширина которых обычно составляет 30—40 м, а средняя высота около 15 м. Кроме того, современные залы нередко имеют сильно расходящиеся боковые стены. При таких условиях трудно обеспечить структуру звуковых отражений, которая бы одновременно способствовала увеличению ясности и пространственности звучания. Значительная ширина залов приводит к слишком большому запаздыванию боковых отражений и к их ослаблению за счет скользящего звукопоглощения. К слушателям сначала поступают первые отражения от низкого потолка, которые маскируют более поздние и слабые отражения от боковых стен. Если же зал при этом имеет сильно расходящиеся стены, то боковые отражения поступают к слушателям по направлениям, близким к направлениям прихода прямого звука (рис. 5.8, а). В результате всего этого ослабевает пространственный эффект, очень важный для восприятия музыки.

Имеется несколько способов, позволяющих увеличить долю боковой энергии, поступающей на слушательские места современного концертного зала. При значительной ширине помещения можно получить дополнительные боковые отражения, разместив слушателей отдельными зонами на разных уровнях с таким расчетом, чтобы между этими зонами образовались вертикальные звукоотражающие стенки. Такой прием использован в ряде залов, в частности, в зале филармонии в Западном Берлине, а также в зале нового Дворца культуры в Зеленограде. В зале, имеющем трапецевидную форму плана и сравнительно небольшую ширину, увеличения боковой энергии можно добиться путем разбивки боковых стен на секции, размеры которых позволяют получить направленные

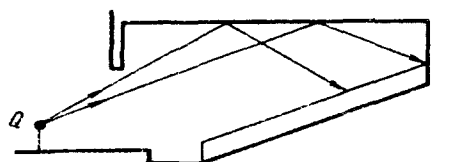


Рис. 5.5. Распределение первых отражений от плоского горизонтального потолка и параллельных боковых стен

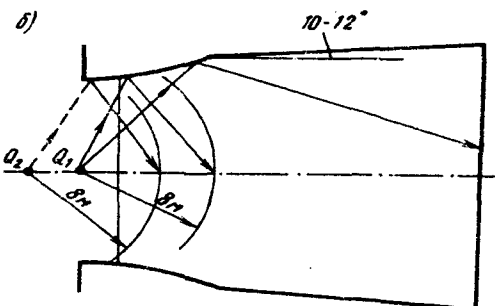
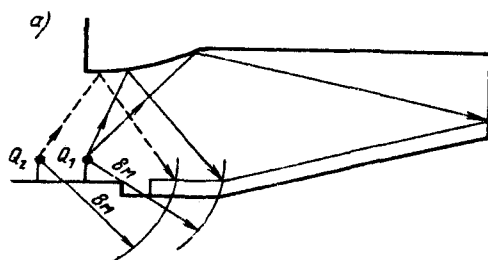
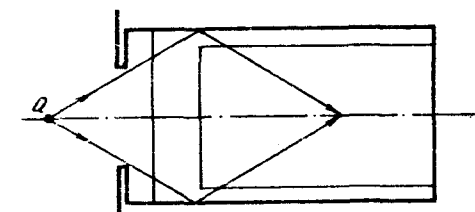


Рис. 5.6. Звукоотражающие поверхности в передней части потолка и боковых стен

а — продольный разрез; б — план

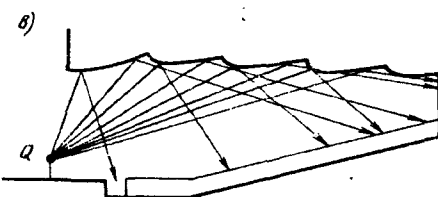
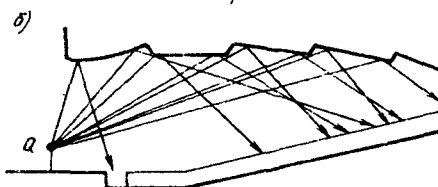
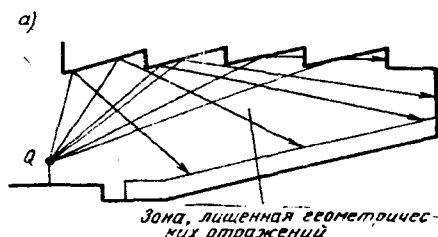


Рис. 5.7. Расчленение потолка поперечными сечениями

а — неудовлетворительные очертания сечений; б и в — удовлетворительные очертания сечений

5.2. ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ МУЗЫКАЛЬНЫХ ПРОГРАММ

В помещениях, предназначенных для музыкальных исполнений, необходимо обеспечить большое время реверберации, усиливающее пространственное впечатление при восприятии музыки. Кроме того, требования к структуре звуковых отражений здесь не столь однозначны, как в помещениях для речевых программ. Если для

однако возникает проблема отражающих поверхностей вокруг оркестра. Эта проблема в значительной степени решается путем некоторого заглубления оркестра, позволяющего создать вокруг него небольшие звукоотражающие стенки. Кроме того, можно использовать подвесные звукоотражатели или понижение потолка над оркестром. Такие способы вполне оправдали себя в ряде современных залов, в частности, в зале Западберлинской филармонии и в концертном зале "Новый Гевандхауз" в Лейпциге.

Залы оперных театров. В отличие от концертного зала в зале оперного театра помимо хорошего звучания музыки необходимо обеспечить хорошую разборчивость пения и речетативов. В связи с этим время реверберации в зале оперного театра должно быть меньше, чем в зале, предназначенном для симфонических концертов (см. рис. 5.1). В то же время рекомендуется аналогичный подъем частотной характеристики времени реверберации, как и в концертном зале. Для того чтобы достичь значений времени реверберации, соответствующих рис. 5.1, объем зала, приходящийся на одно место, должен составлять 6—7 м³. Максимальной вместимостью зала современного оперного театра обычно считается 1500 мест. Рейхардт [6] рекомендует в качестве верхнего предела вместимости 1700 мест. Отсюда максимальный объем зала составляет 10 000 — 12 000 м³. В эту область практически попадают объемы залов наиболее известных оперных театров, приведенных в табл. 5.2. Следует отметить, что залы старых оперных театров в основном имеют небольшой объем на одно место (порядка 5 м³), а отсюда и небольшое время реверберации (1—3 с на средних частотах). Для залов, отличающихся хорошей акустикой, также существует оптимальное соотношение между объемом, временем реверберации и наибольшей высотой:

$$\left(\frac{V}{T_{500}}\right)^{1/3} / h_{\max} = 1,1. \quad (5.2)$$

Наряду с соответствующим временем реверберации в зале оперного театра требуется обеспечить слушательские места интенсивными отражениями с небольшим запаздыванием по отношению к прямому звуку. Эти задачи решаются таким же путем, как и в случае зала драматического театра (см. п. 5.1). Так как оперные певцы обладают более сильными голосами, чем драматические актеры, то в зале оперного театра допускается большее удаление слушателей последнего ряда от сцены. В качестве предельного удаления последнего ряда от плоскости портала рекомендуется 35 м. Запаздывание первого интенсивного отражения и интервалы между последующими интенсивными отражениями могут быть увеличены до 35 мс. Очень важно, чтобы интенсивные малозапаздывающие отражения, повышающие четкость звучания, поступали к слушателям преимущественно с боков.

При акустическом проектировании зала оперного театра приходится решать ряд специфических задач. Прежде всего это касается правильного баланса между звучанием голоса певца со сцены и звучанием оркестра, расположенного в оркестровой яме. Наруше-

Таблица 5.2

Название театра	Год строительства	Объем зала, м ³	Количество мест	Объем на одно место, м ³	Время реверберации на средних частотах, с
1	2	3	4	5	6
Театр Ла Скала в Милане	1778	9000	2489	4,5	1,2
Большой театр в Москве	1856	12 000	2130	5,2	1,35
Оперный театр Ковент-Гарден в Лондоне	1858	12 240	2209	5,6	1,1
Оперный театр в Одессе	1887	9000	1728	5,2	1,1
Национальная опера в Париже	1875	9960	2231	4,5	1,1
Театр Вагнера в Байрейте	1876	10 300	1800	5,7	1,55
Театр Колон в Буэнос-Айресе	1908	20 870	2487	8,7	1,8
Оперный театр в Гамбурге	1955	9100	1650	5,5	1,4
Государственная опера в Вене	1959 (реконструкция)	10 660	1938	5,5	1,3

ние баланса обычно заключается в том, что оркестр, акустическая мощность которого в сотни раз превосходит мощность человеческого голоса, "подавляет" певца. Помимо обеспечения правильного баланса необходимо создать условия для хорошей взаимной слышимости музыкантов, а также музыкантов и певцов. И наконец, как музыканты, так и певцы должны слышать собственное исполнение. Успешное решение всех задач в первую очередь связано с правильным выбором параметров припортальной зоны зала, которая включает поверхности потолка и стен, примыкающие к portalу, а также оркестровую яму.

В современной практике примыкающие к portalу части потолка и стен часто делают в виде выпуклых звукоотражателей, дающих направление отражения к слушателям. В целом такое решение является оправданным. Однако при этом необходимо учитывать отмеченную специфику оперы. Звукоотражатель (козырек) над порталом, направляющий большую долю отраженного звука на удаленные от сцены места, в зале оперного театра едва ли целесообразен. При расположении певца на сцене, и особенно в ее глубине, первые отражения от такого козырька не попадают в переднюю зону слушательских мест (рис. 5.9, а). Напротив, звук оркестра, отраженный от козырька, направляется в передние ряды партера и маскирует звучание голоса певца. Более выгодным для правильного баланса является вариант козырька, изображенный на

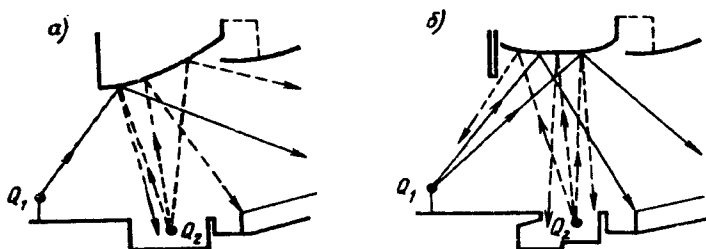


Рис. 5.9. Формы звукоотражающего козырька над порталом
а — неблагоприятная; б — благоприятная

рис. 5.9, б. В этом случае звук певца, отраженный от козырька, направляется в переднюю зону мест, а отраженный звук оркестра возвращается к музыкантам, улучшая условия взаимной слышимости и слышимости собственного исполнения. При таком варианте улучшается также взаимная слышимость музыкантов и певцов. По аналогичным соображениям боковые припортальные стенки не должны сильно раскрываться в сторону зала. Желательно, чтобы направление этих стенок в плане было близким к продольной оси зала. Такая ориентация боковых стенок позволит также увеличить долю поступающих к слушателям боковых отражений. По всей вероятности, полезным мероприятием является некоторое расчленение поверхностей козырька и боковых припортальных стенок с тем, чтобы часть отраженного звука возвращалась на сцену и улучшала для певцов слышимость собственного исполнения.

Созданию оптимального баланса между певцами и оркестром способствует также частичное перекрытие оркестровой ямы (см. рис. 5.9, б). Над примыкающей к сцене частью ямы устраивается навес, вынос которого не должен превосходить $1/3$ ширины ямы. За счет уменьшения излучения звука непосредственно в зал и в сторону козырька над порталом навес позволяет "приглушить" расположенные под ним громкие инструменты оркестра (например, медные духовые). Такой навес способствует также улучшению взаимной слышимости музыкантов. Часть ямы, примыкающая к сцене, нередко делается более глубокой, что также полезно для "приглушения" громких инструментов. Общее увеличение глубины оркестровой ямы, призванное уменьшить громкость оркестрового звучания, нельзя считать целесообразным. Такое мероприятие приведет к ухудшению излучения высоких частот, в результате чего слушатели, особенно в первых рядах, могут ощущать потерю блеска звучания. Вблизи басовых инструментов в оркестровой яме целесообразно размещать низкочастотный звукопоглотитель. Помимо улучшения частотного баланса излучаемого из ямы звука это создает более благоприятные условия для музыкантов, особенно если они располагаются под навесом. Пол оркестровой ямы следует делать дощатым с воздушным промежутком под ним не менее 0,5 м, внутренние поверхности ямы полезно облицевать деревом.

5.3. ПОМЕЩЕНИЯ С СОВМЕЩЕНИЕМ РЕЧЕВЫХ И МУЗЫКАЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Речевые и музыкальные программы являются наиболее трудно совместимыми. Как уже было отмечено, акустические условия, необходимые для этих программ, не только различны, но и достаточно противоположны. Остальные виды программ занимают промежуточное положение (пение) или требуют условий, близких к условиям, необходимым для речевых программ (кинопоказ, мероприятия со звукоусилением). Самой распространенной категорией помещений, в которых приходится решать задачу совмещения различных звуковых программ, в первую очередь речевых и музыкальных, являются залы многоцелевого назначения или, как их часто называют, универсальные залы. Проектирование и строительство таких залов получило весьма широкое распространение как в СССР, так и за рубежом. В первую очередь это обусловлено экономическими соображениями. Сооружение и эксплуатация одного зала с несколькими видами использования оказывается дешевле строительства и эксплуатации нескольких отдельных залов, охватывающих программу использования многоцелевого зала. К помещениям, в которых совмещаются различные звуковые программы (прежде всего речь и музыка), можно также отнести залы музыкально-драматических театров, кинотеатров и крытых спортивных сооружений.

Залы многоцелевого назначения. Акустическое решение многоцелевого зала зависит от его вместимости и конкретной программы использования. Чаще всего в практике проектирования и строительства принимается компромиссное решение. В зале обеспечивается сравнительно небольшое время реверберации (см. рис. 5.1), а его внутренняя поверхность формируются таким образом, чтобы часть из них направляла к слушателям интенсивные малозапаздывающие отражения, увеличивающие ясность звучания, в то время как другая часть создавала ненаправленное, рассеянное отражение звука, повышающее диффузность звукового поля. Это достигается при помощи различной степени расчленения отдельных поверхностей зала. Эффективному членению следует подвергать участки, не дающие первых малозапаздывающих отражений (см. п. 3.3). Остальные поверхности, особенно поверхности, примыкающие к сцене, не должны иметь сильных членений. Как и в музыкальных залах, ранние отражения желательно получить преимущественно от боковых стен. Наряду с увеличением ясности звучания это позволит усилить пространственное впечатление. Запаздывание первого интенсивного отражения, а также интервалы между последующими интенсивными отражениями, по возможности, не должны превышать 30 мс на всей площади слушательских мест.

Наиболее оправдано компромиссное решение для многоцелевых залов средней вместимости (до 1200 слушателей). В таких залах нет особой необходимости в большом времени реверберации, так как в программе их использования симфонические концерты довольно редкое явление. Кроме того, при выступлении симфони-

ческого оркестра в сравнительно небольшом помещении с большой реверберацией звучание производит впечатление "грозности". Размеры залов, как правило, позволяют обеспечить требуемое запаздывание интенсивных первых отражений на всей площади слушательских мест. Практика показывает, что во многоцелевых залах средней вместимости возможно создание компромиссных акустических условий, вполне приемлемых для различных видов звуковых программ. Вопросы акустического проектирования многоцелевых залов средней вместимости подробно рассмотрены в разработанных НИИСФ рекомендациях [8]. Эти рекомендации могут быть также использованы при разработке акустических решений залов музыкально-драматических театров.

В крупных многоцелевых залах вопрос совмещения различных звуковых программ значительно осложняется. Наряду с необходимостью регулирования времени реверберации здесь часто возникают трудности с обеспечением слушательских мест малозапаздывающими первыми отражениями. Тенденция к строительству широких залов, а также требования кинотехнологии приводят к тому, что ширина зала в передней части нередко составляет 30—40 м, а высота — 10 м и более. При таких размерах запаздывание первых отражений, поступающих в переднюю зону мест, значительно превосходит 30 мс. Компромиссное решение в залах подобного типа далеко не всегда является целесообразным.

В настоящее время помимо компромиссного варианта имеется еще два подхода к акустическому решению больших многоцелевых залов. Первый из них связан с использованием средств электроакустики. В зале обеспечивается время реверберации, необходимое для речевых мероприятий и кинопоказа (см. рис. 5.1). Увеличение времени реверберации в случае концертных программ осуществляется с помощью систем искусственной реверберации (амбиофонии). При таком способе достигаются оперативность и широкие пределы регулирования времени реверберации. Вопрос обеспечения слушательских мест малозапаздывающими отражениями (формирование оптимальной структуры отражений) может быть решен с помощью высококачественных громкоговорителей, устанавливаемых в местах, откуда естественные звуковые отражения приходят слишком поздно. Регулируя запаздывание и уровень звука громкоговорителей по отношению к прямому звуку, можно добиться естественности звучания и правильной локализации основного источника звука (певца, музыканта). С помощью громкоговорителей, установленных на боковых стенах зала, возможна имитация боковых отражений, важных для качественного звучания музыки. Электроакустическое решение требует сложной, дорогостоящей аппаратуры, очень квалифицированного обслуживания и исключает использование зала для музыкальных программ в условиях естественной акустики. Это решение становится неизбежным в залах вместимостью более 3000 слушателей, когда обеспечение естественной слышимости оркестра начинает вызывать трудности. Характерным примером большого многоцелевого зала, акустика которого решена с помощью звукотехнических средств, является

зал Кремлевского Дворца съездов, вмещающий 6000 зрителей.

Второй подход к акустическому решению крупных многоцелевых залов основан на использовании средств архитектурной акустики. Эти средства включают переменное звукопоглощение, а также трансформации звукоотражающих поверхностей и объема зала. Переменное звукопоглощение служит для регулирования времени реверберации зала. Объем и отделка зала выбираются таким образом, чтобы обеспечить в нем время реверберации, рекомендуемое для симфонической музыки. Уменьшение гулкости осуществляется путем внесения в реверберирующее пространство зала эффективного широкополосного звукопоглотителя. Возможные изменения частотной характеристики времени реверберации, возникающие при внесении в зал звукопоглотителя, для речи, кинопоказа и мероприятий со звукоусилением не играют большой роли. При тщательном подборе и проверке звукопоглотителя изменения эти могут быть заранее учтены, и переменное звукопоглощение в известных пределах можно использовать для регулирования времени реверберации при различных видах музыкальных исполнений.

