

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет телекоммуникаций

Кафедра систем телекоммуникаций

В. И. Шалатонин

ЭЛЕКТРОАКУСТИКА И ЗВУКОВОЕ ВЕЩАНИЕ

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия
по курсовому проектированию
для направления специальности 1-45 01 01-04
«Инфокоммуникационные технологии (цифровое теле- и радиовещание)»*

Минск БГУИР 2017

УДК [534.86+654.19](076)
ББК [32.87+32.884]я73
Ш18

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра телекоммуникаций и информационных технологий
Белорусского государственного университета
(протокол №10 от 12.05.2015);

доцент кафедры физики и аэрокосмических технологий
Белорусского государственного университета,
кандидат физико-математических наук, доцент Д. В. Ушаков

Шалатонин, В. И.

Ш18 Электроакустика и звуковое вещание : учеб.-метод. пособие /
В. И. Шалатонин. – Минск : БГУИР, 2017. – 67 с. : ил.
ISBN 978-985-543-230-3.

Приведены теоретические сведения по акустике помещений, описана методика проектирования акустического оформления вещательных студий и выбора звукотехнического оборудования студийных аппаратных, приведена справочная информация для проектирования аппаратно-студийных блоков радиодома.

**УДК [534.86+654.19](076)
ББК [32.87+32.884]я73**

ISBN 978-985-543-230-3

© Шалатонин В. И., 2017
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2017

Содержание

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОМЕЩЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ..... | 7 |
| 1.1 Двойственная природа звука..... | 7 |
| 1.2 Студии и студийные аппаратные..... | 9 |
| 1.3 Основные теоретические подходы, используемые для расчета акустических свойств помещения..... | 11 |
| 2 ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ПОМЕЩЕНИЙ..... | 27 |
| 2.1 Акустическое отношение и эквивалентная реверберация..... | 27 |
| 2.2 Диффузность звукового поля..... | 29 |
| 2.3 Время запаздывания отраженных волн..... | 32 |
| 2.4 Дополнительные критерии акустического качества помещений.... | 34 |
| 2.5 Звукоизоляция студий..... | 36 |
| 3 ОПТИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ И АКУСТИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ СТУДИЙ..... | 40 |
| 3.1 Выбор оптимального времени реверберации..... | 40 |
| 3.2 Объем, форма и резонансные свойства студий..... | 46 |
| 3.3 Звукопоглощающие материалы..... | 50 |
| 3.4 Акустическое оформление студий..... | 54 |
| 3.5 Комплекс оборудования современной радиовещательной студии... | 60 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Коэффициенты звукопоглощения материалов и объектов..... | 64 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 66 |

ВВЕДЕНИЕ

Одной из особенностей современного развития человечества является создание искусственной акустической среды, частью которой являются информационные, музыкальные и игровые аудиовизуальные средства, появление которых стало возможным благодаря открытию и практическому использованию прежде всего электроакустических, психоакустических и электромагнитных (ЭМ) явлений и процессов. Без этих средств (наземное и спутниковое радио- и телевидение, Internet, звукозапись, звукоусиление и звуковоспроизведение и др.) невозможно представить жизнь современного общества.

Звуковым вещанием (ЗВ) называется процесс распространения разнообразной звуковой информации одновременно широкому кругу территориально распределенных слушателей. Прием звуковой информации (ЗИ) производится индивидуальными радиоприемниками. Наряду с печатными изданиями и средствами аудиовизуальной информации (сеть Internet, телевидение) ЗВ является одним из средств массовой информации, оказывающей большое влияние на мышление людей. Первые опыты по передаче с помощью радиосигналов ЗВ проводились еще в начале XX столетия. Они связаны с именами американских инженеров Р. Фессендена и Ли де Фореста. В 20-х годах начинается интенсивное строительство радиовещательных (РВ) станций во многих странах мира. Особые достижения 90-х годов прошлого и начала XXI в. связаны с разработкой стандартов и активным внедрением в большинстве стран мира систем цифрового телерадиовещания.

Звуковая информация передается с помощью ЭМ волн в специально выделенных участках ЭМ спектра. ЗВ предназначено для передачи не только смысловой (семантической) информации, как в телефонии, но в первую очередь для передачи художественной (эстетической) информации. Это принципиальное отличие приводит к необходимости значительного повышения качественных характеристик как звуковых сигналов, так и каналов вещания. Сообщения, подготовленные для распространения (новости, репортажи, концерты, спектакли и т. д.), называются передачами. Различные виды передач, распространяемые одна за другой, образуют программу вещания. Стиль подачи, набор и порядок чередования передач в программе называется форматом вещания. Передачи ведутся в записи и очень редко в прямом эфире. Подготовка, формирование и выпуск программ ЗВ проводится высококвалифицированным творческим и техническим персоналом аппаратно-студийного комплекса (АСК) радиодома (РД). Радиодом – это комплекс сооружений и оборудования, обеспечивающий решение творческих, технических, кадровых, экономических и других задач, связанных с обеспечением ЗВ. Важнейшей частью АСК являются студии – помещения, специально предназначенные для исполнения речевых и музыкальных

фрагментов программ ЗВ. Студии отличаются размерами и различными акустическими свойствами. Звуковые электрические сигналы, сформированные с помощью микрофонов, поступают из студии в связанную с ней студийную аппаратную. Технические средства, имеющиеся в аппаратной (микшерный пульт, многоканальный магнитофон, акустическая система и др.) позволяют звукорежиссеру обеспечить высокое техническое качество записанных сигналов (фонограмм). Окончательная подготовка передачи осуществляется в других аппаратных. Основным коммутационным узлом РД служит центральная аппаратная (ЦА), из которой сигналы выпускаемых программ по соединительным линиям поступают на станции спутникового и проводного вещания, радиовещательные передатчики, кабельные и радиорелейные линии связи. С их помощью ЗИ передается к приемным устройствам слушателей.

Одна из основных технических задач ЗВ – повышение качества звучания. Значительные успехи в повышении качества передачи, достигнутые за последние десятилетия, связаны в первую очередь с широким использованием цифровых методов обработки и передачи звукового сигнала (ЗС). Все большее применение находят цифровые микрофоны и, таким образом, даже первичный электрический ЗС является цифровым.

Существенная особенность систем ЗВ заключается в том, что их конечным звеном является человек. Поэтому учет характеристик слуха человека является необходимым условием для правильного выбора технических параметров каналов передачи сигналов ЗВ. Более того, оказалось, что повышение частотной (спектральной) и энергетической эффективности систем ЗВ, обеспечение мобильного приема при малом уровне помех практически невозможно без учета психоакустических особенностей слуха человека. Доказано, что некоторые компоненты сигналов ЗВ являются «избыточными» в том смысле, что их устранение практически не ухудшает субъективное качество звучания передачи. Сокращение статистической и психоакустической избыточности (т. е. компрессия) сигналов ЗВ позволяет в несколько раз уменьшить требуемую для передачи исходного (первичного) сигнала скорость цифрового потока. В процессе компрессии удается сохранить субъективно высокое смысловое и эстетическое соответствие между первичными (на передаче) и воспринятыми в сознании (на приеме) звуковыми образами вещательных программ.

Работы по анализу качества и оценке эффективности алгоритмов компрессии цифровых сигналов ЗВ с целью их последующей стандартизации начались в 1988 г., когда была образована международная экспертная группа *MPEG (Moving Pictures Experts Group)*. В результате ее работы в 1992 г. был принят международный стандарт *MPEG-1 ISO/IEC 11172-3*. К настоящему времени широкое распространение в радиовещании получили еще несколько стандартов *MPEG (MPEG-2 и MPEG-4)*. В США был разработан стандарт *Dolby AC-3 (A-52)*, решающий аналогичные задачи.

Практическая деятельность инженеров специальности «Инфокоммуникационные технологии (цифровое теле- и радиовещание)»

может быть связана с проектированием и эксплуатацией студий звукового и телевизионного вещания, устройств обработки и усиления ЗС. Требования, предъявляемые к современным музыкальным студиям, студиям записи, записывающим комплексам и телецентрам, неуклонно растут; совершенствуются аппаратный и микрофонный парки, меняются структурные и технологические схемы коммутации, разрабатываются новые акустические материалы для звукоизоляции и коррекции внутренней акустики. В связи с этим инженеру в области телекоммуникаций необходимо знать и понимать основные положения акустики помещений и применять эти положения при решении возникающих задач.

Основными объективными показателями, характеризующими акустические свойства помещений, являются время реверберации в диапазоне частот, спектр собственных частот как функция формы и линейных размеров помещения, временная структура запаздывающих сигналов, степень диффузности звукового поля, уровень проникающих шумов. От этих объективных показателей зависит субъективная оценка качества звучания речи и музыки, т. е. такие критерии, как прозрачность звучания, пространственное впечатление, тембральное окрашивание, громкость и другие в той или иной звуковой системе. В отличие от узкополосных телефонных трактов (0,3...3,4 кГц) эффективно воспроизводимый частотный диапазон в современных цифровых системах звукового вещания значительно шире (0,02...20 кГц). Требования к другим объективным показателям также заметно выше.

Основным, наиболее часто используемым параметром при интегральной оценке акустики помещения является стандартное время реверберации. Оно является функцией звукопоглощающих свойств материалов, покрывающих поверхности помещения, и материалов, из которых изготовлены предметы, находящиеся в помещении.

В данном учебно-методическом пособии по курсовому проектированию приведены теоретические сведения по акустике помещений, описана методика проектирования акустического оформления вещательных студий, приведена справочная информация для проектирования аппаратно-студийных блоков радиодома.

1 АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОМЕЩЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

1.1 Двойственная природа звука

Задачей акустики является изучение физической природы звука и проблем, связанных с его возникновением, распространением и восприятием. Реальные источники звука – музыкальные инструменты, голос, громкоговорители, источники шума (например транспорт и др.) – создают вокруг себя в окружающей среде звуковые поля сложной структуры, т. е. в пространстве происходит распространение звуковых волн (зон сжатия и разрежения); следовательно, в каждой точке среды изменяется во времени плотность и звуковое давление (интенсивность). Звуковые волны, передающие энергию и информацию от источника сигнала, иногда называют акустическими, или звуковыми сигналами. Если в любой точке звукового поля поставить измерительный прибор (например микрофон), то можно получить зависимость мгновенного изменения звукового давления от времени для данной точки среды. Эта зависимость называется осциллограммой. Следует отметить, что на выходе микрофона будет уже электрический сигнал, напряжение (мощность) которого изменяется пропорционально изменению звукового давления в акустическом сигнале. Обычно в технических приложениях, в частности при компьютерной обработке звуковых сигналов, используется запись зависимости усредненного за некоторый отрезок времени уровня звукового давления от времени. Такая зависимость называется уровнеграммой.

Любой звуковой сигнал имеет двойственную природу:

- с одной стороны, это объективный процесс волнового распространения энергии механических колебаний частиц в упругой среде (воздухе, жидкости, твердом теле);
- с другой стороны, это только те волновые процессы в упругой среде, которые воспринимаются слуховой системой и носят, таким образом, субъективный характер.

Таким образом, звук – это особый вид механических колебаний, способный вызывать слуховые ощущения. Под звуком мы обычно понимаем субъективные слуховые ощущения, обусловленные раздражением слуховых рецепторов изменениями давления в окружающей упругой среде, вызванными звуковой волной.

Поэтому акустика как наука о звуке является, с одной стороны, наряду с оптикой, термодинамикой, электромагнетизмом, одним из направлений физики (точнее – механики), которое занимается проблемами создания и распространения механических колебаний; с другой стороны, поскольку занимается и проблемами восприятия звука, она тесно связана с психофизикой, музыкальной психологией, теорией музыки и др.

В сферу интересов современной акустики входят три главные проблемы:

1) возникновение звука, что требует изучения физической природы звука, а также методов и средств его создания. Этими вопросами занимается акустика музыкальных инструментов, акустика речи, электроакустика и др.;

2) передача звука от источника к слушателю – это задачи архитектурной акустики, электроакустики и др.;

3) восприятие звука слуховой системой и связь субъективных слуховых ощущений с объективными параметрами звука – это задачи психоакустики.

Слуховая система человека воспринимает только ограниченный класс механических колебаний среды, находящихся в определенных пределах по уровню громкости (изменение уровня звукового давления от 0 до 120 дБ) и по высоте (изменение частоты от 20 до 20 000 Гц). В этом отношении человек сильно уступает другим биологическим субъектам (например, диапазон слышимых частот дельфина достигает 110 кГц).

Музыкальная акустика является одним из направлений акустики. Она занимается всем комплексом проблем, связанных с созданием звуков, используемых в музыке и пении, передачей слушателю и их слуховым восприятием. Современная музыкальная акустика представляет собой в широком смысле слова синтез различных направлений науки и техники: акустики речи и пения; акустики музыкальных инструментов (в т. ч. электронных); электроакустики (в т. ч. систем звукозаписи, звукопередачи и звуковоспроизведения); архитектурной акустики (в т. ч. акустики концертных залов, театров, студий и других помещений, а также техники звукоусиления и озвучивания в них); психоакустики и др. ЗС (музыка, речь, шум и др.), поступающий на вход слуховой системы, имеет определенные физические характеристики (объективно измеряемые параметры): интенсивность, частота, длительность, спектр, расположение в пространстве и др. Этот же сигнал вызывает определенные субъективные ощущения. Они могут характеризоваться такими субъективными параметрами, как высота, громкость, тембр, маскировка, локализация и т. д. Установление связей и определение количественных соотношений между ними и является одной из основных задач психоакустики.

Одной из главных задач музыкальной акустики является изучение законов распространения звуков, так же как и законов их создания и восприятия. В сферу интересов музыкальной акустики входят музыкальные и речевые сигналы, распространяющиеся в основном в закрытых помещениях (концертных и театральных залах, речевых аудиториях, студиях и т. д.), хотя и в условиях открытых пространств также исполняются музыкальные произведения (на открытых эстрадах, стадионах и др.).

Проблемами распространения звука в закрытых и открытых пространствах занимается архитектурная акустика. Однако основные сведения об акустике концертных, театральных залов, студий и других помещений являются также необходимым элементом изучения музыкальной акустики, поскольку нельзя не учитывать огромное влияние, которое оказывает

окружающее пространство на исполнение и восприятие музыкальных и вокальных произведений.

1.2 Студии и студийные аппаратные

В состав радиодома входит аппаратно-студийный комплекс (АСК), предназначенный для решения технических задач по созданию программ. АСК – это совокупность взаимосвязанных функциональных блоков и служб, размещенных в одном или нескольких зданиях и содержащих технические средства, с помощью которых реализуется технологический процесс формирования и выпуска программ звукового и телевизионного вещания. В общем случае АСК содержит аппаратно-студийные блоки (АСБ), в которых создаются отдельные части программ.

В состав каждого аппаратно-студийного блока (АСБ) входят студия и студийная аппаратная. Иногда при студии оборудуют две аппаратные – аппаратную звукозаписи (АЗ) и аппаратную вещания (АВ), несколько различающиеся составом оборудования. В АЗ чаще используют многодорожечные аналоговые или цифровые магнитофоны. Это позволяет отдельно записывать партии отдельных инструментов или групп инструментов, а потом объединять («сводить») фонограммы, вводя при этом в каждый тракт свои преобразования сигналов и регулируя соотношения «звучностей» инструментов и групп инструментов. Иногда звучание голосов солистов записывают позже, но синхронно со звучанием аккомпанирующего ансамбля. Помимо пульта, контрольных громкоговорящих агрегатов и магнитофонов аппаратная комплектуется стойкой устройств звуковых эффектов. В АВ для быстрого введения в передачу сигналов от различных внешних источников – трансляционной аппаратной, автоматической телефонной станции (АТС), междугородной телефонной станции (МТС) – помещают стойку оперативной коммутации. При АВ оборудуют телефонные кабины, предназначенные для приема вопросов от слушателей, т. е. для диалога с ними. Чтобы создать звукорежиссеру или режиссеру, ведущему передачу, более спокойную обстановку для работы, АВ иногда разделяют на две части – режиссерскую и техническую. Студия связана с режиссерской, а она, в свою очередь с технической аппаратной звукопроницаемым окном. В режиссерской комнате (иногда называют контрольной комнатой) размещается микшерный пульт, контрольные акустические агрегаты, цифровые звуковые станции, процессоры обработки звука, магнитофоны и другая дополнительная аппаратура. Требования к акустическим характеристикам контрольной комнаты формируются исходя из необходимости обеспечения приемлемых условий для слухового контроля качества музыкальных и речевых записей.

Контрольные комнаты должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- позволять слышать неискаженный звук контрольных акустических систем;
- не вносить существенных искажений в структуру реверберационного процесса студии, где была произведена запись звука;
- обеспечивать возможность звукорежиссеру услышать и сформировать пространственный звуковой образ, который он хочет передать слушателю;
- быть звуконепроницаемыми (изнутри и снаружи) для обеспечения низкого уровня шумов;
- позволять звукорежиссеру видеть музыкантов, т. е. иметь звуконепроницаемое окно в студию.

В технической комнате располагают дополнительные магнитофоны, стойки коммутации и измерений, стойки с усилителями, щиток питания и др. Для улучшения звукоизоляции студия связана с аппаратной и другими помещениями через тамбур.

Требования к акустическим характеристикам студий и аппаратных (контрольных комнат) все время возрастают, поскольку они в значительной степени определяют качество музыкальных и речевых программ, поступающих к слушателям с помощью современных средств радиовещания, звукозаписи, телевидения и мультимедиа.

Влияние помещения на звуковой сигнал можно рассматривать как его обработку особым пространственным фильтром. Помещение производит линейную фильтрацию сигнала, в результате которой меняется его временная структура и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) (следовательно, и тембр), а также баланс громкостей, пространственные характеристики и др. Следует отметить, что при обычных уровнях звукового давления (в залах с естественной акустикой) помещение можно рассматривать как линейную систему, однако, как показали последние исследования, в современных залах с мощными системами озвучивания (например дискотеках) начинают проявляться нелинейные свойства воздушной среды и, т. о., могут возникнуть не только линейные, но и нелинейные искажения сигнала.

Все студии можно классифицировать:

- по применению: студии звукозаписи, радиовещательные и телевизионные звуковые студии, тонателье на киностудиях и т. д.;
- по виду используемого для записи звукового материала: большие музыкальные, камерные, литературно-драматические и речевые;
- по количеству исполнителей, т. е. по объему: большие, средние, малые и др.

Часто одна и та же студия предназначена для записи речи и музыки разных жанров, поэтому в ней должна быть предусмотрена возможность перестройки акустического оформления. С другой стороны, студии часто строятся специально для записи определенного типа программ: для вокала, речи, камерных ансамблей, оркестра и т. д. Соответственно, требования к их акустическим характеристикам должны отличаться. Обеспечение необходимых параметров, прежде всего оптимального времени реверберации, накладывает определенные ограничения на форму и размер студий. Удельный объем на

одного исполнителя должен составлять примерно $10...18 \text{ м}^3$. Запись музыки в студиях малого объема неизбежно приводит к искажению тембра за счет резонансов помещения в слышимой области, нарушению пространственной панорамы и баланса громкости. Минимальный объем студии для записи музыкальных произведений должен быть не менее 200 м^3 .

Задачи анализа акустики помещений (студий, концертных, театральных залов и др.) включают в себя ряд взаимосвязанных проблем: исследование физических процессов формирования звуковых полей в помещениях различной формы; установление связей объективных акустических параметров с субъективными оценками слушателей; создание методов расчета и проектирования и пр. Все эти проблемы активно исследовались на протяжении длительного периода и находятся в настоящее время на разной стадии изученности.

