

Замечания по поводу релиза:

Это перевод 12й главы «Absorbtion» книги «Master Handbook of Acoustics» в редакции 2009. Перевод неофициальный. Содержимое рисунков на русский язык не переведено, основы знания английского языка, полагаю, есть у всех :).

За неточности перевода, связанные с корректировкой стилистики, автор перевода ответственности не несет :).

Содержание

Рассеяние Звуковой Энергии	2
Коэффициенты поглощения	4
Метод реверберационной камеры	5
Метод импедансной трубы	6
Метод тональных импульсов (Tone-Burst)	8
Установка Поглотителей	10
Поглощение средних и высоких частот за счёт пористости	11
Драпировка Как Звукопоглотитель	19
Ковер как Звуковой Поглотитель	22
Звуковое Поглощение Людьми	26
Звуковое Поглощение в Воздухе	27
Панельные (диафрагменные) Поглотители	28
Полуцилиндрические Поглотители	33
Басовые Ловушки: Низкочастотное Поглощение Резонансом	36
Резонаторы Гельмогльца	37
Перфорированные Панельные Поглотители	41
Щелевые Поглотители	47
Размещение Материалов	47
Время Реверберации Резонаторов Гельмгольца	48
Подавление Мод Комнаты Поглотителями	49
Акустические Модули	51

глава 12

Поглощение

Согласно закону сохранения энергии, энергия не может быть ни создана, ни разрушена. Однако энергия может быть переведена из одной формы в другую.

Если в комнате присутствует звуковая энергия, она не может быть разрушена, но может быть преобразована в иную, «безвредную» форму. Для этого используются звукопоглощающие материалы. Звукопоглощающие материалы можно разделить на следующие основные типы: пористые поглотители, мембранные поглотители, объемные и резонансные поглотители. Пористые поглотители являются самыми эффективными на более высоких частотах, в то время как мембранные и объемные поглотители являются самыми эффективными на более низких.

Все типы поглотителей работают на едином принципе. Звук – это энергия вибрации воздушных частиц, и при использовании поглотителей, она может быть рассеяна в виде тепловой энергии. То есть, в результате поглощения количество звуковой энергии уменьшается. Количество тепла, полученное от звукового поглощения, пренебрежимо мало. Чтобы нагреть чашку чая, придётся преобразовать в тепло звуковую энергию миллионов говорящих людей, так что придётся оставить любые надежды на нагрев наших домов посредством звука, даже очень громкого.

Рассеяние Звуковой Энергии

Некая звуковая волна S , двигаясь в воздухе, ударяется о кирпичную стену, покрытую акустическим материалом, как показано в Рис. 12-1. Что случается с энергией, которую эта волна содержит? Пока звуковая волна движется сквозь воздух, из-за воздушного поглощения выделяется тепловая потеря E , которая заметна только на более высоких звуковых частотах. Когда звуковая волна ударяется об акустический материал, возникает отраженная составляющая A , возвращаемая в воздух от его поверхности.

Более интересно, что часть звука проникает сквозь акустический материал, показанный заштрихованным слоем на Рис. 12-1. Направление движения звука преломляется потому, что акустический материал более плотен, чем воздух. Именно здесь возникает тепловая потеря F на трение, которому подвергаются воздушные частицы в акустическом материале. В момент удара звуковой волны о поверхность стены, происходят две вещи: отражается составляющая B , и волна значительно меняет направление, поскольку входит в намного более плотную среду - кирпич. В пределах кирпичной стены возникают дополнительные потери G . В процессе продвижения волна постоянно ослабевает, и, достигая границы кирпич/воздух, подвергается еще одному отражению C , появляется с противоположной стороны с рефракцией D и тепловыми потерями (I , J , и K).

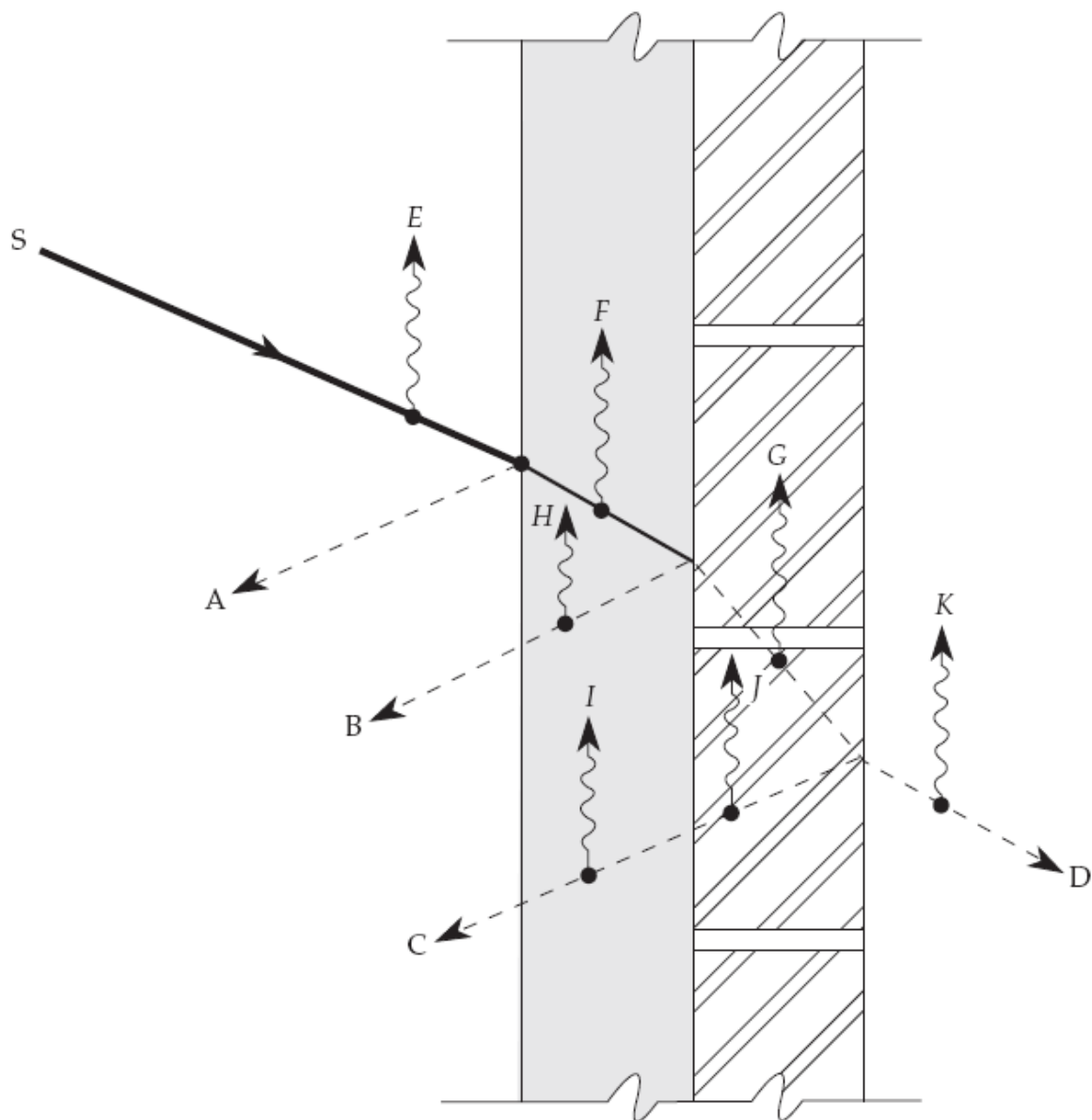


Рис. 12-1 – Звуковой луч, падая на акустический материал на кирпичной стене подвергается отражению от трех различных поверхностей и поглощению в воздухе и в двух различных материалах, с различными углами рефракции при каждом переходе. В данной главе объект исследования – поглощающий материал.

Звуковой луч *S* подвергается множеству сложных воздействий во время своего путешествия через этот барьер, и каждое отражение, проход через воздух или акустический материал, отнимает часть энергии. Рефракция преломляет луч, но не обязательно вносит тепловые потери. К счастью, весь это процесс не связан с практическими проблемами поглощения. Мы обычно рассматриваем все эти процессы совокупно.

Коэффициенты поглощения

Коэффициенты поглощения используются, чтобы оценить эффективность материала в поглощении звука. Коэффициенты поглощения меняются в зависимости от угла, под которым звук попадает в материал. В установившемся диффузном звуковом поле звук движется во всех возможных направлениях. В большинстве вычислений нам нужен коэффициент поглощения, который усреднен по всем возможным углам падения. Смешанный коэффициент поглощения – коэффициент, который усреднен по всем углам падения. Обычно он упоминается как коэффициент поглощения материала, обозначенный как α . Коэффициент поглощения – мера эффективности поверхности или материала в процессе поглощения звука. Если 55 % энергии звука поглощено на некоторой частоте, говорят, что коэффициент поглощения α равен 0.55 на этой частоте. Идеальный звуковой поглотитель поглотит 100 % звука, т.е. $\alpha = 1.0$. У идеально отражающей поверхности $\alpha = 0.0$.

Различные ссылки могут использовать различные символы для коэффициента поглощения; например, символ "a" иногда используемый вместо " α ". Отчасти это связано с тем, что есть несколько различных коэффициентов поглощения. Как отмечено, поглощение изменяется согласно углу падения звука на поверхность (поглощение также зависит от частоты). Один тип коэффициента поглощения измеряет поглощение на определенном углу падения. Другой тип коэффициента поглощения измеряет поглощение диффузного звукового поля, то есть звука с равномерно распределенными углами падения. В этой книге α соответствует коэффициенту поглощения диффузного звукового поля (усредненного для всех углов падения) на заданной частоте. Когда будет подразумеваться коэффициент поглощения под определенным углом, он будет упоминаться как α_θ , где θ – угол падения.

Звуковое поглощение A , обеспеченное определенной площадью материала, вычисляется умножением коэффициента поглощения материала на площадь его поверхности, на которую воздействует звук. Поэтому:

$$A = S\alpha \quad (12-1)$$

где A – единицы поглощения, сэбины или метрические сэбины;

S – площадь поверхности, кв. футы или кв. метры;

α – коэффициент поглощения.

Звуковое поглощение A измеряется в сэбинах, в честь Уолласа Сэбайна. Открытое окно считают абсолютным поглотителем, потому что звук, проходящий через него, никогда не возвращается обратно в комнату. У открытого окна был бы коэффициент поглощения 1.0, и, по определению, открытое окно площадью 1 квадратный фут обеспечивает 1 сэбин звукового поглощения. Окно в десять квадратных футов, таким образом, дало бы 10 сэбинов поглощения. В качестве другого примера представим, что у ковра есть коэффициент поглощения 0.55; 20 кв. футов ковра поэтому обеспечили бы 11 сэбинов поглощения.

Использоваться могут сэбины (футовые) или метрические сэбины. Метрический сэбин – поглощение 1 м² открытого окна. Так как 1 м² равняется 10.76 футов², 1 метрический сэбин равняется 10,76 футовым сэбинам. Или, 1 сэбин = 0,093

метрических сэбина.

При вычислении полного поглощения комнаты, все материалы в комнате, согласно их площади, дадут результирующее суммарное поглощение:

$$\Sigma A = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_3 \alpha_3 + \dots \quad (12-2)$$

где $S_1, S_2, S_3 \dots$ – площади поверхности, кв. футов или м^2 ;
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$ – соответствующие коэффициенты поглощения.

Кроме того, средний коэффициент поглощения может быть вычислен делением полного поглощения на полную площадь поверхности:

$$\alpha_{\text{average}} = \frac{\Sigma A}{\Sigma S} \quad (12-3)$$

Когда поглощающий материал помещен на некой поверхности, нужно принять во внимание потерю поглощения, которую дает эта поверхность. Чистый прирост поглощения по площади - это коэффициент поглощения нового материала минус коэффициент оригинального материала.

Коэффициент поглощения материала меняется в зависимости от частоты. Коэффициенты, как правило, публикуются для шести стандартных частот: 125, 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц. В некоторых случаях поглощающие свойства материала оцениваются единственным числом, известным как коэффициент снижения шума (Noise Reduction Coefficient - NRC). NRC – это среднее арифметическое коэффициентов для 250; 500; 1000; и 2 00 Гц (125 и 4 000 Гц не используются). Важно помнить, что NRC - среднее значение, и определяет поглощение только на средних частотах. NRC является самым практичным для применения в случаях разработки решений для трансляции речи. При рассмотрении более широко-диапазонной музыки должны использоваться отдельные коэффициенты, в более широком диапазоне частот.

В некоторых случаях, чтобы определить поглощение, используется среднее звуковое поглотительное число (SAA). Как NRC, SAA - арифметическое среднее число, но SAA использует коэффициенты поглощения от двенадцати 1/3-октавных диапазонов от 200 Гц до 2.5 кГц. SAA – это среднее этих коэффициентов. Наконец, стандарт ISO 11654 определяет единичный взвешенный коэффициент поглощения для материалов, используя стандарт ISO 354 для тестирования.

Метод реверберационной камеры

Метод реверберационной камеры может использоваться для определения коэффициента поглощения поглощающих материалов и измеряет среднее его значение. Камера - большая комната (примерно 9 000 ф^3) с сильно отражающими стенами, полом, и потолком. Время реверберации комнаты очень велико, и чем оно дольше, тем более точно измерение. Стандартный образец материала, подлежащий тестированию, обычно размерами 8x9 футов, устанавливается на полу, после чего

меряется время реверберации. Сравнение полученного времени реверберации с известным временем реверберации пустой комнаты дает величину поглощения, которое образец добавляет к комнате. Из этого вычисляется поглощение, относящееся к 1 кв. футу материала, давая эквивалент коэффициента поглощения в сэбинах (1м² материала дает поглотительные единицы в метрических сэбинах).

Конструкция камеры важна, чтобы гарантировать большое количество мод и чтобы максимально ровно распределить моды. Положение звукового источника, число и расположение измерительных микрофонов должно быть продумано. Для достижения диффузности звукового поля могут быть использованы большие вращающиеся лопасти. Коэффициенты поглощения, указываемые изготовителями для использования в архитектурных акустических вычислениях, могут быть измерены методом реверберационной камеры.

Открытое окно площадью в один квадратный фут - абсолютный поглотитель с коэффициентом, равным 1.0, но некоторые измерения в камере могут показать коэффициенты поглощения, больше чем 1. Это происходит потому, что дифракция звука от краев стандартного образца заставляет образец акустически "казаться", больше, чем он есть. Нет никакого стандартного метода внесения корректировок, вносимых этим эффектом. Некоторые изготовители издают фактически измеренные значения, если они больше единицы; другие произвольно опускают значения вниз к 1 или к 0.99.

Метод импедансной трубы

Импедансная труба (также называемая трубой стоячей волны или трубой Кундта) применяется и для измерения коэффициентов поглощения материалов. В таком применении она может быстро и точно выдавать значения. Преимущество импедансной трубы - небольшой размер, неприхотливость с точки зрения поддержки оборудования, и меньший размер образца. Этот метод прежде всего используется для пористых поглотителей, потому что он не подходит для тех поглотителей, эффективность которых зависит от их площади, таких как вибрирующие панели и различные ребристые поглотители.

Устройство и работа импедансной трубы показаны на Рис. 12-2. У трубы обычно круглое поперечное сечение с твердыми стенами. Образец, который будет проверен, обрезается так, чтобы четко поместиться в трубе. Если образец предназначен для использования на твердой поверхности, он помещается вплотную к тяжелой задней панели. Если материал должен использоваться с пространством позади него, он устанавливается на соответствующем расстоянии от задней панели.

В другом конце трубы располагается маленький громкоговоритель с отверстием, которое сверлят через его магнит, чтобы внедрить длинную тонкую трубку, соединенную с микрофоном. Возбуждение громкоговорителя на заданной частоте вызывает возникновение стоячих волн из-за взаимодействия прямой волны с волной, отраженной от образца. Форма этой стоячей волны дает важную информацию относительно поглощающих свойств тестируемого материала.