Несмотря на ряд преимуществ, переменное звукопоглощение до сих пор не нашло широкого применения. Объясняется это отчасти необходимостью дополнительных расходов, отчасти тем, что архитектор оказывается в определенной мере связанным в своей работе над интерьером. Кроме того, пределы регулирования реверберации при применяемых способах изменения звукопоглощения оказались недостаточными. Обеспечение достаточно большой разницы в реверберации (0,6—0,7 с) зависит от количества звукопоглотителя, от характеристик используемого материала и способа его размещения на поверхности зала. Чаще всего встречается способ, когда слой пористого звукопоглотителя, располагающийся обычно на боковых стенах, прикрывается поворачивающимися звукоотражающими панелями (типа жалюзи). Поворот панели закрывает или открывает поверхность звукопоглотителя. Иногда одна сторона панели делается звукопоглощающей, а другая — звукоотражающей. При повороте панелей на 180° звукопоглощение в зале меняется. Оба приема имеют существенный недостаток. Из-за неизбежных щелей между панелями эффективность переменного поглощения, особенно в области низких частот, сильно снижается. Для уменьшения влияния щелей панели должны быть больших размеров. Более удачным решением является полное удаление звукопоглотителя из реверберирующего пространства зала. Это может быть осуществлено в виде механических систем раздвижных, подъемно-опускных или наматываемых на катушку штор. Шторы должны убираться в короба или шкафы, а щель через которую они попадают в зал должна хорошо закрываться. Для того чтобы обеспечить достаточное поглощение в области низких частот, между краями смежных штор нельзя оставлять зазор. Вес ткани для штор должен быть не менее 1 кг/м^2 , а сопротивление продуванию лежать в пределах от 1 до 3 рс. Кроме того, ткань должна

располагаться на определенном расстоянии от стены (не менее 200 мм). Из эстетических соображений ткань обычно приходится покрывать декоративной решеткой; которую необходимо сделать достаточно редкой и нерегулярной. Удовлетворяя акустическим требованиям, ткань для переменного звукопоглощения должна также обладать достаточной механической прочностью, не давать вредной в санитарно-гигиеническом отношении пыли, быть огнестойкой и не поражаться молью. Шерстяные ткани типа технического сукна менее желательны, так как требуют комбинированной пропитки — защиты от возгорания и моли. Успешнее могут быть использованы льняные ткани. Наиболее подходящими поверхностями для размещения переменного звукопоглощения являются верхние части стен зала.

Задачей трансформации отражающих поверхностей является обеспечение слушательских мест (особенно передней зоны) интенсивными мало запаздывающими отражениями, необходимыми для звуковых программ, проходящих в условиях естественной акустики. Обычно эта задача решается путем трансформации примыкающих к сцене поверхностей потолка и стен, т.е. путем уменьшения в требуемых случаях высоты и ширины зала в его передней части. Чаще всего предлагается вариант устройства подъемно-опускного участка потолка (звукоотражателя) над авансценой. Снижение звукоотражателя, призванное уменьшить запаздывание отражений, оказывается полезным и с точки зрения расположения громкоговорителей системы звукоусиления. При более низком расположении громкоговорителей, опускаемых вместе со звукоотражателем, обеспечивается лучшая локализация первичного источника звука, а микрофон лучше экранируется от прямого звука громкоговорителей.

Несмотря на акустическую эффективность, трансформации отражающих поверхностей в парадной, зрительской части зала осуществляются довольно редко. Гораздо более распространенным вариантом является устройство оркестровой раковины, которая монтируется на сцене зала из отдельных элементов, имеющих достаточные жесткость и вес. Желательно, чтобы поверхностная масса этих элементов составляла 20 кг/м^2 , в любом случае она должна быть не менее 10 кг/м^2 (чаще всего элементы раковины изготавливаются из дерева с соответствующей огнезащитной пропиткой). При выборе размеров и формы оркестровой раковины следует использовать рекомендации, касающиеся проектирования эстрады концертного зала (см. п. 5.2). Устройство раковины позволяет в определенной мере решить вопрос уменьшения запаздывания первых отражений, обеспечить слушателей дополнительными (в частности, боковыми) отражениями и улучшить акустические условия для исполнителей. Если добиться минимального количества щелей между элементами раковины, то наряду с полезными отражениями можно, как показывает опыт, увеличить время реверберации зала в области средних частот примерно на 0,2 с. Элементы раковины со стороны, обращенной к сцене, целе-

сообразно отделать звукопоглотителем с тем, чтобы в разобранном состоянии раковина увеличивала звукопоглощение на сцене. Увеличение звукопоглощения в пространстве сцены весьма полезно для кинопоказа и мероприятий со звукоусилением.

При переходе от одного вида использования зала к другому (например, от симфонического концерта к оперному спектаклю и наоборот) может быть также использована трансформация объема. Такая трансформация обычно сопровождается изменением вместимости помещения и удаления слушателей от сцены. Уменьшение объема наиболее просто осуществляется путем отгораживания дальней части зала разборной перегородкой. Иногда для уменьшения объема отделяется верхний балкон с помощью опускающейся части потолка, как это сделано в зале нового Дворца культуры в Праге.

Залы кинотеатров. Особенностью кинозала является отсутствие первичного источника звука. Зрители воспринимают заранее записанный звуковой сигнал, воспроизводимый в зале с помощью заэкранных громкоговорителей и громкоговорителей эффектов. При этом запись осуществляется с таким расчетом, чтобы характер звучания соответствовал изображаемой на экране обстановке (глубокое звучание в большом помещении, "сухое" — в открытом пространстве или в маленькой комнате). Так как этот характер не должен меняться при воспроизведении записи, то в залах кинотеатров обычно стремятся обеспечить сравнительно небольшое время реверберации. Как показывает опыт, приемлемое для кинозалов время реверберации практически соответствует рекомендуемому для речи (см. рис. 5.1). Частотная характеристика времени реверберации может быть ровной или с некоторым подъемом в сторону низких частот. Возрастание времени реверберации на частоте 125 Гц не должно превышать 20% (по сравнению со временем реверберации на частоте 500 Гц). Для кинозала при рекомендуемом объеме на одно место (4–6 м³) и наличии мягких кресел с тканевой обивкой спинки и сиденья значения времени реверберации, соответствующие зависимости рис. 5.1, могут быть обеспечены без значительной звукопоглощающей отделки интерьера. В случае жестких кресел количество специальной звукопоглощающей отделки существенно возрастает.

При размещении требуемого по расчету звукопоглотителя на поверхностях кинозала целесообразно придерживаться принципов, изложенных в п. 3.3, т.е. не следует располагать звукопоглотитель на участках потолка и стен, дающих малозапаздывающие отражения, особенно к зрителям центральных и задних мест. Отражения от этих участков позволяют компенсировать уменьшение уровня прямого звука, связанное с удалением от заэкранных громкоговорителей. При полной звукопоглощающей отделке указанных участков для обеспечения достаточной громкости в последних рядах приходится увеличивать усиление, в результате чего громкость в передних рядах оказывается чрезмерной.

Как уже отмечалось, при стационарном экране требуется звукопоглощающая отделка заэкранной стены.

Спортивные залы. Создание комфортных акустических условий в спортивных залах означает прежде всего обеспечение достаточной разборчивости речи и снижение уровня шума, возникающего при проведении различных спортивных мероприятий. Следует отметить, что снижение уровня шума помимо улучшения акустических условий для спортсменов и зрителей способствует повышению разборчивости речи. В залах, предназначенных для проведения соревнований в присутствии зрителей и для видов спорта, требующих музыкального сопровождения, необходимо также обеспечить хорошее звучание музыки. Спортивные залы, сооруженные без учета акустических требований, имеют, как правило, слишком большое время реверберации, снижающее разборчивость речи, повышающее уровень шума и ухудшающее звучание музыки. Поэтому основной задачей акустического решения спортивного зала является уменьшение времени реверберации до значений, соответствующих рекомендуемому для многоцелевых залов (см. рис. 5.1). Кроме того, в больших спортивных залах часто возникает необходимость подавления поздних звуковых отражений, вызывающих эхо или порхающее эхо. Снижение времени реверберации и ослабление поздних отражений является также необходимым условием хорошей работы системы озвучивания, особенно, если предусмотрено использование микрофонов. Система озвучивания обычно устраивается в тех случаях, когда требуется передача речевой информации или музыкальное сопровождение спортивных мероприятий. В спортивных залах, имеющих зрительные места, практически всегда необходима система озвучивания.

Размеры спортивного зала выбираются в соответствии с технологическими требованиями, зависящими от вида спорта. Увеличение размеров сверх технологической необходимости крайне нежелательно, так как ведет к росту времени реверберации и запаздывания отраженного звука. Если размеры зала, а следовательно, и его воздушный объем, соответствуют технологическим требованиям, то основным средством снижения времени реверберации является звукопоглощающая отделка внутренних поверхностей. При выборе звукопоглощающей отделки, необходимой для снижения времени реверберации, в спортивных залах часто возникают трудности, достаточно подробно рассмотренные в п. 3.2. Первая из них связана с тем, что расчет времени реверберации, на основе которого выбирается звукопоглощающая отделка в несоразмерных (плоских и длинных) залах, является лишь ориентировочным. Вторая трудность заключается в том, что при вертикальных отражающих стенах звукопоглощающая отделка потолка не приводит к ожидаемому (расчетному) снижению времени реверберации.

В спортивных залах с вертикальными отражающими стенами

звукопоглотитель следует равномерно распределять по внутренним поверхностям. Если звукопоглотитель располагается только на потолке (наиболее распространенный вариант), то для повышения его эффективности можно рекомендовать упомянутые в п. 3.2 приемы: наклон вертикальных стен к звукопоглощающему потолку или их расчленение. При наклоне всех стен к потолку величина скоса должна составлять $3-4^\circ$, а при наклоне только двух смежных стен — $6-8^\circ$. В случае расчленения вертикальных стен следует использовать систему горизонтальных членений, обеспечивающих рассеянное отражение звука в достаточно широком диапазоне частот. Наклон стен к звукопоглощающему потолку может комбинироваться с их расчленением и звукопоглощающей отделкой. Решение в каждом конкретном случае выбирается с учетом архитектурных и конструктивных особенностей зала.

При выборе типа звукопоглотителя для отделки спортивного зала, учитывая широкополосный характер шума, следует отдавать предпочтение материалам и конструкциям, имеющим коэффициент звукопоглощения $\alpha \geq 0,6$ в диапазоне 125—4000 Гц. Если свободных внутренних поверхностей зала не хватает для размещения требуемой по расчету звукопоглощающей облицовки, то следует применять звукопоглотители кулисного типа (см. табл. 2 прил. 1). Звукопоглотители кулисного типа обеспечивают большее звукопоглощение, чем плоские облицовки, занимающие такую же площадь внутренней поверхности зала. Как звукопоглощающие облицовки, так и кулисные звукопоглотители при необходимости следует защищать от механического повреждения дополнительным экраном в виде металлической сетки или декоративной решетки из любого материала, обладающего достаточной прочностью. Желательно, чтобы коэффициент перфорации декоративной решетки был не менее 0,7. В бассейнах пористый звукопоглотитель следует оберывать в пленку толщиной не более 30 μ .

В больших спортивных залах нередко возникает необходимость ослабления эха и порхающего эха. Эти неблагоприятные акустические эффекты особенно характерны для спортивных залов, которые часто имеют параллельные стены, значительную длину, а также вогнутые поверхности, расположенные напротив плоских поверхностей (потолок и пол). Средства ослабления эха и порхающего эха рассмотрены в п. 3.5. Следует отметить, что мероприятия, направленные на повышение эффективности звукопоглощающего потолка, полезны и для ослабления эффектов эха и порхающего эха.

ГЛАВА 6. ПРИМЕРЫ АКУСТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Акустические решения залов обычно разрабатывают проектные организации, имеющие в своем составе специалистов по акустике. В сложных и ответственных случаях оказывается необходимым привлечение исследовательских институтов, имеющих соответст-

вующее оборудование, а также необходимый опыт в использовании техники моделирования и в проведении натурных акустических испытаний. Являясь головной организацией в области архитектурной акустики, НИИСФ в последние десятилетия принимал активное участие в проектировании и строительстве большого количества различных зальных помещений. К их числу относятся и приводимые примеры залов, рекомендации по акустическому решению которых были разработаны коллективом лаборатории архитектурной акустики НИИСФ. Эти примеры интересны разнообразием акустических задач, а также тем, что рекомендованные акустические мероприятия в большинстве своем были осуществлены в натуре.

6.1. ЗАЛ ЦЕНТРАЛЬНОГО АКАДЕМИЧЕСКОГО ТЕАТРА СОВЕТСКОЙ АРМИИ

В конце 1979 г. завершена многолетняя работа по подготовке и осуществлению реконструкции Центрального Академического театра Советской Армии (ЦАТСА). Одной из основных задач, решавшихся при реконструкции театра, была задача улучшения акустики большого зала. Опыт эксплуатации и акустическое обследование театра до реконструкции показали, что его большой зал имел ряд акустических недостатков. Наиболее существенным из них являлась плохая разборчивость речи актеров в партере, особенно в последних рядах, ухудшение разборчивости в глубине пазух под балконом, эхо, заметное в первых рядах партера, а также необходимость форсирования актерами голоса по сравнению с залом драматического театра нормального размера.

Акустические исследования, выполненные в натуре и на модели, позволили достаточно полно выявить причины указанных акустических недостатков зала:

плохая разборчивость в партере была связана с отсутствием в этой зоне интенсивных малозапаздывающих отражений. При расположении источника звука как в передней части сцены, так и в ее глубине отражения от боковых стен зала не попадали в центральную часть партера. Отражения от потолка поступали в партер только при источнике звука, находившемся в передней части сцены, причем запаздывание этих отражений было слишком велико (50—60 мс). Неудовлетворительная разборчивость на боковых местах партера была также обусловлена большой шириной зала (38 м), при которой сказывалась направленность голоса артиста;

ухудшение разборчивости в глубине пазух под балконом также объясняется отсутствием интенсивных малозапаздывающих отражений;

причиной эха в первых рядах партера оказалась концентрация сильно запаздывающих отражений от элементов вогнутой стены зала (от барьеров балкона и верхней галереи, от кессонов и уступов на софитах балконов и верхней галереи, от прямых углов меж-

ду задней стеной и софитами балкона и галереи, а также от прямоугольных уступов на барьере балкона и галереи);

время реверберации было больше рекомендуемого для зала драматического театра данного объема. В заполненном зале, как показал расчет, выполненный на основе данных измерений в пустом зале, время реверберации в области низких частот (125 Гц) составляло 1,8—1,9 с, а в области средних частот (500—1000 Гц) — 1,5—1,6 с;

вследствие чрезмерного объема зала (18 000 м³) и указанных выше акустических недостатков актерам приходилось слишком напрягать свои голоса.

При разработке нового проекта реконструкции театра перед НИИСФ была поставлена задача — предложить такие меры, которые бы существенно улучшили акустику зала, не вызывая, однако, его коренной переделки. В соответствии с этой задачей был разработан комплекс мероприятий по улучшению акустики большого зала. Эти мероприятия были проверены на уменьшенной модели зала, изготовленной в масштабе 1:40.

Основным мероприятием комплекса являлось устройство достаточного больших звукоотражающих поверхностей над игровым порталом и по его бокам (новый звукоотражающий портал). Назначение нового звукоотражающего портала состоит прежде всего в том, чтобы, направив в партер и в пазухи под балконом интенсивные малопаздывающие отражения, значительно улучшить там структуру ранних отражений и соответственно разборчивость речи.

Наряду с устройством нового звукоотражающего портала были предложены изменения конфигурации и отделки задней стены зала для уменьшения концентрации поздних отражений в первых рядах партера, а также для улучшения разборчивости в глубине пазух на балконе и под ним. Эти изменения включали: устройство гладких подшивных потолков над и под балконом, удаление декоративных колонн и барьера между бельэтажем и амфитеатром, спрямление участков стен в глубине пазух на балконе и под ним, а также устройство полуколонн на вертикальных пилонах, являющихся бковыми стенами пазух. Кроме того, была рекомендована отделка барьеров галереи и балкона эффективным звукопоглотителем.

Для снижения времени реверберации зала было предусмотрено размещение звукопоглотителя на стенах галереи и над новым порталом. При этом учитывалось уменьшение объема зала за счет устройства нового портала и технических помещений около центральной ложи, а также уменьшение количества мест (в основном это неблагоприятные в акустическом отношении боковые места партера). Объем зала после реконструкции составил 17 000 м³, а вместимость — около 1600 слушателей.