Объективные параметры, полученные с помощью волновой, статистической или геометрической теории, такие как время реверберации, структура резонансных частот, время и направления прихода ранних отражений и др., являются основой для оценки акустических свойств различных помещений (концертных залов, студий, театральных залов, аудиторий и др.).

1.3 Основные теоретические подходы, используемые для расчета акустических свойств помещения

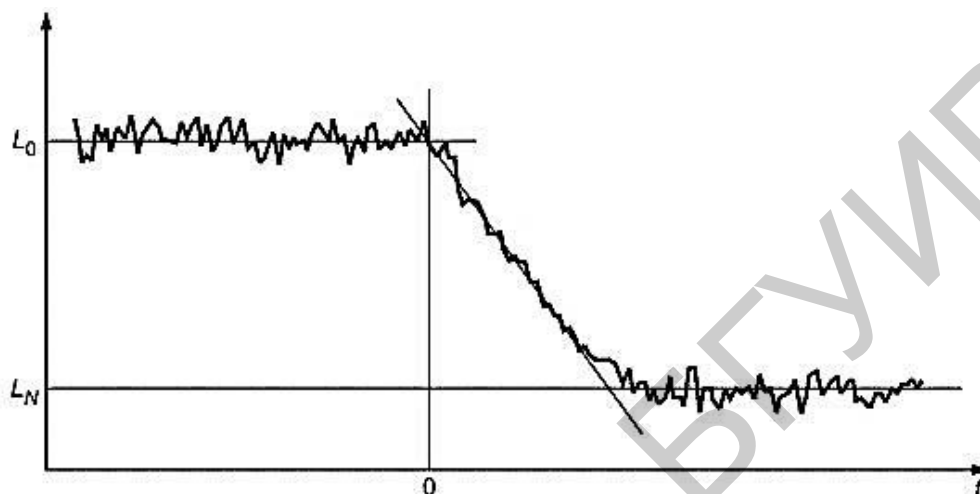
1.3.1 Статистическая теория

В статистической теории прежде всего обращают внимание на особенности постепенного уменьшения энергии звуковых волн, многократно отраженных поверхностями помещения. Этот процесс происходит после прекращения действия источника звука. Идеализируя, этот процесс считают в первом приближении непрерывным. В полулогарифмическом масштабе эта зависимость отображается прямой линией (рисунок 1.1). Предпосылкой к такому рассмотрению является выполнение двух условий:

- все направления распространения волн равновероятны;
- плотность звуковой энергии ($\epsilon = E/V$ или $\epsilon = I_{зв}/C_{зв}$, где E и $I_{зв}$ – соответственно энергия и интенсивность звуковой волны; V и $C_{зв}$ – объем помещения и скорость распространения звуковой волны) в каждой точке пространства помещения одинакова.

В архитектурной акустике большее внимание уделяется переходному (нестационарному) процессу установления стационарного звукового поля. Этот процесс начинается после прекращения действия источника звука ($t = 0$ на рисунке 1.1). В ходе этого процесса, который называется реверберационным, происходит постепенное уменьшение звукового давления и, соответственно, звуковой энергии в помещении.

Реверберация существенно влияет на качество речевых и музыкальных сигналов. Чрезмерная длительность (замедленность) реверберации приводит к тому, что новые слоги речи звучат на фоне предыдущих затухающих слогов. Разборчивость речи при этом ухудшается. При коротком отзвуке разборчивость речи вполне удовлетворительна, но своеобразная «безжизненность», «стерильность» такого звучания также воспринимается как недостаток, особенно при художественном чтении.



L_0 – установившийся уровень сигнала перед выключением источника возбуждения; L_N – уровень фонового шума

Рисунок 1.1 – Типичная зависимость уровня звукового давления в помещении от времени при выключении источника шумового сигнала

Еще большее значение имеет процесс реверберации (отзвука) при слушании музыки. Каждая музыкальная фраза представляет собой обычно последовательность звуковых импульсных сигналов. Затянутый отзвук нарушает естественное звучание музыки тем сильнее, чем быстрее темп исполнения, т. к. звуки как бы «набегают» друг на друга. Наоборот, при очень коротком отзвуке или его отсутствии (при исполнении на открытом воздухе), музыка звучит сухо. Утрачивается слитность звучания. Лишь при некотором вполне определенном для каждого стиля исполнения времени отзвука образуется необходимая связность звучания, создающая наилучший эстетический эффект.

Рассмотрим процессы, происходящие в помещении при звучании источника (И) (рисунок 1.2). Первым в точку приема Пр, где находится слушатель или установлен микрофон, приходит по пути 1 прямой звук, затем по пути 2 звуки, отраженные от ближайших к источнику поверхностей, далее звуки по пути 3, отраженные от удаленных поверхностей (первые отражения). Позже приходят звуки, претерпевшие двукратные отражения на пути 4 (вторые отражения), и т. д. Количество отражений в единицу времени возрастает пропорционально второй степени времени. Помещение постепенно заполняется

звуковой энергией. После выключения источника (И) сигнала начинается процесс реверберации. В той же последовательности, как и при включении источника, первыми в точку приема приходят сравнительно редкие начальные отражения. Далее плотность запаздывающих импульсов увеличивается, а их энергия постепенно уменьшается (рисунок 1.3). Колебания, отраженные 1...4 раза, называются ранними отражениями, остальные быстро затухают и формируют вторую часть отклика (т. н. реверберационный «хвост»).

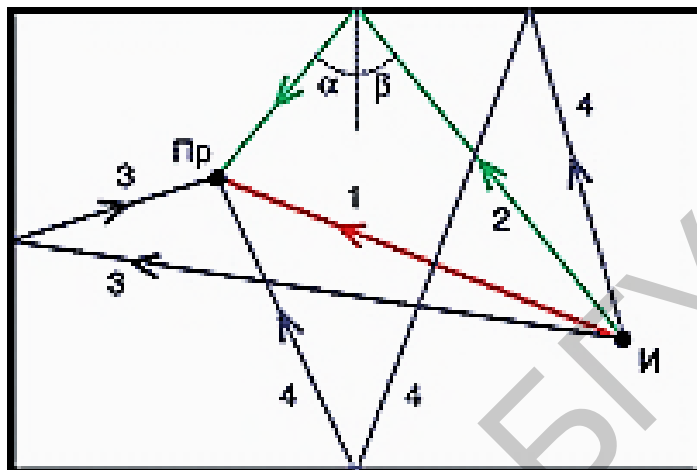


Рисунок 1.2 – Прямой и отраженные сигналы

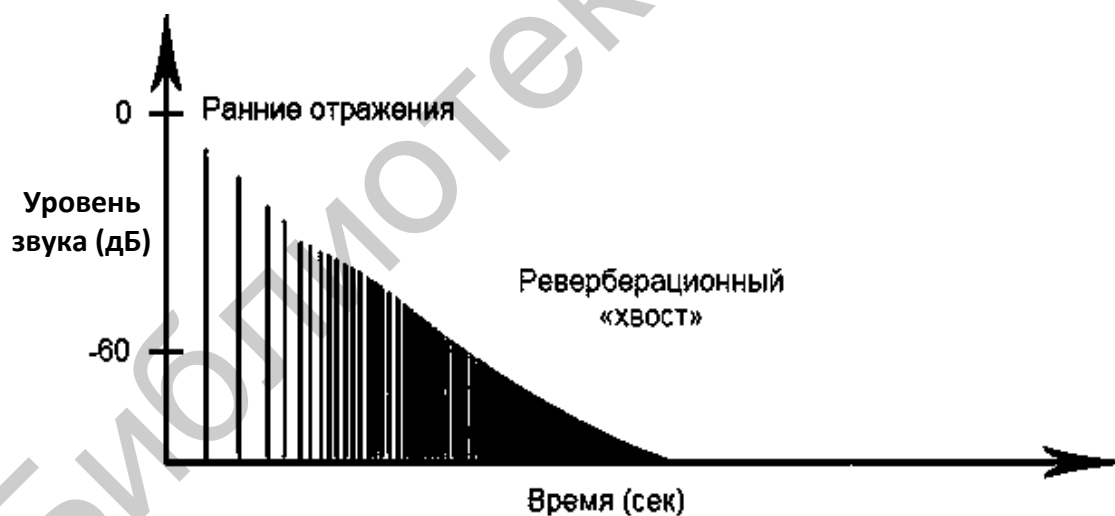


Рисунок 1.3 – Структура реверберационного процесса в помещении

Статистическая теория занимается именно этой, второй частью отзвука с повышающейся плотностью импульсов во времени при одновременном уменьшении их энергии. Прямой звук и начальные, сравнительно редкие отражения не являются определяющими в статистической теории.

Метод, предложенный американским ученым У. Сэбином, основан на модели идеального помещения, в котором звуковое поле после прекращения

действия звукового сигнала может быть рассчитано на основе статистического рассмотрения процесса затухания звука. При этом предполагается, что амплитуды и фазы отраженных звуковых волн распределены хаотически, т. е. в волновом движении нет преобладающих направлений потоков энергии и симметрии в распределении амплитуд. Принятое допущение позволяет считать, что средние значения звуковой энергии по различным направлениям одинаковы, т. е. звуковое поле изотропно, и средняя по времени плотность звуковой энергии в любой точке помещения также одинакова. Такое звуковое поле называют диффузным. Его рассмотрение дало возможность пренебречь явлениями интерференции и применить при расчетах энергетическое суммирование. Дальнейшие исследования показали, что для помещений, линейные размеры которых велики по сравнению с длиной волны, такой подход дает удовлетворительные результаты.

Методами математической статистики в диффузном поле определяют среднюю длину пробега звукового луча между двумя отражениями. Для помещения в форме прямоугольного параллелепипеда с линейными размерами, близкими к золотому сечению (длина относится к ширине и к высоте, как примерно 5 : 3 : 2), статистически определенная средняя длина свободного пробега звукового луча

$$l_{\text{ср}} = 4V/S, \quad (1.1)$$

где V – объем помещения;

S – общая площадь всех ограничивающих поверхностей (пола, потолка, стен).

Впоследствии было установлено, что полученная зависимость примерно сохраняется для помещений, линейные размеры которых отклоняются от золотого сечения, а также для помещений более сложной формы.

При каждом отражении часть падающей энергии поглощается преградами и превращается в тепло. Процесс постепенного уменьшения плотности звуковой энергии У. Сэбин назвал реверберацией (от англ. *reverberation* – отражение, отзвук). За длительность процесса, реверберации (т. н. стандартное время реверберации) было принято считать промежуток времени, за который плотность звуковой энергии уменьшается в 10^6 раз, звуковое давление – в 10^3 раз, а уровень звукового давления – на 60 дБ.

Разумеется, все это справедливо при отсутствии акустических шумов (помех). При наличии шума (обычно с уровнем 30...40 дБ), что характерно и для жилой комнаты и для концертного зала, значительная часть отзвука будет маскироваться и продолжительность слышимого процесса реверберации значительно снизится.

Для экспериментального определения времени реверберации У. Сэбин пользовался органными трубами (источник звука) и секундомером. Он установил, что время реверберации T_p прямо пропорционально объему

помещения V и обратно пропорционально произведению среднего коэффициента поглощения $\alpha_{\text{ср}}$ и площади всех преград S :

$$T_p = kV/(\alpha_{\text{ср}}S). \quad (1.2)$$

Средний коэффициент поглощения равен

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots}{S} = \sum_i^n \frac{\alpha_i S_i}{\sum_i^n S_i}, \quad (1.3)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – коэффициенты поглощения различных материалов;

$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$ – общая площадь преград;

n – количество различных преград.

Из этого выражения можно заключить, что средний коэффициент поглощения соответствует единому материалу, которым можно было бы покрыть все поверхности преград помещения с сохранением общего звукопоглощения $A = \alpha_{\text{ср}}S$. Единицей поглощения считают 1 м^2 открытого проема, полностью поглощающего всю падающую на него энергию (без учета дифракции). Эту единицу называли сэбин (Сб).

По измерениям времени реверберации в пяти различных помещениях в форме прямоугольного параллелепипеда и объемами от 96 до 1960 м^3 У. Сэбин принял значение коэффициента $k = 0,164$ (это число примерно равно хорошо запоминающейся дроби $1/6$). При теоретическом выводе формулы для расчета времени реверберации было получено значение $k = 0,161$, которое и указывается в большинстве учебников. Чтобы согласовать физические размерности в левой и правой частях формулы, было решено придать коэффициенту k размерность с/м.

В дальнейшем было обнаружено, что k различно для помещений разной формы. Измеренные значения k приведены в таблице 1.1.

Из приведенных примеров видно, что форма помещения влияет на значение времени реверберации, хотя из структуры самой формулы У. Сэбина это не вытекает. Дело в том, что от соотношения линейных размеров зависит средняя длина пробега между двумя отражениями $l_{\text{ср}}$, следовательно, зависит и время реверберации T_p .

Теоретический вывод формулы У. Сэбина основан на предположении о диффузном, равномерном распределении звуковой энергии по пространству помещения и о непрерывном поглощении энергии преградами в процессе реверберации.

Таблица 1.1 – Значение коэффициента k в зависимости от формы помещения

| Форма помещения | Значение коэффициента k |
|---|---------------------------|
| Крестообразное в плане, с куполообразным потолком | 0,177 |
| Близкое к золотому сечению | 0,164 |
| Трапецевидное в плане, театрального типа | 0,160 |
| Кубической формы | 0,157 |
| Очень широкое в плане, с низким потолком | 0,152 |

Это допущение дает сравнительно небольшое отклонение рассчитанной величины T_p от измеренной, если средний коэффициент поглощения мал, и поэтому количество отражений получается достаточно большим, чтобы пренебречь дискретностью этого процесса.

Поглощение звука означает, что материал поглощает по крайней мере часть энергии звуковой волны (превращает в тепло), а оставшаяся часть энергии отражается назад в помещение. Коэффициент звукопоглощения α является, таким образом, отношением внутренне поглощенной материалом звуковой энергии к энергии падающей волны. Поэтому большое открытое окно является, например, отличным звукопоглотителем, поскольку практически не отражает звук обратно в помещение. А вот кирпичная стена, наоборот, является очень плохим звукопоглотителем, поскольку она отражает большую часть звуковой энергии обратно в помещение.

Приведем некоторые численные значения α . Минеральная вата средней плотности толщиной около 3 см имеет $\alpha = 0,8$, однако только на средних и высоких частотах. При этом 20 % звуковой энергии отражается обратно в помещение. Открытое окно имеет $\alpha = 0,99$, т. е. обратно в помещение отражается только 1 % энергии. Кирпичная стена имеет $\alpha = 0,03$, т. е. 97 % энергии звуковых волн отразится обратно в помещение. Поэтому с точки зрения звукопоглощения на первом месте открытое окно, затем минеральная вата и кирпичная стена.

Однако, если рассматривать эти материалы с точки зрения звукоизоляции, ситуация изменится. Открытое окно практически не создает звукоизоляции, за исключением разве что тех частот, длина волны которых превышает самый большой размер оконного проема. Трехсантиметровый слой минеральной ваты создаст звукоизоляцию около 3 дБ, хотя на низких частотах звукоизоляции практически не будет. А вот кирпичная стена создаст более 40 дБ звукоизоляции. Необходимо понимать принципиальное различие между коэффициентом звукопоглощения и звукоизоляционными свойствами материала, т. е. между звукопоглощением и звукоизоляцией.

Имеется одна существенная особенность, связанная с поглощением звуковой энергии в помещении. На самом деле звуковая энергия поглощается преградами не непрерывно, а скачками, по мере достижения волной той или

иной поверхности. Поэтому вполне равномерного заполнения энергией всего объема помещения не будет.

Более точные исследования реверберации были проведены в 1929 г. К. Шустером и Е. Ветцманом, а в 1930 г. – Н. Эйрингом. Формула Н. Эйринга имеет вид

$$T_p = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_{\text{ср}})} \quad (1.4)$$

Разложив выражение $\ln(1 - \alpha)$ в ряд и оставив в нем ввиду малости α только первый член, обнаружим, что при небольших значениях α формула Н. Эйринга переходит в формулу У. Сэбина. Действительно,

$$\ln(1 - \alpha_{\text{ср}}) = -\alpha - \frac{1}{2}\alpha^2 + \frac{1}{3}\alpha^3 - \dots \approx -\alpha \quad (1.5)$$

Объясним смысл знака минус в знаменателе формулы. Логарифм чисел меньше единицы имеет отрицательное значение. Знак минус введен, чтобы исключить отрицательное значение T_p .

Выражение, стоящее в знаменателе, является эквивалентом общего поглощения $A = \alpha_{\text{ср}}S$, содержащегося в формуле У. Сэбина.

Сравнивая формулы У. Сэбина и Н. Эйринга, приходим к выводу, что приближение У. Сэбина дает завышенное значение T_p . Расхождение увеличивается с возрастанием $\alpha_{\text{ср}}$ (таблица 1.2).

При значении $\alpha_{\text{ср}} = 1$ получается физически нереальный результат: $T_p = = V/6S$, хотя в этом случае должно быть $T_p = 0$.

Таблица 1.2 – Завышение времени реверберации с увеличением $\alpha_{\text{ср}}$

| | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|
| $\alpha_{\text{ср}}$ | 0,2 | 0,5 | 0,8 |
| Завышение T_p , % | 11 | 37 | 100 |

Формулы У. Сэбина и Н. Эйринга могут быть применены, если звукопоглощающие материалы распределены по ограждающим помещению поверхностям достаточно равномерно, чтобы можно было пользоваться понятием среднего коэффициента поглощения.

Для оптимизации акустических условий в концертных залах рекомендуется $\alpha_{\text{ср}} = 0,19$. Поэтому вполне допустимо время реверберации в этом случае рассчитывать по формуле У. Сэбина.

При выводе формулы У. Сэбина и Н. Эйринга приняты некоторые допущения, которые редко оговариваются в литературе по акустике.

Формула У. Сэбина получена в предположении, что волны падают на преграды под любыми углами, а при выводе формулы Н. Эйринга принято, что волны падают на преграды под углами, близкими к нормали. Поэтому, строго

говоря, в формулу У. Сэбина следовало бы подставлять значения коэффициента поглощения, определенные в диффузном поле, в реверберационной камере, а в формулу Н. Эйринга – значения коэффициента поглощения, измеренные в плоском поле, при нормальном падении, т. е. в трубе.

При очень неравномерном распределении общего поглощения результат, вычисленный по формуле Н. Эйринга, может оказаться далеким от измеренного. Г. Миллингтон объяснил причину этого расхождения. Н. Эйринг полагал, что число отражений от разных поверхностей с площадями S_1, S_2, \dots одинаково. В действительности вероятность числа отражений от данной поверхности тем больше, чем больше сама поверхность. На основании этих соображений Г. Миллингтон вывел иную формулу для расчета времени реверберации:

$$T_p = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{\sum S_i \ln(1-\alpha_i)}, \quad (1.6)$$

где S_i – площадь материалов с коэффициентами поглощения α_i .

Недостаток формулы Г. Миллингтона заключается в следующем: вычисленное значение времени реверберации получается равным нулю, если хотя бы один элемент преграды, как бы он ни был мал, имеет $\alpha_{cp} = 1$. По-видимому, при выводе формулы было принято какое-то сомнительное допущение. Впрочем, парадоксального результата легко избежать, приняв, что ни один коэффициент поглощения не равен единице.

