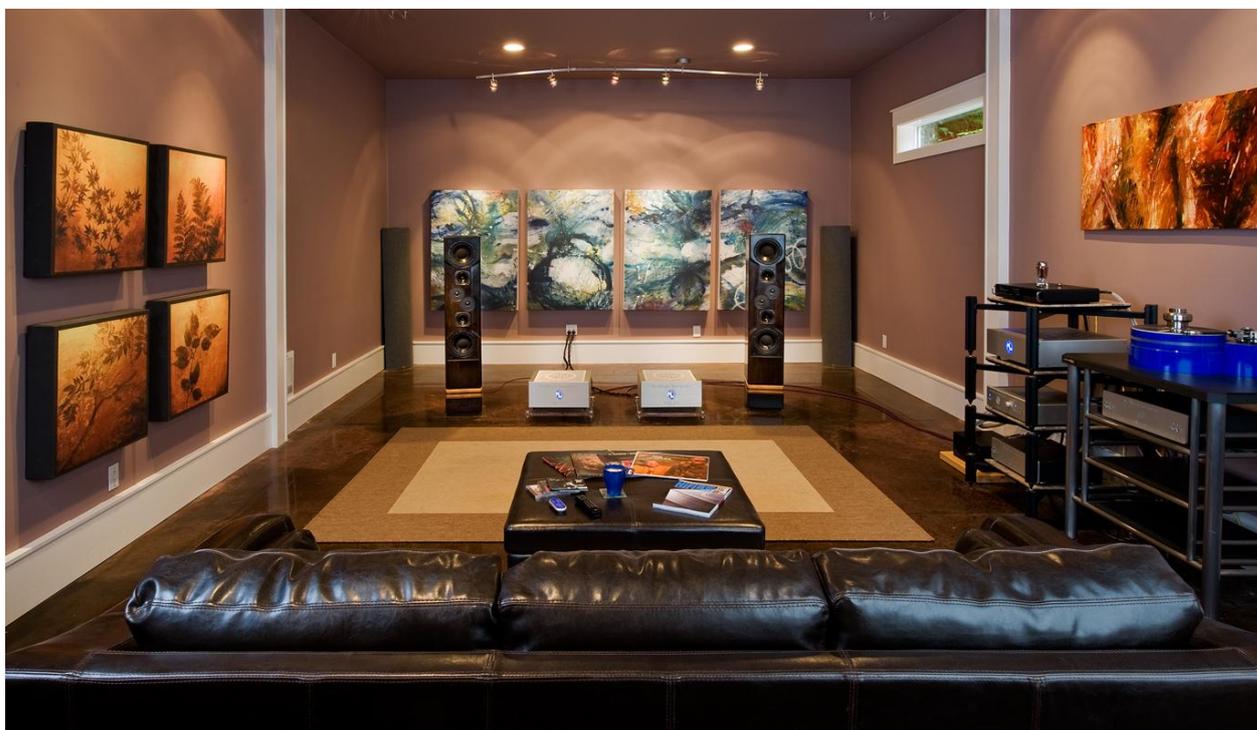


Коррекция акустики музыкальной комнаты. С чего начать?

Каждая музыкальная комната или домашний кинотеатр не похожи друг на друга, как и сами их владельцы. Акустическое проектирование подобных помещений носит ярко выраженный индивидуальный характер. Если Вы решили построить собственную музыкальную комнату, то лучше всего обратиться к инженеру-акустику. Тем не менее, существуют наиболее общие принципы акустической обработки помещений, которые можно применять на практике самостоятельно. Несмотря на внешнюю простоту изложенных ниже рекомендаций, их выполнение может служить мощным инструментом для коррекции основных акустических дефектов помещения и получения, в конечном счете, удовольствия от прослушивания музыки в комнате с реалистичной и живой звуковой сценой.

Андрей Смирнов, инженер-физик, руководитель компании «Акустические материалы и технологии»

Звук, который мы слышим в музыкальной комнате для прослушивания, определяется сложными взаимосвязями между расположением громкоговорителей, слуховой способностью и размещением слушателя, геометрией и акустическими условиями ограждающих поверхностей комнаты. Все эти факторы часто игнорируются, и основное внимание уделяется исключительно качеству громкоговорителей. Однако качество звучания громкоговорителей может значительно изменяться в зависимости от акустических условий комнаты, в которой они установлены. Именно поэтому одна и та же акустическая система по-разному звучит в разных помещениях.