Большая часть перечисленных мероприятий была заложена в проект реконструкции и осуществлена в натуре. Все осуществленные в ходе реконструкции мероприятия показаны на плане и продольном разрезе зала (рис. 6.1 и 6.2). На рисунках также дано

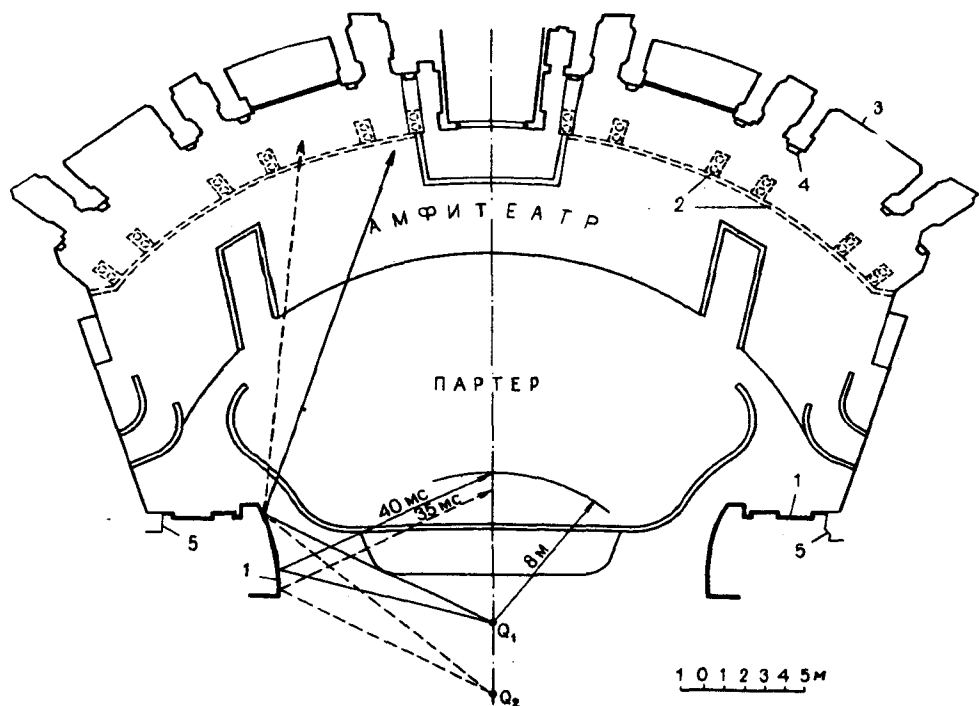


Рис. 6.1. План большого зала ЦАТСА с изменениями после реконструкции
 1 — новый портал; 2 — удаленные декоративные колонны и барьер; 3 — спрямленные участки задней стены; 4 — звукорассеивающие пилоны; 5 — старый портал

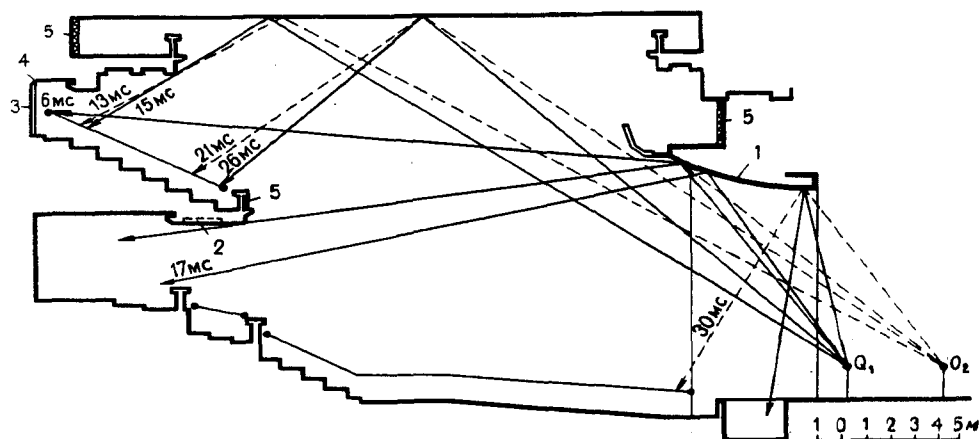


Рис. 6.2. Продольный разрез большого зала ЦАТСА с изменениями после реконструкции
 1 — новый портал; 2 — подшивка кессонов; 3 — спрямленные участки задней стены; 4 — скосы; 5 — звукопоглощающая отделка

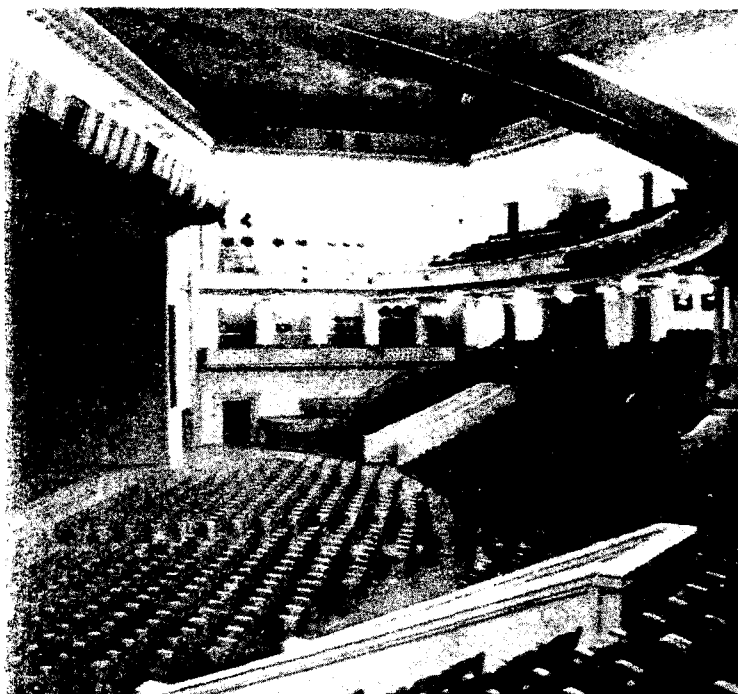


Рис. 6.3. Большой зал ЦАТСА после реконструкции. Вид со стороны амфитеатра

распределение первых отражений от поверхностей зала и указано их запаздывание. Новый звукоотражающий портал выполнен в полном соответствии с рекомендациями. Подшивные потолки над и под балконом, а также звукопоглощающая отделка барьера галереи по соображениям эстетики не были приняты к исполнению. Некоторой компенсацией отсутствия звукопоглотителя на барьере галереи может служить выполненное в натуре увеличение в нем количества сквозных отверстий. Крайне необходимая звукопоглощающая отделка барьера балкона была осуществлена в натуре с применением звукопоглощающих плит "Акмигран". Однако в дальнейшем (без согласования с НИИСФ) поверхность звукопоглощающих плит была зашпаклевана и окрашена. Такая обработка плит, как показали измерения, привела к потере их звукопоглощающих свойств. Интерьер зала после реконструкции показан на рис. 6.3 и 6.4

Перед началом строительных работ по реконструкции театра было принято решение установить в зале деревянный макет нового портала в натуральную величину и проверить как его акустическую эффективность, так и эстетическое воздействие. В сжатые сроки, обусловленные необходимостью демонтажа макета портала,

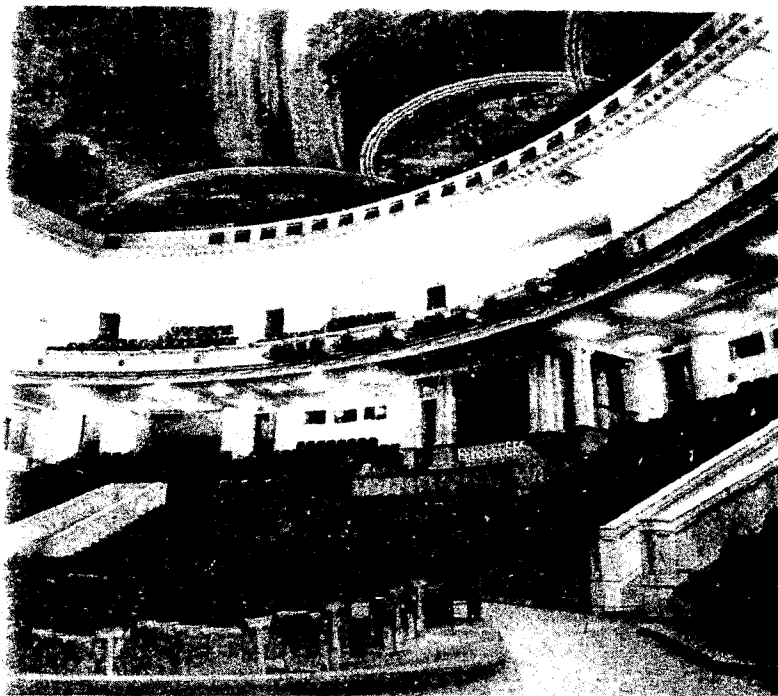


Рис. 6.4. Большой зал ЦАТСа после реконструкции. Вид на заднюю стену

НИИСФ провел акустические испытания зала с макетом портала и без него. Испытания включали импульсные измерения, проводившиеся в основном с использованием широкополосных импульсов (выстрелы из стартового пистолета), а также субъективную оценку условий слухового восприятия. В готовом зале (после реконструкции) помимо импульсных измерений и субъективной оценки были выполнены измерения реверберации. Основу субъективной оценки акустических условий на различных местах составили артикуляционные испытания. Кроме того, во время двух пробных концертов был организован анкетный опрос слушателей. Первый концерт был организован в зале с установленным макетом нового портала, а второй — в готовом зале. Каждый слушатель должен был оценить акустические условия на своем месте по трем показателям: громкость, разборчивость и общее впечатление.

Анализ снятых в зале импульсных осциллограмм (с макетом нового портала и без него) показал, что новый портал полностью устраняет основной акустический недостаток мест партера — отсутствие интенсивных малопаздывающих отражений. На осциллограммах, снятых в зале с макетом нового портала видна группа трех-четырех интенсивных малопаздывающих отражений, причем

группа эта наблюдается при обоих положениях источника на сцене. На рис. 6.5 в виде примера приведены осциллограммы, полученные в середине партера при расположении источника в точке Q_2 .

Новый портал также существенно улучшает структуру отражений в амфитеатре, бельэтаже и на балконе. При установке макета нового портала после прямого звука, как и в партере, появляется серия интенсивных малопаздывающих отражений. На местах бельэтажа (особенно в глубине пазух под балконом) и на балконе устройство нового портала существенно увеличивает плотность интенсивных отражений на участке первых 50 мс после прихода прямого звука. Осциллограммы, снятые в одной из точек амфитеатра, показаны на рис. 6.6.

Важные данные были также получены при анализе магнитных записей импульсных откликов зала с помощью специального интегрирующего прибора. Анализ показал, что при установке нового портала энергия ранних отражений (за первые 50 мс после прихода прямого звука) возрастает в партере в 1,7 раза, в амфитеатре — в 1,6 раза, в глубине подбалконных пазух — в 1,9 раза и на балконе — в 1,3 раза.

В результате артикуляционных испытаний было обнаружено существенное увеличение слоговой разборчивости при установке макета нового портала. Средние значения увеличения, подсчитанные по отдельным зонам слушательских мест (партер, амфитеатр, бельэтаж, балкон) для двух положений актеров на сцене (в точках Q_1 и Q_2), приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Положение актеров на сцене	Среднее увеличение слоговой разборчивости, %			
	партер	амфитеатр	бельэтаж	балкон
Точка Q_1	13	14	8	8
Точка Q_2	7	10	5	3

Оценивая приведенные в табл. 5.3 данные, следует заметить, что наиболее значительное увеличение разборчивости во всех зонах слушательских мест наблюдается при расположении актеров на авансцене (точка Q_1).

Касаясь результатов анкетного опроса во время первого пробного концерта, следует отметить, что по всем трем показателям анкеты (громкость, разборчивость и общее впечатление) получены положительные оценки подавляющего большинства заполнивших анкеты слушателей. Данные анкетного опроса показаны в табл. 6.2.

Изложенные выше результаты объективной и субъективной оценок зала с макетом нового портала и без него подтвердили акустическую эффективность намеченного звукоотражающего портала. Его устройство значительно улучшило структуру ранних звуковых отражений во всех зонах мест зала. Увеличение слоговой разборчивости, обусловленное улучшением структуры ранних отражений

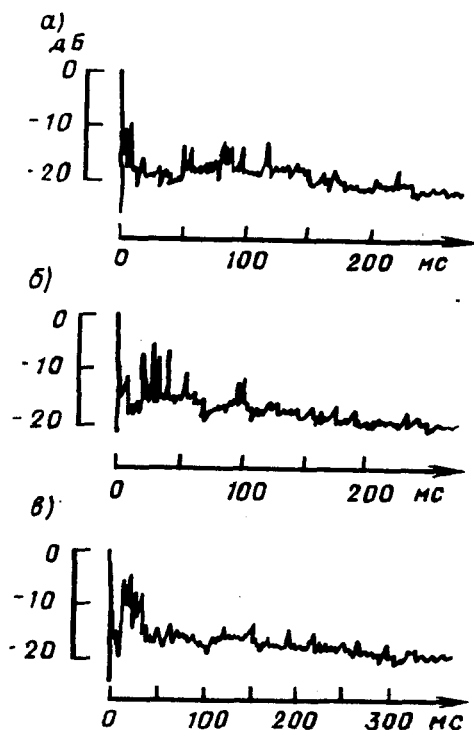


Рис. 6.5. Осциллограммы, снятые в партере большого зала ЦАТСА
а — зал до реконструкции; б — зал с макетом нового портала; в — зал после реконструкции

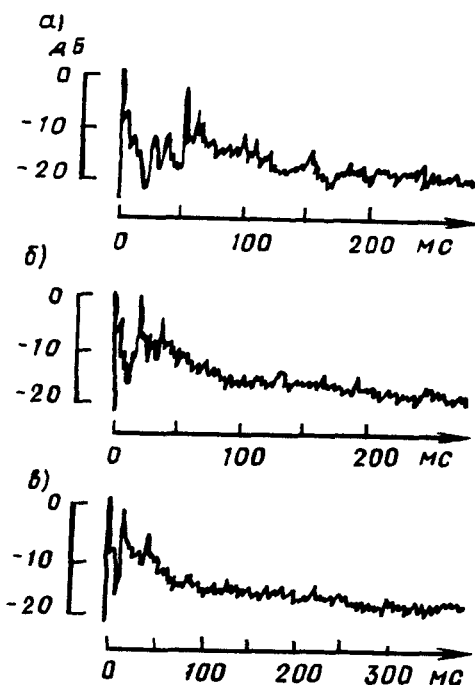


Рис. 6.6. Осциллограммы, снятые в амфитеатре большого зала ЦАТСА
а — зал до реконструкции; б — зал с макетом нового портала; в — зал после реконструкции

Таблица 6.2

Зона слушательских мест	Количество слушателей, давших положительную оценку акустических условий по трем показателям, %		
	громкость	разборчивость	общее впечатление
Партер	89	97	97
Амфитеатр	67	95	94
Бельэтаж	83	96	100
Балкон	94	100	100
Зал в целом	86	97	97

при новом портале, оказалось существенным. Все это позволило рекомендовать выполнение нового портала при реконструкции театра. Импульсные измерения, выполненные после реконструкции театра в готовом зале, подтвердили результаты, полученные в ходе проверки акустической эффективности нового портала. Осциллограммы (см. рис. 6.5, в и 6.6, в) имеют тот же характер, что и при измерениях с макетом нового портала.

Наряду с устройством нового портала был намечен ряд измене-

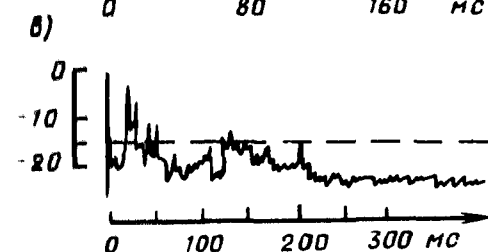
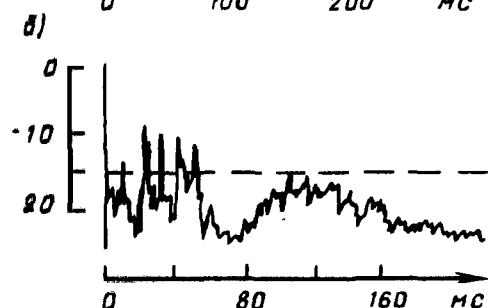
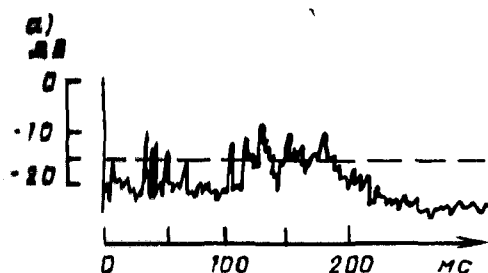


Рис. 6.7. Осциллограммы, снятые в партере большого зала ЦАТСА (в точке наибольшей концентрации отражений)
а — зал до реконструкции; б — модель зала со всеми акустическими мероприятиями; в — зал после реконструкции

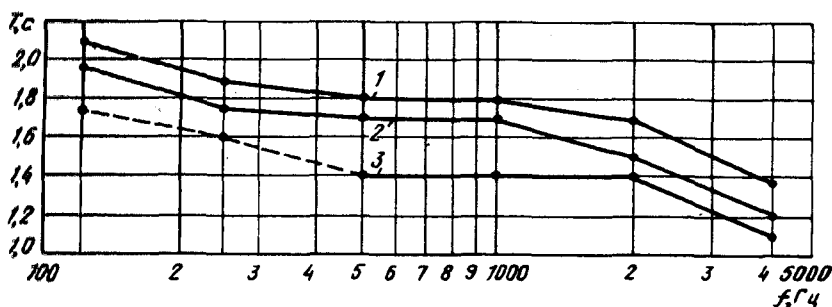


Рис. 6.8. Частотная характеристика времени реверберации большого зала ЦАТСА
1 — пустой зал до реконструкции; 2 — пустой зал после реконструкции; 3 — заполненный зал после реконструкции

ний задней стены зала, направленных на ослабление концентрации поздних звуковых отражений в передних рядах партера. Осуществление значительной части этих изменений позволило ослабить концентрацию поздних звуковых отражений. Уровень концентрации снизился примерно на 3 дБ, а ширина зоны концентрации по уровню — 20 дБ сузилась на 20–30 мс (рис. 6.7, в). Однако эффект ослабления вредной концентрации отражений оказался несколько меньше ожидаемого (рис. 6.7, б). Основной причиной меньшего

ослабления концентрации является невыполнение звукопоглощающей отделки балконного барьера, который является очень важным фактором эхообразования в первых рядах партера.

Наряду с улучшением структуры звуковых отражений в ходе реконструкции предполагалось также несколько снизить время реверберации зала за счет уменьшения его объема и внесения дополнительного звукопоглощения. Мероприятия по снижению времени реверберации зала осуществлены в натуре практически полностью. Результаты измерений времени реверберации в готовом зале представлены на рис. 6.8. Здесь же показаны значения времени реверберации, полученные при аналогичных условиях в пустом зале до реконструкции. Как видно из приводимого графика, в результате реконструкции время реверберации пустого зала снизилось в диапазоне частот измерений примерно на 0,15 с и в заполненном зале в диапазоне 500–2000 Гц оно составляет 1,4 с. Такое время реверберации приемлемо для зала объемом порядка 17 000 м³ (см. рис. 5.1).

Результаты артикуляционных испытаний, выполненных после реконструкции, свидетельствуют о хорошей разборчивости речи во всех зонах слушательских мест. Так, например, при расположении диктора на авансцене (точка Q₁) средние значения слоговой разборчивости в партере составляют 85–91%, а в амфитеатре — 83–87%. Анализ данных анкетного опроса, проводившегося во время пробного концерта в готовом зале, показал, что оценки большинства опрошенных (как и при проверке эффективности нового портала) положительные. Результаты опроса приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Зона слушательских мест	Количество слушателей, давших положительную оценку акустических условий по трем показателям, %		
	громкость	разборчивость	общее впечатление
Партер	89	97	100
Амфитеатр	83	91	100

В заключение необходимо отметить, что в настоящее время уже накоплен некоторый опыт эксплуатации театра. Этот опыт свидетельствует о том, что в результате реконструкции акустические условия в зале улучшились, особенно заметно это улучшение при расположении актеров на авансцене. К сожалению, не удалось существенно улучшить акустические условия для актеров, так как в ходе реконструкции не было возможности значительно уменьшить объем зала.