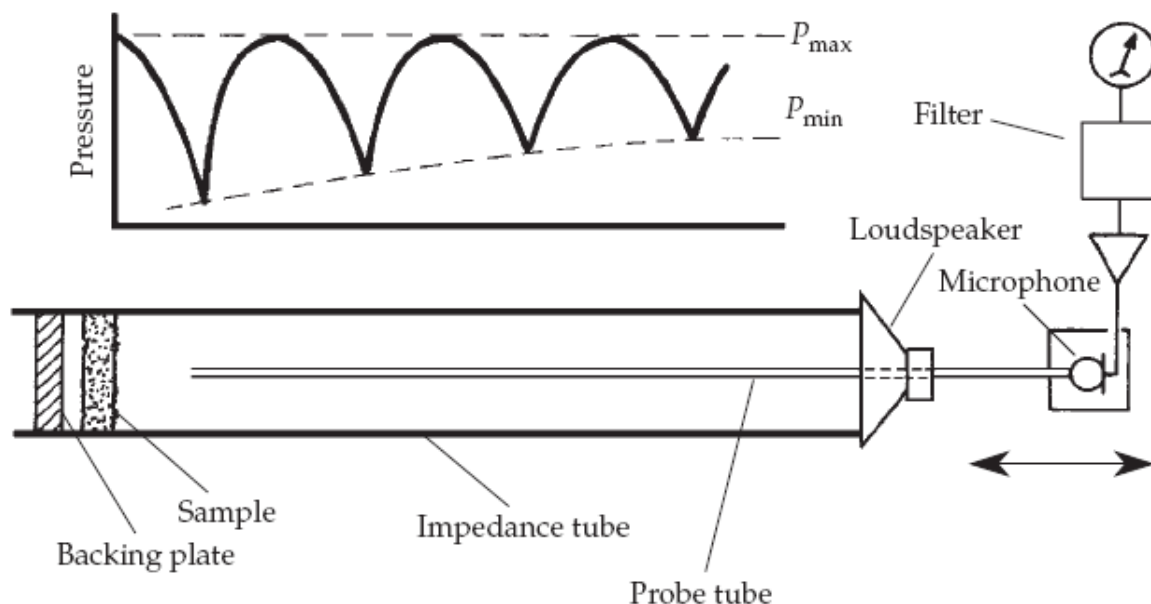


Рис. 12-2 – Метод импедансной трубы для измерения коэффициента поглощения при перпендикулярном падении.

Звуковое давление максимально на поверхности образца. При отодвигании микрофонной трубки-зонда от образца, звуковое давление падает к первому минимуму. Далее, постепенно перемещая трубку, можно обнаружить чередующиеся максимумы и минимумы. Если n - отношение максимального звукового давления к его смежному минимуму, нормальный (перпендикулярный) коэффициент поглощения α_n равен:

$$\alpha_n = \frac{4}{n + (1/n) + 2} \quad (12-4)$$

Это показано на Рис. 12-3.

Преимущества метода трубы стоячей волны ограничиваются тем, что коэффициент поглощения, определенный таким методом, точен только для нормального (перпендикулярного) угла падения. На практике же, звук падает на поверхность материала под различными углами. Иллюстрация 12-4 – номограмма для приблизительного получения коэффициента поглощения для случайного угла падения из коэффициента поглощения нормального падения, измеренного методом стоячей волны. Коэффициенты случайного падения всегда выше, чем коэффициенты нормального падения.

Отдельные отражения влияют на тембр звука. В частности, представляют особый интерес удельные нормальные отражения, названные ранними. И если коэффициенты для случайного падения представляют интерес при вычислениях реверберации

комнаты, для проблем контроля звуковой картины обычно нужны коэффициенты поглощения при нормальном падении.

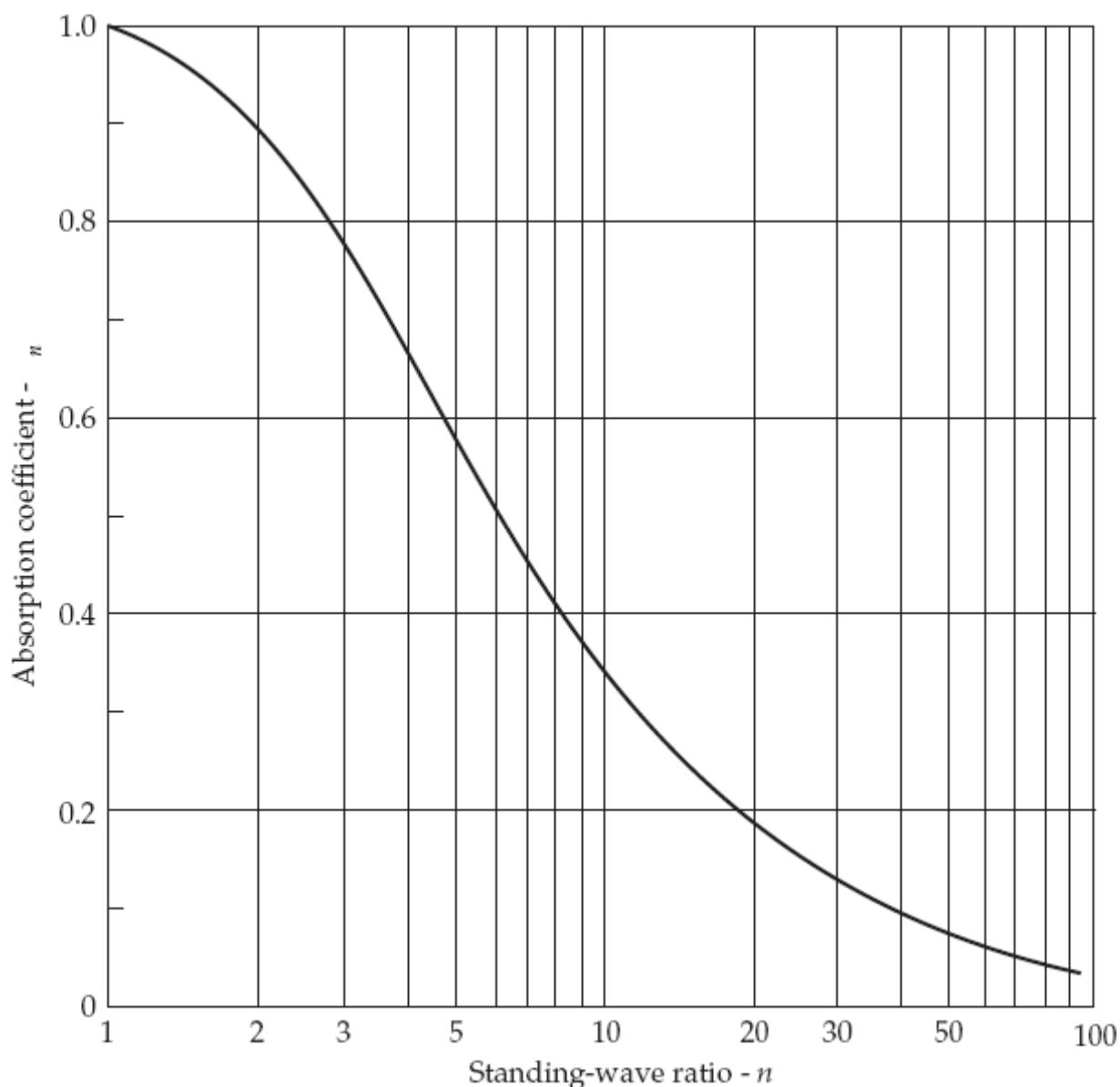


Рис. 12-3 – График для интерпретации отношения стоячей волны по отношению к коэффициенту поглощения. Отношение стоячей волны может быть найдено делением максимума давления на сопряженный ему минимум.

Метод тональных импульсов (Tone-Burst)

Чтобы выполнить безэховые акустические измерения в обычных комнатах могут использоваться короткие звуковые импульсы. Прибытие отражений от стен и других поверхностей до измерительной позиции занимает время. С импульсом короткой

продолжительности гейт может быть открыт только для необходимого звукового импульса, и закрыт для накладывающихся импульсов. Этот метод может использоваться, чтобы измерить звуковой коэффициент поглощения материала с любым желаемым углом падения.

Принцип показан на Рис. 12-5. Система источник/микрофон калибрована на расстояние x , как показано на Рис 12-5А. Геометрия фигуры на Рис 12-5В подобрана так, чтобы полный путь импульса, отраженного от материала, который будет проверен, был равен этому тому же самому расстоянию x . Чтобы определить коэффициент поглощения образца, сила отраженного импульса сравнивается с силой неотраженного пульса на расстоянии x .

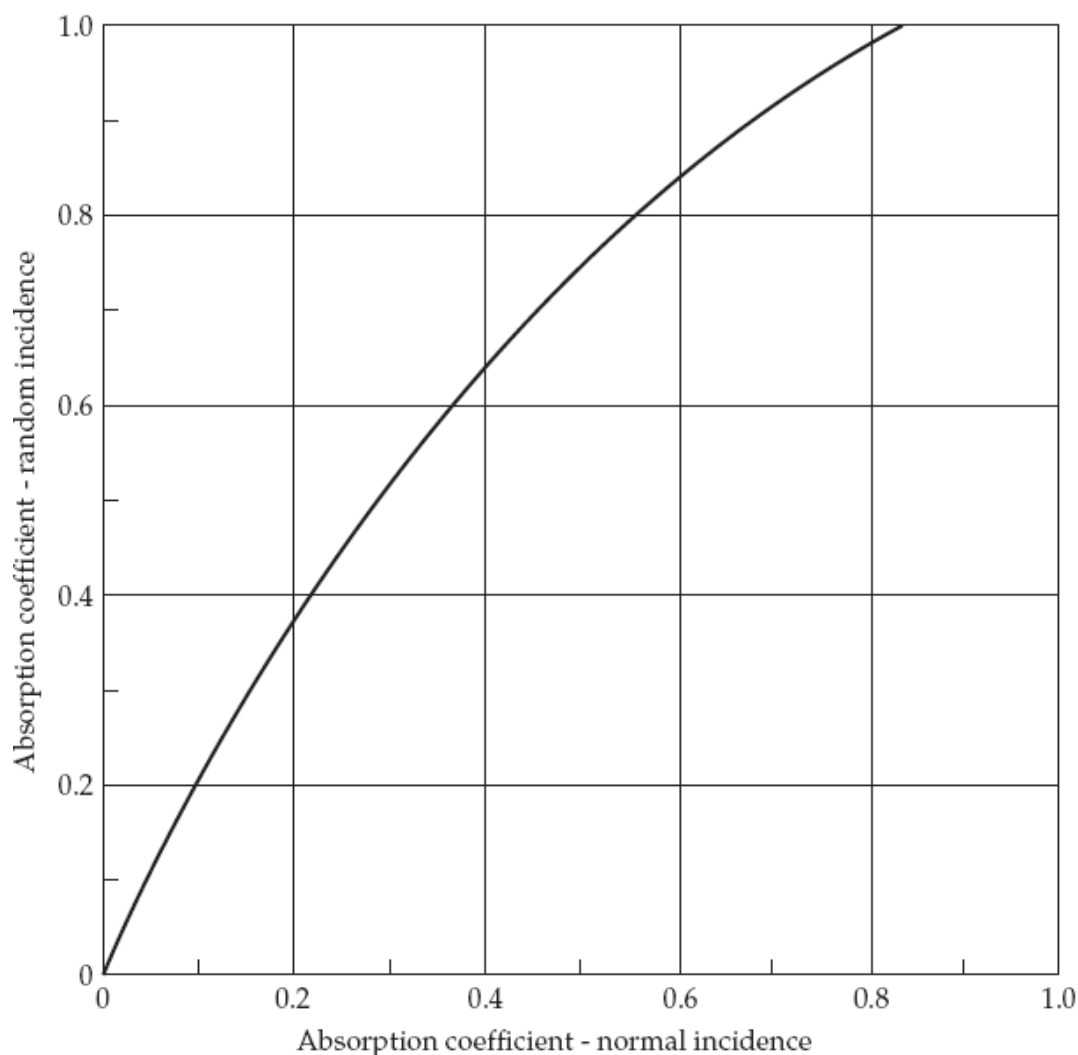


Рис. 12-4 – Примерная взаимосвязь между коэффициентами поглощения при перпендикулярном и диффузном падении.

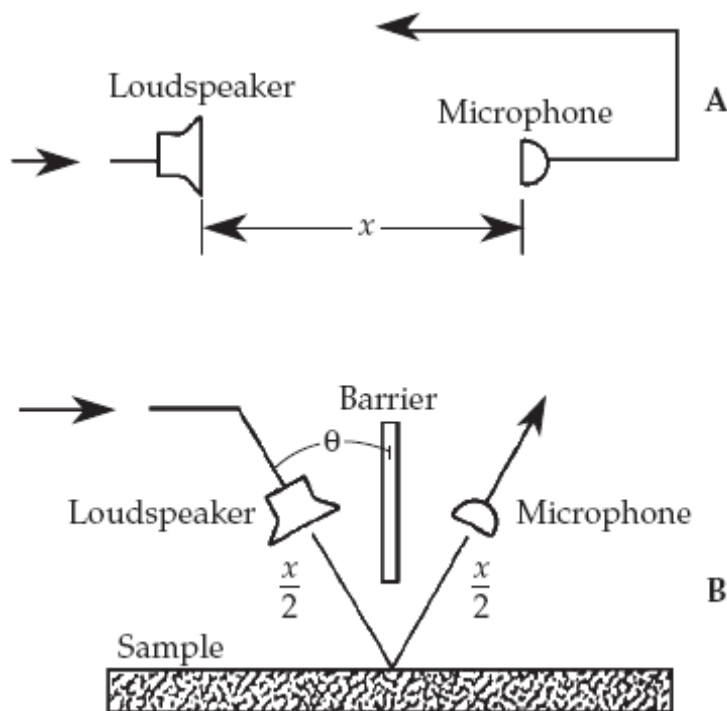


Рис. 12-5 – Определение коэффициентов поглощения материалов методом тональных импульсов. А) – Система источник/микрофон подстраивается под расстояние x . В) - Общая длина пути импульса, отраженного от материала в тесте равно расстоянию x .

Установка Поглотителей

Способ установки испытательного образца на реверберационном полу камеры подобен тому, как материал используется на деле. Таблица 12-1 перечисляет стандартные типы установки, и в форме ASTM, и в более старой форме - ABPMA.

Обозначение типа установки согласно ASTM		Обозначение по ABPMA
A	Материал прямо на жёсткой поверхности	#4
B	Материал приклеен к гипсокартону	#1
C-20	Материал с перфорированной, разреженной или иной поверхностью, покрытый 20мм ворсом (furred)	#5
C-40	То же, 40мм	#8
D-20	Материал с ворсом 20мм	#2
E-400	Материал на расстоянии 400мм от жесткой поверхности	#7

Метод установки оказывает сильное влияние на поглотительные характеристики материала. Например, поглощение пористых материалов намного больше при наличии

воздушного промежутка между этим материалом и стеной. Правило четверти длины волны ($\lambda/4$) показывает, что пористый поглотитель для нормальной работы должен быть, по крайней мере, толщиной в четверть длины волны на интересующей частоте. Например, для частоты 1 кГц, минимальная толщина поглотителя должна быть приблизительно 3,4". Таблицы коэффициентов поглощения должны всегда определять тип стандартной установки или содержать описание способа, согласно которому материал был установлен во время измерений, иначе эти коэффициенты бессмысленны. Широко используется установка типа А – без воздушного пространства между звуковым абсорбирующим материалом и стеной. Другой метод, обычно используемый – это тип установки E-400, который является аппроксимацией ситуаций, которая имеет место в подвесных потолках, как показано на Рис. 12-6.

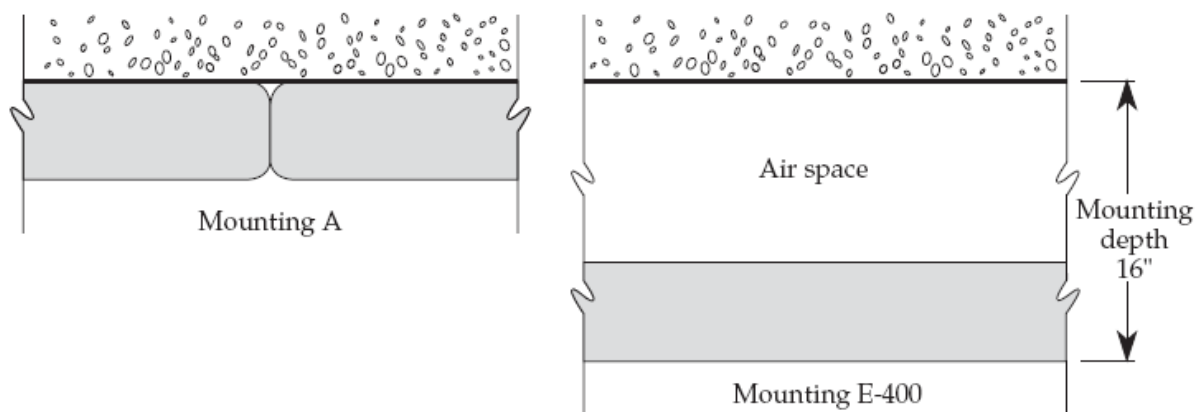


Рис. 12-6 – Обычно используемые стандартные варианты установки, связанные с таблицами коэффициентов поглощения. Установка А – материал вплотную к стене. Вариант E-400 – соответствие случаям подвесных потолков.