Основные методы коррекции акустики помещений

Существует две основные формы акустической обработки помещений - это поглощение и рассеивание звука.

Звукопоглотители могут быть подразделены на следующие группы:

- пористые материалы,
- панельные (диафрагменные) поглотители
- конструкции с перфорированным покрытием.

Звукопоглощение **пористых материалов** обусловлено вязким трением при движении воздуха в узких каналах и порах, внутренним трением при деформации скелета материала, а также теплообменом между воздухом в порах и скелете. Пористые звукопоглощающие материалы обычно изготавливают в виде плит, которые крепят непосредственно к поверхности ограждения или на отnose. Наиболее популярны волокнистые поглощающие материалы, изготавливаемые из древесного волокна, минеральной ваты или стеклянного волокна на синтетическом связующем (AcousticWool, Ecophon, Heradesign, Rockwool, Isover и т.п.). Часто применяются плиты из акустического поролона волнообразной или пирамидальной формы (Mappysil, Vicoustic, Auralex и т.п.).

Для пористых материалов характерно невысокое звукопоглощение на низких частотах, которое плавно растет с повышением частоты звука. Звукопоглощение пористого материала на низких частотах увеличивается при увеличении его толщины и/или плотности.

Коэффициенты звукопоглощения для большинства пористых материалов на средних и высоких частотах составляют 0,5-0,95. Их используют в основном для улучшения акустических качеств в кинотеатрах, театрах, концертных залах, студиях, аудиториях. К пористым материалам относятся также драпировки и ковры, применяемые для увеличения общего звукопоглощения на средневысоких и высоких частотах.

Панельные поглотители являются достаточно популярным средством акустической обработки музыкальных комнат благодаря простоте конструкции и достаточно высокому поглощению в области низких частот. Панельный поглотитель представляет собой жесткий каркас-резонатор с замкнутым объемом воздуха, герметично закрытый гибкой и массивной панелью (мембраной). В качестве материала мембраны, обычно применяют листы фанеры или MDF с наклеенным с внутренней стороны слоем вибродемпфирующего материала. Во внутреннее пространство каркаса помещается эффективный пористый звукопоглощающий материал.

Звуковые колебания приводят в движение мембрану (панель) и присоединенный объем воздуха. При этом кинетическая энергия мембраны преобразуется в тепловую энергию за счет внутренних потерь в материале мембраны, а кинетическая энергия молекул воздуха преобразуется в тепловую энергию за счет вязкого трения в слое звукопоглотителя. Поэтому такой тип низкочастотного поглотителя называется конверсионным. Рассчитать резонансную частоту панельного поглотителя можно с помощью простого он-лайн калькулятора <http://www.acoustic.ua/forms/calculator6.html> .



Панельный поглотитель



Резонатор Гельмгольца

Конструкции с перфорированным покрытием позволяют получить высокое поглощение звука в широком диапазоне частот и применяются в помещениях различного назначения.

В общем случае конструкция поглотителя представляет собой деревянный каркас, смонтированный на поверхности стены или потолка. На каркасе закрепляется перфорированная панель из дерева, гипса или МДФ. Внутреннее пространство каркаса заполняется пористым звукопоглощающим материалом. Иногда вместо перфорированной панели применяется набор деревянных планок, между которыми оставляются зазоры. Такая конструкция называется резонатором Гельмгольца.

Резонансная частота поглощения зависит от коэффициента перфорации (сечения деревянных планок), размера и формы отверстий, глубины каркаса и эффективности звукопоглощения пористого материала. Рассчитать резонансную частоту резонатора Гельмгольца можно с помощью он-лайн калькулятора <http://www.acoustic.ua/forms/calculator5.html> .

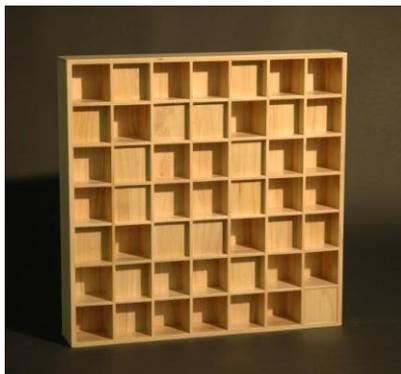
Большое преимущество перфорированных конструкций заключается в простоте их изготовления и монтажа, а также в хороших возможностях архитектурно-декоративного решения интерьера. Наиболее популярные перфорированные звукопоглощающие панели выпускаются под торговыми марками Topakustik, Knauf Cleaneo Acoustic, Danoline и т.п.