6.2. ЗАЛ МОСКОВСКОГО ДЕТСКОГО МУЗЫКАЛЬНОГО ТЕАТРА

В 1980 г. в Москве завершено строительство нового здания детского музыкального театра (МДМТ), проект которого разработан институтом Гипротئاتр. Особенностью зрительного зала театра являются три портала: основной и два боковых, примыкающие к основному под углом 45° . Объем зала 8250 м^3 , число мест 1250, объем на одно место $6,6 \text{ м}^3$, длина от красной линии основного портала до задней стены (под балконом) 26 м, средняя ширина и высота составляют примерно 30 и 11 м. Планы и продольный разрез зала представлены на рис. 6.9, 6.10 и 6.11. Фрагмент интерьера готового зала показан на рис. 6.12.

В связи со сложным объемно-планировочным решением зала НИИСФ по просьбе институт Гипротئاتр провел акустические испытания уменьшенной модели зала. Предварительный анализ чертежей показал, что в зале возможны два основных акустических недостатка. Первый из них связан с дефицитом интенсивных малозапаздывающих (в частности, боковых) отражений. При намеченном объемно-планировочном решении зала такие отражения в передней и центральной зонах партера можно было получить практически только от козырька над основным порталом. Вторым недостатком являлась опасность эха от вогнутой задней стены зала, центр кривизны которой лежит в передней части основной сцены. При таких условиях, даже несмотря на расчленение стены, в передней части зала обычно происходит концентрация звуковых отражений. К началу модельных испытаний строительство театра находилось в стадии, когда практически исключались значительные изменения интерьера зала, поэтому при испытаниях модели могли решаться только ограниченные задачи, заключавшиеся в проверке предполагаемых акустических недостатков и в разработке мероприятий по улучшению акустики зала без коренной переделки проекта.

Модель зала была изготовлена из полистирола толщиной 5 мм в масштабе 1:20. Для звукопоглощающей отделки поверхностей модели использовался поролон толщиной 10 мм. Как показали измерения, выполненные в модели реверберационной камеры, коэффициент звукопоглощения поролона в диапазоне 2,5–20 кГц составляет 0,5–0,6. Эти значения примерно соответствуют (при пересчете частот на натуру) коэффициентам звукопоглощения наиболее распространенных звукопоглощающих материалов. Поглощение звука сидящими слушателями имитировалось слоем ваты толщиной 15 мм, коэффициенты звукопоглощения которого близки к коэффициентам звукопоглощения поверхности занятых слушателями мест (см. рис. 4.7). Акустические испытания модели зала включали измерения времени реверберации и импульсные измерения. Последние проводились с использованием как искровых, так и частотно-модулированных импульсов. Общий вид модели представлен на рис. 6.13, а на рис. 6.14 показана задняя стена модели с акустическими мероприятиями.

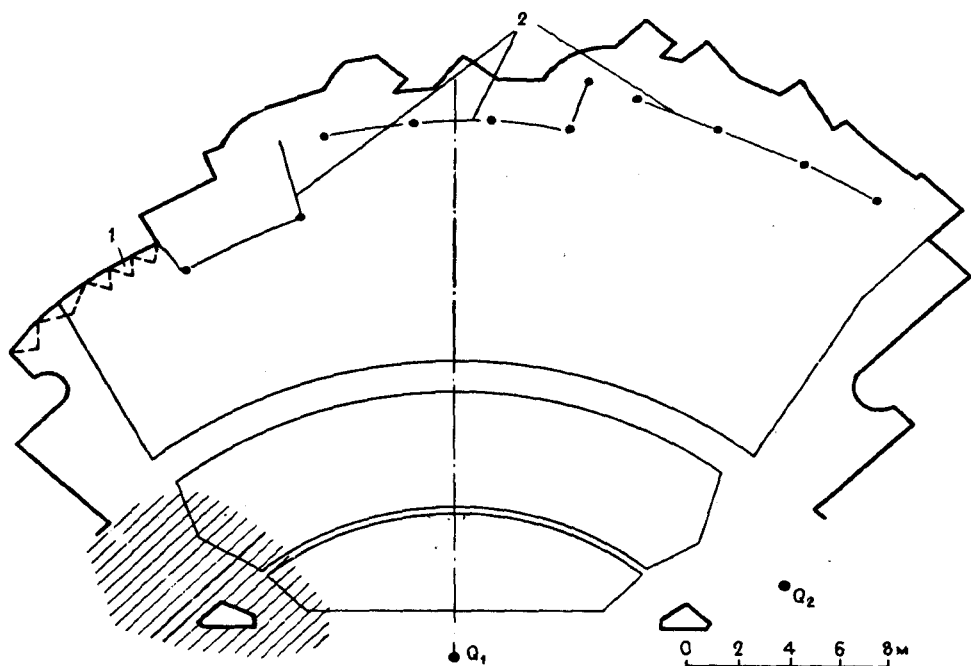


Рис. 6.9. План зала МДМТ на уровне партера

1 — расчленение вогнутого участка стены под балконом; 2 — удаление барьера или его замена решетчатым ограждением

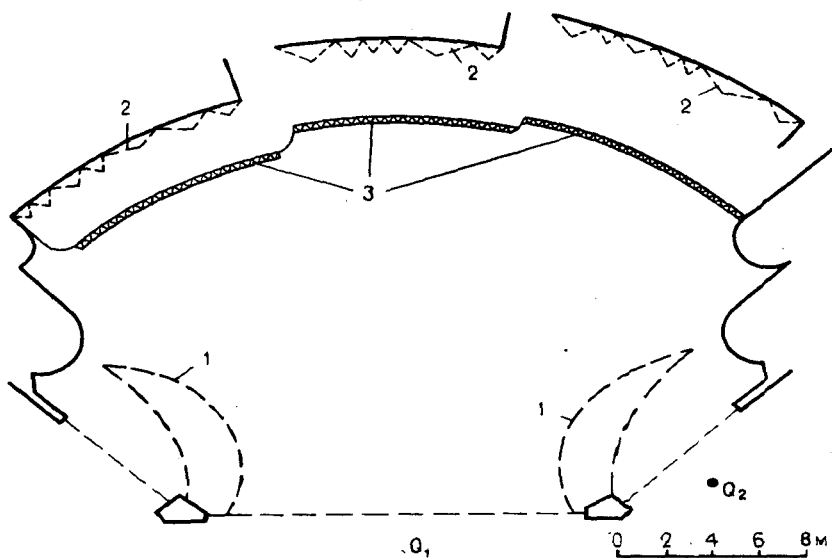


Рис. 6.10. План зала МДМТ на уровне балкона

1 — звукоотражатели над боковыми порталами; 2 — расчленение задней стены; 3 — звукопоглощающая отделка

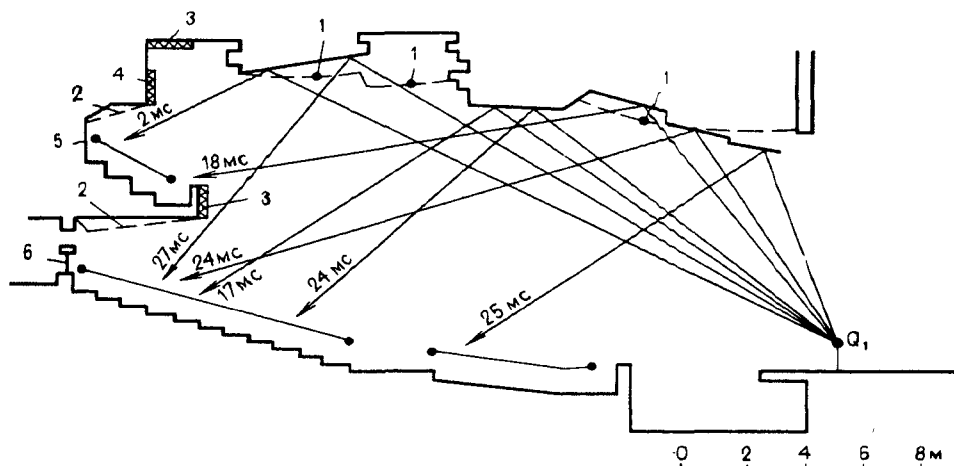


Рис. 6.11. Продольный разрез зала МДМТ

1 — изменение профиля потолка; 2 — скосы; 3 — звукопоглощающая отделка; 4 — звукопоглощающая отделка или расчленение; 5 — расчленение; 6 — решетчатое ограждение

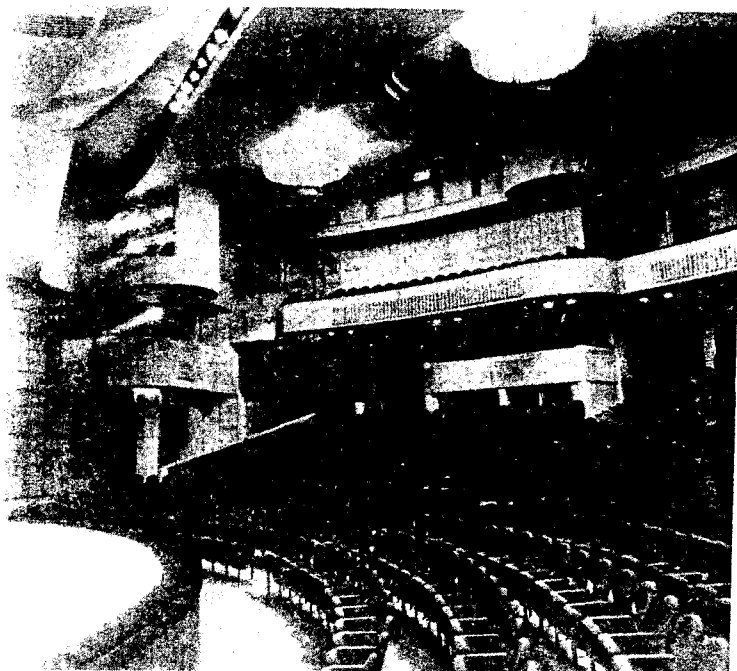


Рис. 6.12. Фрагмент интерьера зала МДМТ

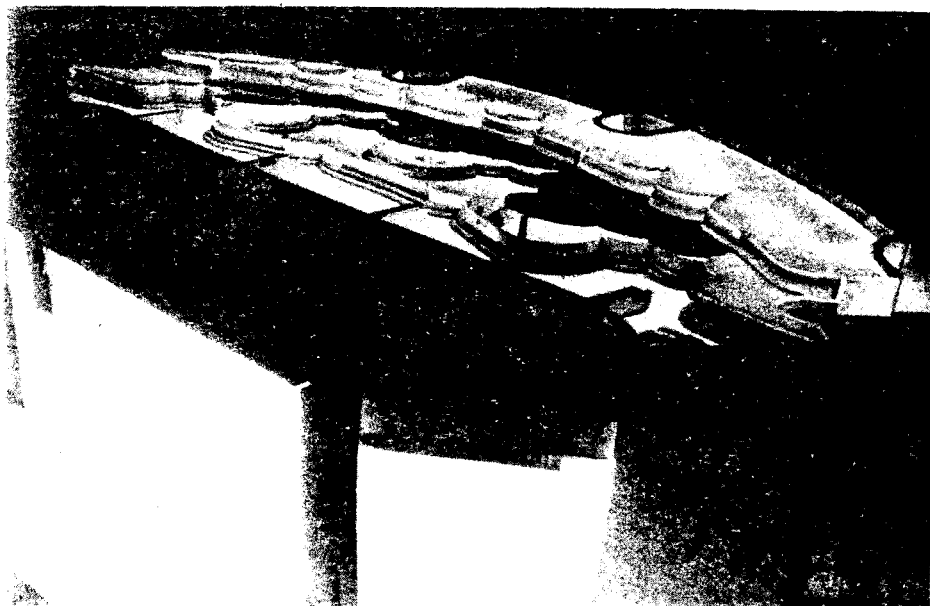


Рис. 6.13. Общий вид модели зала МДМТ



Рис. 6.14. Внутренний вид модели зала МДМТ: задняя стена с акустическими мероприятиями

Проведенные в модели измерения показали, что в диапазоне 200—1000 Гц время реверберации зала составит примерно 1,3 с. Расчет, выполненный для частот 125, 500 и 2000 Гц, дал следующие значения: 1,9; 1,4 и 1,2. При расчете приняты отражающие стены и потолок, полумягкие кресла, ковровое покрытие пола и 70%-ное заполнение зала слушателями. Для залов музыкально-драматических театров объемом порядка 8000 м³ оптимальное время реверберации на средних частотах составляет примерно 1,3 с (см. рис. 5.1). Таким образом, как измерения в модели, так и расчет дали значения, близкие к оптимальному.

Анализ полученных в модели импульсных осциллограмм подтвердил предположение о том, что структура ранних отражений в передней и центральной зонах партера может быть слегка обедненной. Интенсивные первые отражения поступают сюда практически только от козырька над основным порталом. Звукоотражающие поверхности над боковыми порталами, хотя и являются полезными, но все же не оказывают существенного влияния на структуру ранних отражений. Пример осциллограммы, снятой в центральной части партера (источник в точке Q_1), приведен на рис. 6.15, а. Как видно из осциллограммы, уровни ранних отражений меньше уровня прямого звука на 10 дБ и более. На балконе и в задней зоне партера уровень ранних отражений существенно выше.

Подтвердились также предположения, касающиеся концентрации поздних звуковых отражений от вогнутой задней стены зала. Особенно сильной оказалась концентрация при расположении источника звука на одной из боковых сцен. В этом случае в область концентрации попадают противоположная боковая сцена и прилегающие к ней места. На рис. 6.16, а показана осциллограмма, снятая на боковой сцене, в области концентрации отражений (на рис. 6.9 эта область заштрихована) при расположении источника в точке Q_2 . На осциллограмме ясно видна концентрация поздних отражений, уровень которой только на 6 дБ ниже уровня прямого звука. Такая концентрация будет восприниматься слушателями как явное эхо. При расположении источника звука в глубине основной сцены концентрация отражений с запаздыванием порядка 100 мс наблюдается в передних рядах партера и в оркестровой яме. Уровни этих отражений по отношению к уровню прямого звука значительно ниже, чем в случае концентрации на одной из боковых сцен. Однако не следует забывать, что в силу инерции человеческого слуха происходит суммирование отдельных отражений. Оценку этого явления удобно проводить с помощью осциллограмм $E_{T_0}(t)$. На рис. 6.17 показаны две осциллограммы, снятые в первых рядах партера при источнике, расположенном в глубине основной сцены. Нижняя осциллограмма является непосредственной регистрацией импульсного отклика $p(t)$, а верхняя — представляет собой тот же отклик, но возведенный в квадрат и пропущенный через инерционное звено с постоянной времени 35 мс (в те на натуру). Как видно из верхней осциллограммы, в

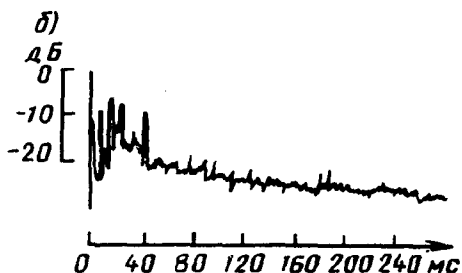
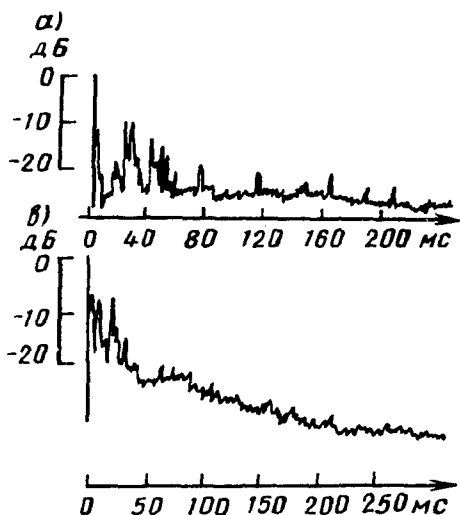


Рис. 6.15. Осциллограммы, снятые в центральной части партера зала МДМТ
а — модель зала в исходном состоянии; б — модель зала с акустическими мероприятиями; в — зал в натуре

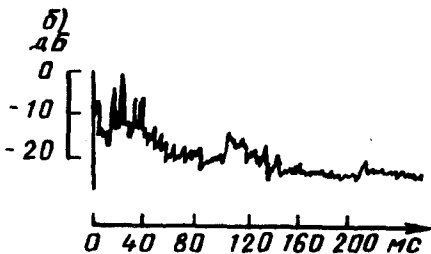
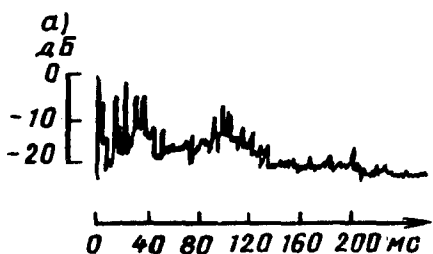


Рис. 6.16. Осциллограммы, снятые на боковой сцене зала МДМТ
а — модель зала в исходном состоянии; б — модель зала с акустическими мероприятиями

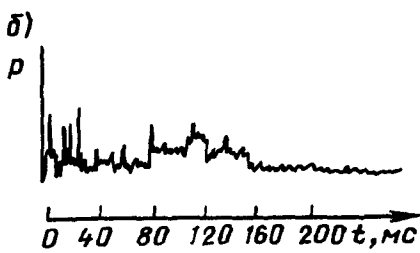
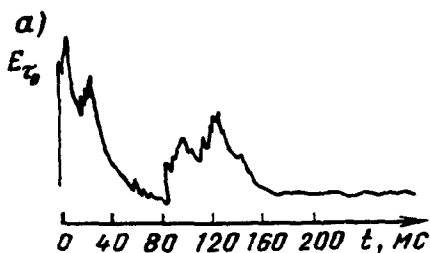


Рис. 6.17. Осциллограммы, снятые в передней части зала МДМТ
а — осциллограмма $E_{\tau_0}(t)$; б — осциллограмма $p(t)$

результате суммирования отдельных отражений их концентрация стала совершенно отчетливой. Следует отметить, что в силу принципа взаимности при размещении источника звука в оркестровой

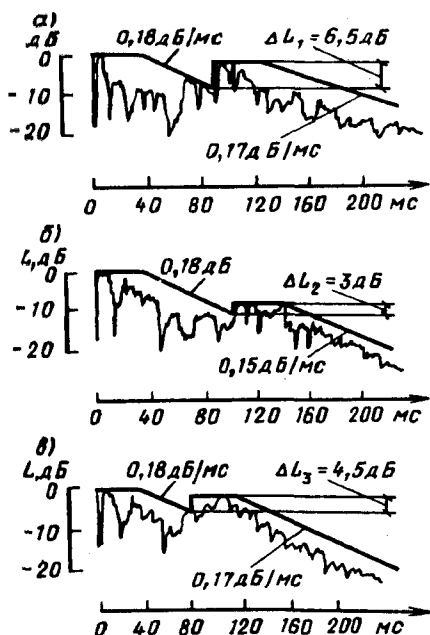


Рис. 6.18. Осциллограммы, снятые на боковой сцене зала МДМТ с использованием ЧМ импульсов (несущая частота 1000 Гц)

а — модель зала в исходном состоянии; б — модель зала с акустическими мероприятиями; в — зал в натуре

яме концентрация отражений должна наблюдаться в глубине основной сцены. Этот эффект, подтвержденный в ходе испытаний модели, может оказаться неприятным для певцов, поющих в сопровождении оркестра.