Поглощение средних и высоких частот за счёт пористости

Материалы с пористой структурой, то есть, с промежутками между слоями, могут работать как пористые звуковые поглотители. Ключевое слово в этом обсуждении пористых поглотителей – промежутки, маленькие трещины или щели в пористых материалах. Если звуковая волна ударяет в комок хлопкового ватина, звуковая энергия заставляет волокна хлопка вибрировать. Амплитуда волокна никогда не будет столь же большой как амплитуда частиц звуковой волны из-за фрикционного сопротивления. Иными словами, некоторая звуковая энергия превратится в тепло за счёт трения, поскольку волокна приведены в движение. Звук проникает в промежутки хлопка, теряя энергию, поскольку волокна вибрируют. Хлопок и множество пустотелых ячеек, подобных пене (к примеру, полиуретан или полиэстер) являются превосходными звуковыми поглотителями из-за их пустотелой пористости, которая позволяет звуковым волнам проникать через материал. С другой стороны, материалы с заполненными ячейками (такие, как пенопласт), используемые для тепловой изоляции, не позволяют звуку проникать в материал, и являются достаточно плохими

поглотителями. Чем лучше воздух проникает через пористый материал, тем лучше его способность поглотить звук.

Пористые поглощающие материалы, используемые как звукопоглотители, обычно рассыпчаты, волокнисты и встречаются в формах панелей, пен, тканей, ковров, и подушек. Если волокна слишком свободно упакованы, только небольшая часть энергии будет рассеиваться в виде тепла. С другой стороны, если волокна сжаты слишком плотно, проникновение снижается, и воздушное движение не может произвести достаточное трение, чтобы быть эффективным. Между этими крайностями много материалов, которые являются очень хорошими поглотителями звука. Они обычно состояются из целлюлозы или минерального волокна. Их эффективность зависит от толщины материала, воздушного пространства и плотности материала.

Эффективность поглощения, зависящую от задержки и рассеивания звуковой энергии в крошечных порах, можно серьезно ухудшить, если поверхностные поры будут забиты, препятствуя проникновению волн. Кирпич, например, имеет много таких пор, и потому является хорошим поглотителем звука. Слой краски может заполнить поверхностные поры и сильно ослабить звуковое проникновение, и, таким образом, поглощение. Однако если использовать распыление незабывающей (nonbriding) краской, поглощение пострадает меньше. Фабричная окраска акустических панелей минимизирует проблему снижения поглощения. При определенных условиях окрашенная поверхность может снизить пористость, но при этом действовать как диафрагма, которая могла бы фактически стать поглотителем, действующим на ином принципе - подобно демпфированной вибрирующей диафрагме.

Иногда встречается акустическая обработка комнат, оформленная с излишним покрытием коврами и драпами, и это подчеркнет недостаток большинства пористых поглотителей - плохое низкочастотное поглощение. Целлюлозо-волоконные плиты с перфорацией поверхности тоже являются несовершенными в поглощении низкочастотного спектра. Чрезмерно увлеченное использование пористых поглотителей вызывает сверхпоглощение высокочастотной звуковой энергии, при этом не решается главная проблема акустики - низкочастотные стоячие волны.

Визуальное отображение подобия поглотительных характеристик звукопоглотителей в зависимости от пористости, показано на Рис. 12-7. Акустические плиты, драпы, и ковры дают самое высокое поглощение выше 500 Гц и относительно низкое поглощение в низкочастотной области, находящейся во влиянии мод комнаты. Необработанные кирпичи дают типичный пик поглощения на высокой частоте, но и более необычный пик поглощения приблизительно на 200 Гц.

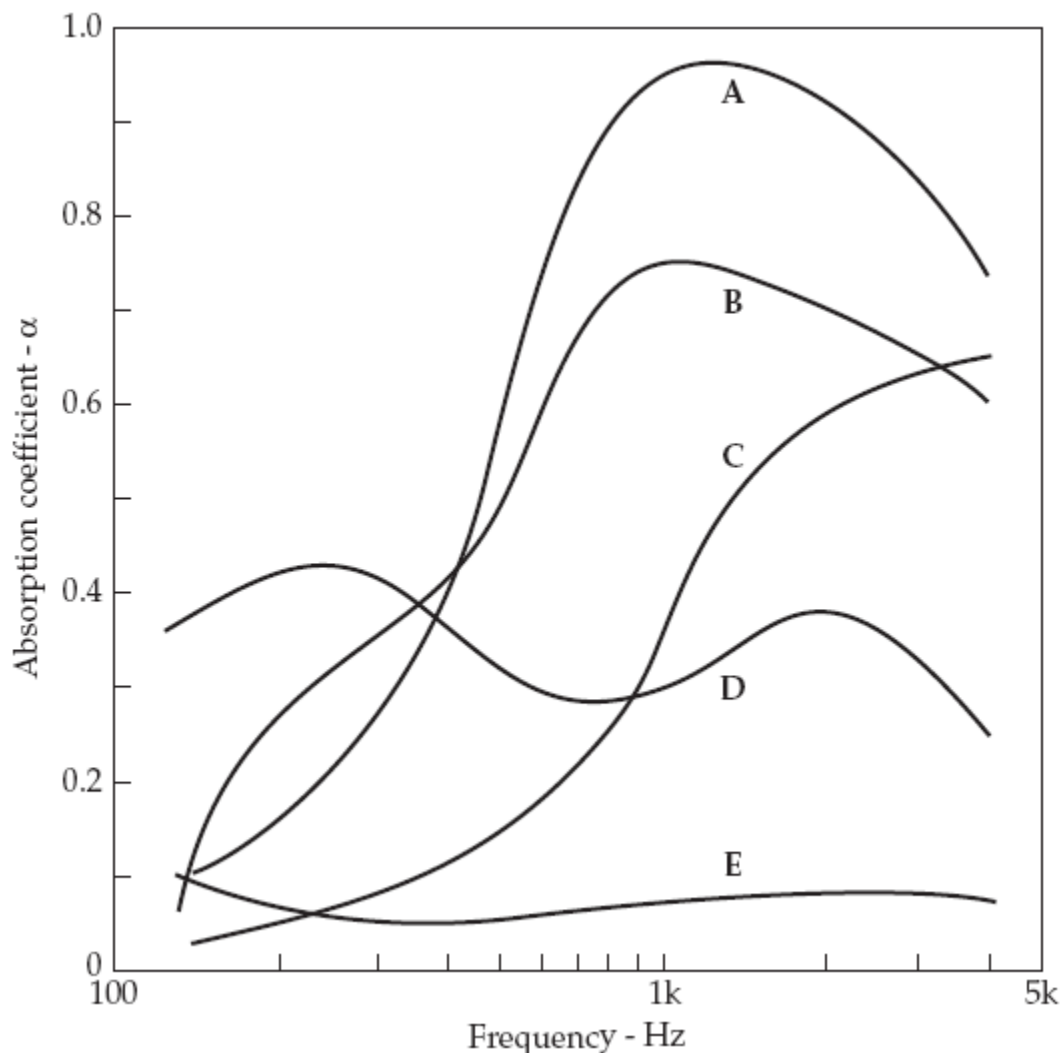


Рис. 12-7 – Коэффициенты поглощения типовых пористых материалов А, В, С подобны по структуре. Пористые поглотители характеризуются хорошим высокочастотным поглощением и плохим низкочастотным. А – акустические плиты высшего сорта; В – велюр средней плотности (14 oz/yd²) сжатый вдвое; С – тяжелый ковер на кирпиче без подстилки; D – кирпичная некрашенная стена; Е – кирпичная крашенная стена.

Изоляционные Материалы Из Стекловолокна

Большие количества стекловолоконных материалов используются в акустической обработке студий звукозаписи, диспетчерских, и общественных мест. Эти стеклянные волокна могут состоять и из специальных, высокоплотных материалов, и из обычной, имеющей малую плотность теплоизоляции. Есть данные, что более толстые панели с воздушной полостью сзади более предпочтительны, чем тонкие панели, и низкая плотность стекловолокна также предпочтительнее высокой плотности. Термоизоляция на стекловолоконной основе используется в большинстве конструкций стен.

Этот материал обычно имеет плотность приблизительно 1 фунтов на кубический фут. Такой материал часто обозначается как R-11, R-19, или подобно этому. R-приставки описывают тепловые качества изолирования, но связаны с толщиной. Толщина R-8 составляет 2.5", R-11 - 3.5", и R-19 - 6".

Стекловолоконная изоляция обычно идет с покрытием крафт-бумагой. Между стенами эта бумага не имеет никакого существенного влияния, но если теплоизоляция используется как звукопоглотитель на стенах, к примеру, позади матерчатой облицовки, действие бумаги становится существенным. Иллюстрация 12-8 сравнивает звуковую поглотительную способность стекловолокон R-19 (6") и R-11 (3.5") с Крафт-бумагой и стекловолокном, выставленными навстречу падающему звуку. Когда вперед выставлена бумага она экранирует стекловолокно от звука выше 500 Гц, но мало влияет ниже 500 Гц. Результат - пик поглощения на 250 Гц (R-19) и 500 Гц (R-11), который может быть важным в обработке комнаты. С выставленным вперед стекловолокном имеет место чрезвычайно глубокое поглощение выше 250 Гц (R-19) или 500 Гц (R-11).

Стекловолоконная изоляция - превосходный и недорогой поглощающий материал. Когда он используется в панелях, обычно требуется косметическое и защитное покрытие, но это имеет место и для более плотных материалов. В качестве покрытия можно использовать ткань, металлическую плёнку, или перфорированное виниловое стенное покрытие. С помощью стекловолоконных панелей можно получить коэффициенты поглощения, больше чем 1.0.

Стекловолокно: Советы

Полужесткие панели из стекловолокна могут использоваться в акустической обработке аудио комнат. Этот тип стекловолоконных панелей имеет обычно большую плотность, чем стекловолоконная теплоизоляция. Типичный материал такого типа - Johns-Manville 1000 Spin-Glass и Owens-Corning Type 703 Fiberglas, оба плотностью 3 lb/ft³. Они доступны в различных толщинах (например, 1-4") с различным значениям R (например, от 4.3 до 17.4). Доступны и другие удельные веса; например, у Type 701 плотность 1.5 lb/ft³, и у Type 705 плотность 6 lb/ft³. Эти полужесткие панели из стекловолокна не блещут внешним видом; так что обычно покрываются тканью. Однако они выделяются в звуковом поглощении и широко используются для обработки комнат.

Стекловолокно: Акустические Плиты

Изготовители акустических материалов предлагают конкурентоспособные линии акустических плит 12"×12" . Поверхностные обработки плит включают даже равномерно распределенные отверстия, случайные отверстия, щели, расщепленные или другие специальные текстуры. Эти плиты - зарекомендовавший себя продукт, используемый для контроля шума и реверберации, при использовании с полным пониманием ограничений, с ними связанных. Одна из проблем использования акустических плит в критических ситуациях – то, что коэффициенты поглощения не всегда известны для отдельной плиты. Средний коэффициент для восьми целлюлозных и минералватных плит толщиной ¾" показан на Рис. 12-9. Диапазон

коэффициентов обозначен вертикальными линиями. Для $\frac{3}{4}$ '' плит, коэффициенты не указаны, можно использовать средние точки. Для $\frac{1}{2}$ '' плит были бы справедливы коэффициенты на 20 % ниже. Когда акустические плиты используются в подвесном потолке, они функционируют прежде всего как пористые поглотители. Однако, воздушное пространство выше заставляет их также выступать в некоторой степени как мембранные поглотители.

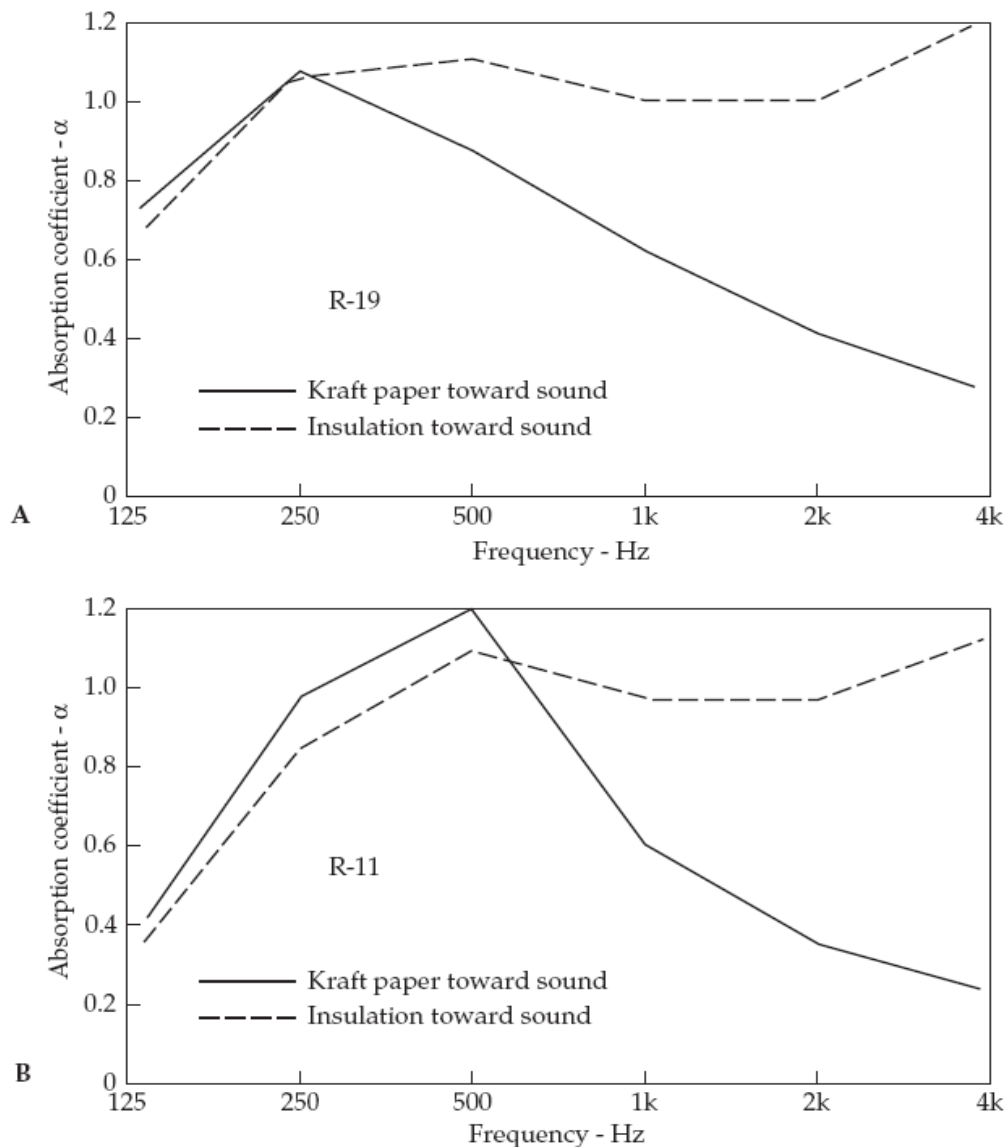


Рис. 12-8 – Когда для обработки стен используется обычная строительная изоляция (возможно, с фабричной облицовкой), становится важной расположение Крафт-бумаги. А – строительная стекловата R-19. В – строительная стекловата R-11 с типом установки А.

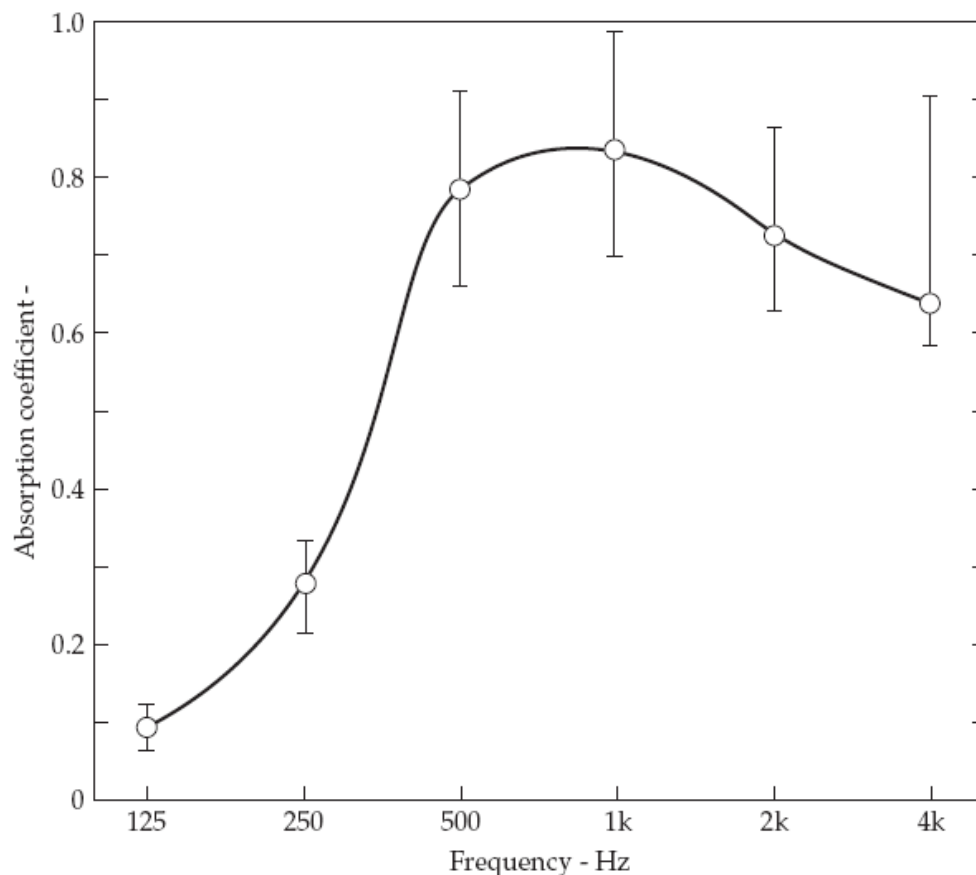


Рис. 12-9 – Усредненные характеристики поглощения восьми акустических плит толщиной $\frac{3}{4}$ ". Вертикальные линии показывают разброс значений.