Рассеивание звука в комнате прослушивания или домашнем кинотеатре можно обеспечить с помощью элементов интерьера (открытые стеллажи, полки и т.п.) или применением специальных акустических диффузоров. Принцип работы диффузора основан на изменении направления распространения звука в пространстве. Некоторые типы диффузоров изменяют и временные характеристики отраженной звуковой волны. При использовании диффузоров ранние отражения рассеиваются и, следовательно, приходят к слушателю с задержкой и с меньшей интенсивностью.

Цилиндрические и пирамидальные диффузоры просто «скашивают» звук таким образом, чтобы отраженный сигнал имел интенсивность меньше исходной.

Диффузоры типа Skyline эффективно перенаправляют звук преимущественно на высоких частотах.

Диффузоры Шредера, конструкция которых основана на математической последовательности квадратичных вычетов из теории чисел, применяются для получения диффузного звукового поля. Фактически, диффузор Шредера представляет собой дифракционную решетку, которая рассеивает падающую на нее звуковую энергию в широком диапазоне частот, даже при большой величине угла падения. Диффузор Шредера состоит из серии ячеек различной глубины, выполненных в корпусе из дерева, MDF или других листовых материалов. На практике применяются двухмерные и одномерные конструкции диффузоров Шредера.



Диффузор Шредера



Диффузор Skyline

Рассчитать конструкцию диффузора Шредера можно с помощью он-лайн калькулятора http://acoustic.ua/forms/SchDiff_out.html .

Типовые проблемы акустики малых помещений

Контролируя ранние отражения и применяя определенное количество звукопоглощающих материалов иногда можно заставить маленькую музыкальную комнату звучать, как большое полноценное помещение. Существует ряд приемов, которые можно использовать для коррекции акустики помещения и предотвращения появления нежелательных акустических дефектов.

Основные факторы, влияющие на степень акустического комфорта или вызывающие возникновение акустических искажений в комнатах прослушивания и домашних кинотеатрах:

Время реверберации (RT60) - один из главных критериев, оценивающих акустическое качество помещения. В общем случае, снижение времени реверберации приводит к улучшению ясности речи и музыкальной артикуляции.

Уменьшение времени реверберации достигается применением в помещении звукопоглощающих покрытий стен, пола и потолка. Однако, при чрезмерно высоком звукопоглощении звучание может приобрести неприятный "ватный" оттенок, ведь человек интуитивно настроен на наличие природной реверберации и при ее недостатке начинает ощущать дискомфорт.

Существуют специальные методики расчета необходимого количества звукопоглощающих материалов для музыкальных комнат и помещений домашних кинотеатров. Правильный баланс количества звукопоглощающих материалов обеспечивает высокую четкость и разборчивость речи, и, несомненно, улучшает качество звуковой сцены. Рекомендуемое значение времени реверберации для музыкальных комнат прослушивания составляет 0.45 ± 0.15 с, для домашних кинотеатров это значение должно быть значительно меньше: $0.2-0.25$ с.

Оптимальное значение времени реверберации напрямую зависит от объема помещения и рассчитывается по специальной методике.

Совет: обеспечить оптимальное время реверберации (или регулировать его) в большинстве случаев позволяет монтаж на стенах и/или потолке звукопоглощающих панелей. В качестве элементов звукопоглощающей облицовки в музыкальных комнатах часто применяют акустические панели Ecophon, Topakustik, Knauf Acoustic, Mappysil или Heradesign. Стеновые поглотители на основе пористых материалов можно выполнить самостоятельно в домашних условиях. Для этого на стене следует смонтировать деревянный каркас глубиной 50-100 мм, заполнить его недорогой

акустической минеральной ватой AcousticWool и обтянуть каркас звукопрозрачной декоративной тканью. Необходимо отметить, что очень часто обычная мебель и элементы интерьера в типичной жилой комнате сами по себе обеспечивают достаточно высокий фонд звукопоглощения на высоких частотах. Но на более низких частотах поглощения, как правило, недостаточно. Как следствие, на невысоких уровнях громкости звучание в комнате может быть вполне приемлемым, но при увеличении уровня возникают низкочастотные проблемы (гул, бубнение и т.п.).