Практика показала, что для помещений с небольшим α_{cp} (театральные и концертные залы, учебные аудитории и т. п.) все три формулы дают одинаково удовлетворительный результат. Для помещений со средними коэффициентами затухания (например студии) более близкими к измеренным оказываются значения времени реверберации, рассчитанные по формуле Н. Эйринга. Если материалы имеют сильно различающиеся α_i , а сами материалы распределены по поверхностям неравномерно, более близкими к измеренным получаются значения T_p , рассчитанные по формуле Г. Миллингтона. Используя названные формулы, необходимо принять те значения α , которые были рассчитаны с помощью этих же формул при обработке экспериментального материала, полученного в звукомерной камере. Коэффициенты поглощения материалов определяют измерениями в «гулкой» (реверберационной) камере. Обозначим объем камеры через V , а ее время реверберации через T_0 . После внесения в камеру исследуемого материала с площадью S_M время реверберации уменьшается до T_M . Тогда

$$\alpha = \frac{1}{6} \frac{V}{S_M} \cdot \left[\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right]. \quad (1.7)$$

Если площадь исследуемого предмета (например, стола, кресла и т. д.) не может быть выражена определенным числом, находят поглощение предмета:

$$A = \frac{V}{6} \cdot \left[\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_0} \right]. \quad (1.8)$$

Таким образом, с помощью вышеприведенных формул У. Сэбина и Н. Эйринга решают обратную задачу: определяют α или A по измеренному времени реверберации.

П. Сэбин – двоюродный брат У. Сэбина – в 1929 г. заметил, что влажность воздуха в измерительной камере значительно влияет на время реверберации на частотах более 2 кГц. Э. Майер обнаружил тот же эффект для частот выше 3,2 кГц. Более точное исследование этого явления было сделано в 1931 г. В. Кнудсенем. Он определил, что поглощение звука в сухом воздухе больше, чем во влажном, а на верхних звуковых частотах больше, чем на нижних. Только тогда, когда относительная влажность становится равной 100 % и появляется туман, поглощение звука в воздухе сильно увеличивается, причем для всех частот.

Поглощение звука вызвано вязкостью и теплопроводностью воздуха, а также молекулярными потерями. Оно становится заметным на частотах более 2 кГц в помещениях объемом свыше 2000 м³ и растет примерно пропорционально квадрату частоты. С учетом этого обстоятельства формула Н. Эйринга приобретает следующий вид:

$$T_p = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha_{cp}) + 4\mu V}. \quad (1.9)$$

Заменяв натуральный логарифм на десятичный, получим формулу с иными числовыми коэффициентами, более удобную для расчетов:

$$T_p = \frac{0,07V}{-S \lg(1 - \alpha_{cp}) + 1,74\mu V}. \quad (1.10)$$

Коэффициент μ – показатель затухания в воздухе, имеющий размерность м⁻¹, определяют по графикам, приведенным в руководствах и учебниках по акустике. Он возрастает с увеличением частоты и уменьшением влажности. Поправка на затухание звука в воздухе пропорциональна объему, поскольку звуковая энергия ослабляется по всему пространству помещения. По данным И. Дрейзена в больших студиях уже на частоте 4 кГц поглощение звука в воздухе достигает 1/3...1/4 общего звукопоглощения. В помещениях с объемом более 2000 м³ с ростом частоты второе слагаемое в знаменателе (1.10) начинает все больше преобладать над первым.

Это означает, что время реверберации на верхних частотах в помещениях большого объема определяется климатическими условиями в помещении, т. е. температурой и относительной влажностью.

Оценим на нескольких примерах влияние на время реверберации поглощения звука в воздухе.

Имеется помещение объемом 1000 м^3 и площадью преград 700 м^2 . Пусть на частоте 4 кГц коэффициент поглощения $\alpha_{\text{ср}} = 0,15$. Без учета поглощения в воздухе

$$T_p = \frac{1}{6} \cdot \frac{1000}{-700 \ln(1-0,15)} = 1,45 \text{ с.} \quad (1.11)$$

При температуре воздуха $21 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности 70, 40 и 20 % значения μ будут соответственно равны 0,05; 0,01 и 0,02, а время реверберации – 1,23; 1,05 и 0,84 с (снижается весьма заметно). Поэтому поддерживать постоянными климатические параметры в студии необходимо не только для того, чтобы исполнители чувствовали себя хорошо, но и чтобы были стабильными акустические условия в студии, другими словами, чтобы частотная характеристика времени реверберации не претерпевала изменений.

Следует отметить, что вследствие сезонной акклиматизации человеческого организма комфортные условия несколько меняются: летом желательна температура $22...25 \text{ }^\circ\text{C}$ при относительной влажности 60...45 %, для зимы – $20...23 \text{ }^\circ\text{C}$ при относительной влажности 70...50 %.

Рассмотрим ограничения на использование расчетов, основанных на статистической теории, по диапазону частот и объему помещений.

Частотный диапазон слышимых звуков простирается от 20 до 20 000 Гц. Между тем акустические расчеты проводятся для интервала, ограниченного частотами 100...4000 Гц. Причина ограничения по верхним частотам очевидна. На частотах более 4 кГц в помещениях большого объема трудно разделить составляющие поглощения, обусловленные материалами и воздухом. Поэтому достоверные данные о коэффициентах поглощения материалов на более высоких частотах отсутствуют. Так же трудно, если не невозможно вовсе, получить достоверные данные о коэффициентах поглощения на частотах ниже 100 Гц. Нижний предел применения статистических методов по объему помещения обусловлен тем, что при размерах преград, соизмеримых с длиной падающих волн, процесс их отражения значительно усложняется.

Для оценки нижней границы по объему в помещениях малого объема пользуются соотношением

$$\sqrt[3]{V} < \lambda, \quad (1.12)$$

где λ – длина волны возбуждающего колебания.

Спектр собственных частот имеет дискретную структуру. Вследствие этого отдельные частоты составляющего спектра возбуждающего колебания усиливаются, что сопровождается искажением тембра звучания. Если выполняется условие $\sqrt[3]{V} > \lambda$, то плотность спектра собственных частот помещения настолько высока, что частоты возбуждающего колебания практически не отличаются от частоты собственного колебания. Поэтому усиление отдельных компонентов спектра сигнала за счет резонансов воздушного объема помещения не происходит.

В тех случаях, когда объем помещения достаточно велик и, соответственно, выполняется условие $\sqrt[3]{V} > \lambda$, можно не считаться с дискретностью спектра собственных частот. В этом случае к анализу временной структуры звукового поля можно подойти с позиции геометрической акустики.

В статистической теории не рассматривается соотношение между энергией прямого и диффузного звука, не учитываются начальные, сравнительно редкие отражения, направленные потоки энергии и фокусировка звука. Сфера ее рассмотрения – достаточно плотный временной ряд отражений, создающий слитную последовательность запаздывающих звуков. Ее выводы тем точнее, чем дальше находится точка наблюдения от точки расположения источника звука.

Статистическая теория имеет ряд уязвимых мест. Некоторые ее положения не находят подтверждения в повседневной практике, расходятся с ней. Она не объясняет акустических процессов на очень низких и очень высоких звуковых частотах, в небольших и очень больших помещениях, в помещениях с резким преобладанием какого-то линейного размера, с неравномерным распределением звукопоглощающих материалов.

Несмотря на это, она является действенным инструментом исследования и проектирования помещений, поскольку дает числовые значения параметров, характеризующих акустику помещений. Важно знать ее сильные и слабые стороны, с пониманием и осторожностью применять расчетные формулы.

1.3.2 Волновая теория

В статистической теории отзвук рассматривается как затухание последовательного ряда отраженных звуковых импульсов, излученных источником звука. Подразумевается, что форма импульсов, следовательно, и их спектр, заданные источником звука, при отражениях остаются неизменными. Такое представление вызвало сомнения принципиального характера: ведь замкнутый воздушный объем помещения, если его размеры соизмеримы с длиной волны или больше ее, следует рассматривать как колебательную систему с распределенными параметрами, которая обладает спектром собственных (резонансных) частот. После прекращения действия источника звука, поддерживающего вынужденные колебания воздуха в помещении, в системе совершаются только собственные колебания, они затухают по мере

поглощения энергии. В явлении реверберации нет места остаточному колебательному процессу, навязанному ранее действием вынуждающей внешней силы. Отзвук – собственное затухающее колебание воздушного объема с частотами, зависящими от размеров и формы помещения.

Следовательно, сутью реверберации являются не многократные отражения, а постепенно затухающие собственные колебания объемного резонатора, не зависящие от внешних влияний.

Такой взгляд был положен в основу волновой теории акустических процессов в помещении. Идеи, положенные в основу волновой теории, были впервые высказаны Дж. В. Стреттом (лордом Рэлеем). В своей книге «Основы акустики», изданной в 1877 г., он приводит необходимый математический аппарат со ссылкой на решение волнового уравнения для трехмерного пространства, полученное французским математиком Ж.-М. Дюамелем в 1849 г. Ж.-М. Дюамель вывел выражение для собственного периода $1/f_{pgn}$ объемного резонатора в форме прямоугольного параллелепипеда, в котором длина волны равна

$$\lambda_{pgn} = \frac{c_{зв}}{f_{pgn}} = 2 / \sqrt{\left(\frac{p}{l}\right)^2 + \left(\frac{g}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2}. \quad (1.13)$$

Отсюда

$$f_{pgn} = \frac{c_{зв}}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{l}\right)^2 + \left(\frac{g}{b}\right)^2 + \left(\frac{n}{h}\right)^2}. \quad (1.14)$$

В приведенных выражениях l, b, h – линейные размеры, p, q, n – любые целые числа, $c_{зв}$ – скорость распространения звуковой волны. В зависимости от значений коэффициентов p, q, n принята следующая классификация типов образующихся стоячих волн:

- осевые, когда два из трех коэффициентов равны нулю;
- касательные, когда один из коэффициентов равен нулю;
- косые, когда ни один из коэффициентов не равен нулю.

Осевые волны отражаются только от одной пары противоположных параллельных преград (стен), касательные – от двух пар (т. е. устанавливаются в плоскости, параллельной третьей паре преград), косые – от всех пар преград. Для многих материалов коэффициенты поглощения зависят от угла падения волны на преграду. В связи с этим волны разных типов затухают с разной скоростью. Затухание получается наибольшим для косых волн и наименьшим для осевых. Поэтому, когда источник звука возбуждает колебания разных типов, то различные собственные колебания, даже с близкими частотами, будут затухать с неодинаковой скоростью. В результате кривая спада интенсивности звука не будет иметь регулярного вида, который предписывается статистической теорией. Крутизна спада уровня на разных стадиях отзвука

будет различной, и тогда теряется определенный смысл самого понятия времени реверберации. Процесс спада будет складываться из разных частных процессов и, значит, не будет изображаться экспоненциальной кривой, а будет следовать ей лишь в среднем. На него будут накладываться небольшие флуктуации, изображенные штриховой линией. Практика показывает, что наличие малых флуктуаций благоприятно сказывается на оценке качества звучания. Поэтому значение статистической теории не только не снижается, а, наоборот, приобретает новую опору в выводах волновой теории. Итак, в статистической теории ход спада интенсивности рассчитывается методами теории вероятности, «в среднем», а флуктуации фактического спада относительно усредненной формы определяются методами волновой теории.

Из волновой теории следует, что помещения простой правильной геометрической формы менее удовлетворяют условию диффузности поля, чем помещения сложной геометрической формы с непараллельными стенами, косо поставленными плоскостями или выпуклыми поверхностями, углублениями в виде кессонов. Разумеется, линейные размеры этих поверхностей должны быть соизмеримы с длиной волны или быть больше ее. Особенно выражены акустические резонансы в помещениях, имеющих совпадающие линейные размеры. В этом случае совпадают резонансные частоты, обусловленные стоячими волнами в разных плоскостях. Наихудшим в акустическом отношении является помещение кубической формы, наилучшим – помещение, пропорции которого приближаются к золотому сечению. Заключение, сделанное акустиками древности, нашло подтверждение в выводах волновой теории.

Волновая теория дала ответ на вопрос, имеющий практическое значение при сооружении различных залов и аудиторий: почему звукопоглощающие материалы, коэффициенты поглощения которых определены в звукомерной камере, ведут себя в помещении иным образом, как будто их коэффициенты поглощения отличаются от измеренных и указанных в справочниках.

Принципиальное различие подходов к объяснению акустических процессов заключается в том, что в одном случае процесс отзвука рассматривается с помощью теории вероятностей усредненно, а в другом с волновых позиций определяются отклонения фактического хода процесса от «среднего».

Из оптики известно, что при уменьшении длины волны волновые законы приближаются к законам геометрической оптики. Точно так же в помещениях, размеры которых весьма велики по сравнению с длиной волны, можно пользоваться законами геометрической оптики, строить пути звуковых лучей, находить точки фокусов, определять запаздывание начальных отражений, т. е. использовать весь арсенал геометрической теории.

1.3.3 Геометрическая (лучевая) теория

Геометрическая (лучевая) теория акустических процессов в помещениях основана на законах геометрической оптики. Движение звуковых волн

рассматривают подобно движению световых лучей. В соответствии с законами геометрической оптики при отражении от зеркальных поверхностей угол отражения равен углу падения, и падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости. Это справедливо, если размеры отражающих поверхностей много больше длины волны, а размеры неровностей поверхностей много меньше длины волны.

Характер отражения зависит от формы отражающей поверхности. При отражении от плоской поверхности (рисунок 1.4, а) возникает мнимый источник I' , место которого ощущается на слух подобно тому, как глаз видит мнимый источник света в зеркале. Отражение от вогнутой поверхности (рисунок 1.4, б) приводит к фокусировке лучей в точке I' . Выпуклые поверхности (колонны, пилястры, крупные лепные украшения, люстры) рассеивают звук (рисунок 1.4, в).

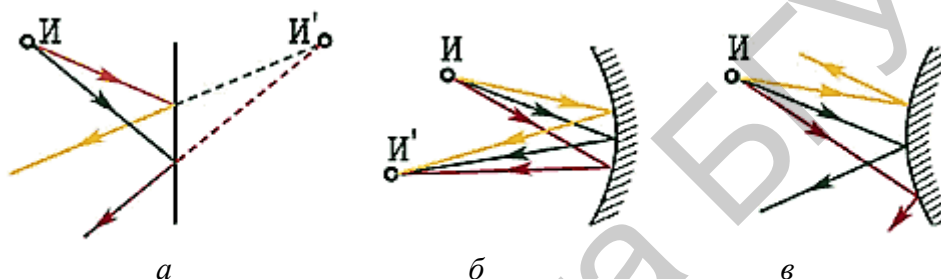


Рисунок 1.4 – Характер отражения при различной форме отражающей поверхности

Немаловажным для слухового восприятия является запаздывание отраженных звуковых волн. Звук, излученный источником, доходит до преграды (например стены) и отражается от нее. Процесс многократно повторяется с потерей при каждом отражении части энергии. На места слушателей (или в точку расположения микрофона) первые запаздывающие импульсы, как правило, приходят после отражения от потолка и стен зала (студии).

Вследствие инерционности слуха человек обладает способностью сохранять (интегрировать) слуховые ощущения, объединять их в общее впечатление, если они длятся не более 50 мс (точнее 48 мс). Поэтому к полезному звуку, подкрепляющему исходный, относятся все волны, которые достигают уха в течение 50 мс после исходного звука. Запаздыванию на 50 мс соответствует разница в пути 17 м. Концентрированные звуки, приходящие позднее, воспринимаются как эхо. Отражения от преград, укладываемые в указанный промежуток времени, являются полезными, желательными, они увеличивают ощущение громкости на значения, доходящие до 5...6 дБ, улучшают качество звучания, придавая звуку «живость», «пластичность», «объемность».

Существенную роль играет направление прихода начальных отражений. Если запаздывающие сигналы, т. е. все ранние отражения, поступают к слушателю с того же направления, что и прямой сигнал, слух почти не различает разницы в качестве звучания по сравнению со звучанием только прямого звука. Возникает впечатление «плоского» звука, лишенного объемности. Между тем даже приход только трех запаздывающих сигналов по разным направлениям, несмотря на отсутствие реверберационного процесса, создает эффект пространственного звучания. Качество звучания зависит от того, с каких направлений и в какой последовательности приходят запаздывающие звуки. Если первое отражение поступает с фронтальной стороны, звучание ухудшается, а если с тыльной стороны, то резко ухудшается.

Весьма существенно время запаздывания начальных отражений по отношению к моменту прихода прямого звука и относительно друг друга. Длительности запаздывания должны быть различными для наилучшего звучания речи и музыки. Хорошая разборчивость речи достигается, если первый запаздывающий сигнал поступает не позже 10...15 мс после прямого, а все три должны занимать интервал времени 25...35 мс. При звучании музыки наилучшее ощущение пространственности и «прозрачности» достигается, если первое отражение приходит к слушателю не ранее 20 мс и не позже 30 мс после прямого сигнала. Все три запаздывающих сигнала должны располагаться в промежутке времени 45...70 мс. Наилучший пространственный эффект достигается, если уровни запаздывающих начальных сигналов незначительно отличаются друг от друга и от уровня прямого сигнала.

При подключении к структуре начальных отражений (первого, второго, третьего) остальной части отзвука наиболее благоприятное звучание получается в том случае, когда вторая часть процесса начинается после всех дискретных отражений. Подключение же процесса реверберации (отзвука) сразу же за прямым сигналом ухудшает качество звучания.

При обеспечении оптимальной структуры начальных (ранних) отражений звучание музыки остается хорошим даже при значительном (на 10...15 %) отклонении времени реверберации от рекомендуемого. Достижение оптимального запаздывания отраженных сигналов по отношению к прямому звуку выдвигает требование к минимальному объему помещения, которое не рекомендуется нарушать. Между тем при проектировании помещения выбирают его размеры, исходя из заданной вместимости, т. е. решают задачу чисто экономически, что неправильно. Даже в небольшом концертном зале оптимальную структуру ранних отражений можно получить лишь при заданных высоте и ширине зала перед эстрадой, меньше которых спускаться нельзя. Известно, например, что звучание симфонического оркестра в зале с низким потолком существенно хуже, чем в зале с высоким потолком.

Чтобы добиться хорошей разборчивости речи, запаздывания должны быть сравнительно небольшими. При звучании музыки нужно подчеркнуть мелодическое начало, для обеспечения слитности звуков необходимо большее время запаздывания начальных отражений. Отсюда вытекают рекомендуемые

размеры концертных залов: высота и ширина не менее 9 и 18,5 м соответственно и не более (у портала) 9 и 25 м.

Увеличивать высоту и ширину зала в некоторой мере можно лишь на расстоянии от портала сцены (эстрады), превышающем примерно $1/4 \dots 1/3$ общей длины зала: высоту до 10,5 м, ширину до 30 м. Длину зала выбирают, учитывая необходимость получать на самых удаленных местах достаточную энергию прямого звука. Исходя из этого обстоятельства, рекомендуют выбирать длину зала по партеру не более 40 м, а по балкону – 46 м.

Рассмотренные выше теории с разных сторон объясняют акустические процессы, происходящие в помещениях. Из них только одна – статистическая – позволяет определить численно важную величину, характеризующую акустические свойства помещения, – время реверберации. Следует лишь сознательно, критически относиться к получаемой числовой оценке, понимать, что в большинстве случаев, особенно при рассмотрении крупных помещений, она носит ориентировочный характер.