Влияние Толщины Поглотителя

Логично ожидать большее звуковое поглощение от более толстых пористых материалов, но эта логика сохраняется, прежде всего, для более низких частот. Поглощение будет самым большим, когда пористый материал помещен на расстоянии четверти длины волны ($\lambda/4$) от твердой отражающей поверхности (или иные нечетные длины, кратные $\lambda/4$); это то расстояние, где скорость частиц является самой большой; но на практике это может быть проблемно реализовать. Иллюстрация 12-10 показывает влияние толщины поглотителя в случае, когда поглотитель установлен непосредственно на твердой поверхности (тип установки А). Различие выше 500 Гц при увеличении толщины поглотителя с 2" до 4" не велико, но зато присутствует значительное улучшение ниже 500 Гц. Присутствует также пропорциональное улучшение общего поглощения с увеличением толщины на 1" при движении от 1" до 2" в сравнении с движением от 2" до 3" или от 3" до 4". Стекловолокно толщиной 4" плотностью 3-lb/ft³ чрезвычайно хорошо поглощает диапазон от 125 Гц к до 4 кГц.

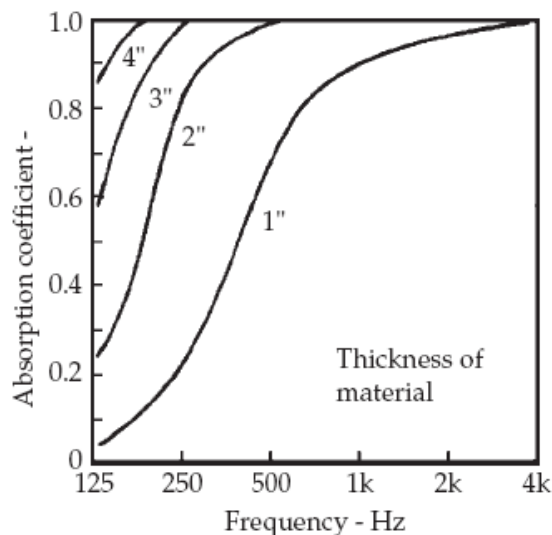


Рис. 12-10 – Толщина стекловолоконного звукопоглотителя определяет поглощение на низших частотах (плотность 3lb/ft³). Материал помещен прямо на поверхность.

Влияние Воздушного пространства позади Поглотителя

Эффективное низкочастотное поглощение можно получить, оставляя воздушное пространство от пористого поглотителя до стены. Пористый поглотитель с пространством может быть столь же эффективным, как поглотитель без пространства суммарной толщины. Это недорогой способ получить улучшенное воспроизведение в определенных рамках. Иллюстрация 12-11 показывает влияние на коэффициент поглощения

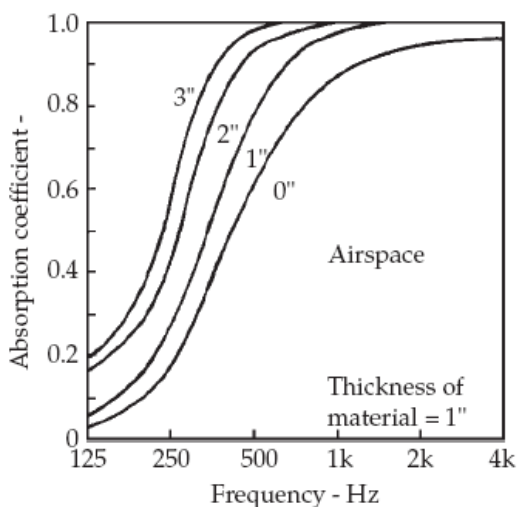


Рис. 12-11 – Поглощение низких частот стекловатой толщиной 1" улучшается с ростом расстояния от стены

Влияние Плотности Поглотителя

Стекловолоконные и другие материалы бывают с различными удельными весами, в пределах от мягких теплоизоляционных панелей до полужестких и жестких панелей. У всех из них есть надлежащее назначение в акустической обработке пространств. Вообще звук в состоянии проникнуть через промежутки высокоплотного, более твердого поверхностного материала так же, как мягкого. Иллюстрация 12-12 показывает, что разница в коэффициенте поглощения относительно невелика при смене плотности в диапазоне от 1 до почти 4. Для очень низких удельных весов промежутки между волокон так велики, что поглощение снижается. Для чрезвычайно плотных панелей поверхностное отражение возрастает, а звуковое проникновение падает.

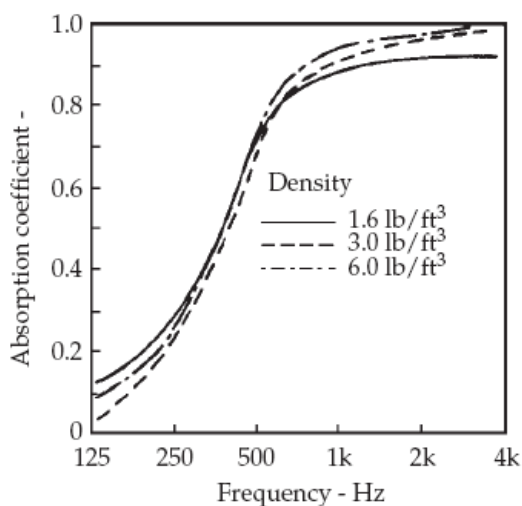


Рис. 12-12 – Плотность в диапазоне 1,5...6lb/ft³ звукопоглотителя из стекловаты оказывает сравнительно малое влияние на поглощение. Материал прикреплен непосредственно к стене.

Пустотелые пены

Гибкий полиуретан и полиэстер широко используются в шумоизоляции автомобилей, в машиностроении, самолетах, и иных промышленных задачах. Пена также находит применение как звукопоглотитель в архитектурных решениях, включая студии звукозаписи и домашние комнаты для прослушивания. Иллюстрация 12-13 - фотография одной из форм Sonex, изделия из пены, оформленного так, чтобы моделировать клинья, используемые в безэховых комнатах. Они изготавливаются в формах "мама" и "папа" и поставляются парами. Этот материал может быть склеен или пришит к целевой поверхности.

Звуковые коэффициенты поглощения Sonex для толщин 2, 3, и 4" показаны на Рис. 12-14 (тип установки А). Стекловолоконо толщиной 2" из Рис. 12-10 акустически значительно лучше двухдюймового Sonex'a, но нужно учесть в этом сравнении следующее:

- (1) У Типа 703 плотность 3 lb/ft³, в то время как Sonex - 2 lb/ft.
- (2) В 2" Sonex, высота клина и средняя толщина гораздо меньше, в то время как

толщина 703 значительно больше.

(3) Сравнение этих двух продуктов является, в некотором смысле, показательным, потому, что завышенная стоимость Sonex в понимании большинства людей связана с внешним видом и легкостью установки, а не с акустическими свойствами.

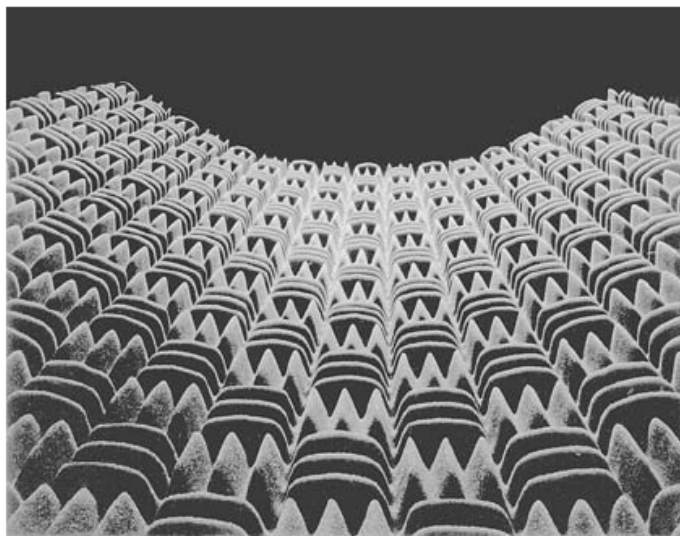


Рис. 12-13 – Sonex – формованная акустическая пена, эмитирующая безэховые клинья. Это пустотелый тип пены.

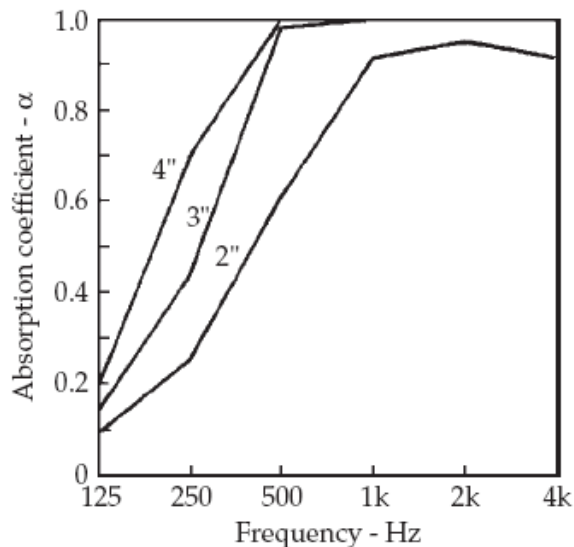


Рис. 12-14 – Коэффициенты поглощения формованной пены Sonex различной толщины

Драпировка Как Звукопоглотитель

Драпировка - пористый тип звукопоглотителя, потому что воздух может идти через ткань, и это позволяет происходить поглощению. Среди параметров, затрагивающих поглотительную способность, находятся тип, вес материала, степень сгиба, и расстояние от стены. Чем более тяжела ткань, тем больше звуковое

поглощение. Тяжелая велюровая драпировка может обеспечить хорошее поглощение, в то время как легкая фактически не обеспечивает. Иллюстрация 12-15 сравнивает поглощение велюров с удельной плотностью 10, 14, и 18 oz/yd², висящих прямо и на некотором расстоянии от стены. Большее поглощение при изменении плотности от 14 до 18 oz/yd², чем от 10 до 14 oz/yd² трудно объяснить. Эффект сконцентрирован области 500-1000 Гц.

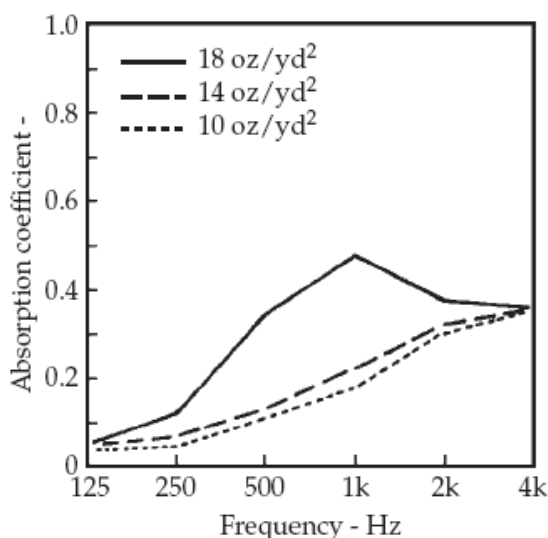


Рис. 12-15 – Коэффициенты поглощения для велюра различной плотности

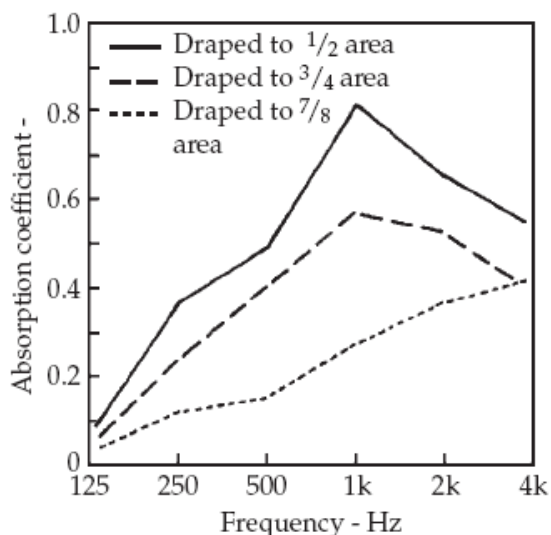


Рис. 12-16 – Влияние драпировки на звуковое поглощение. «Draped to 1/2 area» означает, что складки на ткани сокращают её площадь вдвое относительно расправленного состояния.

от того, что сгибы увеличивают площадь поверхности, направленной к звуку. Влияние показано на Рис. 12-16. Как можно заметить, чем глубже сгиб, тем больше поглощение.

Расстояние, на которое драпировка отстранена от отражающей поверхности, может оказывать большое влияние на поглотительную эффективность. На рис. 12-17А, драпировка или другой пористый материал повешен параллельно твердой стене, и расстояние d между ними различно. Частота звука, падающего на пористый материал, принята постоянной, 1 кГц. Если измерить звуковое поглощение, обеспеченное пористым материалом, мы обнаружим, что оно сильно изменяется с изменением расстояния d от стены. Эксперименты показывают, что максимумы и минимумы поглощения связаны с длиной волны. Длина волны звука λ равна скорости звука, разделенной на частоту, и в случае 1 000 Гц, $1,130/1,000 = 1,13$ фута или приблизительно 13.6". Длина четверти волны равна 3.4", половины – 6.8". Пики поглощения присутствуют на длине одной четверти волны, и, если отодвигать поглотитель далее, на каждом расстоянии, кратном нечетному числу четвертей длин волны. Поглотительные минимумы возникают на расстояниях, кратных четным количествам четвертей волн.

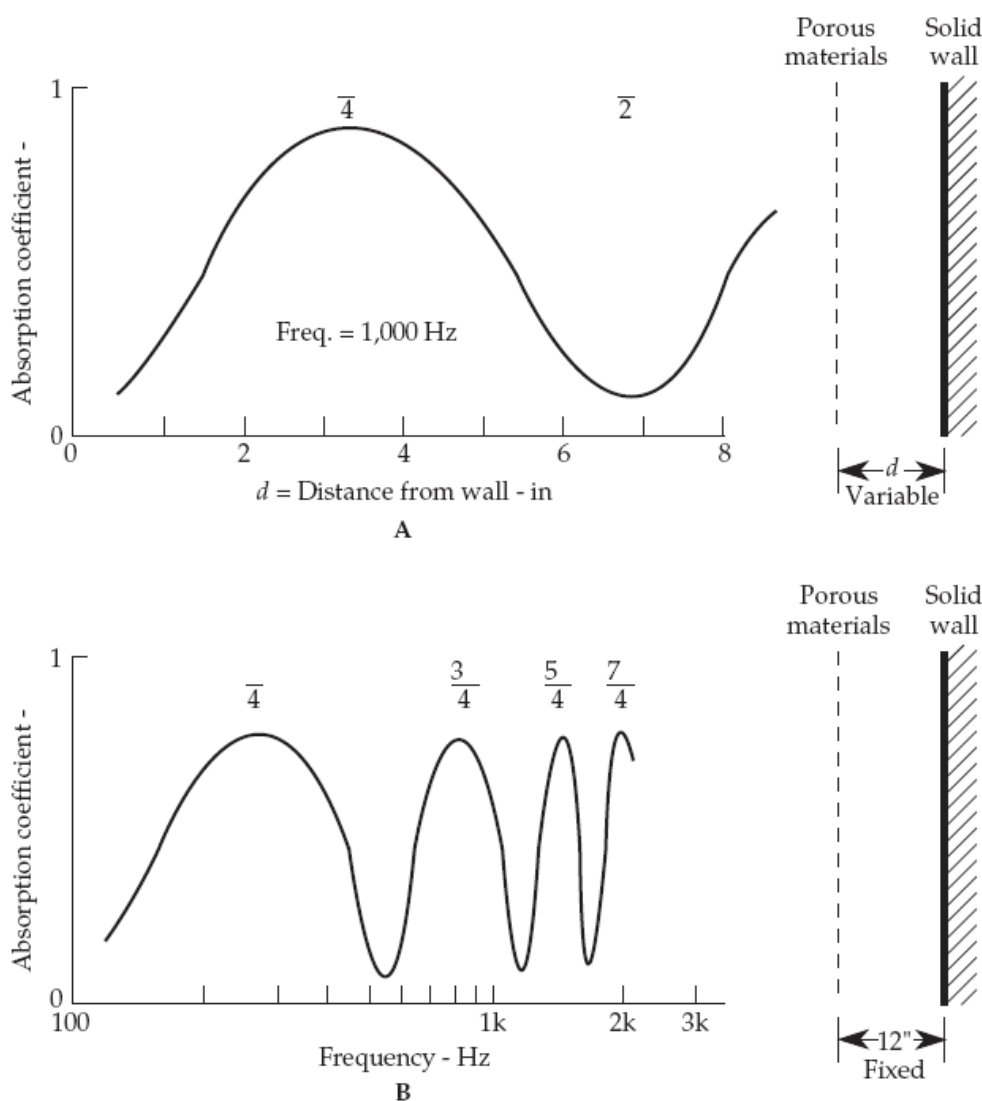


Рис. 12-17 – Звукопоглощение пористым материалом меняется относительно расстояния от стены. (А) – Максимум поглощения при расположении на расстоянии $\frac{1}{4}$ длины волны от

стены; (В) – Материал, повешенный на расстоянии от стены даст максимумы звукопоглощения при совпадении этого расстояния с нечетными четвертями длин волн.