В выявленных зонах концентрации поздних отражений были также сняты осциллограммы с использованием ЧМ импульсов. Анализ этих осциллограмм позволил установить, что в наибольшей степени концентрация проявляется в области 1000 Гц. Так как длительность ЧМ импульсов (в пересчете на натуру) составляет 10 мс, то для оценки осциллограмм с точки зрения заметности эха был применен критерий Ямомото (см. п. 2.5). Абсолютный уровень прямого звука при оценке осциллограмм принимался равным 54 дБ, что примерно соответствовало данным натурных измерений в залах с использованием ЧМ импульсов. На рис. 6.18, а представлена осциллограмма, снятая в зоне наибольшей концентрации поздних отражений (боковая сцена, источник в точке Q_2). Как показано на рисунке $\Delta L = 6,5$ дБ. Для того чтобы эхо не было заметным, эта величина, по данным Ямомото, не должна превышать 2–3 дБ.

Дальнейшие эксперименты на модели зала МДМТ были направлены на поиски мероприятий, которые, не нарушая принятого объемно-планировочного решения зала, позволили бы улучшить структуру ранних отражений и существенно снизить уровень концентрации поздних отражений. С целью улучшения структуры ранних отражений было предложено изменить форму потолка

зала (см. рис. 6.11) и скорректировать форму и ориентацию звукоотражателей над боковыми порталами. Для ослабления концентрации поздних отражений были намечены некоторые изменения формы и отделки задней стены зала, показанные на его планах и разрезе (см. рис. 6.9, 6.10 и 6.11). К таким изменениям относятся расчленение вогнутого участка стены под балконом и задней стены балкона, удаление или замена решеткой барьеров лож, устройство скосов на потолках пазух на балконе и под ним, звукопоглощающая отделка барьеров балкона и части потолка, примыкающей к задней стене, а также звукопоглощающая отделка или расчленение верхней части задней стены. Для расчленения вогнутых участков задней стены использовались выпуклые элементы различной ширины или пилообразный профиль переменного шага. Кроме того, были также испытаны варианты спрямления вогнутых участков.

Перечисленные мероприятия позволили улучшить структуру ранних отражений в партере и значительно ослабить концентрацию поздних отражений от задней стены. На рис. 6.15, б приведена осциллограмма, полученная в центральной части партера реконструированной модели зала. Сравнивая эту осциллограмму с осциллограммой, снятой в той же точке исходной модели (см. рис. 6.15, а), нетрудно заметить увеличение уровня и количества ранних отражений. В результате изменений задней стены модели уровень концентрации поздних отражений, как видно из рис. 6.16, б, снизился примерно на 10 дБ. Оценка осциллограмм, снятых с использованием ЧМ импульсов по способу Ямомото (см. рис. 6.18, б), показала, что такая концентрация не должна вызывать ощутимых помех ($\Delta L = 3$ дБ). К сожалению, не все мероприятия по улучшению акустики зала МДМТ были осуществлены в натуре. В ходе строительства была несколько скорректирована форма потолка и установлен звукопоглотитель. Остальные рекомендации, касавшиеся изменений задней стены, выполнены не были.

После окончания строительства в зрительном зале театра были проведены измерения времени реверберации и импульсные измерения с использованием широкополосных (выстрелы из стартового пистолета) и частотно-модулированных импульсов. Положения источника и приемника звука были те же, что и при испытаниях модели зала. Время реверберации заполненного зала, рассчитанное на основе данных измерений в пустом зале, на частотах 125, 500 и 2000 Гц оказалось соответственно равным 1,5; 1,25 и 0,9 с. Эти значения хорошо согласуются с данными измерений в модели зала. Результаты импульсных измерений свидетельствуют о благоприятной структуре ранних отражений практически на всей площади слушательских мест. В виде примера на рис. 6.15, в приведена осциллограмма, полученная в центральной части партера (источник в точке Q_1). Уровень концентрации поздних отражений снизился меньше, чем в реконструированной модели. Это связано с тем, что мероприятия, направленные на ослабление концентрации,

были выполнены лишь частично. Эхо в зонах концентрации ощущается. Наличие слышимого эха подтверждает и проверка по методу Ямомото (см. рис. 6.18, в). Интересно отметить, что концентрация поздних отражений в натурных условиях наиболее выражена в области 1000 Гц. К такому же результату привели и модельные испытания. В целом, несмотря на сохранившийся эффект концентрации, акустические условия в зале можно считать вполне удовлетворительными, что подтверждается опытом эксплуатации театра.

6.3. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЗАЛ В ГАВАНЕ

Сооруженный в столице Республики Куба Универсальный зал относится к категории многоцелевых залов средней вместимости. Помимо различного рода собраний в нем возможны театральные представления, концерты и кинопоказ. Проект зала был разработан Всесоюзным научно-исследовательским и проектным институтом объектов культуры, отдыха, здравоохранения и спорта при участии ряда других советских организаций. Решение вопросов акустики было поручено НИИСФ.

Проектирование и строительство зала велось на основе существующей конструкции. Поэтому ряд основных архитектурно-строительных параметров зала оказался заранее заданным. Так, были заданы длина и ширина зала, глубина подбалконной пазухи и расстояние от пола до перекрытия. При разработке проекта акустического решения зала были поставлены следующие задачи: обеспечение слушательских мест интенсивными малозапаздывающими звуковыми отражениями; повышение диффузности звукового поля и обеспечение времени реверберации, приемлемого для многоцелевого зала данного объема. Учитывая эти задачи, прорабатывалась форма потолка, расчленялись внутренние поверхности и выбиралась отделка зала.

Объем зала 6000 м³, количество мест 1066, объем на одно место 5,6 м³, длина от красной линии портала до задней стены балкона 35,6 м, ширина 22,5 м и высота в центральной части 9,8 м. В плане зал имеет прямоугольную форму, боковые стены возле портала скошены, задняя стена слегка вогнута. Пол в партере и на балконе с уклоном. Потолок выполнен в виде горизонтальных секций, которые переходят в наклонные плоскости стен выступающих в зал кабин переводчиков и технических помещений. В разрывах между секциями размещены светильники прямого и отраженного света. Над порталом устроен выпуклый звукоотражающий козырек. Стены расчленены пилястрами трапецевидного сечения. Схематический план и продольный разрез зала изображены на рис. 6.19 и 6.20. На рисунках дано распределение первых звуковых отражений от стен и потолка зала. На рис. 6.21 показан фрагмент интерьера готового зала.

Основные рамеры, форма и очертание поверхностей зала благоприятны для двух основных акустических показателей: пра-

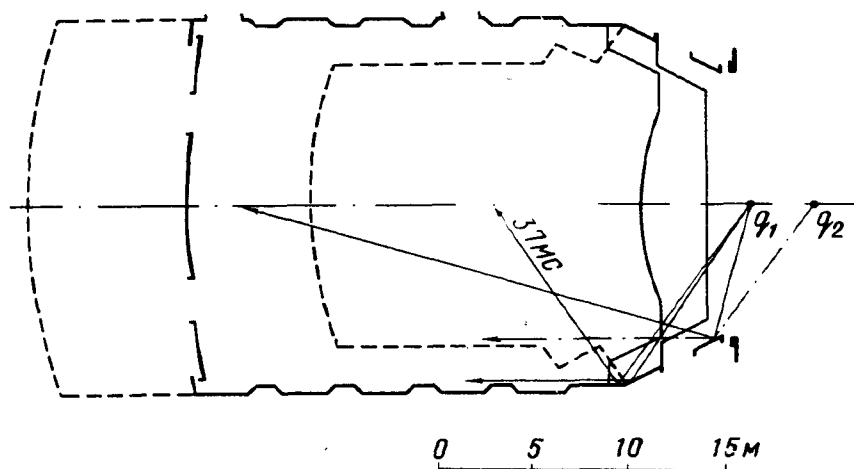


Рис. 6.19. План универсального зала в Гаване

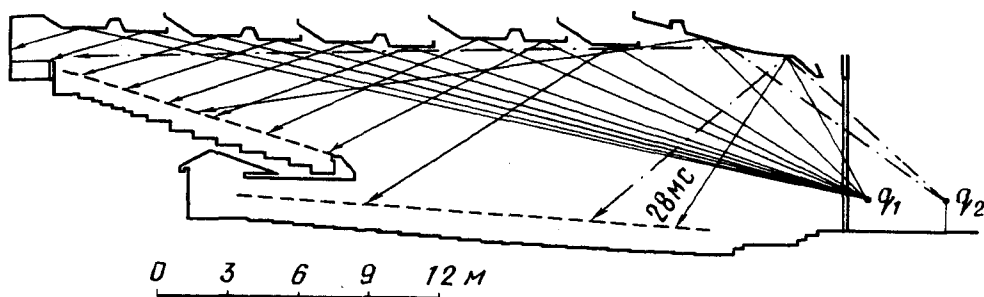
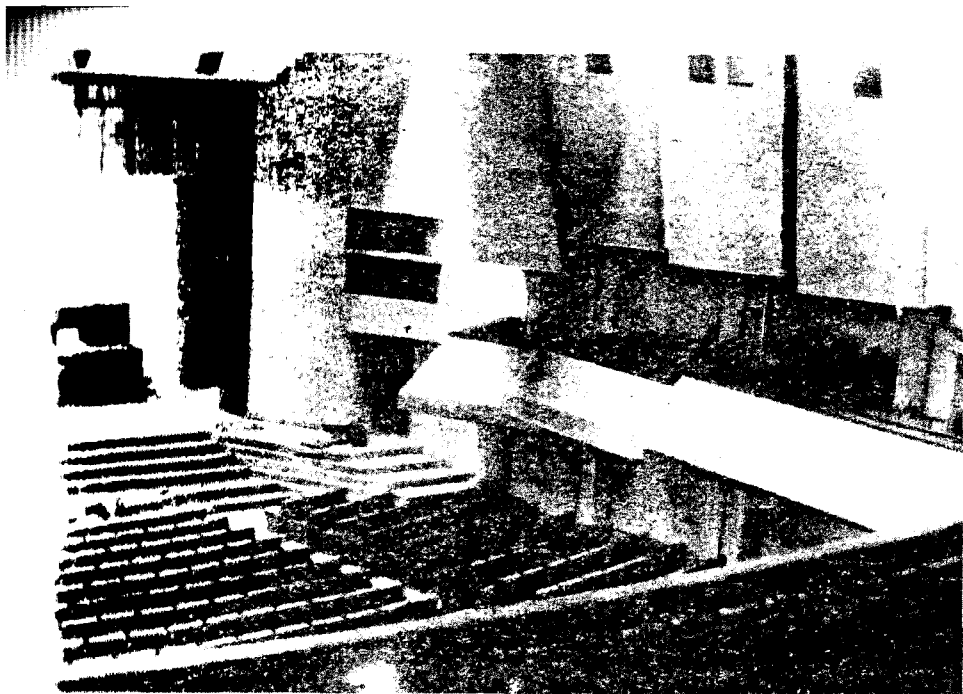


Рис. 6.20. Продольный разрез универсального зала в Гаване

вильного распределения ранних звуковых отражений и диффузности звукового поля. Выпуклый звукоотражающий козырек над порталом (см. рис. 6.20) при расположении источника звука в передней части сцены в точке Q_1 обеспечивает первыми малозапаздывающими отражениями практически весь партер и половину мест балкона. При перемещении источника в глубину сцены в точку Q_2 первыми отражениями от козырька обеспечивается большая часть партера и весь балкон. Секции потолка направляют дополнительные отражения в заднюю половину партера и на балкон. Полезные отражения дают также боковые стены зала и их припортальные скосы (см. рис. 6.19). Хорошие пропорции зала и сильное членение его поверхностей (балкон, секции потолка, выступающие кабины, пилястры стен) способствуют повышению диффузности звукового поля.

При выборе материалов отделки, учитывая влияние добавочного звукопоглощения, было рекомендовано не применять специальных звукопоглотителей, а оштукатурить все поверхности зала

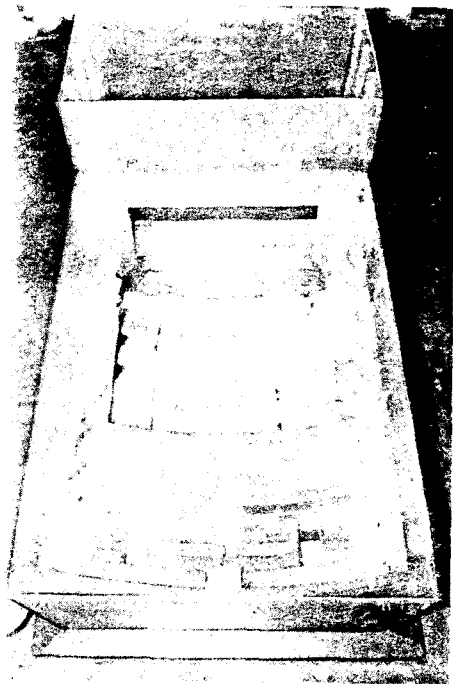


и установить в нем мягкие кресла с тканевой обивкой. Эта рекомендация соответствовала архитектурному замыслу и была принята к исполнению. Поверхность пола в партере и на балконе по желанию авторов проекта полностью покрыта ковром. Для указанной выше отделки был сделан расчет времени реверберации пустого и заполненного залов. Причем при расчете времени реверберации пустого зала учитывалось 50% площади коврового покрытия под креслами, а при расчете заполненного зала ковер под креслами не учитывался. Как показал расчет, время реверберации заполненного зала на частоте 500 Гц составляет 1,25 с, а частоте 125 Гц — 1,5 с. Такие значения соответствуют рекомендуемым для залов многоцелевого назначения данного объема. Разница во времени реверберации пустого и заполненного залов оказалась небольшой.

В ходе разработки акустического решения зала были проведены испытания его уменьшенной модели с использованием искровых импульсов. Модель, общий вид которой показан на рис. 6.22, была выполнена в масштабе 1:40. Звукопоглощение слушателей и мягкого горизонта сцены имитировалось с помощью поролона. Анализ полученных в модели зала осциллограмм показал, что все слушательские места хорошо обеспечены малозапаздывающими интенсивными отражениями, причем при положении источника звука как в передней части сцены, так и в ее глубине. Распределение более поздних отражений характеризуется доволь-

Рис. 6.21. Фрагмент интерьера
универсального зала в Гаване

Рис. 6.22. Общий вид модели
универсального зала в Гаване



но плотной структурой и ровным спадом уровня отражений, что является показателем достаточно высокой диффузности звукового поля. В целом осциллограммы свидетельствуют о хороших акустических условиях на всей площади слушательских мест зала. В виде примера на рис. 6.23 и 6.24, а показаны осциллограммы, полученные в центре партера и в передней части балкона.

Акустические испытания готового зала включали импульсные измерения и измерения времени реверберации. Во время испытаний сценический занавес отсутствовал, на сцене было смонтировано два ряда столов и кресел президиума, а за ним расположен мягкий занавес. При импульсных измерениях в качестве источника звука использовался стартовый пистолет. Положение источника звука и точек измерений было то же, что и при импульсных испытаниях модели зала. Время реверберации зала измерялось также с использованием импульсных звуковых сигналов (холостые выстрелы из автомата). Измерения времени реверберации были проведены как в пустом, так и в заполненном (на 70%) залах.

Анализ натуральных осциллограмм показал, что их характер такой же, как у осциллограмм, полученных в модели: наличие интенсивных малопаздывающих отражений, плотность и ровный спад уровня поздних отражений. В целом результаты натуральных импульсных измерений полностью подтвердили сделанный на основании

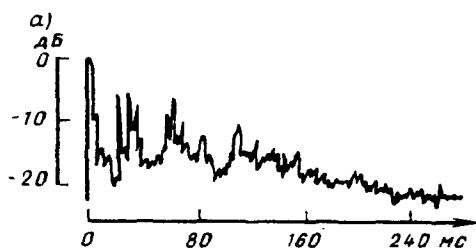


Рис. 6.23. Осциллограммы, снятые в партере универсального зала в Гаване

а — модель зала; б — зал в натуре

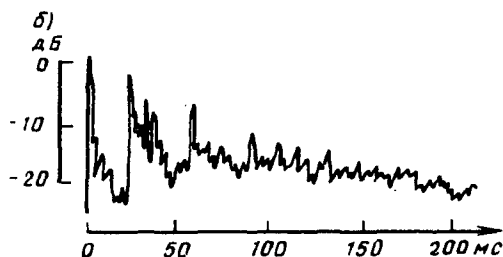


Рис. 6.25. Частотная характеристика времени реверберации универсального зала в Гаване

1 — пустой зал; 2 — заполненный зал

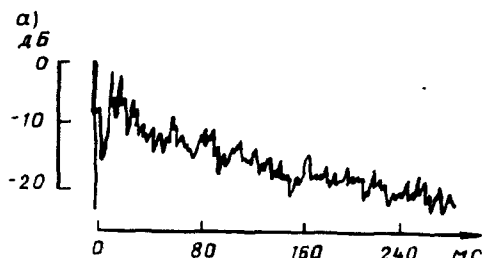
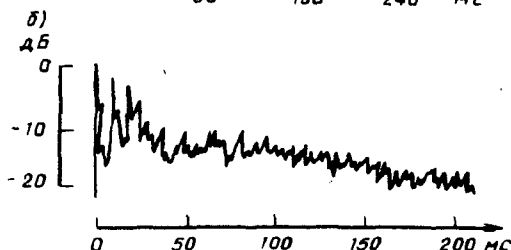


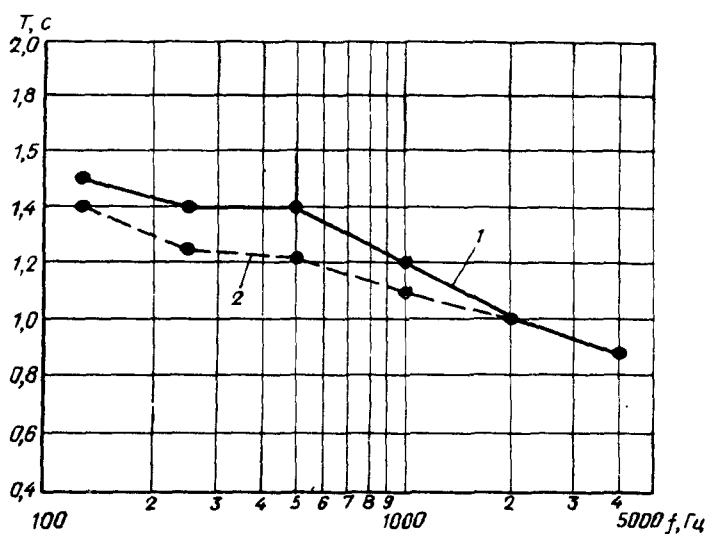
Рис. 6.24. Осциллограммы, снятые на балконе универсального зала в Гаване

а — модель зала; б — зал в натуре



испытания модели вывод о том, что на всех местах зала можно ожидать вполне благоприятных акустических условий. На рис. 6.23, б и 6.24, б в качестве иллюстрации показаны осциллограммы, снятые в партере и на балконе в тех же точках, что и в модели зала.