По современным воззрениям принято разделять процесс отзвука, реверберации на две части: начальные, сравнительно редкие запаздывающие импульсы, и более уплотняющаяся во времени последовательность импульсов. Первую часть отзвука оценивают с позиций геометрической (лучевой) теории, вторую – с позиций статистической теории.

Геометрическая теория может быть использована для анализа акустических процессов в помещениях больших размеров – концертных и театральных залах, крупных студиях. Оптимальные размеры зала (студии) определяют на основе анализа начальных отражений. При проектировании больших помещений расчет времени реверберации может дать результат, значительно отличающийся от реального, и главное – эта величина не позволяет полностью оценить акустическое качество помещения. В такой оценке главную роль играют начальные отражения. Правильное временное соотношение начальных отражений обеспечивает высокое качество звучания даже тогда, когда время реверберации отличается от оптимального.

Статистическая и волновая теории особенно применимы к помещениям сравнительно малых размеров, например, к студиям звукового вещания и аудиториям различного назначения. Результаты этих теорий дополняют друг друга. Первая – дает возможность оценить время реверберации, вторая – рассчитать спектр собственных (резонансных) частот, скорректировать размеры помещения так, чтобы спектр собственных частот в области нижних частот был более равномерным.

2 ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ПОМЕЩЕНИЙ

2.1 Акустическое отношение и эквивалентная реверберация

Время стандартной реверберации является важным, но не исчерпывающим критерием акустического качества помещений. Этот параметр характеризует акустические свойства помещения в целом, в то время как слуховая оценка звучания на отдельных местах прослушивания может быть различной, что прежде всего обусловлено изменением соотношения плотностей звуковой энергии $\epsilon_{\text{пр}}$ прямого звука и энергии $\epsilon_{\text{отр}}$, приносимой в эту точку всей совокупностью отражений.

Если источник звука излучает сферические волны, то плотность звуковой энергии прямого звука в точке помещения, удаленной от него на расстояние r , определяется выражением

$$\epsilon_{\text{пр}} = I_{\text{зв.пр}}/c_{\text{зв}} = P_a/4\pi r^2 c_{\text{зв}}. \quad (2.1)$$

Плотность звуковой энергии $\epsilon_{\text{отр}}$ диффузной составляющей определим как часть установившейся плотности звуковой энергии ϵ_0 ,

$$\epsilon_0 = 4 P_a/(c_{\text{зв}}\alpha S), \quad (2.2)$$

где P_a – акустическая мощность;

αS – общее поглощение звуковой энергии ($\alpha S = A$).

Эта энергия остается в помещении после выключения источника звука через интервал времени $t_{\text{ср}}$ (т. е. после первого отражения от поверхностей помещения):

$$\epsilon_{\text{отр}} = \epsilon_0 \beta = 4 P_a / c_{\text{зв}}\alpha S (1 - \alpha), \quad (2.3)$$

где β – коэффициент отражения.

Величину, характеризующую соотношение плотности звуковой энергии прямого (2.1) и диффузного (2.3) звуков, называют акустическим отношением R :

$$R = \epsilon_{\text{отр}}/ \epsilon_{\text{пр}} = 16 \pi r^2 (1 - \alpha)/\alpha S. \quad (2.4)$$

Величина R зависит от частоты, т. к. коэффициент α частотно зависим. Изменение акустического отношения воспринимается при слуховой оценке как изменение времени реверберации. Для музыкальных программ акустическое отношение доходит до 6...8, в отдельных случаях до 10...12 (органная музыка).

При $R < 2$ музыкальное звучание кажется неестественно сухим. Для речевых программ обычно $R < 1$. Расстояние до источника звука, при котором $R = 1$, называется радиусом гулкости помещения: при больших расстояниях $\epsilon_{отр} > \epsilon_{пр}$ и в звучании появляется гулкость. Как видно из рисунка 2.1 (кривая 1), звуковая энергия в помещении при наличии в точке расположения микрофона прямого и отраженного звуков в момент времени t_1 изменяется скачкообразно, что обусловлено исчезновением поля прямого звука $\epsilon_{пр}$ при выключении источника. Размер этого скачка Δt определяется акустическим отношением. В идеальном диффузном поле $R = \infty$ ($\epsilon_{пр} = 0$) упомянутый скачок отсутствует (см. рисунок 2.1, кривая 3).

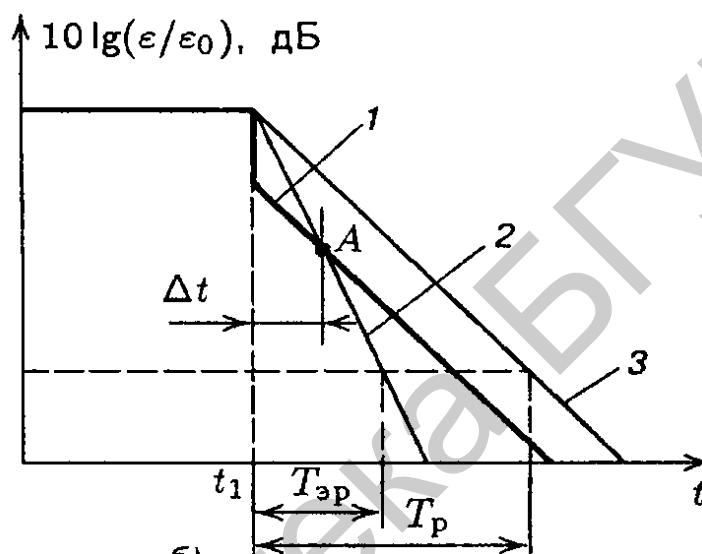


Рисунок 2.1 – Диаграмма, поясняющая оценку эквивалентного времени реверберации

Два процесса спадающей звуковой энергии в помещении – реальный со скачком уровня в момент t_1 (кривая 1 на рисунке 2.1) и без скачка (кривая 2 на рисунке 2.1) – оцениваются на слух как эквивалентные по гулкости, если точка их пересечения A отстоит от момента t_1 на интервал $\Delta t \approx 0,2$ с. Время, в течение которого плотность звуковой энергии этого эквивалентного процесса (кривая 2 на рисунке 2.1) уменьшается на 60 дБ (или в 10^6 раз), и определяет эквивалентное время (ощущаемой на слух) реверберации $T_{эп}$. Очевидно, что, изменяя R , можно изменять субъективное ощущение воспринимаемой реверберации. Как правило, $T_{эп} < T_p$ и только при $R \rightarrow \infty T_{эп} \approx T_p$.

Значение $T_{эп}$ можно рассчитать по формуле

$$T_{эп} \approx 1,2T_p / (1,2 + T_p \lg(\frac{\Omega_M + R}{R})), \quad (2.5)$$

где Ω_M – коэффициент направленности микрофона ($\Omega_M = E_{мп}^2 / E_{мд}^2$; $E_{мп}$, $E_{мд}$ – чувствительность микрофона к прямому и диффузному звукам).

Эквивалентная реверберация $T_{эр}$ существенно зависит от расстояния r между источником звука и точкой расположения микрофона, а также от характеристик направленности последних. При малом значении r она заметно меньше T_p за счет большого уровня прямого звука. Воспринимаемая реверберация в этом случае ослабляется. При $R > 3$ значение $T_{эр}$ близко к T_p . Время $T_{эр}$ может быть малым при использовании остронаправленных микрофонов, ориентированных на источник звука.

2.2 Диффузность звукового поля

Структура реверберационного сигнала связана с характерной картиной звукового поля в помещении. Отраженные от преград помещения сигналы соответствует волнам, движущимся в различных направлениях и несущим ту или иную энергию. Если уменьшение звуковой энергии в помещении происходит не слишком быстро, то в любой точке помещения число налагающихся друг на друга волн с различными направлениями движения оказывается достаточно большим для того, чтобы средние значения потока звуковой энергии по различным направлениям мало отличались друг от друга.

Это свойство поля – равенство средних значение энергии по различным направлениям – назвали изотропией поля. Изотропия поля способствует равномерному распределению энергии по объему помещения, т. е. одинаковости средних во времени значений плотности звуковой энергии в различных точках помещения (исключение составляет лишь сравнительно небольшая область помещения, в которой находится источник звука). Это свойство условились называть однородностью поля.

Однородное и изотропное поле волн, движущихся по различным направлениям, назвали диффузным звуковым полем. В понятие диффузности поля входит еще одна составляющая. Предполагается, что при наложении большого числа волн, несущих сдвинутые во времени отраженные сигналы, они складываются энергетически. Текущие интерференционные эффекты складываются. Результирующая плотность энергии равна сумме плотностей энергий каждого из отраженных сигналов.

Более простая трактовка понятия диффузности поля сводится к тому, что направления движения волн в каждой точке пространства помещения равновероятны, а плотность энергии в каждой единице объема – одинакова.

Предположение о диффузности звукового поля является, конечно, большой идеализацией, и в большинстве случаев поле в помещении не обладает свойствами изотропности и однородности, особенно, если время реверберации невелико, а число отражений недостаточно, чтобы заниматься усреднениями процессов. Все же считается, что приближение к диффузному полю в известной степени является полезным. Поэтому оценка степени диффузности поля, т. е. пространственного распределения поля отраженных волн, необходима для решения ряда практических задач.

Рассмотрим картину прихода волн в каждую точку пространства помещения (рисунок 2.2, а). Волны приходят в рассматриваемую точку пространства A со многих направлений под разными углами после отражений от стен, потолка, пола помещения.

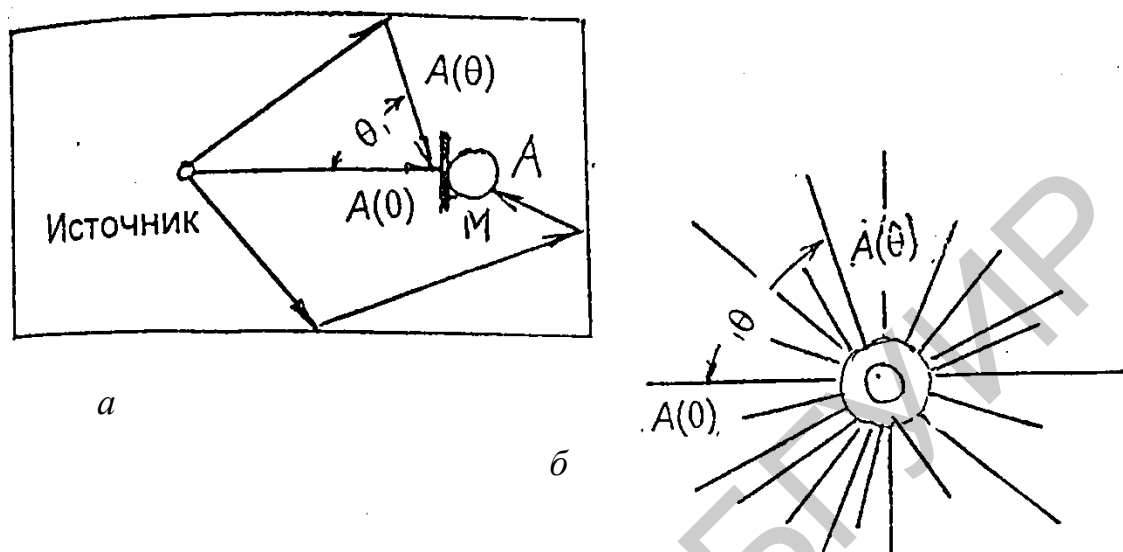


Рисунок 2.2 – Образование поля отраженных волн (а) и его графическое отображение (б)

Для оценки степени диффузности поля используют остронаправленный микрофон, поворачиваемый в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Острая направленность достигается обычно тем, что микрофон помещают в фокусе параболического вогнутого зеркала, размеры которого соизмеримы с длинами волн. Пространственное распределение полей отражений дает представление о направлениях прихода волн, их полезности или вредности по интенсивности и по времени запаздывания. Теоретические основы для оценки диффузности поля заложил Р. Тиле. Его работа была продолжена и развита И. Г. Дрейзенем.

Примерная картина поля отражений, принятых с различных направлений, изображена на рисунке 2.2, б. Она до известной степени напоминает «ежика». Длина «игл» этого «ежика» A соответствует энергии, приходящей в данную точку наблюдения с разных направлений.

Энергия E , усредненная по многим направлениям, представляется выражением

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^{i=n} A_i, \quad (2.6)$$

где n – количество направлений и, следовательно, измерений.

Абсолютное среднее отклонение ΔE от изменения E записывают как

$$\Delta E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{E}) A_i. \quad (2.7)$$

Обозначив относительное отклонение $\Delta E/E$ через m , И. Г. Дрейзен ввел понятие *индекса диффузности поля*, в котором m_0 характеризует энергию, приходящую непосредственно, т. е. без отражений, от источника звука И:

$$i_d = 1 - m/m_0. \quad (2.8)$$

Когда направления прихода отраженных волн равновероятны, а их энергия одинакова, то $m = 0$, $i_d = 1$. Если отражения отсутствуют, т. е. все преграды полностью поглощают падающий на них звук, то в точку наблюдения приходит только прямой звук, $m = m_0$ и $i_d = 0$. Увеличение i_d достигается применением звукорассеивающих конструкций колонн, пилястров, лепных украшений, других крупных выпуклых конструкций.

Единого мнения о том, какими должны быть значения i_d , не выработано. Теоретически наибольшее значение $i_d = 1$ получается в предположении, что прямой звук отсутствует вовсе. Но даже при наличии прямого звука значения i_d могут намного превышать 0,9. Ранее считалось, что приближение $i_d \rightarrow 1$ полезно с точки зрения хорошего впечатления звучания. Обескураживающим явился тот факт, что в залах, считающихся хорошими в акустическом отношении, значения i_d невелики. Так, по данным Р. Тиле величина i_d в театре г. Дуйсбурга в разных точках колеблется от 0,13 до 0,48, в театре г. Гамбурга – от 0,13 до 0,17. Примерно такие же значения приводятся другими авторами.

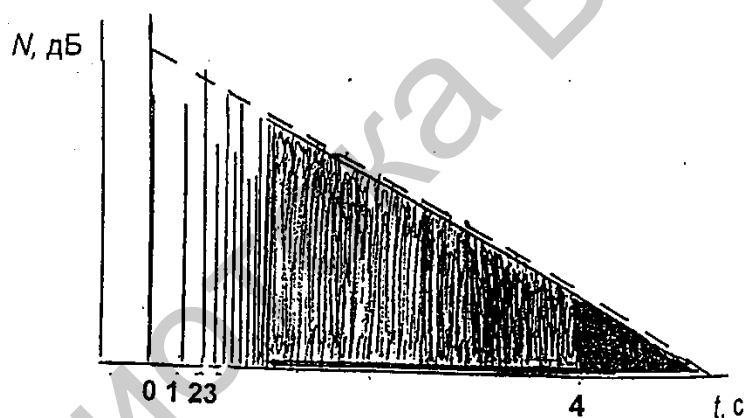
Отклонение от полусферической диаграммы направленности с позиций статистической теории рассматривали как акустический недостаток помещения. После работ Р. Тиле и И. Г. Дрейзена от этого взгляда отказались. Если в начальный период отзвука одно направление прихода волн оказывается преобладающим, то это свойство не должно считаться недостатком. Оно присуще всем залам. И. Г. Дрейзен, оценивая значения i_d в различных точках залов и для множеств залов музыкального назначения, пришел к выводу, что среднее значение индекса i_d составляет 0,63 (для театральных залов несколько меньше). С увеличением объема зала более 10 000 м³ значение i_d уменьшается.

В методе Тиле – Дрейзена не учитывается одно важное обстоятельство – отсутствие определения полезности или вредности степени запаздывания отраженных сигналов по сравнению со временем прихода прямого звука. Этот фактор считается одной из важных характеристик акустических свойств помещений.

2.3 Время запаздывания отраженных волн

Информация о времени реверберации и степени диффузности звукового поля не дает исчерпывающей оценки акустических свойств помещений. Важным дополнением к двум рассмотренным методам служит измерение времени запаздывания отраженных звуковых сигналов.

Звуковые импульсы чаще всего создают искровым разрядом конденсатора. Звук воспринимается двумя микрофонами. Один из них расположен в непосредственной близости от источника звука, второй – в исследуемом месте помещения (зала). Электрические сигналы микрофонов подают на пластины осциллографической трубки, управляющие смещением электронного луча по вертикали. На пластины, управляющие смещением луча по горизонтали, подается пилообразное напряжение горизонтальной развертки. Отметки запаздывающих импульсов на экране осциллографа (и, следовательно, на получаемой осциллограмме) будут смещены относительно отметки начального импульса (рисунок 2.3). Зная масштаб развертки по горизонтали, можно вычислить запаздывания отраженных сигналов относительно исходного.



0 – импульс, пришедший прямым путем; 1, 2, 3 – импульсы, пришедшие после ранних отражений; 4 – более плотная часть запаздывающих импульсов

Рисунок 2.3 – Осциллограмма импульсов

Оказалось, что главенствующую роль в создании хорошего звучания музыки и речи играют начальные отраженные сигналы – первый, второй, третий. В результате анализа времен запаздывания в залах и аудиториях удалось найти более выгодные времена запаздывания начальных отражений и на этой основе выработать рекомендации на оптимальные размеры этих помещений, а также предложить способы уменьшения акустических недостатков залов для слушания музыки и аудиторий для слушания речи.

При рассмотрении результатов измерений времени запаздывания отраженных волн в лучших в акустическом отношении музыкальных залах было выявлено, что первый запаздывающий сигнал должен приходиться в точку

наблюдения через 20...30 мс после прихода прямого звука, а приход последующих (запаздывающих) трех сигналов должен укладываться в промежутки времени 50...70 мс (рисунок 2.4).

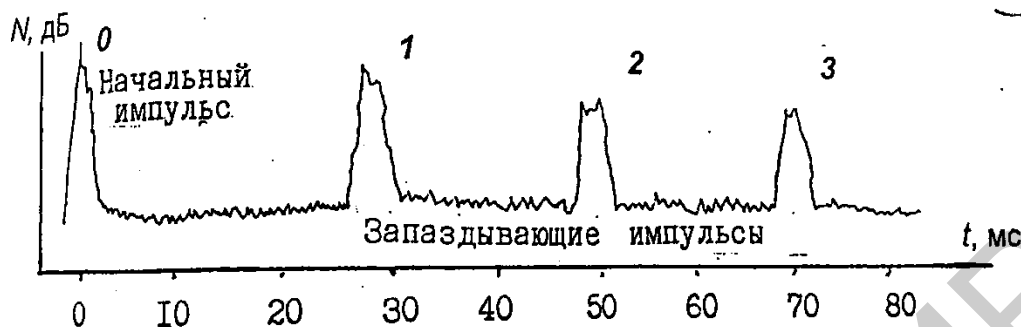
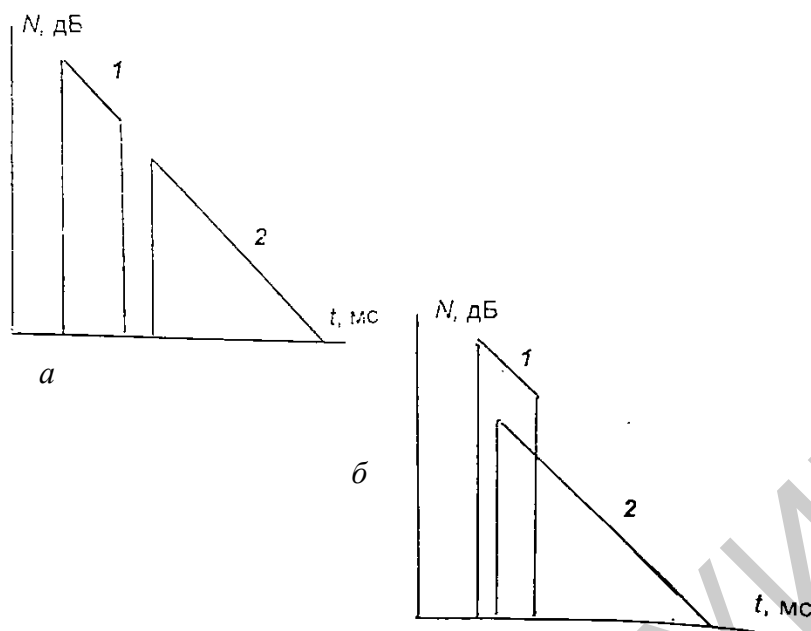


Рисунок 2.4 – Оптимальное время запаздывания начальных отраженных импульсов 1, 2, 3 по отношению к импульсу 0, пришедшему прямым путем

Из этого условия вытекает, что высота зала у портала сцены должна находиться в пределах 9...9,5 м, ширина зала у портала 18,5...25 м. Длину зала устанавливают из условия облучения дальних рядов слушателей естественным (без усиления) звуком. Она не должна превышать 40...45 м. Для речевых аудиторий первый запаздывающий сигнал должен приходить на места слушателей в промежуток времени 10...15 мс, а приход трех запаздывающих сигналов – в промежуток 25...45 мс.