Этот эффект объяснен отражениями звука от твердой стены. У поверхности стены давление будет максимально, но скорость частиц воздуха будет равна нулю, потому что звуковые волны не могут сместить стену. Однако, на четверти длины волны от стены, давление - нулевое, а скорость частиц воздуха максимальна. Помещая пористый материал, например драп, на расстояние четверти длины волны от стены, мы получим максимальный поглощающий эффект на соответствующей частоте, потому что скорость частиц в материале максимальна, и имеют место максимальные потери на трение. Тот же самый эффект происходит на нечетных длинах $\lambda/4$, таких как $3\lambda/4$, $5\lambda/4$, $7\lambda/4$, и так далее. На расстоянии полуволны скорость частиц минимальна, следовательно, поглощение минимально. Практически, т.к. у драпировки обычно есть некоторая степень сгиба, четверть длины волны находится в некоем диапазоне расстояний от стены. Таким образом, максимумы и минимумы скорости частиц имеют тенденцию быть несколько разбросанными в пространстве, ослабляя влияние расположения драпировки на общую картину отклика.

На рис. 12-17В расстояние от драпа от стены считается постоянной, 12", а поглощение измерено на различных частотах. Наблюдается та же самая вариация поглощения: максимум, когда расстояние от стены – в нечетных длинах четвертей волны и минимуме – в четных длинах четвертей волны. При конкретном расстоянии в 12" (1 футе), длина волны соответствует $1,130/1 = 1\ 130$ Гц, четверть волны - 276 Гц, половина длины волны - 565 Гц, и так далее. Относительно четвертей длины волны, получаются синусоидальные волны. Измерение поглощения делается с помощью шума в определенных частотных полосах, следовательно, стоит ожидать, что колебания, показанные на Рис 12-17В будут усредняться с использованием таких частотных полос.

Рис. 12-18 показывает измерения поглощения велюра 19 oz/yd² в реверберационной камере. Сплошная линия – для драпа, достаточно удаленного от стен. Другие линии, очень близкие друг к другу - для того же самого материала, расположенного на расстоянии приблизительно 4 и 8 дюймов от стены. Расстояние в 4 дюйма является длиной волны 3 444 Гц; 8 дюймов – 1 722 Гц. Нечетные четверти волн обеих 4 и 8 дюймовых показаны на верхней части Рис. 12-18. Поглощение велюра больше, когда есть промежуток от стены, и эффект является самым большим в области 250...1000 Гц. На 125 Гц промежуток в 10 и 20 см фактически ничего не добавляет к поглощению, потому что на 125 Гц, четверть длины волны составляет 2,26 фута.

Ковер как Звуковой Поглотитель

Ковер обычно доминирует в акустической картине во многих типах пространств. Ковер - единственная штука, с которой владелец часто определяется заранее, и причина - чаще комфорт и внешний вид, чем акустика. Ковер и то, на чем он лежит,

может обеспечить существенное поглощение в середине и высоких частотах. Представьте, что ковер помещен в студию звукозаписи с закрытой площадью 1 000 кв. футов. Далее, предположите, что время реверберации равно примерно 0.5 секундам, которые требуют 1060 сэбинов поглощения в этой комнате. На более высоких звуковых частотах, тяжелый ковер с коэффициентом поглощения приблизительно 0,6 дает 600 сэбинов поглощения на 4 кГц или 57 % необходимого поглощения для всей комнаты еще до того, как поглотительные потребности стен и потолка даже будут приняты к рассмотрению. Акустический проект уже весьма сокращается и даже прежде, чем он будет начат.

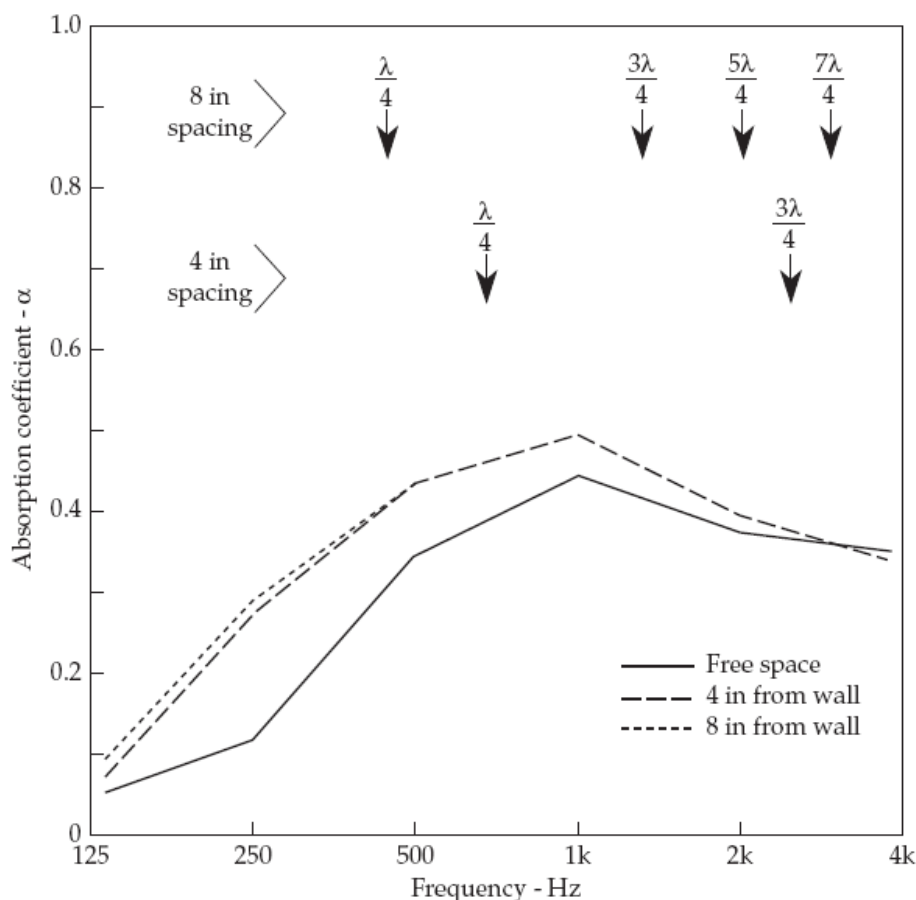


Рис. 12-18 – Измерения коэффициентов поглощения вельвета (19oz/yd²) в свободном пространстве, и на расстоянии 4 и 8 дюймов от отражающей стены. Сверху показаны точки, на которых поглощение растёт в связи с отражением от стены.

Есть другая, более серьёзная проблема - поглощающая способность ковра велика только на более высоких звуковых частотах. Ковер, имеющий коэффициент поглощения 0,60 на 4 кГц, может дать только 0,05 на 125 Гц. Другими словами, 1 000 ft² ковра дает 600 сэбинов на 4 кГц, и только 50 сэбинов на 125 Гц. Это - большая проблема, с которой сталкиваются при акустических обработках. Неуравновешенное

поглощение ковра может быть компенсировано другими способами, низкочастотными поглотителями, преимущественно резонансного типа.

Чтобы собрать воедино проблему неуравновешенного поглощения ковра, необходимы достоверные значения коэффициентов поглощения. Ассортимент типов ковров и различия в типах низлежащего слоя, добавляют неопределенности. Приходится применять опыт и рассуждения для определения, какие коэффициенты поглощения должны использоваться, особенно при устилке ковров вплотную от стены к стене.

Влияние Типа Ковра на спектр поглощательной способности

Есть значительные вариации в звуковом поглощении в зависимости от типа ковра. Рис. 12-19 показывает разность между тяжелым ковром Вильтона и вельветовым ковром с и без латексного покрытия. Латексное покрытие существенно увеличивает поглощение выше 500 Гц и несколько уменьшает его ниже 500 Гц.

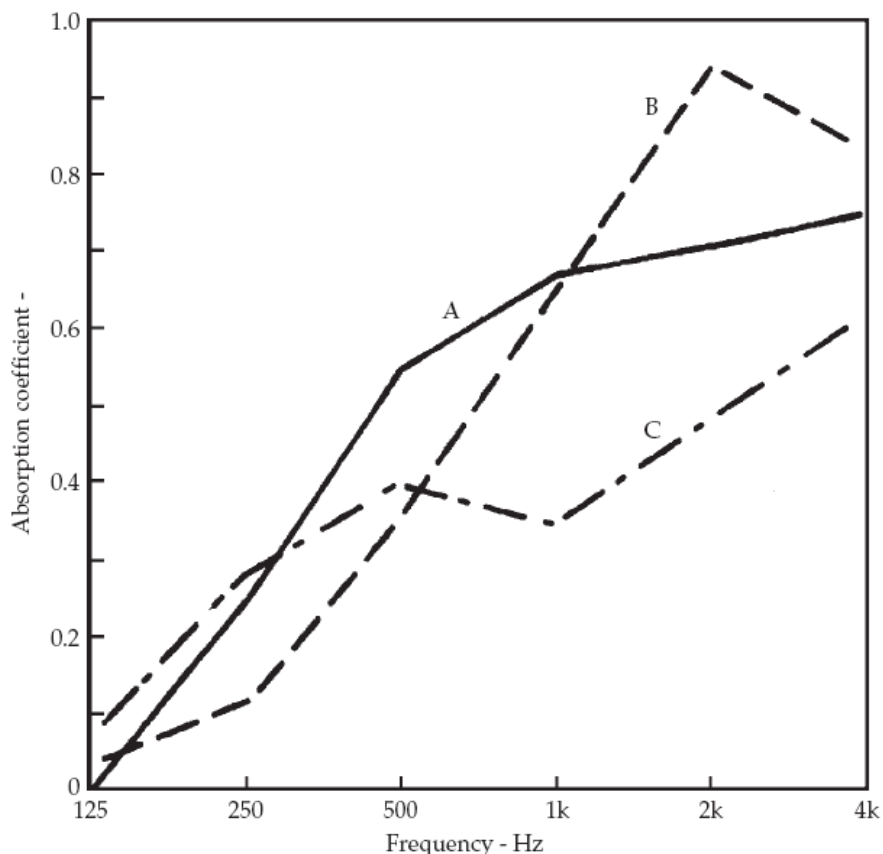


Рис. 12-19 – Сравнение звукопоглощающих характеристик трех различных типов ковров. (A) – Ковер Вильтона, высота ворса 0,29", 92,6 oz/yd². (B) – Вельвет с латексным покрытием, высота ворса 0,25", 76,2 oz/yd². (C) – Тот же вельвет без латексного покрытия, 37,3 oz/yd².

Влияние низлежащего слоя на поглощение

Пенорезина, губчатый каучук, велюр, полиуретан, или их комбинации часто используются как дополнение под ковром. Пенорезина делается обрызгиванием латекса струями воды с добавлением клеящего агента, с последующей заливкой в

формы. Результат - наличие пустотелых ячеек. Губчатый каучук, с другой стороны, формируется газовыми пузырьками химического происхождения, что может привести и к полым, и к заполненным ячейкам. Полые ячейки обеспечивают промежутки, необходимые для хорошего звукового поглощения, в то время как заполненные ячейки - нет.

Влияние низлежащего слоя на поглотительные свойства ковра весьма существенно. Рис. 12-20 отображает измерение коэффициентов поглощения в реверберационной камере для одного ковра типа Axminster с различными низлежащими слоями. Линии A и C показывают зависимость от веса ворса в диапазоне 80 и 40 oz/yd². Линия B показывает промежуточную комбинацию ворса и пены. В то время как эти три линии значительно отличаются, они все весьма контрастируют с линией D - ковер, положенный непосредственно на голом бетоне. Можно подытожить, что низлежащий слой заметно способствует совокупному поглощению ковра.

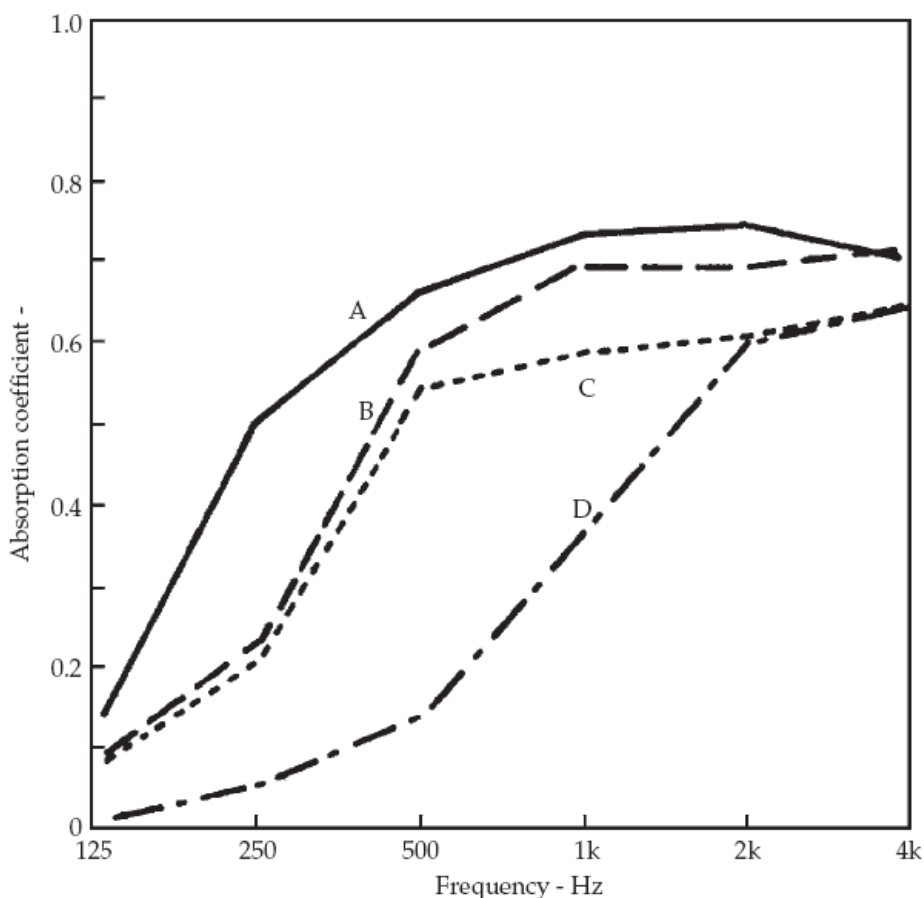


Рис. 12-20 – Звукопоглощающие характеристики ковра типа Axminster с различными низлежащими слоями. (A) – 80oz ворс, (B) – ворс и пена, (C) – 40oz ворс, (D) – без низлежащего слоя, непосредственно на бетоне.

Коэффициенты Поглощения Ковра

Коэффициенты поглощения, показанные на Рис. 12-19 и 12-20, взяты из листа Харриса 1957 года, самого исчерпывающего исследования характеристик ковров,

доступных в то время. Коэффициенты, показанные на Рис. 12-21 и включенные в приложение данной книги отображены для сравнения с Рис. 12-19 и 12-20. Ковры весьма разнообразны, что предоставляет акустическим дизайнерам широкий выбор при проектировании акустических систем.

Звуковое Поглощение Людми

Люди, являющиеся аудиторией концертного зала, составляют существенную часть звукового поглощения. Также может иметь значение, если один или несколько человек находятся в маленькой контрольной комнате. Проблема в том, как оценить человеческое поглощение и как использовать его в вычислениях. Некоторые методы используют площадь поверхности, по которой рассажена аудитория. Либо можно использовать количество присутствующих людей. В любом случае, поглотительные единицы (сэбины), связанные с присутствием людей, необходимо вычислить на каждой частоте и затем добавить к сэбинам ковра, драпов, и других поглотителей в комнате на соответствующих частотах. Таблица 12-2 содержит данные по поглощению на одного человека для неформально одетых студентов колледжа в классной комнате и поглощению для более формально одетых людей в аудитории.