Комнатные моды – влияние основных резонансов в помещении небольшого размера приводит к увеличению времени реверберации и к неравномерности амплитудно-частотной характеристики, которая в свою очередь часто приводит к окрашиванию звука. Проблемы возникают на низких частотах из-за сравнительно низкой плотности мод. Наличие резонансных мод в помещении приводит к нежелательному окрашиванию звука и появлению ярко выраженных дефектов тонального баланса. Фонограмма приобретает характерное «коробчатое» звучание. Проектировщики студий звукозаписи и музыкальных комнат стараются решить эту проблему путем использования комнат с соответствующими пропорциями, располагая слушателей и громкоговорители в нужных местах, а также применяя специальные низкочастотные поглотители. Выбор «правильных» комнатных пропорций позволяет значительно снизить влияние комнатных резонансов и ослабить слышимое воздействие мод.

Совет: поиск оптимального взаимного расположения АС и зоны прослушивания – самый простой и «недорогой» метод борьбы с комнатными модами. Практически ничего не стоит и позволяет достаточно эффективно уменьшать влияние комнатных резонансов в области низких частот. В общем случае, желательно избегать мест с минимальным и максимальным значением звукового давления.

Уменьшить влияние комнатных мод можно также с помощью низкочастотных панельных (мембранных) поглотителей, настроенных на частоту нежелательных резонансов.

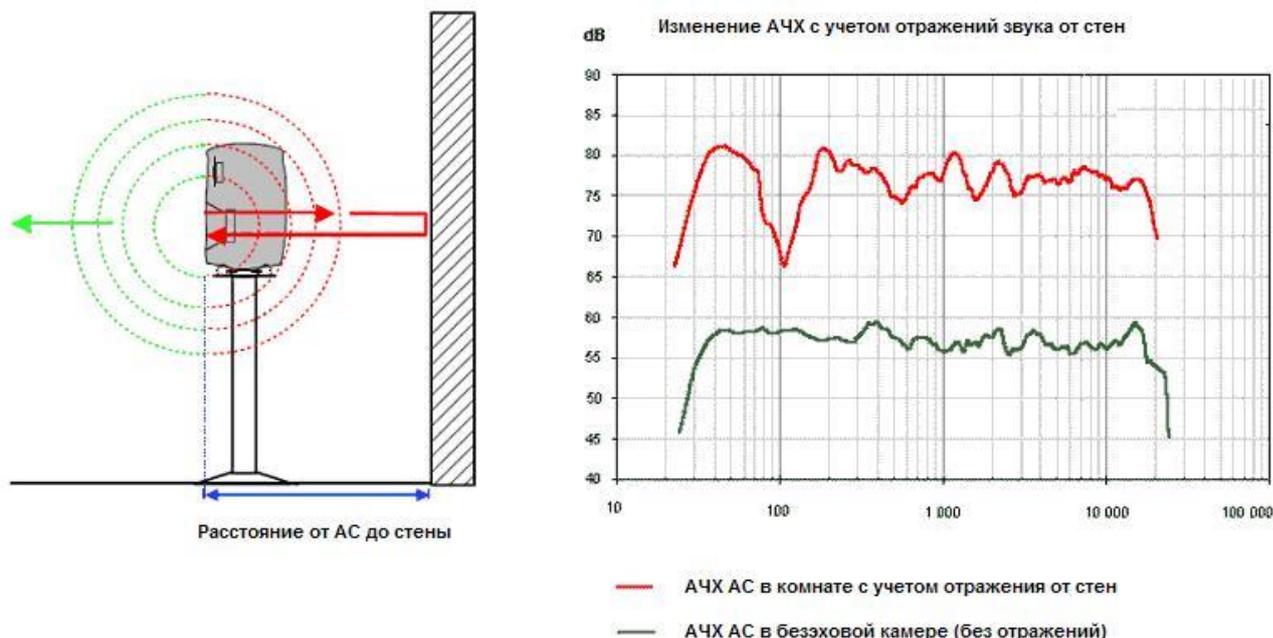
Довольно эффективно подавляют комнатные резонансы низкодобротные угловые поглотители. Их конструкция очень проста. Плиты из минеральной ваты высокой плотности общей толщиной 100-200 мм размещают в углах комнаты вплотную к фронтальной стене или под углом 45 градусов. Поглотитель монтируют в деревянном каркасе на всю высоту помещения. Для предотвращения эмиссии базальтовых волокон, каркас обшивается звукопрозрачной декоративной тканью.