Результаты измерений времени реверберации пустого и заполненного залов представлены на рис. 6.25. Как видно из приводимых данных, время реверберации заполненного зала соответствует рекомендуемому для многоцелевого зала данного объема. Бесспорным акустическим преимуществом является небольшая разница во времени реверберации пустого и заполненного залов. Сравнивая результаты измерений и расчета времени реверберации



(табл. 6.4), следует отметить, что между ними имеется достаточно хорошее соответствие.

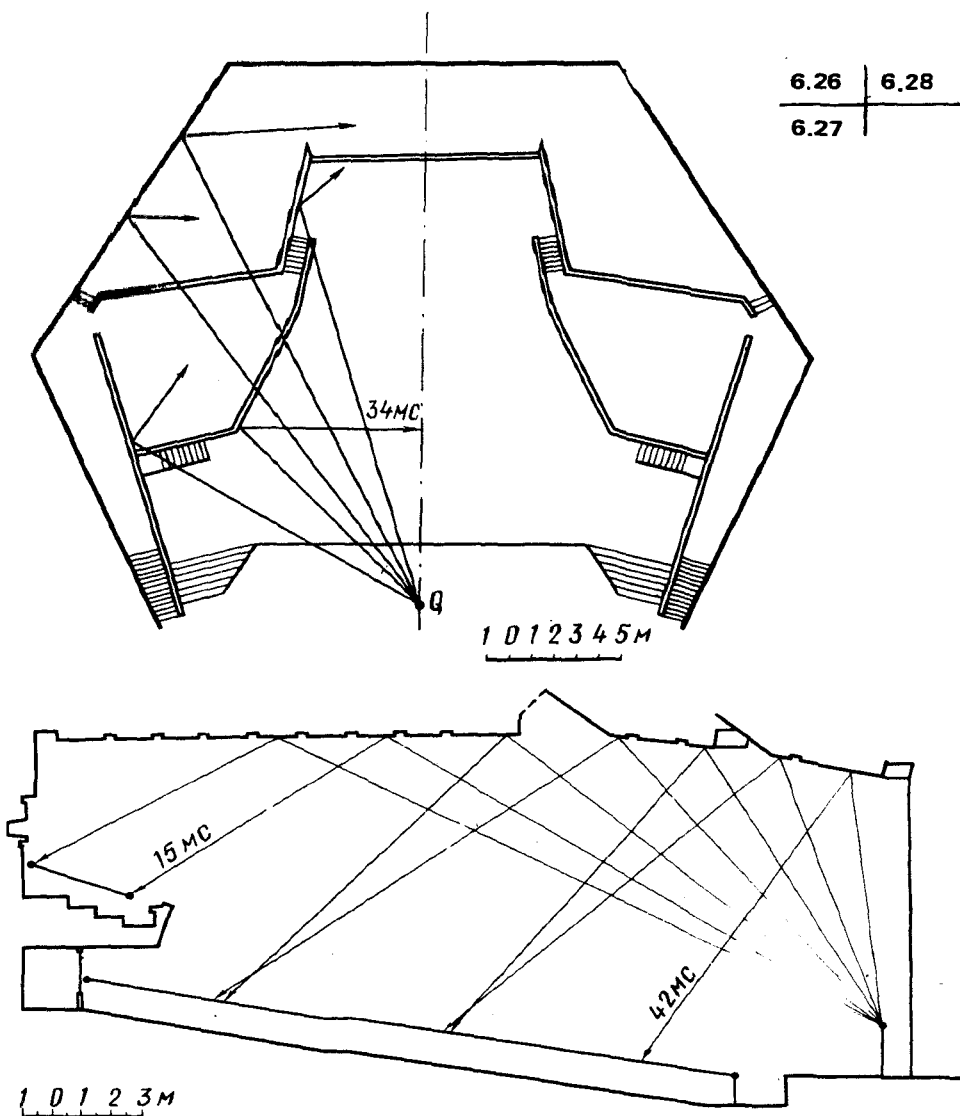
Т а б л и ц а 6.4

Состояние зала	Время реверберации, с, для частоты, Гц		
	125	500	2000
Пустой			
расчетное	1,6	1,55	1,05
измеренное	1,5	1,4	1,0
Заполненный			
расчетное	1,5	1,25	1,0
измеренное	1,4	1,2	1,0

Таким образом, натурные акустические измерения ясно показали, что задачи, поставленные в ходе акустического проектирования сооружения, решены успешно и в зале обеспечены комфортные акустические условия. Пробные мероприятия, проведенные после завершения строительства, и последующий опыт эксплуатации зала свидетельствуют о его хорошей акустике.

6.4. КИНОКОНЦЕРТНЫЙ ЗАЛ ДВОРЦА КУЛЬТУРЫ В ЗЕЛЕНОГРАДЕ

В 1983 г. в Зеленограде введен в эксплуатацию новый Дворец культуры с киноконцертным и театральным залами, акустическое решение которых было разработано в НИИСФ. С акустической точки зрения особенно интересным является киноконцертный зал на 1200 мест, являющийся, по существу, залом многоцелевого назначения средней вместимости.



Объем зала (без сцены) составляет 9800 м^3 , объем на одно место $8,2 \text{ м}^3$, длина от красной линии портала до задней стены 30 м, средняя ширина и высота соответственно 31 и 11 м. В плане зал представляет собой шестиугольник. Пол в партере и амфитеатре с уклоном. Основная часть потолка горизонтальная, над авансценой устроены два наклонных козырька. Вся поверхность потолка слегка расчленена. Звукорассеивающие элементы расположены также в верхних частях стен, которые помимо этого сильно расчленены галереями. План и продольный разрез зала с распре-

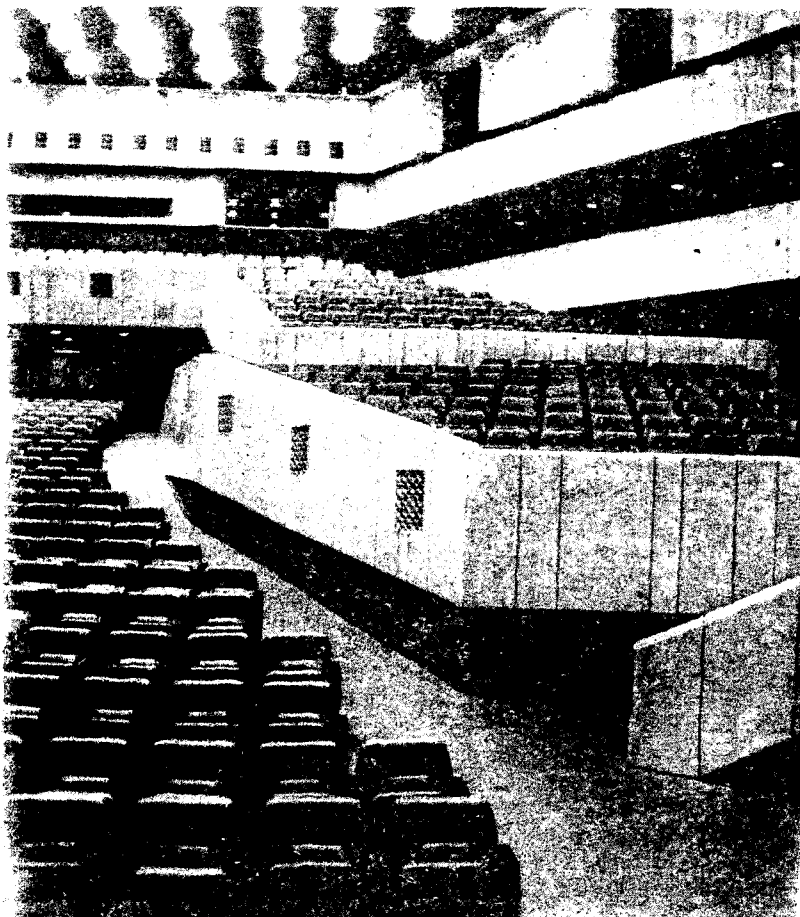


Рис. 6.28. Фрагмент интерьера киноконцертного зала в Зеленограде

Рис. 6.26. План киноконцертного зала в Зеленограде

Рис. 6.27. Продольный разрез киноконцертного зала в Зеленограде

делением первых звуковых отражений изображены на рис. 6.26 и 6.27. На рис. 6.28 показан фрагмент интерьера зала в натуре.

Учитывая сравнительно небольшую вместимость зала, при разработке его акустического решения был принят компромиссный вариант, заключающийся в обеспечении сравнительно небольшого запаздывания ранних звуковых отражений, достаточно диффузного звукового поля и времени реверберации 1,3–1,4 с в области средних частот. Такие значения времени реверберации соответствуют рекомендуемым для залов многоцелевого назначения объемом

порядка 10 000 м³ (см. рис. 5.1). Наряду с этим для улучшения звучания музыкальных исполнений в условиях естественной акустики в самом начале проектирования были рекомендованы два важных мероприятия. Первое из них, реализованное в натуре и в значительной мере определившее архитектурный облик зала, заключалось в размещении слушательских мест отдельными группами на разных уровнях. Это позволило создать в зале вертикальные поверхности, расположенные вблизи слушателей, и тем самым обеспечить слушательские места интенсивными малопаздывающими отражениями. Причем значительная доля интенсивных отражений поступает к слушателям с боков, увеличивая эффект пространственного впечатления. Такие отражения оказались особенно важными для центральной части партера, которая из-за значительных размеров портала (требования кинотехнологии) и сильно расходящихся боковых припортальных стен не получала малопаздывающих отражений от потолка и стен зала. Принятый принцип размещения слушательских мест также весьма полезен для повышения диффузности звукового поля. Вторым мероприятием было устройство оркестровой раковины, призванной направить к слушателям дополнительные ранние отражения, улучшить условия для музыкантов и несколько увеличить время реверберации зала при выступлениях симфонического оркестра. Оркестровая раковина была заложена в проект, частично изготовлена, но, к сожалению, пока не осуществлена в натуре.

При выборе материалов отделки с тем, чтобы не вызвать крайне нежелательного для музыкальных исполнений переглушения зала, было резко ограничено применение специальных звукопоглощающих материалов. Звукопоглощающие плиты "Акмигран" были размещены только по периметру потолка в виде узкой полосы. Остальные поверхности зала было рекомендовано отделать твердыми звукоотражающими материалами. Стены зала имеют комбинированную отделку: значительная часть облицована мрамором, а остальная выполнена из штукатурки по кирпичу и офактуренных асбоцементных листов. Из таких листов выполнены элементы потолка зала. Выбранная конструкция потолка позволила избежать применения в отделке зала специального низкочастотного звукопоглотителя. Пол зала полностью покрыт ковром с очень небольшим ворсом. В зале установлены мягкие кресла с обивкой из искусственной кожи. Как показал расчет, время реверберации заполненного зала на частотах 125, 500 и 2000 Гц соответственно составляет 1,6, 1,35 и 1,2 с.

При разработке акустического решения киноконцертного зала были проведены акустические испытания его уменьшенной модели с использованием искровых импульсов. Задачи испытаний в основном состояли в оценке акустической эффективности принятой схемы размещения слушателей и устройства оркестровой раковины. Кроме того, была проверена целесообразность расчленения потолка и верхних частей стен. Модель зала была изготовлена из оргстекла и полистирола толщиной около 5 мм в масштабе



Рис. 6.29. Общий вид модели киноконцертного зала в Зеленограде

1:25. Поглощение звука сидящими слушателями имитировалось с помощью поролона. Общий вид модели показан на рис. 6.29.

Анализ снятых в модели осциллограмм показал, что местные звукоотражатели, возникшие в результате ступенчатого размещения групп слушательских мест, значительно улучшают структуру звуковых отражений на всех местах, особенно в партере. На осциллограммах появляется серия интенсивных отражений и уплотняется структура поздних отражений. На рис. 6.30 показана осциллограмма, снятая в центральной части партера, а на рис. 6.31 — осциллограмма, полученная в амфитеатре модели зала (источник звука размещался на авансцене в точке Q). Установка оркестровой раковины в модели значительно обогащала структуру отражений на всей площади слушательских мест: увеличивалась плотность отражений, возрастал уровень отражений, а спад уровня становился более плавным. Размещение членений в верхних частях стен в основном сказывалось на поздней части осциллограмм, делая структуру поздних отражений более равномерной. Эффективное членение потолка, улучшая равномерность структуры, сильно уменьшало уровень ранних отражений. В связи с этим было рекомендовано не подвергать потолок слишком сильному членению.

После завершения строительства Дворца культуры в киноконцертном зале были выполнены акустические измерения, в программу которых входили импульсные измерения с использованием широкополосных импульсов (выстрелы из стартового пистолета) и измерения времени реверберации. Помимо осциллографирования импульсных откликов зала была проведена обработка на ЭВМ их магнитных записей. В результате обработки получены значения текущих интегралов квадратов импульсных откликов (см. п. 1.1),

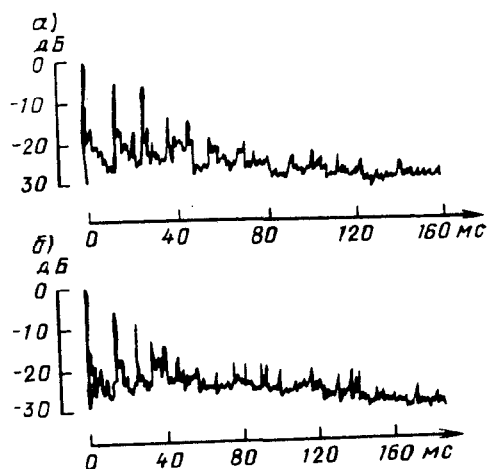


Рис. 6.30. Осциллограммы, снятые в партере киноконцертного зала в Зеленограде
а — модель зала; б — зал в натуре

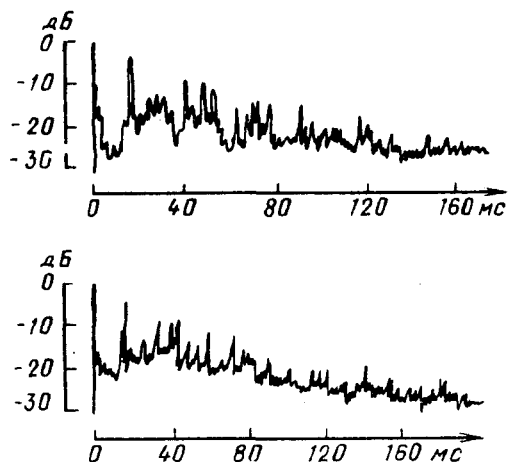


Рис. 6.31. Осциллограммы, снятые в амфитеатре киноконцертного зала в Зеленограде
а — модель зала; б — зал в натуре

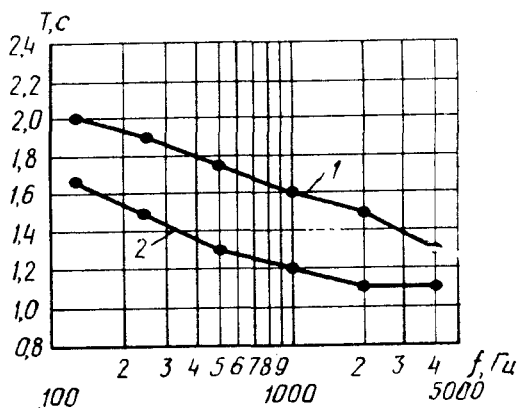


Рис. 6.32. Частотная характеристика реверберации киноконцертного зала в Зеленограде
1 — пустой зал; 2 — заполненный зал (корректировочный расчет)

а отсюда и значения таких акустических критериев, как индекс ясности S_{80} и индекс пространственного впечатления по Йордану (см. п. 2.4). Для определения индекса пространственного впечатления магнитные записи импульсных откликов зала были сделаны с использованием микрофона, имеющего диаграмму направленности в виде восьмерки.

Анализ снятых в зале осциллограмм полностью подтвердил результаты импульсных испытаний модели зала. Следует отметить довольно хорошее соответствие осциллограмм, снятых в модели и в готовом зале (см. рис. 6.30 и 6.31). Интересными оказались результаты определения индекса ясности и индекса пространственного впечатления — основных акустических показателей, характеризующих условия восприятия музыкальных программ в естественном звучании. Индекс ясности практически на всей площади слушательских мест лежит в диапазоне оптимальных значений (от 2 до 7 дБ). Индекс пространственного впечатления в партере и на большей части мест амфитеатра также имеет оптимальные значения (—5 . . . —8 дБ). В последних рядах амфитеатра и на галереях (балконах) индекс пространственного впечатления несколько ниже, так как относительная доля боковых отражений здесь становится меньше. Время реверберации зала и его частотная характеристика, как видно из рис. 6.32, соответствуют рекомендуемым. Таким образом, объективные акустические показатели зала свидетельствуют о его хорошей акустике. Это подтверждается и опытом эксплуатации зала.

6.5. ОЛИМПИЙСКИЙ ЗАЛ "ДРУЖБА"

Крытое спортивное сооружение "Дружба" является первым олимпийским спортивным объектом, введенным в эксплуатацию. Основу сооружения составляет демонстрационный зал для спортивных игр объемом около 55 000 м³ и с числом мест на трибунах 2500. Зал, включая пространство фойе, перекрыт железобетонной оболочкой (в плане 88x88 м) купольного типа. Центральная часть оболочки, расположенная над игровой площадкой, выполнена в виде кессонов размером 2,4x2,4 м. На рис. 6.33 и 6.34 представлены план и разрез демонстрационного зала, на рис. 6.35 — фрагмент его интерьера.