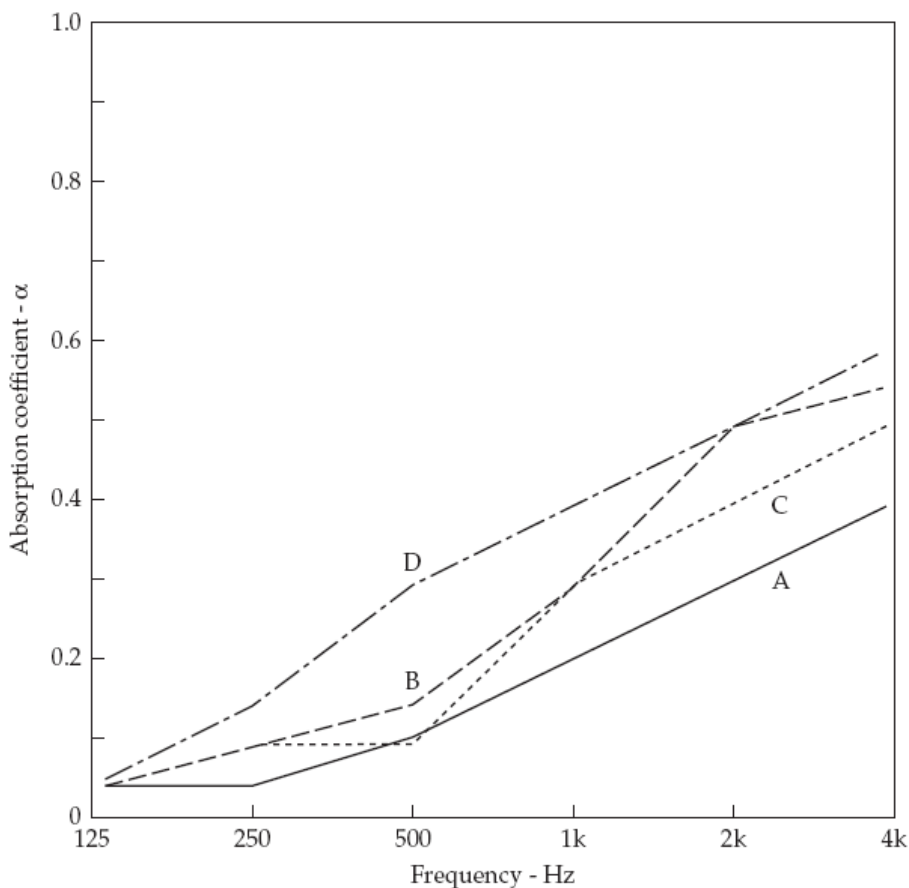


Рис. 12-21 – Коэффициенты поглощения ковра из обычно применяемой таблицы. (A) – высота ворса 1/8"; (B) – 1/4"; (C) – 3/16" комбинация ворса и пены (D) – 5/16" комбинация ворса и пены. Сравните эти графики с Рис. 12-18 и 12-19.

Для 1 кГц и выше, поглощение студентами колледжа в неформальной одежде в обстановке классной комнаты, падает на более низкой частоте, чем более крупной аудитории. Низкочастотное поглощение студентов, однако, значительно ниже, чем более формально одетых людей. Эмпирическое правило, используемое некоторыми акустиками, просто приписывает 5 сэбинов на 500 Гц, за одного усаженного человека.

Таблица 12-2

	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Студенты колледжа, одетые неформально	NA	2,5	2,9	5,0	5,2	5,0
Рассаженная аудитория, в зависимости от расстояния друг от друга и материала кресел	2,5-4,0	3,5-5,0	4,0-5,5	4,5-6,5	5,0-7,0	4,5-7,0

Звук, проходящий через ряды людей, как в аудитории или концертном зале, подвергнут необычному типу ослабления. В дополнение к нормальному ослаблению звука с расстоянием от источника присутствует дополнительное падение вплоть до 15 - 20 децибел в районе 150 Гц с распространением этого эффекта в диапазоне 100...400 Гц. Фактически, это эффект связан с присутствием людей только частично, потому что имеет место, даже когда места пусты. Подобное падение в уровне звукового давления влияет на ранние отражения от боковых стен, что является результатом интерференции. Угол падения также играет роль. Когда аудитория рассажена на относительно плоском полу, угол звукового уровня мал и имеет место большее поглощение. С ростом угла падения (например, на стадионе), поглощение становится меньше.

Звуковое Поглощение в Воздухе

Для частот приблизительно от 2 кГц и выше в больших помещениях поглощение звука воздухом в пространстве становится значительным. Воздушное поглощение может составлять 20%..25% полного поглощения в пространстве. Воздушное поглощение может быть оценено как:

$$A_{\text{air}} = mV \quad (12-5)$$

где m – коэффициент аттенюации воздухом, сэбин/фут³ или сэбин/м³;
 V – объем воздуха, фут³ или м³.

Значение воздушного коэффициента ослабления m меняется в зависимости от влажности. С влажностью в диапазоне 40..60 %, значения m на 2, 4, и 8 кГц следующие: 0.003, 0.008, и 0.025 сэбин/фут³ и 0.009, 0.025, и 0.080 сэбин/м³, соответственно.

Например, церковь, вмещающая 2000 человек обладает объемом 500 000 фут³. При 50%-ой относительной влажности на 2 кГц воздушное поглощение – 0.003

сэбин/фут³, что даёт 1500 сэбин поглощения на 2 кГц.

Панельные (диафрагменные) Поглотители

Поглощение звука на более низких слышимых частотах может быть получено резонансным (реактивным) поглотителем. Стекловолоконные и акустические плитки - стандартные формы пористых поглотителей, в которых звуковая энергия рассеивается как тепло в промежутках между волокон. Однако, поглощение стекловолоконных и других волокнистых поглотителей на низких звуковых частотах весьма слабо. Для лучшего поглощения толщина пористого материала должна быть сопоставимой с длиной звуковой волны. На 100 Гц длина волны составляет 11.3 футов, и использование любого пористого поглотителя, толщиной близкой к этой, было бы непрактично. Поэтому, чтобы получить поглощение на низких частотах, часто используются резонансные поглотители.

Груз, повешенный на пружине, будет вибрировать на своей собственной частоте. Панели с воздушной полостью позади них, действуют так же. Масса панели и упругость воздуха в полости образуют вместе резонанс на некоторой определенной частоте. Звук поглощается, поскольку панель изгибается из-за демпфирования, вызванного тепловыми потерями на трение внутри материала, из которого изготовлена панель. (Точно так же груз на пружине прекратит колебаться из-за демпфирования.) Поглощение, обеспечиваемое мембранными поглотителями, обычно относительно невелико, потому что резонансные колебания также излучают некоторую звуковую энергию. Панели, сделанные из мягких материалов с высоким демпфированием, обеспечивают большее поглощение.

Демпфирование увеличивается с ростом амплитуды колебания мембраны, а амплитуда максимальна на резонансной частоте, т.е. поглощение звука максимально на частоте, на которой структура резонирует. Как отмечено, замкнутая герметичная воздушная полость позади панели действует как пружина; и чем больше глубина воздушного пространства, тем меньше жесткость этой пружины. Аналогично меньшее воздушное пространство действует как более жесткая пружина. Частота резонанса для плоской, неперфорированной панели может быть оценена как:

$$f_0 = \frac{170}{\sqrt{(m)(d)}} \quad (12-6)$$

где f_0 – частота резонанса, Гц;
 m – поверхностная плотность панели, lb/ft² или кг/м²;
 d – глубина воздушного промежутка, ft или м.

Примечание: для метрических единиц замените 170 на 60.

Например, рассмотрим кусок ¼” фанеры, расположенной от стены 3¾”. Поверхностная плотность ¼” фанеры – 0.74 lb/ft², может быть измерена или найдена в описании. В итоге мы получаем резонансную частоту приблизительно 102 Гц.

Иллюстрация 12-22 показывает резонансные частоты панели как функцию глубины полости в дюймах и поверхностной плотности в унциях на квадратный фут. Зная толщину фанеры и глубину пространства позади фанеры, частота резонанса

может быть найдена по диагональным линиям. Уравнение (12-6) относится к мембранам и диафрагмам и из других материалов, таким как оргалит, фибролит, или даже Крафт-бумага. Для других материалов необходимо определить поверхностную плотность. Поверхностную плотность легко найти, взвесив кусок материала известной площади. Площадь поверхности мембранного поглотителя должна быть по крайней мере 5 футов².

Насколько точны уравнения (12-6) и Рис. 12-22? Фактические измерения на трех фанерных мембранных поглотителях показаны на Рис. 12-23. Линия А отображает простейший случай с 3/16'' фанерной панелью на двухдюймовых брусках. Оценочная частота резонанса этой структуры составляет приблизительно 175 Гц. Пиковый коэффициент - приблизительно 0.3, что является величиной, которую можно ожидать от таких конструкций. Линия В для 1/16'' фанеры с заполнением 1" стекловолокном и 1/4'' воздухом. Граф С является тем же самым за исключением того, что использована 1/8" панель. Обратите внимание, что стекловолоконный наполнитель почти удвоил пиковое поглощение, при этом переместив его приблизительно на 50 Гц вниз. Такие методы вычисления частоты пикового поглощения на резонансе не идеально точны, но они - хорошая первая аппроксимация с точностью, достаточной для большинства целей.

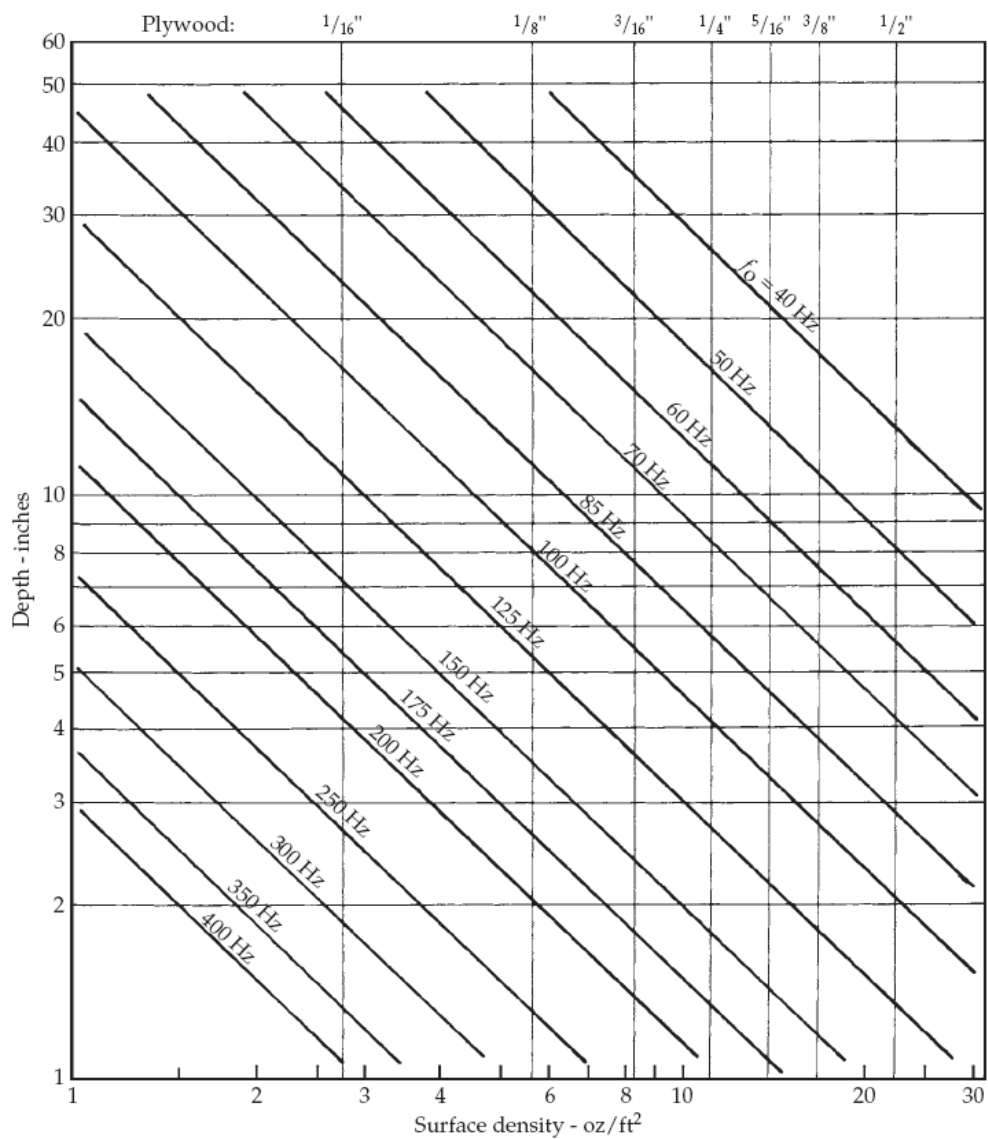


Рис. 12-22 – Номограмма конструкций резонансных панельных поглотителей.

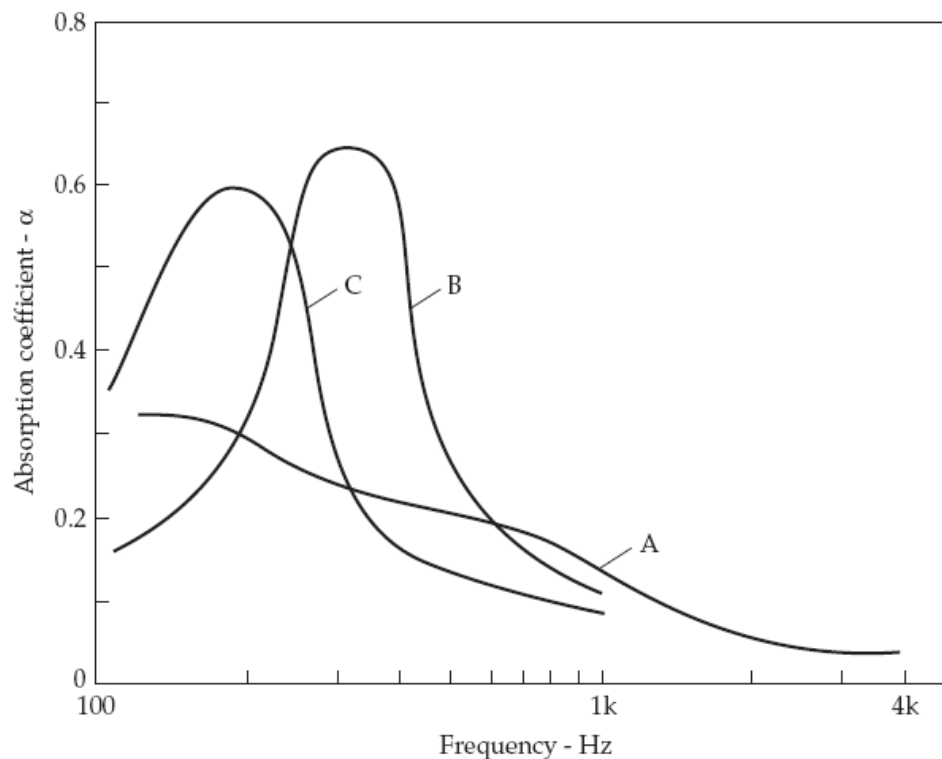


Рис. 12-23 – Измерение поглощения трех панельных поглотителей. (A) – 3/16" фанера с 2" воздушным промежутком. (B) – 1/16" фанера с 1" слоем минералваты и 1/4" воздушным промежутком. (C) – То же что и (B), но с 1/8" фанерой.

Поглощение увеличивается, когда полость заполнена пористым материалом, таким как стекловолоконо, т.к. этот материал улучшает демпфирование. Материал может располагаться свободно в полости или приложен к тылу панели. Панель наиболее эффективна, когда размещена в точке максимума давления для желательной поглощаемой частоты; это может быть на задней стене, в средней точке, или углу комнаты. Панели менее эффективны, когда помещены в точку минимального давления.

Некоторые музыкальные комнаты обязаны своим акустическим превосходством низкочастотному поглощению, которое даёт изобилие панельных стен. Пол из настила фанеры или двойной пол вибрирует как диафрагма и способствуют низкочастотному поглощению. Двойные стены и потолки выполняют ту же самую роль. Все эти подобные компоненты должны быть учтены в акустическом проекте комнаты, большой или маленькой.

Гипсокартонная облицовка стен играет важную роль в конструкции домов, студий, диспетчерских, и других помещений. Обшивка поглощает звук посредством гибких диафрагменных движений, работая как резонансная система, особо эффективная при поглощении низкочастотного звука. Обычно такое низкочастотное поглощение приветствуется, но в больших пространствах, разработанных для музыки, такие поверхности могут поглотить излишне много низкочастотного звука, что это может помешать достигнуть необходимых показателей реверберации. Облицовка 1/2"

толщины на расстоянии 16" даёт коэффициент поглощения 0.29 на 125 Гц и даже больше на 63 Гц (что может представлять интерес при строительстве студий звукозаписи музыки). Поглощение облицовкой в маленьких звуковых комнатах должно быть включено в вычисления. Это является иногда проблематичным, потому что используются различные толщины облицовки, и частота пикового поглощения изменяется согласно толщине и воздушному пространству. Облицовка толщиной $\frac{1}{2}$ " обладает массой $5,3 \text{ lb/ft}^2$. С воздушным промежутком $3 \frac{3}{4}$ ", панель толщиной $\frac{1}{2}$ "

резонирует на частоте 60,6 Гц, а двойная панель $\frac{5}{8}$ " – на 38,1 Гц.