Угловой низкодобротный поглотитель

Эффективным методом борьбы с комнатными резонансами является монтаж дополнительных облицовок стен и потолка по гипсокартонной технологии Кнауф. Такие облицовки должны быть выполнены правильно и смонтированы с помощью специальных эластичных креплений типа Vibrofix с низкой резонансной частотой (6-15 Гц). Чтобы исключить дребезг конструкции и нежелательное переизлучение звука рекомендуется использовать каркас из деревянного бруса и применять в составе облицовки между слоями гипсокартона демпфирующие слои (листы фанеры, вязкоэластичные мембраны и т.п.). Этот метод достаточно эффективен и широко применяется в практике студийного строительства.

SBIR-эффект (Speaker Boundary Interference Response) - когерентное взаимодействие между прямым звуком и отражениями от ближних границ комнаты (не зависит от взаимного расположения громкоговорителей и слушателя). Влияние SBIR эффекта приводит к появлению ярко выраженных пиков и провалов на амплитудно-частотной характеристике системы «громкоговоритель-комната». Частоты, на которых возникает нежелательное акустическое взаимодействие, зависят от расстояния между громкоговорителем и стеной помещения и, в основном, расположены в диапазоне 40-150 Гц. SBIR эффект при наличии одной отражающей звук стены, характеризуется глубоким провалом в частотной характеристике. Приближение громкоговорителя к стене увеличивает частоту провала, удаление от стены уменьшает эту частоту.



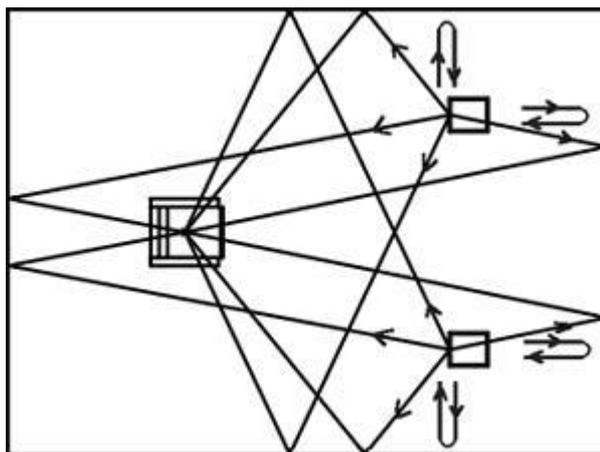
Влияние SBIR-эффекта на АЧХ громкоговорителей

Совет: существенно снизить влияние SBIR-эффекта можно с помощью оптимизации расположения громкоговорителей. Очень важно исключить вариант расположения громкоговорителей на одинаковом расстоянии от смежных стен. Расположение громкоговорителя в двугранном углу (стена/стена) или в трехгранном углу (стена/стена/пол) смещает специфический провал АЧХ в более высокочастотную область, тем самым уменьшая влияние SBIR-эффекта. Необходимо учесть, что при этом более явно негативное влияние комнатных мод. Удаление громкоговорителя от стены смещает провал АЧХ в низкочастотную область. На достаточно большом расстоянии (2-3 м) провал оказывается за пределами нижней границы АЧХ громкоговорителя и SBIR-эффект не проявляется в полной мере.

В некоторых случаях помогает применение панельных поглотителей или резонаторов Гельмгольца. При этом поглотители размещают на участках стен, ближайших к

месторасположению громкоговорителей. В случае необходимости поглотители монтируются на потолке непосредственно над акустическими системами.

Гребенчатая фильтрация – когерентная деструктивная интерференция между прямым звуком и ранними отражениями от стен, пола и потолка (зависит от взаимного расположения громкоговорителей и слушателя). При этом возникают периодические глубокие провалы в частотной характеристике в диапазоне 250-600 Гц. Гребенчатая фильтрация приводит к тому, что из сигнала, доходящего до зрителя, исчезает полезная информация в целом наборе информационно-значимых частотных полос, что сильно искажает тональный баланс исходной фонограммы.