Структура отзвука содержит две характерные части запаздывающих импульсов: вначале сравнительно редкие одиночные импульсы, а потом вторая часть с более плотной структурой запаздывающих импульсов (именно она, строго говоря, и образует процесс реверберации). В акустически совершенных залах вторая часть следует после первой (рисунок 2.5, а). Если же плотная часть запаздывающих импульсов накладывается на первую часть с редкими импульсами (рисунок 2.5, б), то звучание в таком зале воспринимается как несколько ущербное.

Если начальные запаздывающие сигналы приходят после интервала времени 50...70 мс, то они воспринимаются звучащими отдельно от исходного сигнала, т. е. образуют эхо. Особенно неприятно воспринимаются повторяющиеся регулярно отдельные запаздывающие сигналы. Каждый одиночный импульс создает серию эхо-сигналов, воспринимаемых как рокот. Этот эффект назвали «порхающим эхом». Его наличие является серьезным акустическим недостатком помещения.



1 – начальные запаздывающие импульсы;
2 – последующая более плотная часть запаздывающих импульсов

Рисунок 2.5 – Удовлетворительное (а) и неудовлетворительное (б) временные соотношения участков процесса реверберации

Временной анализ запаздывающих сигналов позволяет выявить различные акустические недостатки и поэтому входит в комплекс необходимых акустических измерений в помещениях.

2.4 Дополнительные критерии акустического качества помещений

Стандартное время реверберации T_p и акустическое отношение R еще не полностью определяют акустическое качество помещений. Известно очень большое число дополнительных критериев качества помещений. Практически все они являются энергетическими и основаны на оценке энергии E импульсного отклика помещения $p_{зв}(t)$ для разных временных интервалов:

$$E(t) = \int_0^t p_{зв}^2(t) dt; \quad E(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p_{зв}^2(t) dt; \quad E(t, \infty) = \int_t^{\infty} p_{зв}^2(t) dt, \quad (2.9)$$

где $p_{зв}$ – изменяющееся во времени мгновенное значение звукового давления;
 t_1, t_2 – текущие моменты времени импульсного отклика помещения.

Наиболее часто применяют следующие энергетические критерии (в децибелах):

- четкость:

$$D = 10 \lg (E_{50} / E_{\infty}); \quad (2.10)$$

- прозрачность:

$$C = 10 \lg \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}}; \quad (2.11)$$

- гулкость:

$$H = 10 \lg \frac{E_{\infty} - E_{50}}{E_{50}}; \quad (2.12)$$

- пространственное впечатление:

$$R' = 10 \lg \frac{E_{80} + E_{25,80} - E_{25,80}^A}{E_{25} + E_{25,80}^A}; \quad (2.13)$$

- латерализация:

$$LF = 10 \lg \frac{E_{50}^B - E_{25}^B}{E_{80}}. \quad (2.14)$$

Выражение (2.14) оценивает долю энергии отраженных звуков, поступающих с боковых направлений помещения (справа и слева).

Нижний индекс у функции E определяет значение t в миллисекундах, являющееся верхним пределом интеграла $\int_0^t p_{3B}^2(t) dt$ импульсного отклика помещения. Если указаны два значения, то они являются соответственно нижним t_1 и верхним t_2 пределами при вычислении интеграла $\int_{t_1}^{t_2} p_{3B}^2(t) dt$. Верхний индекс A свидетельствует о том, что для приема импульсного отклика помещения применен однонаправленный измерительный микрофон с углом охвата $\pm 40^\circ$ в диапазоне частот 500...1000 Гц, ориентированный на источник звука. Верхний индекс B соответствует применению измерительного микрофона с диаграммой направленности в форме восьмерки, причем ось его максимальной чувствительности ориентирована перпендикулярно боковым стенам помещения. Отсутствие верхнего индекса у функции E говорит о применении ненаправленного измерительного микрофона при записи импульсного отклика помещения.

Одним из важнейших критериев при оценке акустического качества помещений, предназначенных для исполнения речевых программ, является разборчивость (рисунок 2.6): слоговая W_S и словесная W_A . Она представляет собой отношение правильно понятых слогов или слов к общему их числу, имеющемуся в артикуляционной таблице, и выражается в процентах. На нижней части рисунка 2.6 приведена шкала оценки качества речи в баллах и терминах.

Для речевых сигналов критерий четкости D связан прежде всего с высокой разборчивостью, его оптимальное значение составляет $-1,5...-2$ дБ. Для радиовещания коэффициент словесной разборчивости не должен быть менее 96 %. В музыкальных студиях оптимальное значение параметра D лежит в пределах $-3...-6$ дБ и не должно сильно изменяться от одной точки расположения измерительного микрофона к другой.



Рисунок 2.6 – Изменение качества речи от слоговой W_S и словесной W_A разборчивости

Пределы изменения критерия прозрачности в студиях, предназначенных для исполнения классической музыки, составляют $-1,8 \leq C \leq +2$ дБ, а для романтической музыки эти пределы уже существенно другие и составляют $-5 \leq C \leq -1,8$ дБ.

Оптимальные значения критерия гулкости H в музыкальных студиях лежат в пределах 3...8 дБ. При $H < 3$ дБ звучание кажется излишне сухим, а при $H > 8$ дБ – слишком гулким.

Пространственное впечатление практически не ощущается, если значение R' составляет менее -10 дБ; слабо заметно, если $-10 \leq R' \leq -4$ дБ; заметно, если $-4 \leq R' \leq 1$ дБ; очень хорошее при $1 \leq R' \leq 7$ дБ; излишне полное, если $R' > 7$ дБ. В музыкальных студиях значение критерия LF должно быть не менее 1,5 дБ.

2.5 Звукоизоляция студий

Важной характеристикой студий звукового и телевизионного вещания является допустимый уровень шума, который образует звуковой фон помещения. Он складывается из четырех основных составляющих:

- 1) шумов, проникающих в студию из смежных помещений вследствие звукопроводности стен, пола и потолка;
- 2) структурных звуков, распространяющихся по конструкциям здания и обусловленных вибрацией машин и механизмов;

3) так называемых воздушных шумов, создаваемых системой кондиционирования и вентиляции;

4) шумов технологического оборудования, установленного в студии. Допустимый уровень звукового давления шума зависит от частоты. Применительно к студиям ЗВ уровень громкости звукового фона не должен быть более 20 фон.

Звукоизоляция помещений определяет уровень проникающих извне шумов. Для студий, измерительных камер и других помещений требуется высокая звукоизоляция от внешних шумов и вибраций, создающих акустические шумы. Звукоизоляция требуется и для концертных залов, театров, аудиторий, комнат для прослушивания и для жилых помещений. Пути прохождения звука через ограждающие конструкции следующие: через сквозные поры, щели и т. п. (воздушный перенос), через материал перегородки в виде продольных колебаний его частиц (материальный перенос) и через поперечные колебания перегородок, похожие на колебания мембран (мембранный перенос), которые часто можно приближенно рассматривать как колебания всей перегородки в целом. Количественное определение звукопроводности перегородок проводится с учетом всех видов переноса звуковых колебаний. Звукоизоляция помещения – это фактически разность между уровнями звука с внешней стороны и внутри помещения.

Для уменьшения воздушного переноса необходимо тщательно следить за устранением различного рода отверстий и щелей в перегородках. Для уменьшения материального переноса необходимо брать слоистые конструкции стен и перегородок из материалов с резко отличающимся удельным акустическим сопротивлением (например, бетон + поролон). Для уменьшения мембранного переноса необходимо стремиться к увеличению массы перегородки. Для уменьшения шумов вибрации перегородки применяют различного рода виброизолирующие прокладки. Проникновение шумов через вентиляционные каналы устраняют заглушением, т. е. покрытием стенок каналов поглощающими материалами, а также применением различного рода акустических фильтров. Звукоизоляция студий определяет максимально допустимый уровень акустических шумов, ограничивающий передаваемый динамический диапазон сигнала снизу. Так как этот уровень мал (не должен превышать 30 дБ), то необходимо принимать меры в отношении тщательной изоляции студий от шума. Радиодома и телецентры должны располагаться на тихих улицах. Студии должны располагаться в уединенных местах зданий, подальше от проезжей части наиболее тихой улицы. Должны применяться «плавающие» полы и подвесные потолки. Студии первого и цокольного этажей должны иметь отдельный фундамент, изолированный от основного звукоизолирующими прокладками и засыпкой между общим и индивидуальным фундаментами (засыпка песком, прокладки из демпфирующих изоляционных материалов: резина, строительный войлок, различные синтетические материалы). Все студии снабжаются тамбурами глубиной не менее 1 м, открывающиеся в направлении выхода из студии.

Внутренние поверхности тамбуров обрабатываются звукопоглощающими материалами. Аппаратные должны быть отделены от студий просмотрным окном трехслойной конструкцией из толстых стекол толщиной 6...9 мм с непараллельным расположением во избежание резонанса объема между стеклами. Все стекла должны быть изолированы по периметру прокладками из профильной резины, обеспечивающими их плотное, без малейших щелей, прилегание к рамам. Для защиты студий от структурных звуков, распространяющихся по конструкциям здания, часто используется схема, получившая название «коробка в коробке». Студия при этом имеет отдельный фундамент, на котором монтируются ее стены, образующие внутреннюю «коробку». На расстоянии 200...500 мм от нее сооружается внешняя «коробка», поверхности которой могут являться как внешними, так и внутренними стенами здания. Иногда внутренняя «коробка» не имеет отдельного фундамента, а подвешивается на пружинах или резиновых амортизаторах.

Известен феномен огибания звуком звуконепроходимой преграды через несущие конструкции здания. В ряде случаев применение, например, дополнительной звукоизолирующей стены для улучшения звукоизоляции не дает ожидаемого эффекта. Причина недостаточной эффективности звукоизоляции заключается в том, что звук в форме вибрации передается через потолок, пол и другие стены. Поэтому гарантией надежной звукоизоляции может быть только применение звукоизолирующих материалов по всем поверхностям комнаты. Такая передача звуковых волн особенно заметна в бетонных зданиях.

Уровень фонового шума. Уровень шумов в вещательных студиях и концертных залах в соответствии с рекомендациями Международной комиссии по стандартизации (*International Organization for Standardization (ISO)*) должен определяться по частотно-зависимой кривой NC25 (*Noise Curve*) в соответствии с кривой 3 (нумерация снизу) рисунка 2.7. и таблицей 2.1.

Достижение такого уровня является чрезвычайно трудной задачей. Даже при размещении студии в достаточно тихой части здания необходимо применение специальных мер для обеспечения звукоизоляции и виброизоляции помещения: специальных двойных стен и дверей, их акустической развязки с остальной частью здания с использованием «плавающих» конструкций пола, подвесных стен и потолков; использования специальных глушителей для вентиляционных систем и др.

На допустимый уровень шума необходимо ориентироваться при выборе системы кондиционирования. Возможно, следует также предусмотреть звукоизоляционные боксы для шумного электронного или электрического оборудования (при этом нужно соблюдать осторожность, чтобы не допустить перегрева приборов).

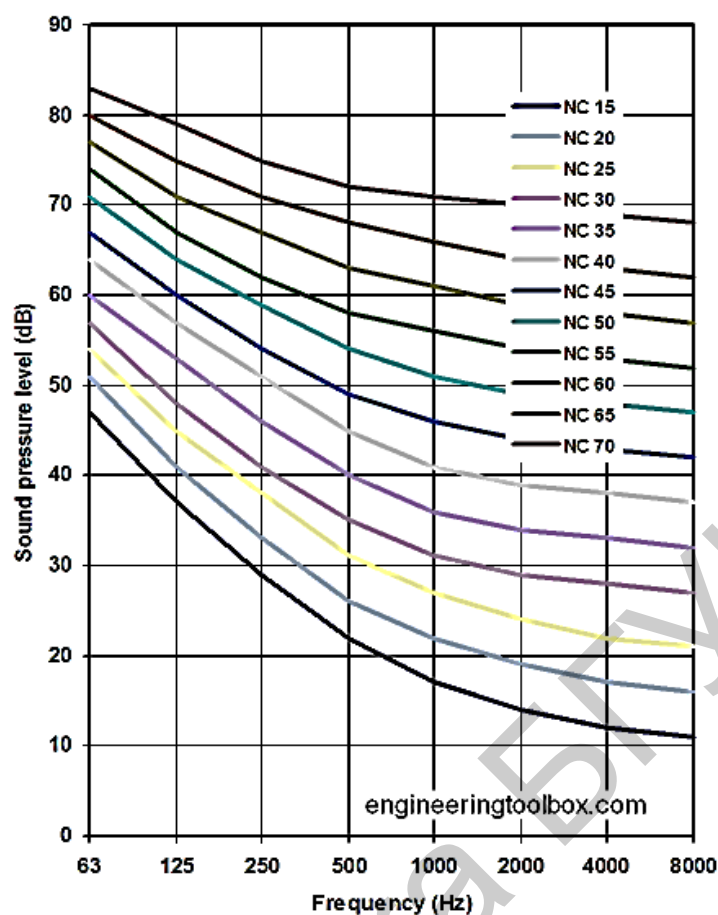


Рисунок 2.7 – Кривые допустимого уровня звукового давления в соответствии с рекомендациями *ISO*

Таблица 2.1 – Максимально допустимые уровни звукового давления

| Кривые уровня шума | Максимальный уровень звукового давления, дБ | | | | | | | | |
|-----------------------|---|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| | Средняя частота звуковой октавы, Гц | | | | | | | | |
| | 31,5 | 62,5 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| NC 0 | 55 | 36 | 22 | 12 | 5 | 0 | -4 | -6 | -8 |
| NC 10 | 62 | 43 | 31 | 21 | 15 | 10 | 7 | 4 | 2 |
| NC 20 | 69 | 51 | 39 | 31 | 24 | 20 | 17 | 14 | 13 |
| NC 30 | 76 | 59 | 48 | 40 | 34 | 30 | 27 | 25 | 23 |
| NC 40 | 83 | 67 | 57 | 49 | 44 | 40 | 37 | 35 | 33 |

Этот же норматив необходимо использовать и в помещениях студий звукозаписи. Современные микрофоны настолько чувствительны, что высокий уровень фонового шума может уменьшить динамический диапазон прослушивания.

3 ОПТИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ И АКУСТИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ СТУДИЙ

3.1 Выбор оптимального времени реверберации

Оптимальное значение стандартного времени реверберации, при котором передача воспринимается наилучшим образом, зависит от жанра программы, объема помещения и частоты. Для двух основных видов вещательных программ – речевых и музыкальных – оптимальное значение $T_{p \text{ опт}}$ существенно различно. В большинстве случаев оно регламентируется для частотного диапазона 125...4000 Гц.

Чем меньше время реверберации, тем выше разборчивость речи. Однако слишком малое время реверберации делает звучание слишком сухим, обедняет его в тембральном отношении. Увеличение T_p обогащает звучание, улучшает четкость и прозрачность звучания, придает ему пространственность, объемность, гулкость, но ухудшает условия восприятия смысловой информации при речевой передаче. Для дикторских студий время реверберации должно оставаться практически постоянным (0,3...0,4 с) в полосе частот 125...4000 Гц. В студиях меньшей площади допускается уменьшить это значение до 0,2...0,25 с. Поскольку низкочастотные компоненты спектра определяют в основном гулкость звучания, то снижение времени реверберации на низких частотах в определенной степени способствует повышению разборчивости речи. Поэтому в телевизионных студиях, где основным видом звучания является речь, рекомендуется обеспечивать горизонтальную частотную характеристику оптимального времени реверберации в диапазоне 250...4000 Гц с плавным спадом на более низких частотах. На частоте 125 Гц величина спада должна составлять 20...25 % от значения T_p в полосе частот 250...4000 Гц. Конкретное значение оптимального T_p зависит от размеров студии и увеличивается с увеличением объема помещения V . Например, для телевизионных студий с площадью пола 600, 300, 150 и 60...80 м² значения T_p соответственно равны 0,9; 0,8; 0,65 и 0,4 с.

В литературно-драматических студиях оптимальное время реверберации должно быть больше, чтобы передать все богатство оттенков речи актера. Большие литературно-драматические студии с площадью пола 150...200 м² должны иметь $T_p = 0,8...1,0$ с, а для студий меньшей площади (около 100 м²) – 0,5...0,7 с. Требования к оптимальной реверберации в малых литературно-драматических студиях (с площадью пола 30...40 м²) те же, что и для дикторских студий. В литературно-драматический блок (ЛДБ) радиодома обычно входит заглушенная студия, предназначенная для создания различных звуковых эффектов, а также для записи передач, которые по замыслу режиссера должны происходить на открытом воздухе. В таких студиях следует обеспечить минимально возможное время реверберации: в полосе частот 125...4000 Гц оно

не должно превышать 0,15 с. Иногда в состав ЛДБ включают так называемое гулкое помещение. По аналогии с комнатами «эха» для них рекомендуется горизонтальная форма частотной характеристики времени реверберации при $T_p = 3$ с.

В музыкальных студиях оптимальное время реверберации существенно больше в сравнении с речевыми студиями. Это способствует улучшению мелодичности и выразительности звучания: более богатыми, тоньше нюансированными, более естественными воспринимаются тембры инструментов; звучание приобретает прозрачность, ясность, четкость, объемность. Для музыкальных студий оптимальное значение стандартного времени реверберации можно определить по формуле, предложенной Э. Манером и Р. Тиле:

$$T_p = 2,4 \cdot 10^{-2} k \sqrt[3]{V} / [-\ln(1 - \alpha_{\text{ср}})]. \quad (3.1)$$

Здесь k – поправочный коэффициент, равный единице для помещений объемом V , не превышающим 2000 м^3 и медленно возрастающий при $V > 2000 \text{ м}^3$; $\alpha_{\text{ср}}$ – среднее значение коэффициента звукопоглощения, зависящее от назначения помещения.