При проектировании сооружения в демонстрационном зале по рекомендации НИИСФ была предусмотрена звукопоглощающая отделка потолка, необходимая для снижения времени реверберации и уменьшения порхающего эха, неизбежно возникающего при расположении вогнутой поверхности (покрытие зала) напротив плоской (пол зала). Звукопоглощающая отделка в окончательном варианте была решена в виде звукопоглощающих щитов, закрывающих дно кессонов. Натурные прослушивания и анализ магнитных записей импульсных откликов, сделанных в демонстрационном зале в процессе строительства (без звукопоглощающей отделки), подтвердили чрезмерную гулкость помещения (рис.

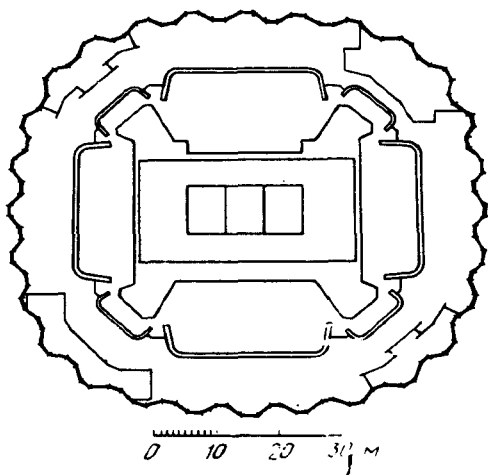
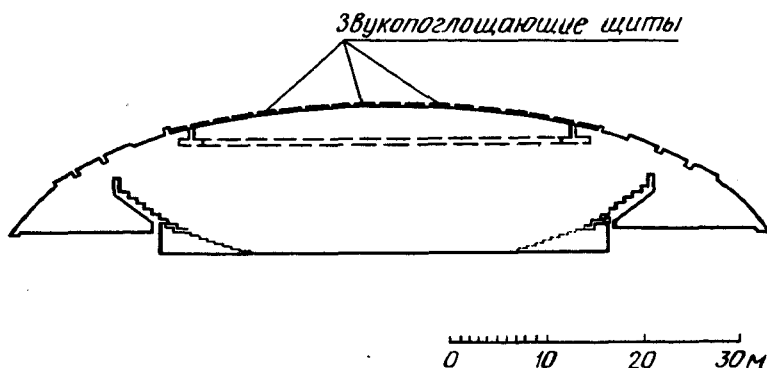


Рис. 6.33. План зала "Дружба"

Рис. 6.34. Разрез зала "Дружба"



6.36) и наличие в нем сильного порхающего эха. Оба эти эффекта являются крупными акустическими недостатками, существенно ухудшающими условия акустического комфорта для спортсменов и зрителей, а также условия работы системы звукоусиления.

С целью оценки степени ослабления порхающего эха за счет звукопоглощающей отделки потолка были проведены импульсные испытания уменьшенной модели демонстрационного зала. Модель была изготовлена в масштабе 1:40 из оргстекла. Толщины оргстекла соответствовали (с учетом масштаба модели) толщинам железобетонных конструкций покрытия. Звукопоглощающие щиты имитировались 4-мм поролоном, звукопоглощение которого соответствовало звукопоглощению заложенных в проект щитов. В ходе испытаний в различных точках модели при разных положениях источника фиксировались импульсные осциллограммы. В качестве источника импульсов использовался искровой разрядник. Общий вид модели зала с импульсной установкой показан на рис. 6.37.

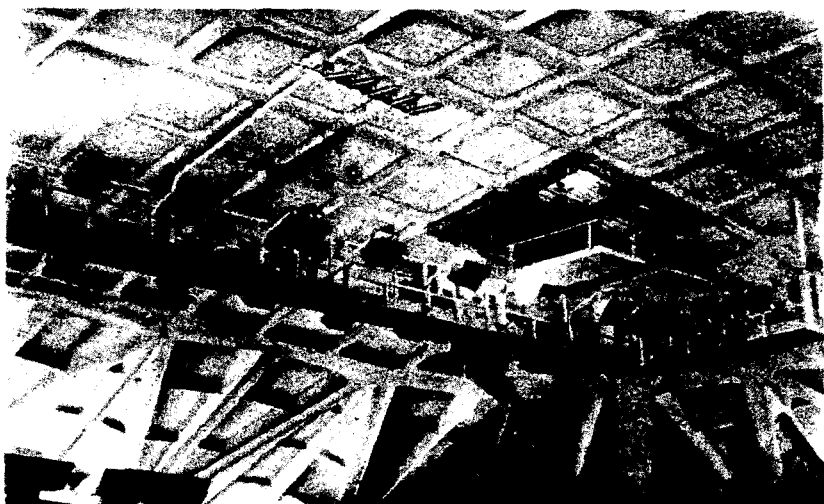
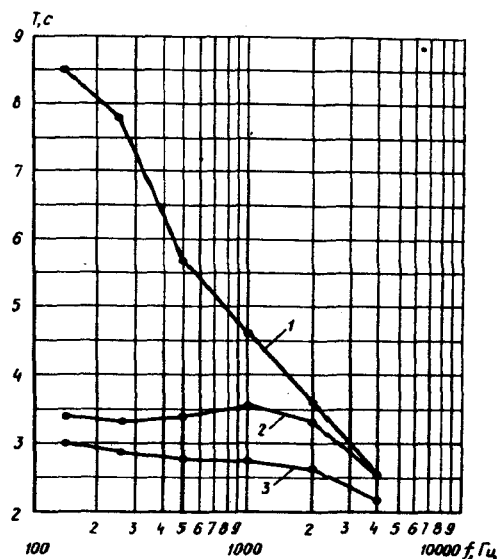


Рис. 6.35. Фрагмент интерьера зала "Дружба"

Рис. 6.36. Частотная характеристика времени реверберации зала "Дружба"

1 — зал в процессе строительства, без звукопоглощающей отделки потолка; 2 — готовый зал, без слушателей; 3 — заполненный зал (корректировочный расчет)



Анализ полученных в модели демонстрационного зала осциллограмм позволил установить, что без звукопоглощающей отделки потолка порхающее эхо очень сильное. На осциллограммах с интервалом около 200 мс повторяются группировки отражений, уровень которых существенно превышает уровень соседних отражений. Более интенсивное порхающее эхо наблюдается при высоком центральном расположении источника, при смещении источника от центра зала порхающее эхо уменьшается. В случае отделки потолка

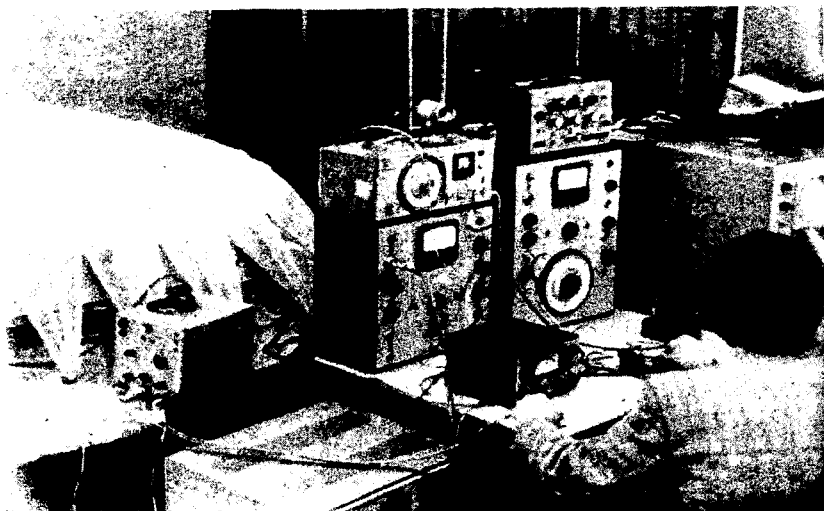


Рис. 6.37. Общий вид модели зала "Дружба" и импульсной установки

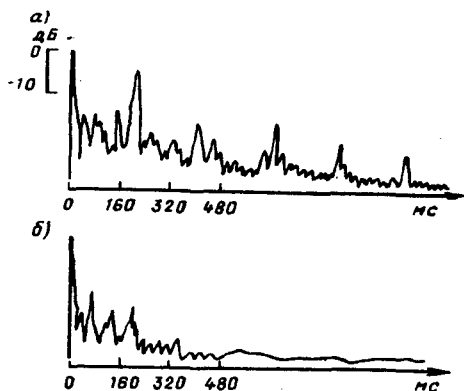


Рис. 6.38. Осциллограммы, снятые в центральной части модели зала "Дружба"
а — без звукопоглощающей отделки потолка; б — со звукопоглощающей отделкой потолка

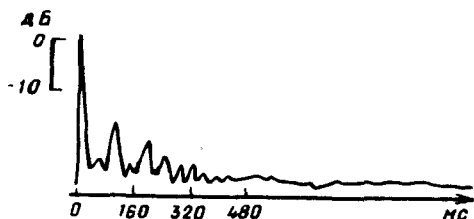


Рис. 6.39. Осциллограмма, снятая в готовом зале "Дружба" при тех же условиях, что и осциллограмма рис. 5.30, б

уровень поздних группировок отражений, имеющих запаздывание порядка 200 мс и выше, существенно снижается. На рис. 6.38 в виде примера приведены осциллограммы, снятые в центре модели (высота источника в пересчете на натуру — 4,4 м, а приемника — 2 м) при наличии звукопоглотителя на потолке и без него.

Звукопоглощающие щиты в кессонах потолка были осуществлены в натуре. Кроме того, небольшое количество звукопогло-

тителя было размещено на других поверхностях зала (на крышах звукоаппаратной, буфетов и воздухораспределительных устройств). В полностью готовом зале перед проведением Олимпийских игр были выполнены заключительные акустические измерения (измерения времени реверберации и импульсные измерения). Время реверберации, измеренное в пустом зале (см. рис. 6.36), составляет 2,6—3,5 с в диапазоне 125—4000 Гц. В заполненном зале, как показал корректировочный расчет, время реверберации в указанном диапазоне частот снижается до 2,2—3,0 с. Импульсные измерения в готовом зале были выполнены в тех же точках и при тех же положениях источника и приемника, что и импульсные испытания модели. Источником импульсов служили выстрелы из стартового пистолета. Результаты импульсных измерений находятся в хорошем соответствии с данными импульсных испытаний модели и свидетельствуют о значительном снижении уровня поздних группировок отражений. В качестве примера на рис. 6.39 показана осциллограмма, полученная в зале при тех же условиях, что и модельная осциллограмма, представленная на рис. 6.38. Субъективно порхающее эхо в зале воспринимается как весьма слабое.

Накопленный опыт эксплуатации демонстрационного зала свидетельствует о его хорошей акустике. На трибунах очень хорошо слышно происходящее на игровой площадке, спортсменами акустические условия оцениваются как весьма благоприятные, хорошо звучит в зале музыка, а благодаря разумно выбранной системе звукоусиления в зале обеспечена достаточная разборчивость передаваемой информации. Нередко помимо спортивных мероприятий в зале проводятся и культурные мероприятия, в том числе эстрадные концерты.

Т а б л и ц а 1. Коэффициенты звукопоглощения некоторых материалов и конструкций

Материалы и конструкции	Коэффициент звукопоглощения для частоты, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	2	3	4	5	6	7

ОБЫЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

Кирпичная кладка без расшивки швов	0,15	0,19	0,29	0,28	0,38	0,46
То же, с расшивкой швов	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
Стены оштукатуренные, окрашенные клеевой краской	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04
То же, окрашенные масляной краской	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Штукатурка по металлической сетке с воздушной полостью позади	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Бетон с железнением поверхности	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Мрамор, гранит и другие каменные шлифованные породы	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Травертин	0,02	0,03	0,03	0,03	0,035	0,04
Метлахская плитка	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Панель деревянная толщиной 5—10 мм с воздушной прослойкой* 50—150 мм	0,3	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
Плиты древесностружечные неокрашенные толщиной 20 мм (ГОСТ 10632—77 с изм.) с воздушной прослойкой 50—150 мм	0,1	0,08	0,05	0,05	0,08	0,1
Плиты твердые древесноволокнистые толщиной 4 мм, объемным весом 1000 кг/м ³ , с воздушной прослойкой 50—150 мм	0,3	0,16	0,08	0,05	0,04	0,08
Штукатурка гипсовая, сухая толщиной 10 мм (ГОСТ 6266—81 с изм.) с воздушной прослойкой 50—150 мм	0,3	0,25	0,1	0,08	0,05	0,04

Переплеты оконные застекленные	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
Светопрзрачные ограждения из стеклоблоков	0,01	0,12	0,024	0,06	0,1	0,06
Пол паркетный	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Пол дощатый на лагах	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,09
Линолеум на твердой основе	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Ковер шерстяной толщиной 9 мм по бетону	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
То же, на войлочной подкладке толщиной 3 мм	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,3
Портьеры хлопчатобумажные на подкладке со складками, общий вес ткани 0,5 кг/м ²	0,05	0,3	0,45	0,7	0,65	0,5
Портьеры плюшевые со складками, общий вес ткани 0,65 кг/м ²	0,15	0,35	0,55	0,7	0,7	0,65
Фибролит толщиной 50 мм с воздушной прослойкой 50—100 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,6	0,65
Вентиляционные решетки	0,3	0,42	0,5	0,5	0,5	0,51
Вода в ванне бассейна	0,01	0,01	0,013	0,015	0,02	0,025
Проем сцены, оборудованной декорациями	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Киноэкран	0,3	—	0,4	—	0,4	—

ПОКРЫТИЯ ПОЛОВ СПОРТИВНЫХ ЗАЛОВ

Тарафлекс. Спорт М	0,02	0,03	0,03	0,03	0,06	0,03
Искусственная трава фирмы "Полиграс"	0,07	0,07	0,075	0,1	0,39	0,52
Астротурф	0,1	0,15	0,3	0,5	0,7	0,5
Пуластик	0,05	0,12	0,2	0,2	0,15	0,1
Спортан пористый	0,05	0,06	0,07	0,1	0,3	0,5
Спортан	0,04	0,05	0,08	0,18	0,2	0,3
Риздор	0,02	0,03	0,04	0,18	0,25	0,17
Тартан	0,02	0,03	0,06	0,1	0,18	0,17

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

Плиты гипсовые перфорированные с пористым
заполнителем, размер 810х810х26 мм
без воздушной прослойки

0,05	0,2	0,45	0,75	0,55	0,35
------	-----	------	------	------	------

Материалы и конструкции	Коэффициент звукопоглощения для частоты, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
1	2	3	4	5	6	7
с воздушной прослойкой, мм:						
50	0,05	0,4	0,75	0,55	0,55	0,3
100	0,15	0,6	0,75	0,55	0,5	0,3
200	0,25	0,65	0,65	0,6	0,55	0,3
Плиты минераловатные акустические, размером 500x500x20 мм						
перфорированные ПА/О без воздушной прослойки, мм	0,05	0,15	0,6	0,9	0,8	0,4
то же, с воздушной прослойкой "						
50	0,05	0,35	0,9	0,8	0,7	0,4
100	0,2	0,4	0,9	0,75	0,7	0,4
отделочные ПА/С "с набрызгом" без воздушной прослойки, мм	0,05	0,15	0,6	0,8	0,85	0,8
то же, с воздушной прослойкой, "						
50	0,1	0,3	0,8	0,85	0,8	0,7
100	0,15	0,5	0,85	0,8	0,8	0,7
гладкие декоративные ПА/Д без воздушной прослойки, мм	0,05	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1
то же, с воздушной прослойкой, "						
50	0,15	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1
100	0,25	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1
Плиты пористые акустические "Акмигран", размером 300x300x20 мм						
без воздушной прослойки, мм	0,05	0,15	0,5	0,65	0,65	0,7

с воздушной прослойкой, 50	0,15	0,55	0,55	0,65	0,65	0,7
100	0,25	0,55	0,55	0,65	0,65	0,7
200	0,35	0,6	0,6	0,65	0,7	0,75
Плиты "Силакпор"						
без воздушной прослойки, мм	0,2	0,5	0,65	0,6	0,6	0,6
с воздушной прослойкой 100 мм	0,5	0,7	0,6	0,55	0,55	0,6
Минские плиты А-1						
без воздушной прослойки, мм	0,1	0,3	0,6	0,7	0,8	0,8
с воздушной прослойкой 200 мм	0,4	0,65	0,65	0,7	0,75	0,75
Плиты "Москва"						
без воздушной прослойки	0,1	0,25	0,8	0,6	0,5	0,35
с воздушной прослойкой 100 мм	0,2	0,6	0,6	0,5	0,35	0,3
Плиты "Мелодия"						
без воздушной прослойки	0,15	0,25	0,8	0,4	0,2	0,2
с воздушной прослойкой 100 мм	0,25	0,5	0,6	0,45	0,3	0,3
Фибролит толщиной около 50 мм с воздушной прослойкой 50—100 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,6	0,65
Слой пористого звукопоглотителя ** толщиной не менее 100 мм, покрытый стеклотканью*** или мешковиной и деревянными рейками**** шириной 20—25 мм, толщиной 10—12 мм и рас- стоянием между ними 15—20 мм	0,4	0,7	0,8	0,8	0,75	0,65
То же, вместо реек гипсовые перфорированные плиты размерами 400х400х10 и 500х500х10 мм, с отверстиями диаметром 10 мм и шагом 24 мм	0,4	0,7	0,75	0,6	0,45	0,3

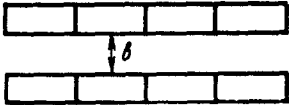
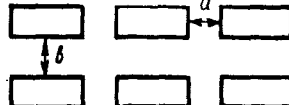
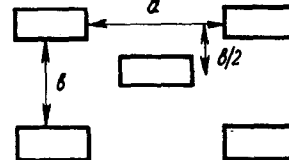
* Имеется в виду воздушная прослойка позади плит.

** Слой пористого звукопоглотителя. Плиты ППМ-80 плотностью 80—100 кг/м³ с диаметром волокна 8 мкм. Супертонкое базальтовое волокно плотностью 20 кг/м³ с диаметром волокна 1 мкм. Супертонкое стекловолокно плотностью 15 кг/м³ с диаметром волокна 2 мкм.

*** Ткани: ТСТ-6, А-1 (ГОСТ 8481—75 с изм.), 34-176 (ГОСТ 19907—83).

**** Вместо реек можно применить алюминиевые перфорированные панели размером 500х500 мм Видненского завода металлоконструкций.