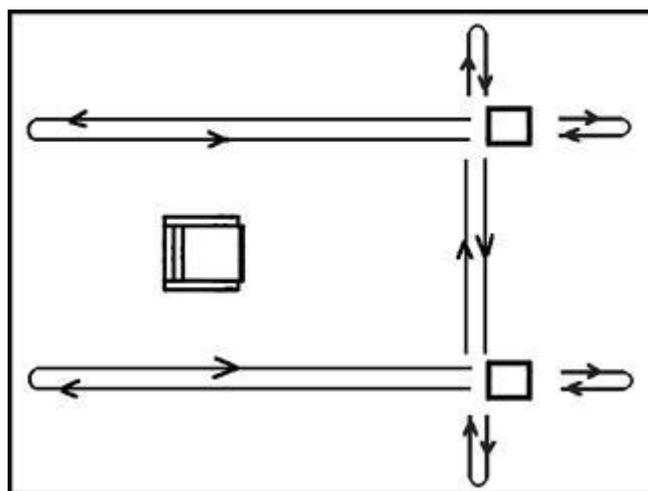


Площадки ранних отражений на стенах

Совет: чтобы уменьшить влияние эффекта гребенчатой фильтрации рекомендуется смонтировать на площадках ранних отражений панели на основе пористых звукопоглощающих материалов (минеральная вата или акустический поролон) или звукорассеивающие конструкции (диффузоры). Очень эффективно для этих целей применение перфорированных гипсовых панелей Knauf Acoustic или панелей Topakustik из перфорированного МДФ с натуральным шпоном. Эти панели поглощают средние частоты и отражают высокие. Таким образом, комната остается «живой» и не переглушенной.

Определить расположение площадок первых отражений на боковых стенах несложно. Попросите кого-нибудь из ваших друзей взять зеркало и пройти вдоль боковых стен. Если, сидя в кресле, вы можете видеть в зеркале отражение громкоговорителей, это и есть площадка первого отражения. Кроме того, можно воспользоваться специальным калькулятором для расчета расположения площадок первых отражений <http://www.acoustic.ua/forms/calculator4.html> .

Порхающее эхо - многократные отражения звука между двумя параллельными поверхностями стен, пола и потолка в плоскости расположения АС (напоминает отражения в двух зеркалах, расположенных напротив друг друга). Возникновение эффекта порхающего эха придает неприятный жесткий, металлический характер звучанию верхних средних и высоких частот.



Возникновение порхающего эха

Совет: порхающее эхо легко устранить. Достаточно разместить на плоскопараллельных поверхностях звукопоглощающие материалы или смонтировать акустические диффузоры (в плоскости размещения АС). В качестве звукопоглощающего материала можно использовать ковер, повешенный на стену, палас на полу (если эхо возникает из-за отражений между полом и потолком), шторы на окне или специальные панели из акустической минеральной ваты. Порхающее эхо также исчезнет, если на боковых стенах смонтировать непараллельные облицовки, например, по гипсокартонной технологии.

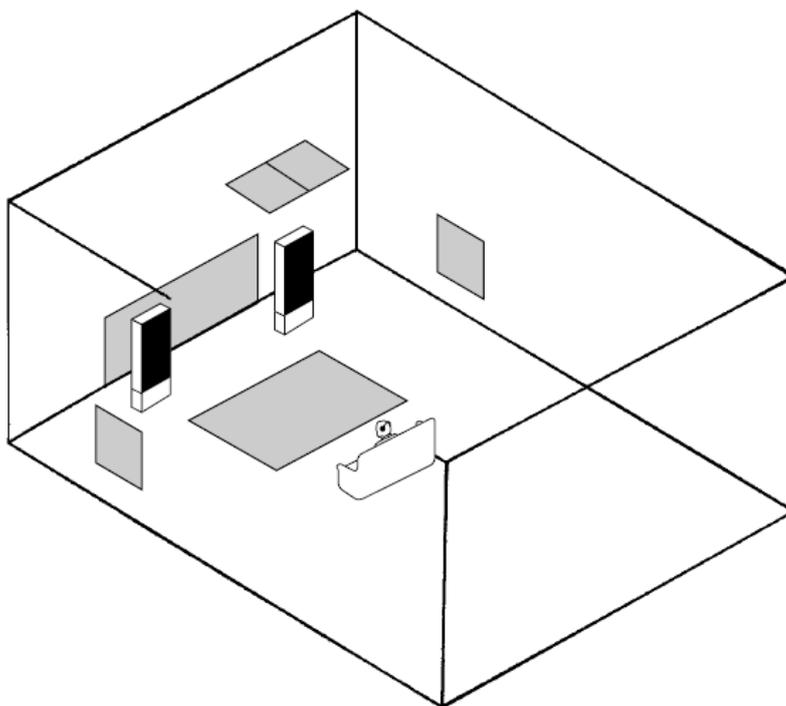
С чего начать? (общие рекомендации)

Акустическую настройку музыкальной комнаты необходимо всегда начинать с оптимизации взаимного расположения АС и места прослушивания. Это самый дешевый способ, позволяющий достаточно эффективно уменьшать нежелательное влияние комнатных резонансов и SBIR-эффекта на низких частотах.