В таблице 3.1 приведены средние значения коэффициента звукопоглощения $\alpha_{\text{ср}}$ для различных групп помещений (независимо от их объема при $k = 1$). Выражение (3.1) дает нам кривые для определения T_p , приведенные на рисунке 3.1. Параметром каждой кривой является величина $\alpha_{\text{ср}}$.

Таблица 3.1 – Рекомендуемые значения среднего коэффициента звукопоглощения $\alpha_{\text{ср}}$ для помещений различного назначения

| Наименование помещения | $\alpha_{\text{ср}}$ |
|--|----------------------|
| Концертный зал для исполнения симфонической музыки | 0,19 |
| Оперный театр | 0,2 |
| Драматический театр, кинозал | 0,22 |
| Эстрадный театр | 0,25 |

Экспериментальные зависимости оптимального времени реверберации на средних частотах (500 Гц) в зависимости от объема помещения, полученные разными авторами, представлены на рисунке 3.2.

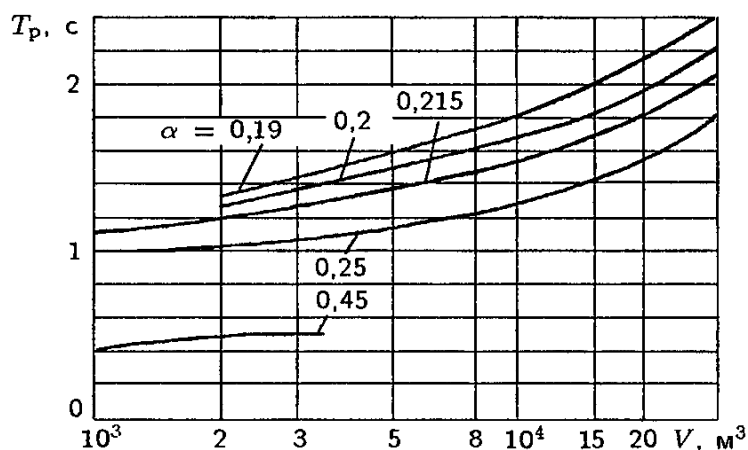


Рисунок 3.1 – Зависимость оптимального стандартного времени реверберации от объема помещения

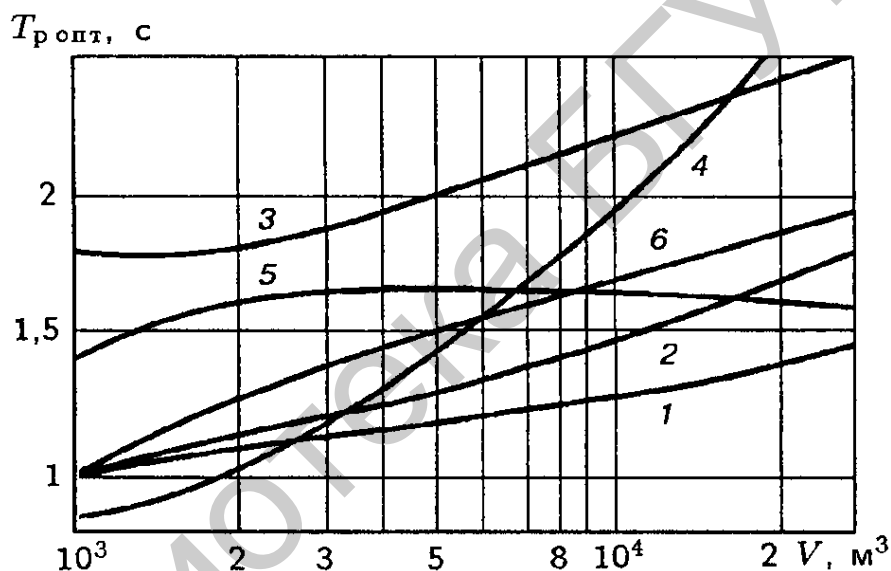


Рисунок 3.2 – Зависимость оптимального стандартного времени реверберации от объема музыкальных студий по данным М. Реттингера (1), Л. Беранека (2), П. Брюля (3), Э. Манера и Р. Тиле (4), В. Куля (5), С. Я. Лившица (6)

Приведенные зависимости значительно отличаются друг от друга. С достаточной для практики точностью они могут быть заменены следующими приближенными выражениями:

- для речи:

$$T_p = 0,3 \lg V - 0,05; \quad (3.2)$$

- для произведений малых музыкальных форм и оперы:

$$T_p = 0,4 \lg V - 0,15; \quad (3.3)$$

- для симфонической музыки:

$$T_p = 0,5 \lg V - 0,3. \quad (3.4)$$

В выражениях (3.2)–(3.4) V – объем помещения, м^3 . Эти выражения справедливы для частоты примерно 500 Гц. При значительном увеличении времени реверберации в области нижних частот помещение становится «гулким», что приводит к снижению разборчивости речи и неприятному звучанию музыки. Резкое снижение T_p на высших частотах сказывается на звучании согласных звуков речи и лишает «яркости» звучание музыки. Большое значение здесь имеет и опыт слушателей. Например, характер речи во время проповедей в соборах и звучание в них органной музыки приучили слушателей к значительной реверберации с подъемом в области нижних частот. Для старинных концертных залов с большим количеством драпировок характерно снижение времени реверберации на верхних частотах. Помещениям, обшитым деревом, свойственно также уменьшение времени реверберации в области верхних частот, что приводит к приятному оттенку в звучании музыки.

Частотная характеристика оптимального времени реверберации должна быть такой, чтобы отдельные спектральные составляющие сложного звучания не могли бы за счет реверберации подчеркиваться или подавляться одна относительно другой. Например, С. Я. Лившиц считал, что это условие будет выполнено, если произведение уровня громкости сигнала на время его затухания для всех частотных составляющих речевых и музыкальных сигналов будет одинаковым. В. Кнудсен при исследовании этой проблемы исходил из несколько иного принципа. Он считал, что для обеспечения высокого качества звучания необходимо, чтобы все его частотные составляющие затухали до порога слышимости к одному и тому же моменту времени.

Накопленный опыт позволяет считать, что для музыкальных студий более предпочтительной является горизонтальная форма частотной характеристики T_p . В крупных студиях (с площадью пола более 450 м^2) на верхних частотах допускается спад времени реверберации, обусловленный поглощением звука в воздухе, а на нижних частотах – его подъем. С увеличением объема музыкальной студии оптимальное время T_p возрастает. Однако в студиях объемом более $2000...5000 \text{ м}^3$ на величину T_p гораздо сильнее влияет жанр произведения. По данным исследований В. Куля, оптимальное время реверберации в больших студиях ($V > 5000 \text{ м}^3$) мало зависит от объема и составляет $1,48 (\pm 0,05)$ с для современной классической музыки; $-1,54 (+0,3; -0,07)$ с для классической музыки и $2,07 (+0,2; -0,07)$ с для романтической симфонической музыки.

На практике для больших музыкальных студий выбирают компромиссные значения T_p . На основании длительного опыта эксплуатации рекомендуется выбирать для больших (площадью пола более 750 м^2), средних – ($350...400 \text{ м}^2$) и малых – ($250...300 \text{ м}^2$) музыкальных студий значения T_p равные соответственно $2,0$; $1,5...1,7$ и $0,9...1,1$ с. В студиях, предназначенных для

исполнения эстрадной и джазовой музыки, площадью 350...450 м² значение T_p должно составлять 0,9...1,1 с, а в небольших камерных студиях (площадью примерно 150 м²) – 1,0 (±0,2) с.

Оптимум и форма частотной характеристики времени реверберации в разных студиях одинакового объема могут колебаться в довольно широких пределах в зависимости от формы студии и ее высоты, расположения звукорассеивающих конструкций, вариантов размещения оркестрантов, принятой технологии звукозаписи (с использованием акустических кабин для размещения исполнителей, акустических щитов и тому подобных конструкций). Поэтому указанные оптимальные значения времени реверберации, заимствованные из нормативных документов, следует рассматривать как первоначальные исходные данные, подлежащие уточнению в процессе акустической настройки студии. Элементы акустической настройки студии должны быть предусмотрены в обязательном порядке уже на стадии ее проектирования.

Контрольные комнаты. Студийные аппаратные (контрольные комнаты) по своим параметрам близки к речевым студиям. Оптимальное значение времени реверберации для них рекомендуется выбирать из соотношения

$$T_p = T_{\text{фикс}} \sqrt[3]{V/V_0}, \quad (3.5)$$

где $V_0 = 100 \text{ м}^3$;

$T_{\text{фикс}} = (0,28 \pm 0,05) \text{ с}$;

V – объем помещения (изменяется обычно в пределах 100...300 м³).

Частотная характеристика времени реверберации – горизонтальная прямая с отклонением ±0,05 с (на частотах ниже 160 Гц поле допуска увеличивается до ±0,1 с). До недавнего времени в основе акустического проектирования контрольных комнат лежала концепция повторения параметров среднестатистического жилого помещения, т. е. считалось, что звукорежиссер должен находиться в условиях, близких к условиям домашнего прослушивания. Среднее время реверберации выбиралось 0,2...0,4 с. Объемы также были небольшими и составляли 30...40 м³. Такие помещения удовлетворительно работали для записи музыки с небольшим динамическим диапазоном. Кроме того, условия реального прослушивания музыкальных и речевых сигналов, переданных по каналам радиовещания, телевидения, звукозаписи и пр., настолько разнообразны, что приведенные выше требования нельзя считать типовыми для жилых помещений. Следующим этапом явилась концепция построения контрольных комнат, получившая название *LEDE* (*live-dead end*), в которой звукорежиссер работал на границе двух сред – «живой» (*live*), с большим количеством отражений, и «мертвой» (*dead*), свободной от отражений. В основе такого построения контрольных комнат лежало предположение, что одним из важнейших критериев качества акустики в помещении является время прибытия ранних отражений, которое должно

быть в пределах 20...30 мс после прямого звука. Если в студии при записи обеспечено это требование, то первые отражения в контрольной комнате не должны маскировать их, поэтому полезно переднюю часть контрольной комнаты (стены за контрольными агрегатами, полы и потолки) сделать заглушенной (*dead end*), а заднюю часть комнаты сделать отражающей (*live end*). Для того чтобы заднюю часть комнаты сделать отражающей, на задней стене и потолке должны устанавливаться различные отражающие решетки. Такая конструкция комнаты позволяла звукорежиссеру ощущать живые отражения, но вместе с тем звук от студийных мониторов воспринимался им без искажения, поскольку на прямой звук не накладывались отражения комнаты. Однако такие контрольные комнаты было очень трудно настраивать и, кроме того, возросшие требования к передаче стереопанорамы и расширенного динамического диапазона для цифровых записей требовали снижения уровня реверберационных помех. Тем не менее целый ряд известных студий (*Master Sound Astoria* в Нью-Йорке, *Red Bus Studios* в Лондоне, *Winfield Sound* в Торонто и др.) продолжают использовать контрольные комнаты, построенные по такой концепции, и в настоящее время.

В конце 80-х годов была предложена конструкция «бессредных» контрольных комнат. Идея их проектирования была предложена англичанином Т. Хидли и реализована Ф. Ньюэллом во многих студиях мира. Она заключается в следующем: все поверхности, в направлении которых излучают студийные контрольные агрегаты (т. е. потолок, задняя стена и боковые стены) делаются звукопоглощающими, а поверхности перед звукорежиссером – передняя стена и пол – звукоотражающими. Это позволяет звукорежиссерам слышать прямой звук мониторов, неокрашенный дополнительными отражениями, и в то же время получать отражения собственных голосов от передней фронтальной поверхности пола и находящегося в комнате оборудования (пульта, компьютеров, стоек и др.). Измерения процесса реверберации, выполненные в таких комнатах, показали, что в первые моменты времени (до 50 мс) происходит очень быстрое поглощение отраженной энергии, что дает ощущение мельчайших нюансов в звучании мониторов, в то время как в обычных комнатах эти детали маскируются реверберационным процессом. Такого типа комнаты потребовали применения контрольных акустических систем с высоким уровнем звукового давления и улучшенными переходными характеристиками, поэтому в них часто используются рупорные громкоговорители (например фирмы *JBL*).

Контрольные комнаты, построенные по такой концепции, показали возможность получения в них записей с высокой прозрачностью звучания, что особенно важно для цифрового звука. Учитывая, что контрольные комнаты используются теперь нередко и как исполнительские студии для записи электронной музыки, такой принцип их построения лучше соответствует этой музыке (в них легче вносить искусственную реверберацию).

Уровень шумов в контрольных комнатах не должен превышать кривую *NC25* (рисунок 2.7) для обеспечения достаточно большого динамического

диапазона при записи, что накладывает особые требования к звукоизоляции стен и их размещению. Так же как и при строительстве студий звукозаписи, при конструировании контрольных комнат проблема снижения уровня шумов требует решения сложнейших задач, в том числе при выборе материалов для звукопоглощения и звукоизоляции. Широкое внедрение в практику современных пространственных систем звукозаписи изменило и требования к параметрам современных контрольных комнат. В международных стандартах и рекомендациях (*ITU-R BS.775-1*, *SMPTE RP-173*, *EBU R22*, *EBU Tech3276*, *ITU-R BS.1116-1* и др.) оговариваются требования к размерам и форме контрольных комнат, параметрам звукового поля в них, параметрам и способам расстановки контрольных акустических систем.

3.2 Объем, форма и резонансные свойства студий

Достаточно общепринятой является классификация студий, в которой цифры после буквы «С» (студия) указывают на среднюю площадь помещения в метрах квадратных. Вещательными студиями являются: большая (С-1000), средняя (С-450), малая (С-250) и камерная (С-150) музыкальные студии; литературно-драматическая студия (С-100); заглушенная студия (С-50) и речевая дикторская студия (С-24-36). Телевизионные студии: большая (С-450-600), средняя (С-300), малая (С-150) и дикторская программная (С-60-80). Объем студии зависит от вида исполняемой музыки и должен выбираться в зависимости от заданного оптимального времени реверберации (связь этого показателя с объемом помещения была рассмотрена выше) и от максимального числа размещаемых в ней исполнителей. Удельный объем на одного исполнителя должен составлять примерно 10...18 м³.

В результате многократного отражения звуковых волн от границ помещения возникает замкнутое трехмерное волновое поле. Обычно линейные размеры помещения значительно больше длины звуковых волн. Замкнутый объем помещения представляет собой распределенную колебательную систему со спектром собственных частот, при этом каждой собственной частоте соответствует свой декремент затухания. Если источник звука создает звуковые сигналы с меняющимся спектральным и амплитудным распределением, то эти сигналы возбуждают колебания воздуха в помещении с частотами, близкими к резонансным, и по мере изменения спектра будут возникать все новые и новые моды собственных колебаний замкнутого объема, которые, накладываясь на ранее возникающие моды, имеющие уровни выше порога слышимости, в большей или меньшей степени исказят начальный сигнал. Поскольку декремент затухания компонент частотного спектра различен, то каждая частотная компонента имеет разное время реверберации.

Собственные резонансные частоты помещения в форме прямоугольного параллелепипеда связаны с его линейными размерами l , b , h соотношением

$$f_0 = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{l}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}, \quad (3.6)$$

где c_0 – скорость звука в воздухе ($c_0 \approx 343$ м/с);

m, n, p – любые целые числа.

Из этого соотношения следует, что теоретически в помещении может возбуждаться бесконечное число резонансных мод колебаний. Их распределение по спектру определяется размерами помещения. Если выполнено условие золотого сечения, собственные частоты расположены достаточно равномерно по диапазону частот. В помещениях достаточного большого объема спектр собственных колебаний весьма плотный, начиная с самых низких частот. На практике это означает, что дополнительная резонансная окраска звучания в больших помещениях не возникает.

Если же размеры студии сравнительно малы, то за счет появления значительно отстоящих друг от друга резонансных частот амплитудный спектр отзвуков может значительно отличаться от спектра исходного сигнала, что вызовет недопустимое искажение тембра. Поэтому, например, запись музыки в студиях малого объема неизбежно приводит к искажению тембра за счет резонансов помещения в слышимом частотном диапазоне, нарушению пространственной панорамы и баланса громкости. Минимальный объем студии для записи музыкальных произведений должен быть не менее 200 м^3 .

Форма студии имеет существенное значение и для обеспечения необходимой структуры ранних (в первую очередь боковых) отражений и однородности (диффузности) звукового поля, что очень важно для качественной записи звука. Студии средних и малых размеров чаще имеют прямоугольную форму, при этом выбор соотношений их длины l , ширины b и высоты h желательно делать в соответствии с золотым сечением. Тогда с учетом численных значений золотого сечения линейные размеры должны быть связаны с объемом следующими соотношениями:

$$l = 1,62 \cdot \sqrt[3]{V}, b = \sqrt[3]{V}, h = 0,62 \cdot \sqrt[3]{V}. \quad (3.7)$$

Эти соотношения желательно выдерживать с отклонениями не более 10 % для студий звукового вещания и 15 % для телевизионных студий. Высоту студии следует соотносить с высотой окружающих студию помещений. В речевых студиях выполнение соотношений (3.7) приводит к недопустимо низкой высоте студии. В больших студиях звукового вещания допустимо уменьшать высоту на 10...20 % по сравнению с рассчитанной по (3.7).

Интенсивность (добротность) резонансных отзвуков необходимо уменьшать, чтобы приблизить режим студии к апериодическому. Этого можно добиться путем применения звукопоглощающих материалов с большим коэффициентом поглощения (так называемых акустических ловушек) на резонансных частотах, например, в речевой студии. В небольших студиях со

значительным временем реверберации, например в гулкой студии литературно-драматического блока, основным способом борьбы с собственными колебаниями воздушного объема является придание студии неправильной формы (например непараллельные стены).

Исследования показывают, что при анализе низкочастотных резонансов необходимо применять волновую теорию, а на более высоких частотах – геометрический (лучевой) подход. Примерное значение частоты раздела, на которой поведение качественно изменяется, может быть определено по формуле

$$f_p = (3 \times c_0)/d, \quad (3.8)$$

где c_0 – скорость звука в воздухе ($c_0 = 343$ м/с);

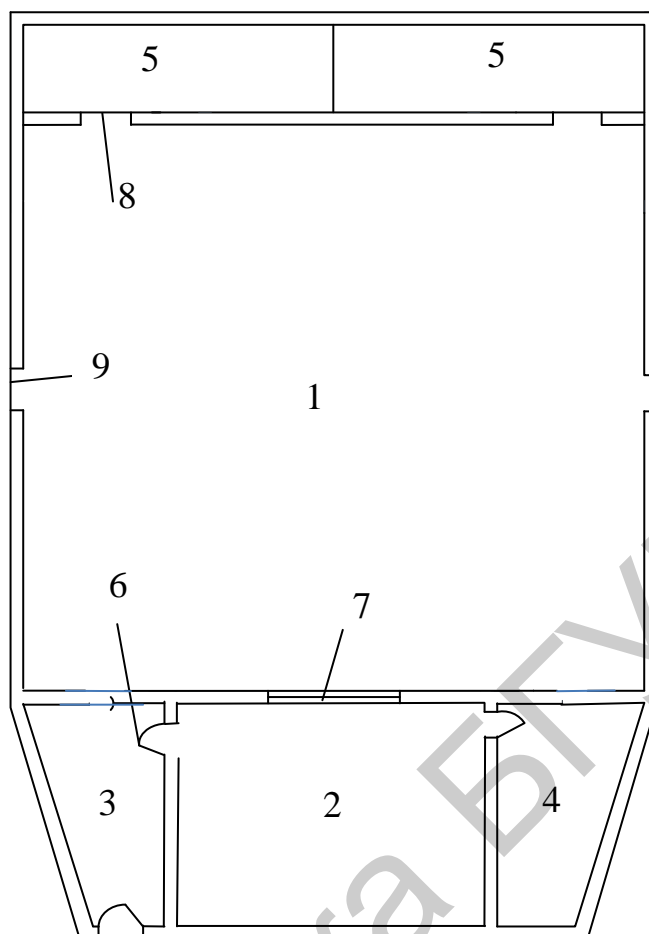
d – наименьший размер студии, в метрах.