Мы отметили, что пористые материалы обычно дают самое большое поглощение на высоких частотах. При рассмотрении маленьких комнат для прослушивания и студий очевидно, что системы, дающие хорошее низкочастотное поглощение, неоценимы при управлении модами комнаты.

Мембранные звукопоглотители весьма просты в изготовлении. Пример мембранного поглотителя, который будет установлен на плоской стене или на потолочной поверхности, показан на Рис. 12-24. $\frac{1}{4}$ " или $\frac{1}{16}$ " фанерная панель прикреплена к деревянной структуре, чтобы обеспечить необходимое расстояние от стены. Стекло- или минерало- волоконная 1.. $1\frac{1}{2}$ " вставка приклеивается к поверхности стены. Воздушное пространство между поглотителем и тыловой поверхностью фанерной панели должно быть выдержано $\frac{1}{4}$ " или $\frac{1}{2}$ ".

На рис. 12-25 показан угловой мембранный поглотитель. Для вычислений используется средняя глубина. Глубины большие и меньшие, чем среднее число, просто означают, что пик спектральной поглощательной способности более широк, чем у поглотителя с постоянной глубиной. Выдержать расстояние $\frac{1}{4}$ " или $\frac{1}{2}$ " от

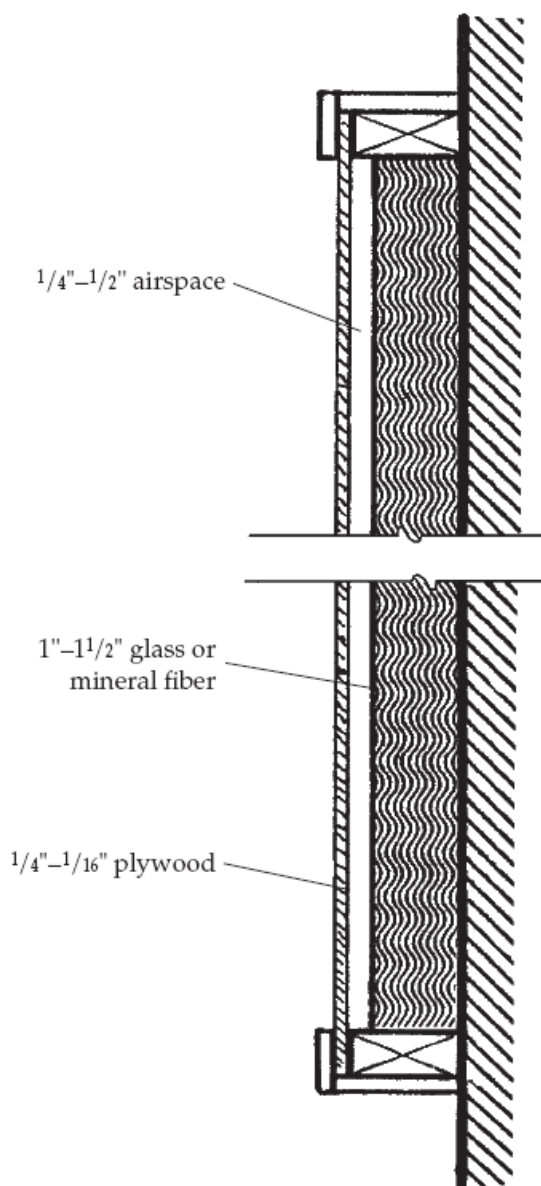


Рис. 12-24 – Типовой панельный резонансный поглотитель настенной установки

тыла фанерной панели до поглотителя просто, если используется минералватная

панель типа Tectum. при использовании гибкого стекловолокна требуется поддержка армированной оболочкой, тканью с крупной ячейкой, или металлической сеткой. Для случаев, в которых отражение средних и высоких частот от мембранного поглотителя может создать проблемы, облицовка стекловолокна не попрепятствует поглощающему действию на низких частотах, если был оставлен промежуток, чтобы избежать демпфирования вибрации фанерной панели. Все моды комнаты заканчиваются в углах комнаты, для контроля таких модов можно использовать угловые мембранные поглотители.

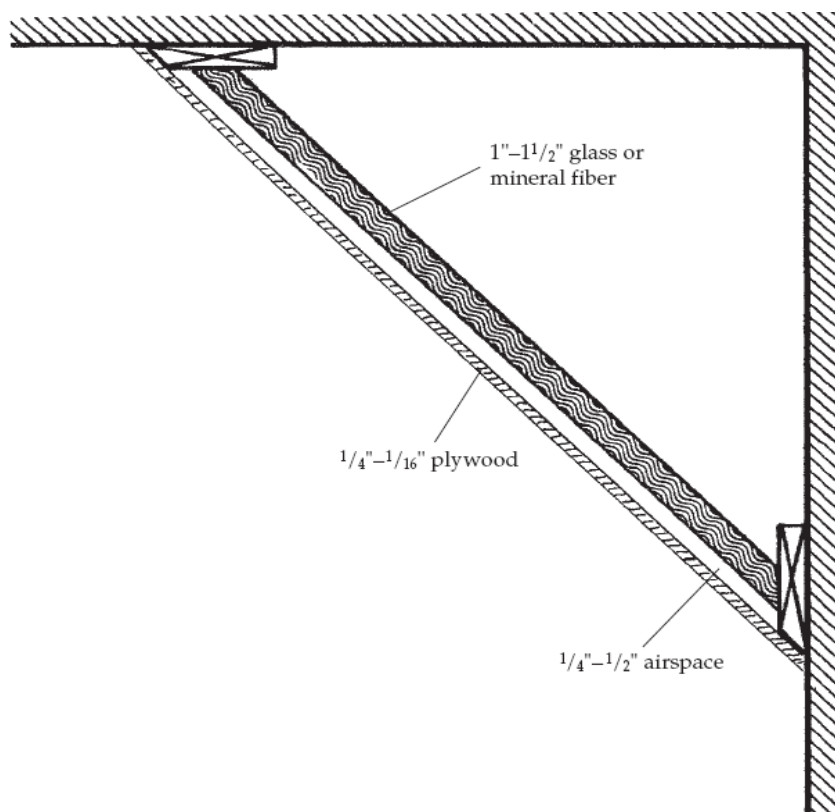


Рис. 12-25 – Типовой панельный резонансный поглотитель для вертикальной или горизонтальной угловой установки.

Полуцилиндрические Поглотители

Обшивание комнаты плоскими панелями может дать некоторую пользу акустически, но выгибание фанеры или ДВП в форме полуцилиндров может дать некоторые очень заманчивые преимущества. С полуцилиндрическими элементами, акустически можно достигнуть хорошей диффузности звукового поля наряду с живостью и блеском - факторами, которые обычно выступают друг против друга в комнатах с плоскими поверхностями. Чем больше длина хорды, тем лучше поглощение басов. На частотах выше 500 Гц разница между полуцилиндрическими элементами различных размеров не значительна.

Полная длина полуцилиндров является довольно несущественной, будучи в реальных условиях зависимой от длины листа фанеры, длины, ширины, или высоты

комнаты. Однако желательно разбить полость позади поверхности ПЩЭ беспорядочными перегородками. Подобные перегородки показаны на Рис. 12-26.

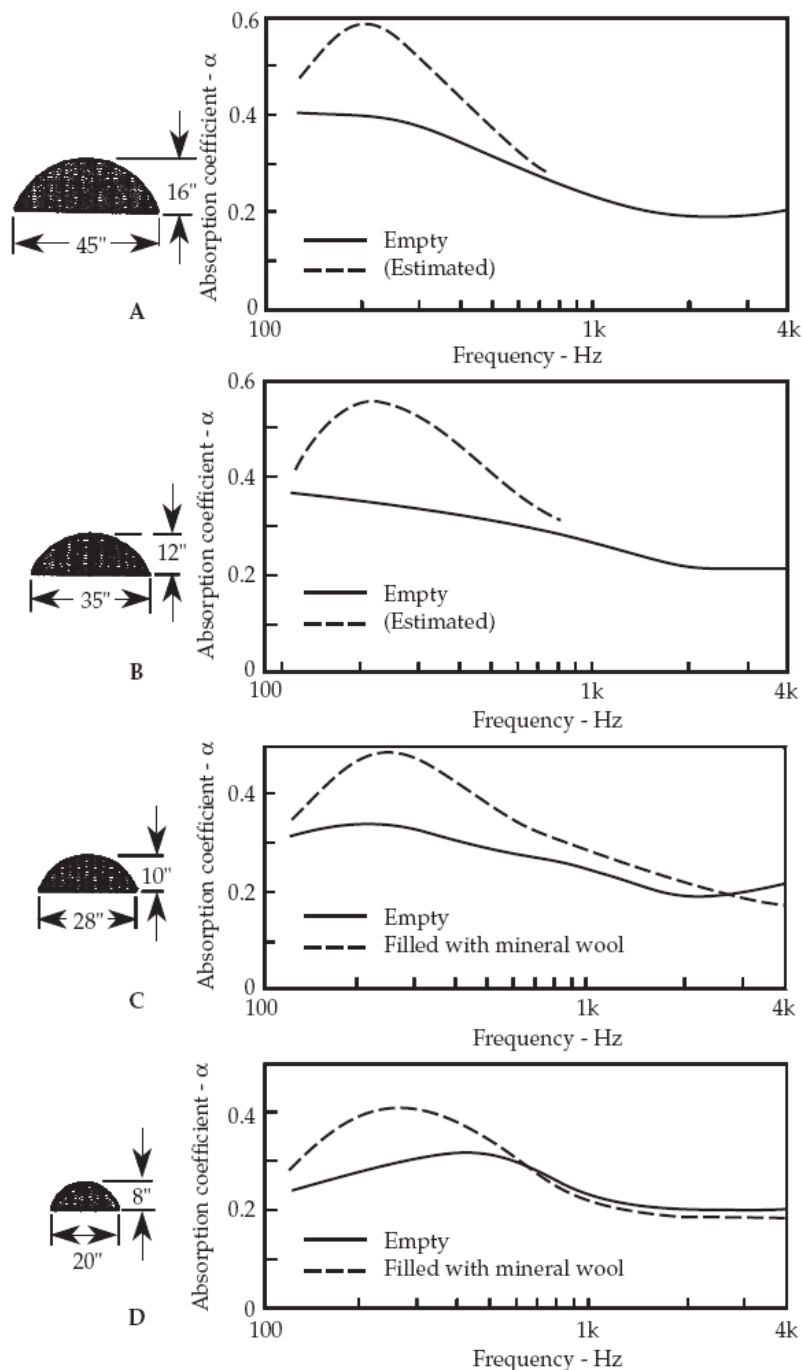


Рис. 12-26 – Измеренное поглощение полуцилиндрических поглотителей с различными длинами хорд и высот. (A) и (B) – доступны данные только для пустых полуцилиндров; пунктирные линии – предполагаемое поглощение при заполнении мин. ватой; (C) и (D) – пустые и заполненные мин. ватой полуцилиндры (Mankovsky)

Характеристики полуцилиндров меняются в зависимости от того, пусты ли они или заполнены поглощающим материалом. Графики 12-26C, и D отображают

увеличение поглощения низких частот, связанное с заполнением пустот поглотителем. Если нужно, это улучшение басового поглощения может быть легко достигнуто простым заполнением ПЦЭ стекловолокном. Если басовое поглощение не необходимо, ПЦЭ может оставаться пустым. Эта приспособляемость важна в акустическом проекте комнат слушания и студий.

Конструкция полуцилиндрических поглотителей

Конструкция полуцилиндрических поглотителей элементарно проста. Структура для вертикальных полуцилиндров показана на Рис. 12-27, (над пластинчатым низкочастотным поглотителем). Различные размеры хорд очевидны, как случайное размещение переборок так, чтобы полости имели различные объемы, приводящие к различным собственным частотам. Желательно, чтобы каждая полость была максимально воздухонепроницаема, изолирована от смежных полостей хорошо подогнанными перегородками и структурой. Неоднородности в стене могут быть герметизированы незастывающим акустическим изолятором. Перегородки каждого ПЦЭ вырезаны по необходимому радиусу лобзиком. Щели между перегородками и поверхностью заполняются адгезивным резиновый клеем, чтобы гарантировать плотное прилегание. Если такие этим пренебречь, в результате можно получить скрип и связь между полостями.

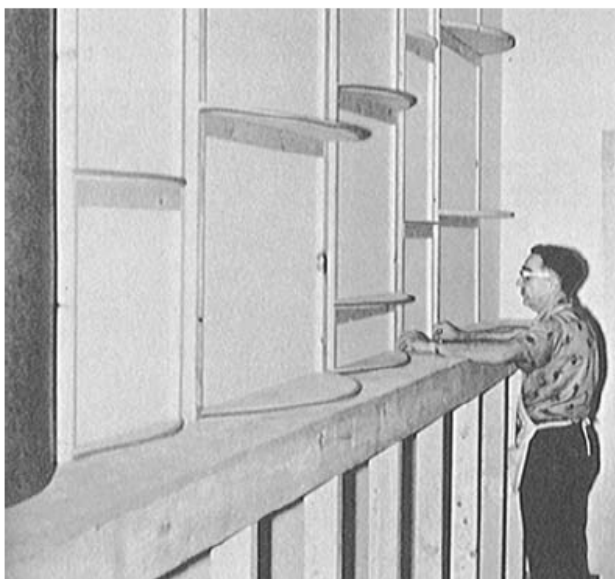


Рис. 12-27 – Процесс установки полуцилиндров на студии звукозаписи. Противодребезговые пенорезиновые вставки устанавливаются на каждой грани перегородки. Также обратите внимание на беспорядочную установку перегородок (Moodv Institute Of Science).

Полуцилиндры, показанные на Рис. 12-28 сделаны из 1/8'' пресованного оргалита (Masonite) в качестве оболочки. Несколько советов могут упростить работу по растяжению этой оболочки. На Рис. 12-28 вдоль несущих лент прорезаны щели толщиной, точно совпадающей с толщиной оргалита. Предположим, что полуцилиндр А уже установлен и проведен в месте лентой 1, которая прибита или привинчена к стене. Двигаясь слева направо, следующий шаг состоит в том, чтобы

установить полуцилиндр В. Сначала левый край полости оргалита В вставляется в остающуюся щель ленты 1. Правый край листа оргалита В вставляется в левую щель ленты 2. Если все измерения и пропилы были сделаны правильно, перемещение ленты 2 к стене должно образовать плотный стык с перегородкой 3 и прокладкой 4. Прижатие ленты 2 к стене завершает полуцилиндр В. Полуцилиндр К устанавливается аналогичным способом, и так далее до конца ряда полуцилиндров. В некоторых проектах оси симметрии полуцилиндров на боковых стенах сделаны перпендикулярными тем, что на задней стене. Если бы полуцилиндры использовались на потолке, то их оси должны были быть перпендикулярными обоим.

Практично и приемлемо делать каждый полуцилиндр полностью независимой конструкцией, а не конструировать их на стене. Такой независимый полуцилиндр может быть расположен где вздумается.

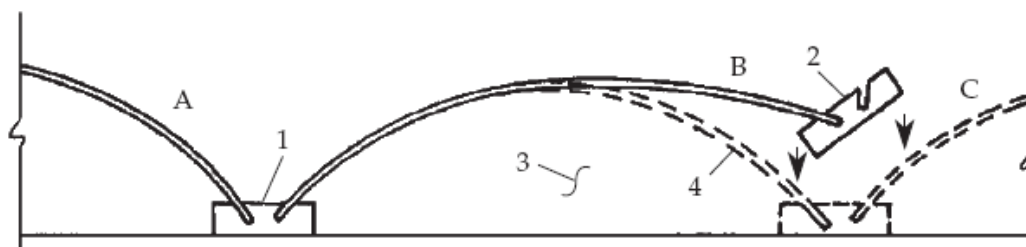


Рис. 12-28 – Метод сгиба фанеры или жесткой оболочки по перегородкам, показанным на рис. 12-27.

Басовые Ловушки: Низкочастотное Поглощение Резонансом

Термин "басовая ловушка" описывает многие виды низкочастотных звукопоглотителей, включая мембранные поглотители, но, возможно, этот термин следовало бы зарезервировать для особого типа объемного реактивного поглотителя. Звуковое поглощение на самых низших октавах слышимого спектра является труднодостижимым. Басовые ловушки обычно используются в контрольных комнатах студий звукозаписи, чтобы снизить стоячие волны на этих басовых частотах. Типичная басовая ловушка показана на Рис. 12-29. Она представляет собой коробку или полость определённой глубины и с входным сечением, соответствующим назначению. Это подобранная по размеру полость с глубиной равной четверти длины волны (фаза максимальной скорости частиц) на проектируемой частоте, на которой желательно максимальное поглощение.