Если оптимизация расположения АС не привела к желаемому результату, то уменьшить влияние низкочастотных резонансных явлений можно с помощью НЧ-поглотителей. Располагают НЧ поглотители в углах комнаты, где звуковое давление комнатных мод максимально. Монтаж НЧ-поглотителей рекомендуется начинать с углов за фронтальными громкоговорителями. Затем поглотители устанавливаются в тыловых углах комнаты (за спиной слушателя). Хороший результат дает размещение НЧ-поглотителей на потолке по периметру помещения.

Ранние отражения В комнате прослушивания слушатель воспринимает прямой звук акустических систем и целый набор отражений от стен, пола и потолка. Прямой звук содержит наиболее важную информацию об излучаемом сигнале. Если он сопровождается ранними отражениями, то звуковая сцена становится размытой и нечеткой. Очевидно, что необходимо снизить энергию ранних отражений, для чего применяются звукопоглощающие материалы и звукорассеивающие конструкции. Предпочтительнее использовать минимум звукопоглощающего материала для отделки только тех внутренних поверхностей в комнате, от которых отражается звук.

Фронтальная стена Очень многое зависит от назначения комнаты и её размеров. В общем случае, не следует оставлять переднюю стену акустически необработанной. В музыкальных комнатах и помещениях домашних кинотеатров целесообразно размещать на фронтальной стене (или в её нижней части) широкополосные звукопоглощающие конструкции, это поможет устранить нежелательные отражения и сфокусировать звуковую сцену. Очень часто бывает достаточно просто повесить штору из тяжелой ткани.



Площадки ранних отражений

Потолок Площадки ранних отражений расположены на участке потолка между зоной установки АС и местом прослушивания. Закрепление звукопоглощающих панелей в этой зоне существенно влияет на улучшение качества звуковой сцены. Монтаж акустических панелей по всей площади потолка, как правило, является избыточной мерой и часто приводит к чрезмерной заглушенности помещения. Обычно бывает достаточно смонтировать на потолке звукопоглощающие панели площадью 2-4 кв.м.

Боковые стены Отражения от боковых стен играют очень важную роль в формировании звуковой сцены, но их акустическая отделка связана с рядом противоречий.

С одной стороны, размещение звукопоглощающих материалов в площадках ранних отражений на боковых стенах существенно улучшает локализацию звуковых образов и в целом «собирает» звуковую сцену в единое целое.

С другой стороны, необработанные боковые стены обеспечивают хорошую пространственность и придают объемность звучанию музыки.

В голове каждого слушателя есть своя мера баланса между пространственностью звуковой сцены и локализацией источников. Именно поэтому часто разгораются споры на тему «чем лучше обрабатывать боковые стены», звукопоглощающими материалами или акустическими диффузорами.

В данном случае каждый слушатель должен решить свою собственную задачу

экспериментально.

Для начала рекомендуется ослабить боковые отражения размещением на стенах высокоэффективного поглощающего материала, например, плит из акустической минеральной ваты толщиной 50-100 мм (площадью около 1 кв.м). Следующий эксперимент следует проводить, удалив звукопоглощающий материал с площадок первых отражений на боковых стенах, но оставив его на полу, потолке и фронтальной стене. После этого можно сравнить результаты и сделать соответствующие выводы.

Боковые отражения можно несколько ослабить, используя ткань вместо акустической минеральной ваты. Необходимую величину подавления боковых отражений можно выяснить, используя для отделки боковых стен материалы с разной поглощающей способностью (пористый поглотитель, плотная ткань, легкая ткань, ковры). Очень часто компромисом является применение акустических панелей, хорошо поглощающих средние частоты и отражающих высокие. К таким материалам относятся перфорированные панели Topakustik, Knauf Cleaneo Acoustic, Danoline, щелевые резонаторы Гельмгольца.

Возможность «настраивать» боковые отражения позволяет достичь комфортного сочетания пространственности и объемности звучания (stereo image effect) и оптимизировать условия для прослушивания различных типов музыки.

Тыловая стена Независимо от того, установлен ли в вашей комнате домашний кинотеатр или стереосистема, желательно, чтобы стена, находящаяся за головой слушателя, диффузно отражала звуковые волны. С этой задачей хорошо справляются диффузоры Шрёдера или полицилиндрические звукорассеивающие конструкции из фанеры или ДВП. Можно также использовать обычные элементы интерьера: открытые полки или стеллажи для книг, CD-дисков или виниловых пластинок.