Соотношение (3.8) показывает, что наиболее критичным размером с точки зрения акустики является высота студии. Для любых, даже малых размеров студии высота потолка должна быть не ниже 3 м. Необходимо отметить, что до настоящего времени отсутствуют общепринятые оптимальные соотношения размеров студии. Ниже, в таблице 3.2 приведены рекомендуемые рядом авторов оптимальные соотношения размеров для студий разного объема.

Таблица 3.2 – Рекомендуемые соотношения размеров студии

| Размер студии | Высота | Ширина | Длина |
|---------------|--------|--------|-------|
| Малая | 1,00 | 1,25 | 1,6 |
| Средняя | 1,00 | 1,60 | 2,5 |
| Большая | 1,00 | 1,25 | 3,2 |

Среди объективных параметров, определяющих звуковое поле в студии, важнейшим, безусловно, является оптимальное время реверберации. Как показано выше, величина T_p зависит от вида исполняемых программ и от объема помещения: например, для симфонической музыки романтического стиля – 2...2,2 с, для эстрадной и джазовой музыки – 0,9...1,1 с и т. д. Для исполнения камерной музыки, сольных и хоровых программ, выступлений небольших ансамблей оптимум достигается при меньшем времени реверберации, чем для симфонической музыки, и также зависит от объема студии. Для художественной передачи речи оптимальное время реверберации студии с объемом 500 м³ находится в пределах 0,7...0,8 с. В литературно-драматических студиях время реверберации должно быть в пределах 0,5...0,6 с. В речевых студиях для передачи информационных программ время реверберации не должно быть более 0,4 с. На рисунке 3.3 приведен один из вариантов плана аппаратно-студийного комплекса, а на фото рисунка 3.4 – пример акустического оформления и размещения оборудования в студийной аппаратной.



1 – студийное помещение; 2 – студийная аппаратная; 3 – коридор-фойе; 4 – комната для оборудования; 5 – вспомогательное помещение для хранения музыкальных инструментов и другого инвентаря; 6 – звукоизолированные двери; 7 – оконный блок; 8 – деревянные двери; 9 – аварийные выходы

Рисунок 3.3 – План аппаратно-студийного комплекса

Поскольку в одних и тех же студийных помещениях приходится записывать различные музыкальные и речевые программы, в них должна быть предусмотрена возможность перестройки акустических условий для обеспечения различных значений оптимального времени реверберации. С этой целью в студиях используются различные звукопоглощающие конструкции, которые могут сравнительно легко и быстро вводиться в действие или убираться. Например, применяются резонансные щиты (щиты Бекеши), различного типа рассеиватели звука (диффузоры Шредера, жалюзи), вращающиеся колонны с различным размещением поглощающего материала и т. д.

Широко применяются устройства искусственной реверберации, в том числе цифровые ревербераторы, реализуемые как программным путем, так и с помощью специальных приборов. Можно также проводить регулировку времени эквивалентной реверберации путем подбора расстояния между

источником звука и микрофоном и путем изменения диаграммы направленности микрофона.

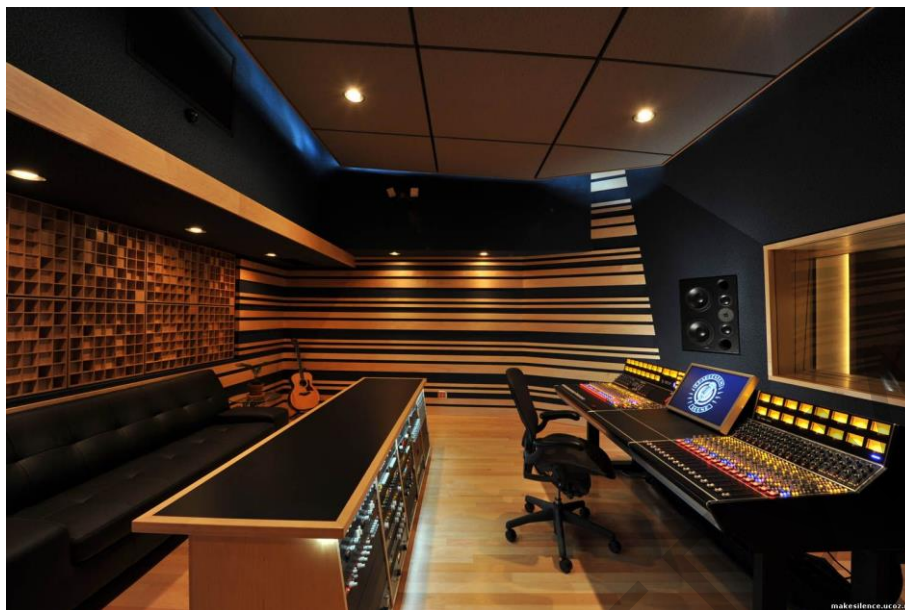


Рисунок 3.4 – Пример планировки студийной аппаратной

Кроме обеспечения оптимального времени реверберации принципиально важным параметром для студий является «ясность» или «четкость» ($S80$) для музыки (особенно камерной) и разборчивость для речи. Пределы изменения $S80$ в студиях, предназначенных для записи классической музыки, составляют $-1,8...+2$ дБ, а для романтической – $-5...-1,8$ дБ. Разборчивость речи для театрально-драматических и речевых студий должна быть не менее 90 % (слоговая); отличным считается значение коэффициента артикуляции, равное 96 %. Остальные параметры (интимность, пространственность звучания, полнота и др.) должны находиться в пределах, предложенных Л. Беранеком для хороших концертных залов.

3.3 Звукопоглощающие материалы

Для снижения или коррекции времени реверберации помещений в его отделке применяют звукопоглощающие материалы и конструкции (звукопоглотители).

С акустической точки зрения звукопоглотители могут быть разделены на следующие группы:

- пористые (в т. ч. волокнистые);
- пористые с перфорированными экранами;
- резонансные;
- слоистые конструкции;
- штучные или объемные.

Пористые звукопоглотители изготавливают в виде плит, которые крепятся к ограждающим поверхностям непосредственно или на отnose, из легких и пористых минеральных штучных материалов – пемзы, вермикулита, каолина, шлаков и т. п. – с цементом или другим вяжущим материалом. Такие плиты достаточно прочны и могут быть использованы для снижения шума в коридорах, фойе, лестничных маршах общественных и промышленных зданий.

В помещениях, где к внешнему виду звукопоглотителей предъявляются повышенные требования, применяют специальным образом обработанные волокнистые материалы. Сырьем для их производства служат древесные волокна, минеральная вата, стеклянная вата, синтетические волокна. Эти изделия также изготавливают в виде плоских плит (потолочные или стеновые панели) или криволинейных и объемных элементов. Поверхность волокнистых звукопоглотителей обрабатывается специальными пористыми красками, пропускающими воздух (например *Acutex T*) или покрывается воздухопроницаемыми тканями или неткаными материалами, например лутрасилом. В настоящее время в строительной практике чаще применяются волокнистые звукопоглотители. Они не только являются более эффективными с акустической точки зрения в широком частотном диапазоне, но и отвечают возросшим требованиям, предъявляемым к дизайну помещений.

В волокнистых поглотителях рассеяние энергии колебаний воздуха и превращение ее в тепло происходит на нескольких физических уровнях. Во-первых, вследствие вязкости воздуха, а его очень много в межволоконном пространстве, колебания частиц воздуха внутри поглотителя приводят к их трению. Кроме этого, происходит трение воздуха о волокна, поверхность которого велика. В-третьих, волокна трутся друг о друга. Этим объясняется то, что на средних и высоких частотах коэффициент звукопоглощения волокнистых материалов находится в пределах 0,4...0,9.

Волокнистые и пористые материалы используют для улучшения акустических характеристик не только в студиях, но и в кинотеатрах, театрах, концертных залах, студиях, аудиториях и др. Для увеличения звукопоглощения на низких частотах необходимо увеличить толщину материала или предусмотреть воздушный промежуток между поглотителем и отражающей конструкцией. Волокнистые звукопоглотители без окраски или без наружного тканевого слоя используют с наружной защитой от механических повреждений, выполненной из перфорированного материала (например, *Sound Lux*, дерева, фанеры, гипсокартона).

Коэффициенты звукопоглощения некоторых строительных материалов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Коэффициенты звукопоглощения строительных материалов

| Материал, объект | Частота, Гц | | | | | |
|---|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Бетон неокрашенный | 0,01 | 0,012 | 0,016 | 0,019 | 0,023 | 0,035 |
| Бетон окрашенный | 0,009 | 0,011 | 0,014 | 0,016 | 0,017 | 0,018 |
| Мрамор | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,013 | 0,015 | 0,017 |
| Кирпич неокрашенный | 0,024 | 0,025 | 0,031 | 0,042 | 0,049 | 0,07 |
| Кирпич окрашенный | 0,012 | 0,013 | 0,017 | 0,02 | 0,023 | 0,025 |
| Штукатурка гипсовая | 0,02 | 0,026 | 0,04 | 0,062 | 0,058 | 0,028 |
| Штукатурка известковая | 0,024 | 0,046 | 0,06 | 0,085 | 0,043 | 0,056 |
| Древесноволокнистые плиты (ДВП), 12 мм | 0,22 | 0,3 | 0,34 | 0,32 | 0,41 | 0,42 |
| Панель гипсовая 10 мм на расстоянии 100 мм от стены | 0,41 | 0,28 | 0,15 | 0,06 | 0,05 | 0,02 |
| Пол паркетный | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |
| Пол дощатый на лагах | 0,2 | 0,15 | 0,12 | 0,1 | 0,08 | 0,07 |
| Метлахская плитка | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 |
| Застекленные оконные переплеты | 0,35 | 0,25 | 0,18 | 0,12 | 0,07 | 0,04 |
| Двери лакированные | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Ковер шерстяной толщиной 9 мм по бетону | 0,02 | 0,08 | 0,21 | 0,26 | 0,27 | 0,37 |

Для предотвращения эмиссии частиц волокна между экраном и волокнистым материалом прокладывают воздухопроницаемый холст. Конструкции с перфорированным покрытием звукопоглотителя позволяют достигать достаточно большого звукопоглощения в широком диапазоне частот. Частотную характеристику звукопоглощения регулируют подбором материала, его толщиной, размером, формой и шагом отверстий. Звукопоглощение пористых и волокнистых материалов, покрытых перфорированным экраном, носит резонансный характер. Прототипом таких конструкций служит резонатор Гельмгольца, состоящий из воздушной полости, соединенной отверстием с помещением, например, глиняный сосуд, вмурованный в стену, с открытым в помещение отверстием. У таких резонаторов звукопоглощение достигается в узком диапазоне частот вблизи собственной частоты колебаний.

Для получения высокого значения коэффициента звукопоглощения (0,7...0,9) в широком диапазоне частот применяют многослойные резонансные конструкции, состоящие из двух-трех параллельных экранов с разной перфорацией и с воздушными промежутками неодинаковой толщины. Звукопоглощающие конструкции с большим звукопоглощением в области

низких частот изготавливают в виде панелей, состоящих из тонких пластин (например, дерева, фанеры, гипсокартона), закрепленных на раме. Пластины должны быть расположены на некотором расстоянии от ограждающих поверхностей. Под действием звуковых волн панели будут колебаться. При совпадении резонансных частот панелей с частотами падающих звуковых волн происходит резонансное поглощение этих волн. Если при этом между панелями и ограждением разместить волокнистые поглотители, эффективные на средних и высоких частотах, то будут сформированы широкополосные звукопоглощающие конструкции. Без их применения трудно добиться оптимального времени реверберации в концертных и театральных залах, где применение только пористых и волокнистых поглотителей приглушает зал на средних и высоких частотах и оставляет его достаточно гулким на низких.

Следует также иметь в виду, что в помещениях большого объема эффективность снижения времени реверберации или уровня шума за счет добавочного звукопоглощения уменьшается. В таких помещениях важно использовать еще и форму стен и потолков. Так, применение не плоских, а кессонных потолков или выступов (балконов) на стенах увеличивает звукопоглощение (на низких частотах – за счет формы поверхности, на средних и высоких – за счет многократных отражений от удаленных участков стен и потолка). Кроме того, это приводит к большей диффузности звукового поля, что положительно сказывается на акустике помещения.

В тех случаях, когда звукопоглощающие материалы нельзя применять на ограждающих конструкциях (например, если они прозрачные или их площадь недостаточна для достижения необходимого эффекта), используются подвесные штучные (объемные) звукопоглотители. Чаще всего это плоские плиты из волокнистых материалов, обтянутые тканями или заключенные в перфорированные листы металла. Так, штучные звукопоглотители *Bufl* шведской фирмы *Ecophon* (600×1200×50 мм), обладают специальными крючками для подвеса. Такие конструкции акустически очень эффективны, т. к. подвешенные вертикально, они поглощают звук обеими поверхностями. Если эти поглотители подвешены так, что в плане образуют замкнутые фигуры (квадраты, треугольники и т. д.), то звукопоглощение увеличивается за счет резонансного поглощения в воздухе между вертикалями панелей.

При выборе того или иного звукопоглотителя, помимо акустических требований, необходимо учитывать и условия эксплуатации помещения. Необходимо принимать во внимание такие свойства материалов, как влаго- и огнестойкость, механическая прочность, экономичность, биостойкость, возможность вторичной покраски, очистки от пыли и мойки.

Ведущие торговые марки звукопоглощающих материалов и конструкций, представленные на рынке СНГ:

- *Ecophon* (Швеция) – подвесные потолки, стеновые панели, штучные звукопоглотители на основе стекловолокна;
- *Akusto* (Финляндия) – подвесные потолки на основе стекловолокна;
- *Rockfon* (Дания) – подвесные потолки на основе базальтового волокна;

- Шуманет БМ (РФ) – необработанные звукопоглощающие панели на основе базальтового волокна;
- *Sound Lux* (РФ) – стеновые панели из металлических перфорированных кассет и базальтово-волоконистых звукопоглотителей;
- *AMF, OWA* (Германия) – потолочные панели из различных волоконистых материалов;
- *МАРРУ* (Италия) – поролоновые пористые звукопоглощающие листы и маты с различной формой лицевой поверхности (для лучшего рассеивания отраженных волн).

Кроме того, необходимо отметить, что наличие мягких кресел, декораций, занавесей, ковровых дорожек, зрителей увеличивает общее звукопоглощение, что также необходимо учитывать при выборе звукопоглощающих материалов для акустического оформления студий.

3.4 Акустическое оформление студий

Прежде всего в соответствии с рекомендациями, приведенными выше, необходимо определить объем и форму студии и студийной аппаратной, а также оптимальную частотную зависимость стандартного времени реверберации.

Зная V и $T_p(f)$ и пользуясь формулой Н. Эйринга (1.4), находим средний коэффициент звукопоглощения $\alpha_{cp}(f)$. Если объем студии превышает 2000 м^3 , то на частотах более 2 кГц значения $\alpha_{cp}(f)$ находят с учетом поглощения звука в воздухе, т. е. по формуле

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{cp}) + 4 \cdot \mu \cdot V}, \quad (3.9)$$

где μ – показатель затухания звука в воздухе, имеющий размерность м^{-1} , который определяют по кривым на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Зависимости коэффициента затухания звука в воздухе от относительной влажности и частоты (по данным Э. Ивенса и Э. Безли)

Относительная влажность воздуха в помещении для комфортного самочувствия людей в соответствии с санитарными нормами должна составлять 40...55 % при температуре 22...25 °С.

Для всех расчетных частот (обычно 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 6000 Гц) определяем общий фонд звукопоглощения:

$$A(f) = \alpha_{\text{ср}}(f) \cdot S, \quad (3.10)$$

где S – общая площадь всех внутренних ограничивающих поверхностей студии, которая определяется по формуле

$$S = 2 \cdot l \cdot b + 2 \cdot l \cdot h + 2 \cdot b \cdot h. \quad (3.11)$$

Все требуемое (расчетное) звукопоглощение A условно разделяют на две составляющие: основное $A_{\text{осн}}$ и добавочное $A_{\text{доб}}$. В основной фонд включают звукопоглощение, не изменяемое в процессе подбора материалов. Основной фонд складывается из предметов обстановки, оборудования, декоративного оформления, присущих студии. Сюда также входит звукопоглощение, создаваемое предполагаемым количеством исполнителей, а также полом, стенами, потолком, не покрытыми звукопоглощающими материалами, дверями, окнами, вентиляционными решетками.

Добавочное звукопоглощение вычисляют как разность требуемого и основного фонда звукопоглощения:

$$A_{\text{доб}} = A - A_{\text{осн}}. \quad (3.12)$$

Оно формируется специальными звукопоглощающими материалами и конструкциями, как правило, промышленного изготовления. Например, гладкие, крашенные маслом стены, застекленные окна, паркет, полированная мебель – хорошие отражатели звука. Энергия звуковых волн при отражении от таких поверхностей теряется в небольшом количестве. Ковры, мягкая мебель, тяжелые матерчатые драпировки и др., напротив, являются хорошими поглотителями. Наличие их в помещении резко сокращает время реверберации.

Часто в студии имеются поглотители звука – люди, предметы обстановки, музыкальные инструменты, в отношении которых невозможно пользоваться понятием коэффициента поглощения, поскольку трудно определить занимаемую ими площадь. Для таких поглотителей обычно известно, каким эквивалентным звукопоглощением a_j обладает каждый из них. При вычислении основного фонда звукопоглощения добавляют второе слагаемое в виде суммы произведений соответствующих величин звукопоглощения $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$ на количество поглотителей $K_1, K_2, K_3, \dots, K_m$, таким образом

$$A_{\text{осн}} = \sum_{i=1}^p S_i \cdot \alpha_i + \sum_{j=1}^m K_j \cdot a_j. \quad (3.13)$$

Средний коэффициент поглощения определяется как

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{A_{\text{осн}}}{S}. \quad (3.14)$$

Теперь, зная среднее значение коэффициента поглощения для всех расчетных частот, по формуле Эйринга можно определить стандартное время реверберации для акустически необработанного помещения:

$$T = \frac{0.166 \cdot V}{S(-\ln(1 - \alpha_{\text{ср}}))}, \quad (3.15)$$

Как правило, полученные значения T времени реверберации значительно больше оптимального времени реверберации. Поэтому, чтобы приблизить величину времени реверберации в проектируемой студии к оптимальной, необходимо провести дополнительную акустическую обработку внутренних поверхностей зала. Подбираем звукопоглощающие материалы и конструкции таким образом, чтобы за счет добавочного звукопоглощения $A_{\text{доб}}$, общее поглощение A оказалось близким к требуемому.