Таблица 2. Звукопоглощение кулис из минеральной плиты ПП-80 (ПП-100) размером 1000х500х40 мм (ГОСТ 9573-82) в оболочке из стеклоткани* 33-100 (ГОСТ 19907-83)

Схема расположения кулис в плане	Расстояния между плитами, м	Звукопоглощение, м ² , на 1 м ² поверхности потолка или стен для частоты, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
	$b=0,3$	1,0	1,4	2,0	2,7	2,3	1,9
	$b=0,5$	0,8	1,0	1,5	1,9	1,7	1,5
	$b=0,8$	0,6	0,6	1,2	1,4	1,4	1,2
	$b=1,0$	0,4	0,5	0,8	1,2	1,1	1,1
	$a=0,25$	0,9	1,7	2,4	2,6	2,7	2,4
	$b=0,25$	0,9	1,7	2,4	2,6	2,7	2,4
	$a=0,5$	0,6	0,8	1,2	1,6	1,6	1,6
	$b=0,5$	0,6	0,8	1,2	1,6	1,6	1,6
	$a=0,3$	0,8	1,0	1,6	2,2	2,0	1,9
	$b=0,3$	0,8	1,0	1,6	2,2	2,0	1,9
	$a=1,0$	0,4	0,8	1,1	1,3	1,4	1,3
	$b=0,5$	0,4	0,8	1,1	1,3	1,4	1,3
	$a=0,5$	0,4	0,5	0,8	1,0	1,0	0,9
	$b=1,0$	0,4	0,5	0,8	1,0	1,0	0,9
	$a=0,5$	0,7	1,0	1,5	1,8	1,7	1,7
	$b=0,5$	0,7	1,0	1,5	1,8	1,7	1,7
	$a=0,5$	0,7	1,0	1,5	1,8	1,7	1,7
	$b=0,5$	0,7	1,0	1,5	1,8	1,7	1,7

* Плиты могут быть помещены в кассеты из перфорированного металла (процент перфорации не менее 25) или из просечно-вытяжной сетки.

Т а б л и ц а 3. Эквивалентная площадь звукопоглощения
слушателей и кресел

Слушатели и кресла	Эквивалентная площадь звукопоглощения, м ² , для частоты, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Слушатель						
в мягком и полумягком кресле	0,25	0,3	0,4	0,45	0,45	0,4
то же, в жестком "	0,2	0,25	0,3	0,35	0,35	0,35
Кресло						
мягкое с прористым наполнителем сиденья и спинки, обитые воздухопро- ницаемой тканью	0,15	0,2	0,2	0,25	0,3	0,3
полумягкое, обитое воздухопроницаемой тканью	0,08	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2
полумягкое, обитое искусственной кожей	0,08	0,1	0,12	0,1	0,1	0,08
жесткое, с фанерной спинкой и сиденьем	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блауэрт Й. Пространственный слух. — М.: Энергия, 1979. — 223 с.
2. Йордан В.Л. Акустическое проектирование концертных залов и театров. — М.: Стройиздат, 1985. — 225 с.
3. Качерович А.Н. Акустическое оборудование киностудий и театров. — М.: Искусство, 1980. — 239 с.
4. Ланз М.Ю. Метод определения частотного состава звуковых отражений в помещениях с помощью узкополосных испытательных импульсов: Автореф. дис. канд. техн. наук. — М., 1983. — 21 с.
5. Лейзер И.Г. Добавочное звукопоглощение в помещениях: 1У Всесоюзная акустическая конференция. Рефераты докладов. — М.: АН СССР, 1958.
6. Рейхардт В. Акустика общественных зданий. — М.: Стройиздат, 1984. — 198 с.
7. Фурдуев В.В., Чен-Тун. Измерение диффузности звукового поля в помещениях методом направленного микрофона // Акустический журнал. — 1960. — т. У1. — № 3. — с. 105—110.
8. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости. — М.: Стройиздат, 1981. — 47 с.
9. Руководство по расчету и проектированию средств защиты застройки от транспортного шума. — М.: Стройиздат, 1982. — 30 с.
10. Руководство по расчету и проектированию шумоглушения вентиляционных установок. — М.: Стройиздат, 1982. — 86 с.
11. Руководство по расчету и проектированию звукоизоляции ограждающих конструкций зданий. — М.: Стройиздат, 1983. — 65 с.
12. Barron M., Marshall A.H. Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure // J. Sound and Vibr. — 1981. — v. 77. — № 2. — p. 211—232.
13. Beranek L.L. Music, acoustics and architecture. — New York: John Wiley and Sons, 1950. — 586 p.
14. Beranek L.L., Schultz T. Some recent experiences in the design and testing of concert halls with suspended panel arrays // // Akustische Beihefte. — 1965. — № 1. — p. 307—316.
15. Beranek L.L. Audience and seat absorption in large halls // // J. Acoust. Soc. Amer. — 1969. — v. 45. — № 1. — p. 13—19.
16. Beranek L.L., Blazier W.E., Figwer J.J. Preferred noise criterion /PNC/ curves and their application to rooms // J. Acoust. Soc. Amer. — 1971. — v. 50. — № 5. — p. 1223—1228.
17. Bolt R.H., Doak P.E. A tentative criterion for the short-term transient response of auditoriums // J. Acoust. Soc. Amer. — 1950. — v. 22. — № 4. — p. 507—509.
18. Brebeck D. Nachbildung von akustisch annlichen Wandmaterialien fur raumakustische Modellversuche. 5-th Int. Congr. Acoust. — Liege, 1963. — № 63.
19. Burd A.N. The use of a model to evaluate various possible modification to a music studio. 7-th Int. Congr. Acoust. — Budapest, 1971. — 19 — A — 2.
20. Cremer L., Muller H.A. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Bd. 1. — Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1978. — 521 s.
21. Fasold W., Winkler H. Bauphysikalische Entwurfslehre. Bd. 5. — Berlin: VEB, 1976. — 184 s.
22. Gottlod D. Vergleich objektiver akustischer Parameter mit

Ergebnissen subjectiver Untersuchungen an Konzertsälen. Fortsch. Akustik. Plenarvotr. und Kurzref. 3. Tag. Dtsch. Arbeitsgemeinschaft. Akustik. DAGA'73, Aachen. — Düsseldorf, 1973. — s. 423–426.

23. Houtgast T., Steeneken H.J.M. The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility // *Acustica*. — 1973. — v. 28. — № 1. — p. 66–73.

24. Januska I. Zreteľnosť a stupen ozvehy jako abjektívni kriteria kvality uzavrených priestorů pro poslech reci // *Sb. prací VUZORT*, Praha. — 1971. — № 3. — s. 285–302.

25. Jordan V.L. A group of objective acoustical criteria for concert halls // *Appl. Acoust.* — 1981. — v. 14. — № 4. — p. 253–266.

26. Junius W. Raumakustische Untersuchungen mit neueren Messverfahren in der Lieberhalle Stuttgart // *Acustica*. — 1959. — v. 9. — № 4. — p. 289–303.

27. Kolmer F., Kyncl J. *Prostorová akustika*. — Praha: Nakladatelství technické literatury, 1980. — 243 s.

28. Kosteh C. New public assembly // *Acustica*. — 1965 / 66. — v. 16. — № 6. — p. 325–330.

29. Kryter K.D. Methods for the calculation and use of the articulation index // *J. Acoust. Soc. Amer.* — 1962. — v. 34. — № 11. — p. 1689–1697.

30. Kuhl W. Räumlichkeit als Komponente des Raumeindrucks // *Acustica*. — 1978. — v. 40. — № 3. — p. 167–181.

31. Kuttruff H., Jusofie M.J. Nachhallmessungen nach dem Verfahren der integrierten Impulsantwort // *Acustica*. — 1967 / 68. — v. 19. — № 1. — p. 56–58.

32. Kuttruff H. *Room acoustics*. — London: Applied Science Publishers LTD, 1979. — 309 p.

33. Lehmann P., Wilkens H. Zusammenhang subjectiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien // *Acustica*. — 1980. — v. 45. — № 4. — p. 256–268.

34. Lochner J.P.A., Burger J.F. The intelligibility of speech under reverberant conditions // *Acustica*. — 1961. — v. 11. — № 4. — p. 195–200.

35. Mackenzie R. *Auditorium acoustics*. — London: Appl. Sci. Publ., 1975. — 231 p.

36. Minarik V. Urcovani stupne difúze akustického pole uzavrených priestorů // *Slaboproudý obsor.* — 1969. — v. 30. — № 6. — s. 245–252.

37. Niese H. Die Prüfung des raumakustischen "Echograd-Kriteriums" mit Hilfe von Silbenverständlichkeitsmessungen // *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik*. — 1957. — v. 66. — № 3. — s. 70–80.

38. Reichardt W., Abdel Alim O., Schmidt W. Definition und Messgrundlage eines objektiven Masses zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietungen // *Acustica*. — 1975. — v. 32. — № 3. — s. 126–137.

39. Reichardt W., Lehmann U. Sind Raumeindruck und Durchsichti-

gkeit des Hörerlebnisses im Konzertsaal Gegensätze? // Appl. Acoust. — 1976. — v. 9. — № 2. — s. 139–150.

40. Reichardt W., Lehmann U. Optimierung von Raumeindruck und Durchsichtigkeit von Musikdarbietung durch Auswertung von Impulsschalltest // Acustica. — 1981. — v. 48. — № 3. — s. 174–185.

41. Santon F. Numerical prediction of echograms and the intelligibility of speech in rooms // J. Acoust. Soc. Amer. — 1976. — v. 59. — № 6. — p. 1399–1405.

42. Schroeder M.R. New method of measuring reverberation time // J. Acoust. Soc. Amer. — 1965. — v. 37. — № 3. — p. 409–412.

43. Spandock F. Die Vorausbestimmung der Akustik eines Raumes mit Hilfe von Modellversuchen. 5-th Int. Congr. Acoust. / / T. 2. — Liege, 1965. — p. 313–343.

44. Steeneken H.J.M., Houtgast T. Some applications of the speech transmission index [STI] in auditoria // Acustica. — 1982. — v. 51. — № 4. — p. 229–234.

45. Thiele R. Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen // Acustica. — 1953. — v. 3. — № 2. — p. 291–302.

46. Tismer W. Messung von Schalldiffusitäten // Technische Mitteilungen RFZ. — 1964. — v. 8. — № 1. — s. 19–25.

47. Wilkens H. Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen // Acustica. — 1977. — v. 38. — № 1. — p. 10–23.

48. Winkler H. Die Kompensation der zu großen Luftabsorption bei raumakustischen Modellmessungen mit Echogrammen // Hochfrequenztechnik und Electroakustik. — 1964. — v. 73. — № 4. — s. 121–131.

49. Minkler H. Entwicklung eines Senders und Empfängers für raumakustische Modellmessungen mittels Echogrammen // Hochfrequenztechnik und Electroakustik. — 1964. — v. 73. — № 4. — s. 132–138.

50. Yamagushi K. Multivariate analysis of subjective and physical measures of hall acoustics // J. Acoust. Soc. Amer. — 1972. — v. 52. — № 5. — p. 1271–1279.

51. Yamamoto T. The perceptible limit of the echo due to multiplex reflections // J. Acoust. Soc. Jap. — 1971. — v. 27. — № 3. — p. 153–162.

52. Yamamoto T. Study of acoustical room characteristics by the use of acoustic models // NHK Techn. Journ. — 1973. — v. 25. — № 6. — p. 299–320.

53. Yoshida T. Psychometric approach to room acoustics. 5-th Int. Congr. Acoust. — Liege, 1965. — v. 18.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕЩЕНИЙ	5
1.1. Структура звуковых отражений	6
1.2. Время реверберации	14
1.3. Диффузность звукового поля	18
ГЛАВА 2. ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ПОМЕЩЕНИЙ	25
2.1. Субъективная оценка помещений для речевых программ	25
2.2. Объективные методы оценки разборчивости речи	27
2.3. Методы и критерии субъективной оценки помещений для музыкальных программ	34
2.4. Связь субъективных и объективных критериев оценки помещений для музыкальных программ	39
2.5. Объективная оценка мешающих акустических факторов	49
ГЛАВА 3. ИНЖЕНЕРНЫЕ СРЕДСТВА АКУСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ	56
3.1. Расчет геометрических отражений	56
3.2. Расчет времени реверберации	70
3.3. Звукопоглощающая отделка и ее размещение	77
3.4. Расчет акустических критериев	80
3.5. Устранение мешающих акустических факторов	85
ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ УМЕНЬШЕННЫХ МОДЕЛЕЙ В АКУСТИКЕ ПОМЕЩЕНИЙ	90
4.1. Условия подобия при моделировании	91
4.2. Масштаб и материалы моделей	94
4.3. Источники и приемники звука для моделирования	97
4.4. Субъективная оценка акустики помещений с помощью их моделей	103
4.5. Акустические измерения в уменьшенных моделях	107
ГЛАВА 5. АКУСТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ НАЗНАЧЕНИЯ	110
5.1. Помещения для речевых программ	110
5.2. Помещения для музыкальных программ	116
5.3. Помещения с совмещением речевых и музыкальных программ	124
ГЛАВА 6. ПРИМЕРЫ АКУСТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ	130
6.1. Зал Центрального Академического театра Советской Армии	131
6.2. Зал Московского детского музыкального театра	140
6.3. Универсальный зал в Гаване	148
6.4. Киноконцертный зал Дворца культуры в Зеленограде	153
6.5. Олимпийский зал "Дружба"	159
Приложение	164
Список литературы	170

Научное издание

Леонид Иосифович Макриненко

АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Редакция литературы по строительным материалам и конструкциям
Зав. редакцией А. И. Ф о н и н
Редактор З. С. Ш е с т о п а л о в а
Внешнее оформление художника
Технический редактор М. Д. Л е в и н а
Корректор Л. А. Е г о р о в а
Оператор С. А. С а в ч е н к о

ИБ 3464

Подписано в печать 12.03.85 Формат 84х108 1/32 д.л.
Набор машинописный Бумага офсетная № 2 Печать офсетная
Усл. печ. л. 9,24 Усл.кр.-отт. 9,45 Уч.-изд. л. 11,16
Тираж 4900 экз. Изд. № А УИИ—711 Зак. № 507 Цена 1 р. 70 к.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а
Тульская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Тула, пр. Ленина, 109

В СТРОЙИЗДАТЕ ГОТОВИТСЯ К ИЗДАНИЮ:

СНИЖЕНИЕ ШУМА В ЗДАНИЯХ И ЖИЛЫХ РАЙОНАХ / ПОД РЕД. Г.Л. ОСИПОВА, Е.Я. ЮДИНА. — М.: СТРОЙИЗДАТ, 1987 (1 кв.). — 45 л.

В ПЕРВОМ МЕЖДУНАРОДНОМ ИЗДАНИИ, В ПОДГОТОВКЕ КОТОРОГО ПРИНИМАЛИ УЧАСТИЕ КРУПНЕЙШИЕ СПЕЦИАЛИСТЫ СССР, ФРГ, ЯПОНИИ И ДР. ОТРАЖЕНЫ ПОСЛЕДНИЕ МИРОВЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ДОСТИЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СТРАН В ОБЛАСТИ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ ОТ ШУМА. ИЗЛОЖЕНЫ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШУМА В ЗДАНИЯХ И НА ТЕРРИТОРИЯХ ЗАСТРОЙКИ. ПРИВЕДЕНЫ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ШУМА, ДАНО ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, КОНСТРУКЦИЙ И УСТРОЙСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАЩИТУ ОТ ШУМА.

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка, № формулы, рисунки	Напечатано	Следует читать
21	Формула (1.13)	$R_K = \rho_1(t) \rho_2(t) / \sqrt{\rho_1(t) \rho_2(t)}$	$R_K = \rho_1(t) \rho_2(t) / \sqrt{\rho_1^2(t) \rho_2^2(t)}$
33	Формула (2.16)	$\int_0^{t_2} \rho(t) / t^2 dt$	$\int_0^{t_2} \rho(t) ^2 dt$
		$\tau_0^{-(t-t_2)/\tau - \tau_0} e^{-(t-t_2)/\tau_0}$	$\tau_0^{-(t-t_2)/\tau - \tau_0} e^{-(t-t_2)/\tau_0}$
42	Формула (2.25)	$\sqrt{\frac{\tau}{\int_0^T \rho_1(t) dt + \frac{\tau}{\int_0^T \rho_1(t) dt}}}$	$\sqrt{\frac{\tau}{\int_0^T \rho_1^2(t) dt + \frac{\tau}{\int_0^T \rho_2^2(t) dt}}}$
42	Формула (2.26)	$L_S = 10 \lg \frac{\sum_i E_i q(\varphi_i)}{E_D + \sum_i [1 - q(\varphi_i)]}$	$L_S = 10 \lg \frac{\sum_i E_i q(\varphi_i)}{E_D + \sum_i [1 - q(\varphi_i)]}$
43	Формула (2.28)	$R_1 = 10 \lg \left[\left(\int_{25 \text{ мс}}^{\infty} \rho^2(t) dt - \int_{25 \text{ мс}}^{80 \text{ мс}} \rho^2(t) dt \right) / \left(\int_0^{25 \text{ мс}} \rho_1^2(t) dt + \Psi \int_{25 \text{ мс}}^{80 \text{ мс}} \rho_2^2(t) dt \right) \right]$	$R_1 = 10 \lg \left[\left(\int_{25 \text{ мс}}^{\infty} \rho_K^2(t) dt - \int_{25 \text{ мс}}^{80 \text{ мс}} \rho_R^2(t) dt \right) / \left(\int_0^{25 \text{ мс}} \rho_K^2(t) dt + \int_{25 \text{ мс}}^{80 \text{ мс}} \rho_R^2(t) dt \right) \right]$
44	4 сверху	+ 40°C	± 40°
46	Формула (2.35)	$B' = 10 \lg \frac{E_{x200}}{E_{y200}} + B'$	$B' = 10 \lg \frac{E_{x200}}{E_{y200}} + B'_{xy}$
46	3 снизу	над группой	над группой Y
52	7 сверху	> 1,5	< 1,5
57	Формула (3.1)	$u = a \cos \gamma \sqrt{\frac{2}{a} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)}$	$u = a \cos \gamma \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right)}$
58	Рис. 3.1	от прямоугольного отражения	от прямоугольного отражателя
61	6 сверху	полотна	потолка
71	17 сверху	параметр плана	периметр плана
73	Формула (3.15а)	$N = cS/AV$	$N = cS/4V$
73	Формула (3.17)	$\frac{\pi c}{4} \cdot \frac{h + ah + ab}{V}$	$\frac{\pi c}{4} \cdot \frac{bh + ah + ab}{V}$