Окна Оконное стекло может стать настоящей проблемой. Необходимо запомнить две вещи, касающиеся окон. Во-первых, оконное стекло хорошо переизлучает звуковые волны. Если его не задрапировать шторой или не повесить на окно жалюзи, оно может стать причиной интенсивных отражений, которые в комнате для прослушивания крайне нежелательны. Во-вторых, оконное стекло пропускает низкие частоты, что делает звук «тощим» и «хилым». В любом случае, влияние окон на акустику помещения, как правило, негативно. Рекомендуется, по возможности, избегать комнат с большими окнами. Если все-таки у вас такая комната, возможно для соблюдения баланса придется приобрести отдельный сабвуфер, даже если ваши фронтальные АС отличаются очень хорошей низкочастотной характеристикой. Хороший результат дает применение массивных ставней из натурального дерева, ДСП или МДФ.

Пространство между фронтальными громкоговорителями По возможности старайтесь оставлять это пространство свободным. Для улучшения качества звучания стереосистемы стойку для аппаратуры, телевизор, и элементы интерьера постарайтесь размещать подальше от этой критической области, например, вдоль боковой стены. Если без стойки для аппаратуры у фронтальной стены не обойтись, постарайтесь выбрать модель с наименьшей высотой. Усилители можно разместить на специальных подставках на полу. В специализированной музыкальной комнате размещение телевизора или плазменной панели между фронтальными АС крайне нежелательно.

Пол В качестве финишного покрытия пола, особенно для 2-канальной стереосистемы, очень хорошо подойдут твердые поверхности паркета, паркетной доски или толстого ламината. В случае применения паркетной доски рекомендуется использовать тонкую (2-3 мм) подложку из химически сшитого полиэтилена. Обычно хорошо влияет на акустику помещения деревянный пол, тогда как пол, облицованный плиткой или камнем, может вызвать ряд проблем. Между зоной прослушивания и фронтальными громкоговорителями на пол с твердой поверхностью рекомендуется уложить небольшой ковер. Он поможет снизить интенсивность отраженного звука. Сплошное ковровое покрытие хорошо подходит для домашнего кинотеатра, но для 2-канальной стереосистемы его необходимо применять с осторожностью. Если Вы остановили свой выбор на ковролине, постарайтесь найти покрытие с коротким ворсом.

Журнальный столик Традиционное расположение журнального столика между зоной прослушивания и фронтальными АС однозначно противопоказано. Конечно, такой столик довольно удобен, но он резко негативно влияет на качество звука. Если без этого аксессуара никак не обойтись, расположите небольшой приставной столик слева или справа от дивана.

Двери Для того чтобы двери имели высокую звукоизоляцию и не допускали «утечки» низких частот, необходимо чтобы в состоянии «дверь закрыта» были исключены все щели и неплотности в прилегании дверного полотна к коробке. Дверное полотно должно быть массивным, с поверхностной плотностью 35-40 кг/м². Лучше всего для этих целей подходят двери из массива твердых пород дерева или многослойные с чередованием жестких звукоизоляционных и мягких звукопоглощающих слоев. Для этого коробка обязательно должна иметь порог и уплотняющую прокладку по всем притворам. В качестве прокладки лучше всего использовать профильные резиновые уплотнители, имеющие сечение в виде буквы «D». Разница в звукоизоляции двери с порогом и без него достигает 10-15 дБ.

Звукоизоляция Надлежащий акустический дизайн, подразумевает проведение профессиональных мероприятий по звукоизоляции музыкальной комнаты или помещения домашнего кинотеатра. Очень важно не допустить проникновение внешнего шума в музыкальное помещение. Например, шум от громких соседей может быть очень раздражающим. Особенно это заметно при воспроизведении «тихих» участков музыкальной фонограммы. Возможно, вы захотите, чтобы музыка, звучащая в комнате не была слышна вашим соседям. Психоакустические исследования показывают, что только 2% людей могут спокойно слушать громкую музыку, если они точно знают, что этим мешают своим соседям.

Создать идеальные условия восприятия фонограммы по всей площади музыкальной комнаты или домашнего кинотеатра практически невозможно, но обеспечить приемлемые условия в определенной зоне прослушивания для заданного количества зрителей является одной из основных задач акустического проектирования помещений.

Литература

1. "The Master Handbook of Acoustics" by F. Alton Everest
2. "Setting Up Speakers In A Rectangular Room" by George Cardas
3. "Acoustic Treatment For Home Studios" by Petr Elsea, 1996
4. "Acoustics Absorbers and Diffusers", T. J. Cox and P. D'Antonio, 2004