Для обеспечения требуемой частотной характеристики времени реверберации обычно приходится применять различные типы материалов, имеющие различные частотные характеристики звукопоглощения. Подбор их

В телевизионных студиях постановочных передач значительное звукопоглощение создают декорации. На низких частотах оно может достигать 70 %, на средних – 40 %, а на верхних – 50 % от требуемого общего звукопоглощения. Для приближенных расчетов было введено понятие усредненного коэффициента поглощения декораций, отнесенного либо к 1 м² площади поверхности декорации, – для плоскостных декораций (т. н. «задников»), либо к 1 м² площади пола, занимаемой декорациями, – для объемных декораций.

Результаты расчетов необходимо представить таблицей (таблица 3.4) и графиками зависимостей основного и добавочного фондов звукопоглощения и времени реверберации студии от частоты.

Таблица 3.4 – Сводная таблица расчета акустического оформления студии

| Наименование материалов (поглотителей) | Площадь (м ²) или количество | Частота, Гц | | | | | | | | | | | |
|--|--|-------------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|
| | | 125 | | 250 | | 500 | | 1000 | | 2000 | | 4000 | |
| | | α | A | α | A | α | A | α | A | α | A | α | A |
| Основной фонд (перечислить составляющие) | | | | | | | | | | | | | |
| Итого: | | | | | | | | | | | | | |
| Требуемое общее поглощение A | | | | | | | | | | | | | |
| Требуемый добавочный фонд $A_{доб} = A - A_{осн}$ | | | | | | | | | | | | | |
| Итого: | | | | | | | | | | | | | |
| Добавочный фонд (перечислить составляющие) | | | | | | | | | | | | | |
| Итого: | | | | | | | | | | | | | |
| Расчетное общее поглощение ($A_{доб} + A_{осн}$) | | | | | | | | | | | | | |
| Средний коэффициент звукопоглощения, $\alpha_{ср}$ | | | | | | | | | | | | | |
| Расчетное время реверберации T_p | | | | | | | | | | | | | |
| Оптимальное время реверберации $T_{опт}$ | | | | | | | | | | | | | |
| Отклонение $\Delta T = T_p - T_{опт}$ | | | | | | | | | | | | | |
| Отклонение, % $(\Delta T / \Delta T_{опт}) 100$ | | | | | | | | | | | | | |

Сведения о коэффициентах звукопоглощения некоторых материалов и конструкций содержатся в приложении А. При размещении звукопоглощающих материалов по поверхности студии необходимо учитывать не только акустические, но и архитектурно-декоративные требования. Нижнюю

часть стен рекомендуется покрывать поглотителями, отличающимися прочностью, долговечностью и хорошими декоративными свойствами. Это могут быть, например, жесткие деревянные панели. Остальную часть стен следует покрывать звукопоглотителями, которые размещают таким образом, чтобы они равномерно чередовались с непокрытыми участками стен. Чаще всего применяют перфорированные конструкции и акустические плиты, стремясь создать рельеф, обладающий не только необходимыми акустическими свойствами, но и приемлемый в декоративном отношении. Потолок покрывают перфорированными и звукорассеивающими конструкциями, например, полицилиндрами. Пример акустического оформления музыкальной студии представлен на рисунке 3.6. Применение звукопоглощающих материалов позволило обеспечить приемлемую величину времени реверберации в диапазоне частот.

При подборе звукопоглощающих материалов необходимо учитывать одновременно целый ряд дополнительных факторов: стоимость материалов, их внешний вид, возможность поставки, требования пожарной безопасности и т. п. На этой же предварительной стадии следует решить вопрос и о способе монтажа материалов на поверхностях студии. Звукопоглощающие свойства материалов зависят и от способа их крепления. Например, наличие воздушного зазора между задней поверхностью звукопоглощающей плиты и плоскостью стены (при креплении плиты по несущему каркасу) приведет к увеличению поглощения в низкочастотной области. Игнорирование этого факта при акустическом проектировании может привести к существенному «переглушению» студии на низких частотах, причем исправление этого дефекта в построенной студии обычно весьма сложно и требует значительных затрат. Помимо этого, следует принимать во внимание и ряд дополнительных акустических требований. В частности, для музыкальных студий оказывается полезным размещать на потолке достаточно большое количество звукорассеивающих конструкций, в дикторских студиях следует избегать поступления первых интенсивных отражений в область размещения дикторского стола и др.



Рисунок 3.6 – Пример акустического оформления музыкальной студии

При проектировании необходимо также учитывать, что расчеты фонда звукопоглощения помещений не обладают высокой точностью. Это связано с целой группой факторов, в том числе с тем, что используемые при расчетах справочные данные о коэффициентах звукопоглощения различных материалов и конструкций являются усредненными. Их реальные значения могут отличаться от справочных, что обуславливает необходимость корректировки времени реверберации в акустически обработанном помещении.

Подобная корректировка, называемая также акустической настройкой, является обязательной процедурой перед вводом в эксплуатацию любой студии. Поэтому необходимо предусмотреть в проекте конструктивные решения, позволяющие проводить акустическую настройку достаточно быстро и без сколько-нибудь существенных дополнительных капитальных затрат. Процедура акустической настройки базируется на проводимых в студии акустических измерениях. Как правило, применяется цифровое измерительное оборудование с процессорным управлением. При проведении акустических измерений не ограничиваются определением только нормированных показателей, т. е. времени реверберации и уровня шума. Определяют также структуру звуковых отражений и целый ряд дополнительных параметров акустического качества, таких как индекс прозрачности, индекс четкости, время раннего затухания и др.

3.5 Комплекс оборудования современной радиовещательной студии

После акустического оформления помещения студии и аппаратной, можно перейти к выбору и размещению оборудования. При этом чаще всего начинают с выбора и размещения выходного звена звукового тракта – акустических систем (мониторов). В малобюджетных студиях обычно применяют недорогие акустические системы (АС), потенциал которых достаточен для успешной работы звукорежиссера. Однако неудачное размещение АС может ухудшить качество звуковоспроизведения, даже при использовании высококачественных АС. Это произойдет, например, если АС будут размещены рядом с отражающими звук предметами, как показано на рисунке 3.7.

Если расстояние от АС до стены составляет, например, 0,4 м, то разность хода l двух сигналов (прямого и отраженного от стены) составит приблизительно 1 м. На частоте 85 Гц длина волны λ равна 4 м и сдвиг фаз φ между прямым и отраженным сигналами составит $\varphi = 360l/\lambda = 360 \times 0,25 \times 1 = 90^\circ$. Сложение таких сигналов приводит к увеличению звукового давления, которое может достигнуть значимой величины. С повышением частоты излучаемого сигнала сдвиг фаз возрастает. При прежней разности хода 1 м сигналы оказываются противофазными на частоте 170 Гц, что проявляется в спаде АЧХ. По мере увеличения частоты спад сменяется подъемом и т. д. Это явление напоминает явление акустического короткого замыкания у единичных громкоговорителей

без акустического оформления. При асимметричном расположении АС относительно стен различия в их АЧХ могут оказаться существенными, превышающими на некоторых частотах 6 дБ. В результате спектральный баланс нарушается, искажается стереопанорама. Смещение кажущихся источников звука от требуемого положения может достигать четверти ширины стереобазы. Проверить влияние отражений можно путем прослушивания тестовой фонограммы, в которой специальный широкополосный сигнал подается последовательно в левую, правую и одновременно в обе АС.

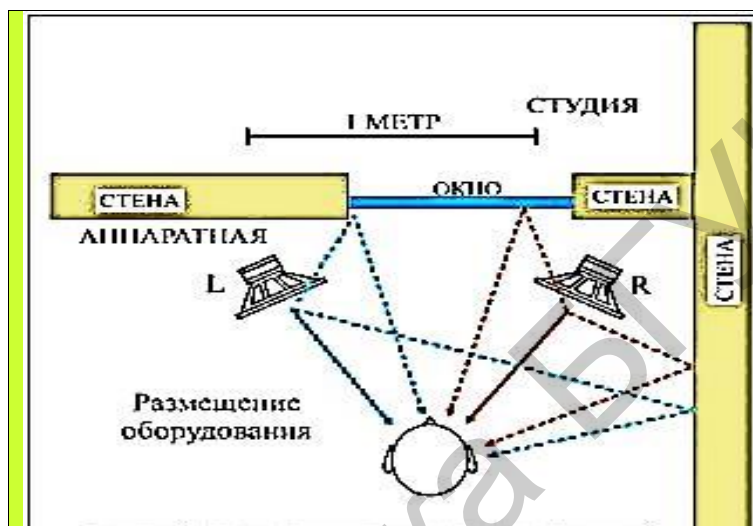


Рисунок 3.7 – Неудачное размещение мониторов в аппаратной

При значимом влиянии отражений мы также заметим и изменение тембра звучания. Исправить такой дефект можно удалением АС от стен и других предметов, отражающих звук. Иногда помогает размещение поглощающих материалов на стенах, прилегающих к мониторам.

Для Национальной государственной телерадиокомпании Республики Беларусь специалистами компании *HLS Medientechnik* (Германия) были спроектированы и поставлены «под ключ» комплексы оборудования для средней музыкальной студии объемом порядка 2000 м³ и малой студии универсального назначения (рисунок 3.7). Студии обеспечивают контентом Первый национальный канал, радиостанцию «Беларусь», радио «Столица», канал «Культура». Основу микрофонного парка средней музыкальной студии составляют микрофоны *Neumann TLM 193* с зеркальной АЧХ по отношению к нелинейности АЧХ времени реверберации студийного помещения. В качестве основных стереомикрофонов применены микрофоны *Schoeps MK 4G* с усилителями *Schoeps CMC 6 UG XT*, которые обеспечивают расширенный до 40 кГц диапазон частот. Солистов записывают с помощью микрофонов *Brauner Phantom C*, с теплым, аналогичным ламповому звучанием в широком диапазоне звуковых давлений, в интервале частот от 20 Гц до 22 кГц. В качестве микрофонов второго плана

применяются микрофоны *Audio-Technica AT4047*. Система контроля на головные телефоны многоканальная – на основе центрального усилителя *Furman HDS-6* и персональных микшеров *HR-6*.

Аппаратная звукозапись средней музыкальной студии базируется на аналоговом микшерном пульте *D&R CINE-MIX 2*: частотный диапазон составляет от 10 Гц до 100 кГц; *dual-in-line* – одновременная многоканальная запись и сведение, автоматизация микширования; полное *LCRS*- и 5.1-панорамирование на каждом модуле; компрессоры динамического диапазона 3С во всех каналах. Система многоканальной звукозаписи построена на основе комплекса *Pro Tools* с ПО версии 8.0. Основные АЦП/ЦАП – *DIGIDESIGN 192 I/O*. Система записи дополнена вторым комплексом на базе компьютера, по умолчанию используемого для автоматизации пульта, и АЦП/ЦАП *Lynx Aurora 16*.

Акустический контроль осуществляется с использованием акустических систем среднего поля *PMC IBIS*. Пассивные АС *PMC* поддерживаются усилителями мощности (УМ) *Bryston 14B-SST*. АС ближнего поля могут использоваться как для монтажа, так и для поддержки *Surround* звучания в версиях «музыка 4.0» или «музыка + диалоги 5.0».

Генератор акустической атмосферы *LEXICON 960* способен не только создавать реалистичную имитацию процесса реверберации, но и преобразовывать стереофонограммы в фонограммы форматов *Surround*.

Компрессоры, встроенные в микшерный пульт, дополняют внешние устройства – *SPL TRANSIENT DESIGNER* и *SPL DynaMaxx*, а также монтажную аппаратную. В монтажной аппаратной установлена система *Pro Tools* с набором АЦП/ЦАП, аналогичная аппаратной звукозаписи.

Задачи, решаемые малой студией, не менее разнообразны. Мультизадачность осложнила подбор микрофонного парка. В результате выбор был остановлен на микрофонах *Rode NT1-A* (с кардиоидной ДН) и *Rode NT2-A*. Эти модели обеспечивают максимальное затухание по тылу, с сохранением остальных характеристик на достаточно высоком уровне.

Сердце аппаратной малой студии (рисунок 3.8) – микшерный пульт *Soundcraft Ghost*, системы *in-line* с возможностью создания двух миксов: основного (по выходу на многоканальный рекордер) и дополнительного (по сведению с рекордером). В связи с особыми требованиями к дизайну микшерный пульт установлен на специальной консоли *Argosy Soundcraft Ghost*. Среди оборудования аппаратной малой студии следует отметить пассивные АС *JBL LSR6332* для контроля качества речи и стереоконтроля и высококачественные усилители *Bryston 4B-SST*. В качестве микрофонного предусилителя, ди-эссера, компрессора, лимитера, эквалайзера применена модель *Track One*. Это устройство с автоматической настройкой временных характеристик предназначено для обработки речи, вокала и улучшения звучания музыкальных инструментов.



Рисунок 3.8 – Аппаратная малой студии

Кроме этих студий формирование программ происходит и в более простых по составу оборудования эфирных студиях малого объема, рассчитанных на выпуск дикторских, музыкальных и новостных программ. Все эфирные студии Дома радио, кроме музыкальных, имеют в составе цифровое устройство задержки сигнала на выходе пульта. Для обеспечения совместимости этого устройства с остальным аналоговым оборудованием тракта, производится аналого-цифровое и цифроаналоговое преобразование аудиосигнала до и после обработки соответственно.

Сформированные сигналы звукового вещания с помощью двухпроводного кабеля подаются в центральную аппаратную. Туда также сходятся каналы служебной связи. Коммутация и контроль сигналов в центральной аппаратной производится в аналоговом виде с помощью активного матричного коммутатора *HARRIS PANACEA* и индикаторных панелей уровней аудиосигналов. Далее сигналы радиопрограмм по электрическому кабелю длиной порядка двух километров поступают в Международный центр коммутации РУП «Белтелеком» для дальнейшей доставки к радиовещательным передатчикам.

Приложение А
(справочное)

Коэффициенты звукопоглощения материалов и объектов

Таблица А.1 – Коэффициенты звукопоглощения материалов и объектов

| Материалы и объекты | Частота, Гц | | | | | | |
|--|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 6000 |
| | Коэффициент звукопоглощения | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Слушатели | 0,33 | 0,41 | 0,44 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,47 |
| Слушатели на деревянных стульях | 0,17 | 0,36 | 0,47 | 0,52 | 0,50 | 0,46 | 0,44 |
| Кресло деревянное | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
| Кресло, обитое кожей | 0,10 | 0,12 | 0,17 | 0,17 | 0,12 | 0,10 | 0,10 |
| Кресло, обитое кожей и поролоном | 0,05 | 0,09 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 | 0,15 |
| Кресло, обитое бархатом | 0,14 | 0,22 | 0,31 | 0,40 | 0,52 | 0,60 | 0,62 |
| Стул мягкий | 0,05 | 0,09 | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,16 | 0,15 |
| Стул полумягкий | 0,05 | 0,08 | 0,18 | 0,15 | 0,17 | 0,15 | 0,05 |
| Стул жесткий | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Публика на 1 м ² | 0,28 | 0,40 | 0,45 | 0,49 | 0,47 | 0,45 | 0,44 |
| Паркет по асфальту | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,07 |
| Паркет на шпонках | 0,20 | 0,15 | 0,12 | 0,10 | 0,08 | 0,07 | 0,07 |
| Пол на деревянных балках | 0,15 | 0,11 | 0,10 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,06 |
| Резина толщиной 5 мм на полу | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,10 | 0,06 |
| Релин | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,06 |
| Линолеум на твердой основе | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Стена, оштукатуренная и окрашенная краской клеевой | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

Продолжение таблицы А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Стена, оштукатуренная и окрашенная краской масляной | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Стена, оштукатуренная известкой с металлической сеткой | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,08 | 0,04 | 0,06 | 0,06 |
| Стена, оштукатуренная известкой с деревянной обрешеткой | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,04 | 0,06 | 0,06 |
| Деревянные плиты | 0,12 | 0,11 | 0,1 | 0,03 | 0,08 | 0,11 | 0,12 |
| Стена песочно-известковая | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,04 | 0,06 | 0,06 |
| Обычная гипсовая штукатурка | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,06 | 0,03 | 0,07 |
| Бетонная поверхность железненная | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| Штукатурка АЦП | 0,27 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,33 | 0,40 | 0,13 |
| Мрамор, гранит и другие шлифы | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| Кирпичная кладка без расшивки швов | 0,15 | 0,19 | 0,29 | 0,28 | 0,38 | 0,46 | 0,45 |
| Кирпичная кладка с расшивкой швов | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,06 |
| Метлахская плитка | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 |
| Проем сцены | 0,20 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,20 |
| Вентиляционные решетки | 0,30 | 0,42 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,51 | 0,52 |
| Окно (стекло ординарное) | 0,35 | 0,25 | 0,18 | 0,12 | 0,07 | 0,04 | 0,03 |
| Двери лакированные | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Двери сосновые | 0,10 | 0,11 | 0,10 | 0,08 | 0,08 | 0,11 | 0,11 |

Список использованных источников

- 1 Вахитов, Ш. Я. Акустика / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев. – М : Горячая Линия – Телеком, 2009. – 662 с.
- 2 Радиовещание и электроакустика : учебник для вузов / С. Н. Алябьев [и др.] ; под ред. Ю. А. Ковалгина. – М. : Радио и связь, 2002. – 798 с.
- 3 Электроакустика и звуковое вещание : учеб. пособие для вузов / И. А. Алдошина [и др.] ; под ред. Ю. А. Ковалгина. – М. : Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.
- 4 Радиовещание и электроакустика : учебник для вузов / А. В. Выходец [и др.] ; под ред. М. В. Гитлица. – М. : Радио и связь, 1989. – 432 с.
- 5 Ефимов, А. П. Акустические измерения, оценки, контроль : учеб. пособие / А. П. Ефимов, Ю. С. Рысин, Д. Г. Свобода. – М. : МГУСИ, 2005. – 113 с.
- 6 Шалатонін В. І. Електраакустыка і радыёвяшчанне : вучэбны дапаможнік. В 2 ч. Ч. 1: Тэарэтычныя асновы акустыкі / В. І. Шалатонін – Мінск : БДУІР, 1994. – 60 с.
- 7 Шалатонін В. І. Електраакустыка і радыёвяшчанне : вучэбны дапаможнік. В 2 ч. Ч. 2: Асноўныя ўласцівасці маўлення і слыху / В. І. Шалатонін. – Мінск : БДУІР, 1997. – 78 с.
- 8 Сергеев, М. Акустическое оформление малых студий / М. Сергеев // Звукорежиссер. – 2009. – № 6. – С. 26–29.
- 9 Акустика: справочник / А. П. Ефимов [и др.] ; под ред. М. А. Сапожкова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1989. – 336 с.
- 10 Алдошина, И. А. Музыкальная акустика : учебник для высших учебных заведений / И. А. Алдошина, Р. Приттс. – СПб. : Композитор, 2011. – 720 с.
- 11 Алдошина, И. А. Акустика студий и контрольных комнат. Архив журнала «Звукорежиссер» №1/2004 [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : <http://www.acoustic.ua/articles/117>.
- 12 Музыкальная акустика [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : <http://www.paintpit.ru/sitemap.html>.
- 13 Защита от шума и вибраций [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : <http://www.acoustic.ua/articles/>.
- 14 Ефимов, А. П. Три взгляда на акустику помещений [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : <http://rusarch.ru/efimov1.htm>.

Учебное издание

Шалатонин Валерий Иванович

ЭЛЕКТРОАКУСТИКА И ЗВУКОВОЕ ВЕЩАНИЕ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Е. С. Чайковская*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *Е. Г. Бабичева*

Подписано в печать 26.10.2016. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,07. Уч.-изд. л. 4,1. Тираж 100 экз. Заказ 250.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровка, 6