Концепция отражения от стен и четвертьволновых глубин (графически изображенная для драпировки на Рис. 12-17) применима и к басовым ловушкам. Звуковое давление у основания полости на проектируемой частоте максимально, с соответствующей длиной четверти длины. Скорость воздуха у основания равна нулю. На входе в ловушку давление равно нулю, а скорость частиц максимальна, что приводит к двум явлениям. Во-первых, стекловолоконная полужесткая панель

поперек входа приводит к большому трению быстро вибрирующим воздушным частицам, что приводит к максимальному поглощению в этой частоте. Кроме того, нулевое давление на входе образует вакуум, который действует как звуковой "дренаж". Эффект басовой ловушки, таким образом, усиливается.

Эффект басовой ловушки, как драп, располагаемый на расстоянии отражающей стены, проявляется не только на глубине четверти длины волны, но также и на нечетных четвертях волн. Для очень низких басовых частот требуются большие глубины ловушек. Например, длина четверти волны для 40 Гц составляет 7 футов. Неиспользуемое пространство выше потолков диспетчерской, между внутренними стенами и внешними оболочками часто используются в качестве ловушек. Знаменитый дизайн басовых ловушек Хидли (Hidley) - пример ловушек такого типа.

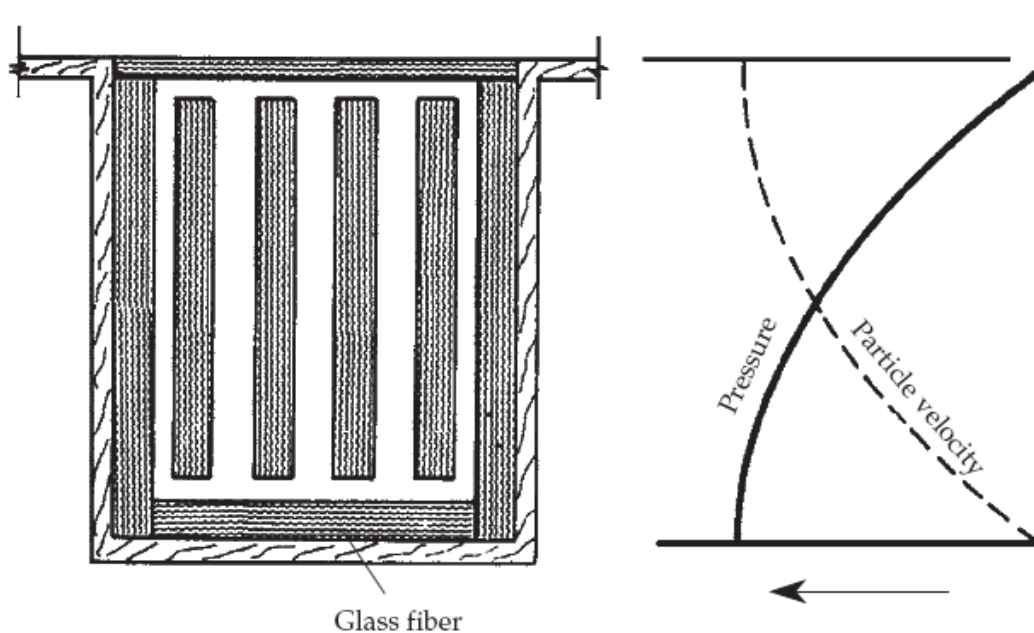


Рис. 12-29 – Работа басовой ловушки зависит от отражений звука от её дна. Давление для частоты, четверть волны которой равна глубине ловушки, максимально на дне, а скорость частиц равна нулю. На входе давление равно нулю (или очень мало), а скорость частиц максимальна. Поглотитель, расположенный там, где скорость частиц максимальна, будет действовать очень эффективно. То же самое имеет место для нечетного количества четвертей волн.

Резонаторы Гельмгольца

Резонаторы Гельмгольца (Helmholtz) широко используется, чтобы достигнуть поглощения на более низких звуковых частотах. Работа резонаторных поглотителей может быть легко продемонстрирована. Дутьё поверх горлышка любой бутылки производит тон на своей собственной частоте резонанса. Воздух в полости упруг, и масса воздуха в горлышке бутылки реагирует с этой упругостью, образуя резонансную систему, подобно грузу на пружине, вибрирующему с его естественным

периодом. Поглощение максимально на частоте резонанса и спадает на близлежащих частотах. Резонансная частота Резонатора Гельмгольца с квадратной горловиной определяется как:

$$f_0 = \left(\frac{c}{2\pi} \right) \sqrt{\frac{S}{V(1 + 2\Delta l)}} \quad (12-7)$$

где c – скорость звука в воздухе, 1130 футов/секунду или 343 м/секунду;
 S – площадь поперечного сечения входа резонатора, ft^2 или m^2 ;
 V – объем резонатора, ft^3 или m^3 ;
 l – длина горловины резонатора, футов или м;
 $2\Delta l$ – фактор коррекции горловины резонатора = $0.9a$, где a – периметр квадратной горловины;

Для резонаторов Гельмгольца с круглой горловиной резонансной частотой будет:

$$f_0 = \frac{(30.5R)}{\sqrt{V(l + 1.6R)}} \quad (12-8)$$

где R – радиус круглой горловины, футов или м;
 V – объем резонатора, ft^3 или m^3 ;
 l – длина горловины резонатора, футов или м.

Примечание: Для метрических единиц, измените 30.5 на 100.

Измените объем воздушной полости, длину или диаметр горловины, и частота резонанса изменится. Ширина полосы поглощения зависит от трения системы. Стеклоянная бутылка даёт малое трение вибрирующему воздуху и имеет очень узкую полосу поглощения. Добавляя немного марли поперек горлышка бутылки или помещая пучок хлопка в горлышко, амплитуда вибрации падает, и ширина полосы поглощения увеличивается. Для максимальной эффективности поглотители Гельмгольца должны быть помещены в область высокого модального звукового давления для заданной частоты.

Чтобы продемонстрировать эффективность узкополосной техники измерения коэффициентов поглощения, Riverbank Acoustical Laboratories измерили поглощение бутылок Coca-Cola. Набор из 1152 пустых бутылок на 10 унций был расставлен на стандартном полу 8x9 футов реверберационной комнаты. Одна, хорошо изолированная бутылка имела поглощение 5.9 сэбинов на частоте резонанса 185 Гц, но с полосой пропускания (со срезом -3dB) всего лишь 0.67 Гц. Поглощение 5.9 сэбинов дает человек на 1 кГц, или 5.9 кв. футов стекловолокна (толщиной 2 дюйма, плотностью 3 lb/ft^3) в среднечастотном диапазоне. Узкополосность этой поглотительной характеристики связана с очень высоким Q (добротность) $185/0.67 = 276$.

Попадающий на резонатор Гельмгольца и не поглощаемый при этом звук излучается повторно. Поскольку звук повторно излучается от горловины, он имеет тенденцию быть излученным полусферически. Это означает, что непоглощенная энергия рассеивается, а рассеяние звука очень желательно в контрольных комнатах студий.

В резонаторах Гельмгольца мы имеем дело с акустическими эффектами, которые упоминались задолго до самого Гельмгольца. В древних греческих и римских летних театрах обнаружены бронзовые вазы. Большие вазы, возможно, использовались, чтобы поглотить звук на более низких частотах. Группы ваз поменьше, возможно, давали звуковое поглощение на более высоких частотах. В средневековые времена резонаторы использовались во многих церквях в Швеции и Дании. Горшки, показанные на Рис. 12-30 были вделаны в стены, по-видимому, чтобы компенсировать низкочастотные моды. Пепел, обнаруженный в некоторых из горшков, возможно, был туда помещен, чтобы понизить Q керамического горшка и таким образом расширить частоту его эффективности.

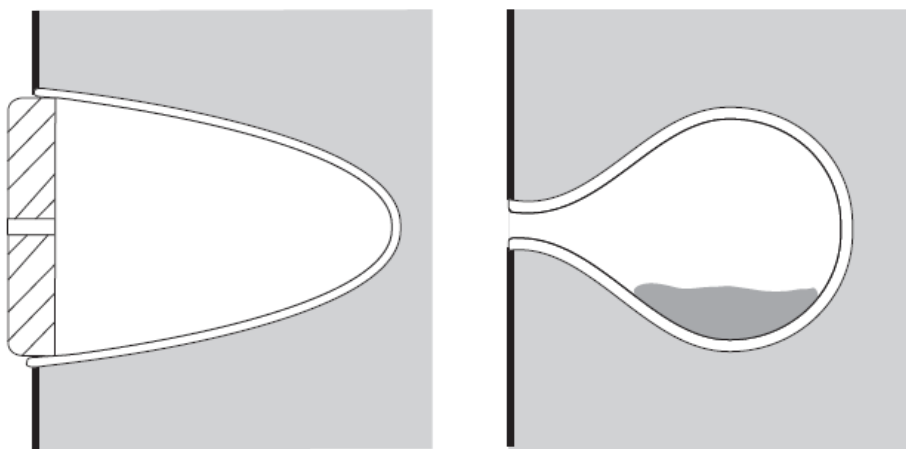


Рис. 12-30 – Горшки, вделанные в стены церквей Швеции и Дании служили как резонаторы Гельмгольца, поглощая звук. Пепел, обнаруженный в некоторых из них, возможно, использовался как поглощающий агент.

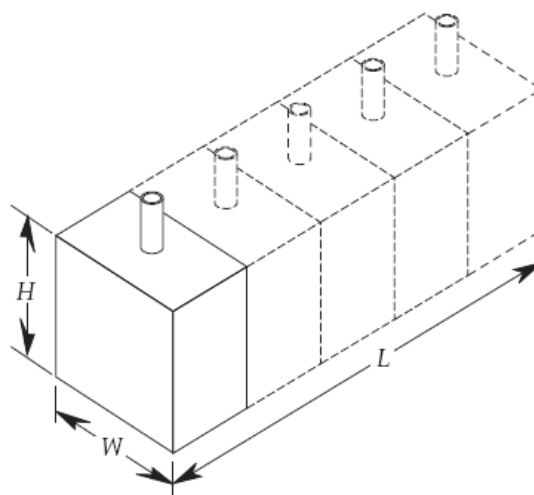


Рис. 12-31 – Наборные резонаторы Гельмгольца из одиночных кубических поглотителей

Резонаторы Гельмгольца часто используются в форме акустических блоков. Эти

блоки сформированы из бетона с открытой щелью, находящейся перед закрытой полостью. У блока с двумя ячейками может быть две щели. В некоторых случаях, в каждой полости помещается металлический делитель, или же в специальный паз в полости помещается пористый поглотитель. Рис. 12-31 отображает идеализированные квадратные бутылки с трубчатыми шеями, образующими наборной поверхностный резонатор. Укладка этих бутылок увеличивает действие резонатора. Рассмотрим коробку длины L , ширины W , и глубины H с крышкой, толщины равной длине горлышек бутылок. В этой крышке сверлят отверстия тем же диаметром, что и отверстия в горлышках. Разделение между каждым сегментом может быть удалено, практически не влияя на работу резонатора.

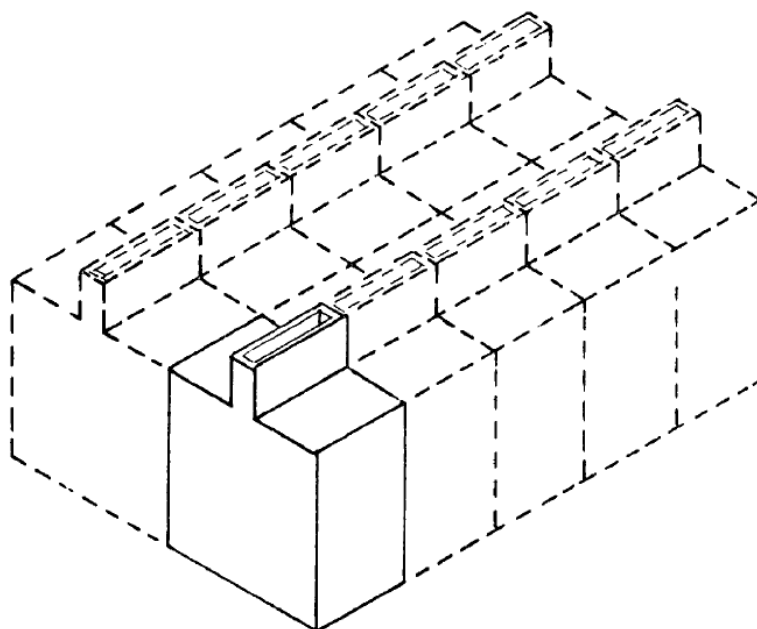


Рис. 12-32 – Устройство щелевых резонаторов Гельмгольца из одиночных резонаторов.

Рис. 12-32 иллюстрирует квадратную бутылку с удлиненным пазом в горловине. Их можно складывать в ряды. Этот проект подобен щелевому резонатору. Разделяющие стенки в воздушной полости могут также быть устранены, не нарушая действие резонатора. Естественно, есть некоторые предостережения – деление воздушного пространства может улучшить действие перфорированной поверхности или щелевых резонаторов, но только потому, что это снижает паразитные, нежелательные моды вибрации, возникающие в пределах полости.

Акустические элементы каменной кладки, такие как Cinderblox и многие его производные, использовались с 1917. Элементы SoundBlox SoundCell, произведенные Proud-foot, дают несущую способность и массу, требуемую для звуковой изоляции, а также увеличение низкочастотного поглощения посредством Резонаторов Гельмгольца, образуемых щелями и полостями в блоках.

Перфорированные Панельные Поглотители

Перфорированные панели, например, из оргалита, фанеры, алюминия, или стали, отставленные на расстояние от стены, образуют резонансный тип поглотителя. Каждое отверстие действует как горловина резонатора Гельмгольца, и скрытая полость позади принадлежит отверстию, подобно полости Резонатора Гельмгольца. Фактически, мы можем рассмотреть эту структуру как набор двойных резонаторов. Если звук прибывает перпендикулярно поверхности перфорированной панели, все крошечные резонаторы находятся в фазе. Для звуковых волн, ударяющих перфорированную панель под углом, поглотительная эффективность несколько снижается. Эта потеря может быть минимизирована секционированием полости позади перфорированной поверхности простенками, подобными корзине для яиц из дерева или пресованной бумаги.

Частота резонанса перфорированных мембранных поглотителей с круговыми отверстиями разделенным воздушным пространством позади, вычисляется приблизительно:

$$f_0 = 200 \sqrt{\frac{p}{(d)(t)}} \quad (12-9)$$

где f_0 – частота резонанса, Гц;

p – процент перфорации, равный площади отверстий, разделенной на площадь панели и умноженной на 100;

t – эффективная длина отверстия, дюймов, равная сумме толщины панели и диаметра отверстия, умноженного на 0,8;

d – глубина воздушного промежутка.

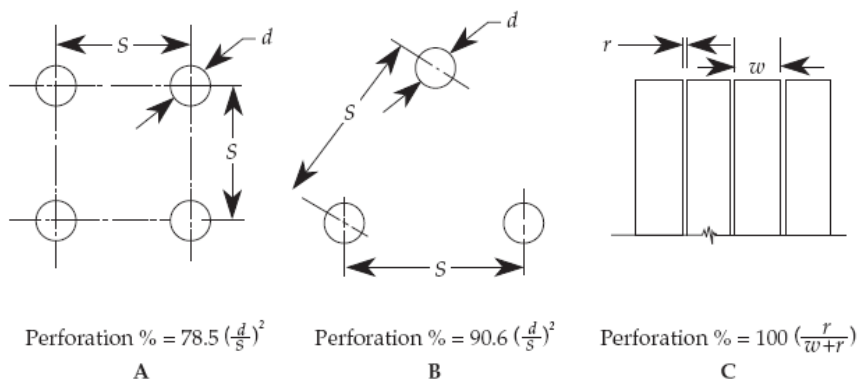


Рис. 12-33 – Формулы для вычисления процента перфорации для перфорированных панельных резонаторов, включая щелевые поглотители. (A) и (B) – процент перфорации для двух типов конфигурации круглых отверстий; (C) – процент перфорации для щелевых поглотителей.

Есть некоторый беспорядок в литературе относительно p , процента перфорации. Некоторые авторы используют десятичное отношение площади отверстия к групповой области, а не процент от области отверстия к групповой области, вводя коэффициент погрешности, равный 100. Этот процент перфорации легко вычисляется

по Рис. 12-33. Процент перфорации для двух типов конфигураций с круговыми отверстиями показан в Рис. 12-33А и В, и процент для щелевых поглотителей (описанный ниже) показан на рис. 12-33С.

Частота резонанса для перфорированных панелей с круговыми отверстиями, определяемая по (12-9), графически представлена на Рис. 12-34 для толщины панели 3/16". Общая перфорированная панель с отверстиями диаметром 3/16", с расстояниями 1" между ними согласно квадратной конфигурации по Рис. 12-33, имеет 2.75 % площади отверстий. Если эта панель отнесена от стены брусом 2×4 (согласно американским стандартам на размеры строительного бруса, размеры 2х4 – 38мм х 89мм – *прим. перев.*) с гвоздями по краю, система будет резонировать приблизительно на 420 Гц, и пиковое поглощение появляется около этой частоты.

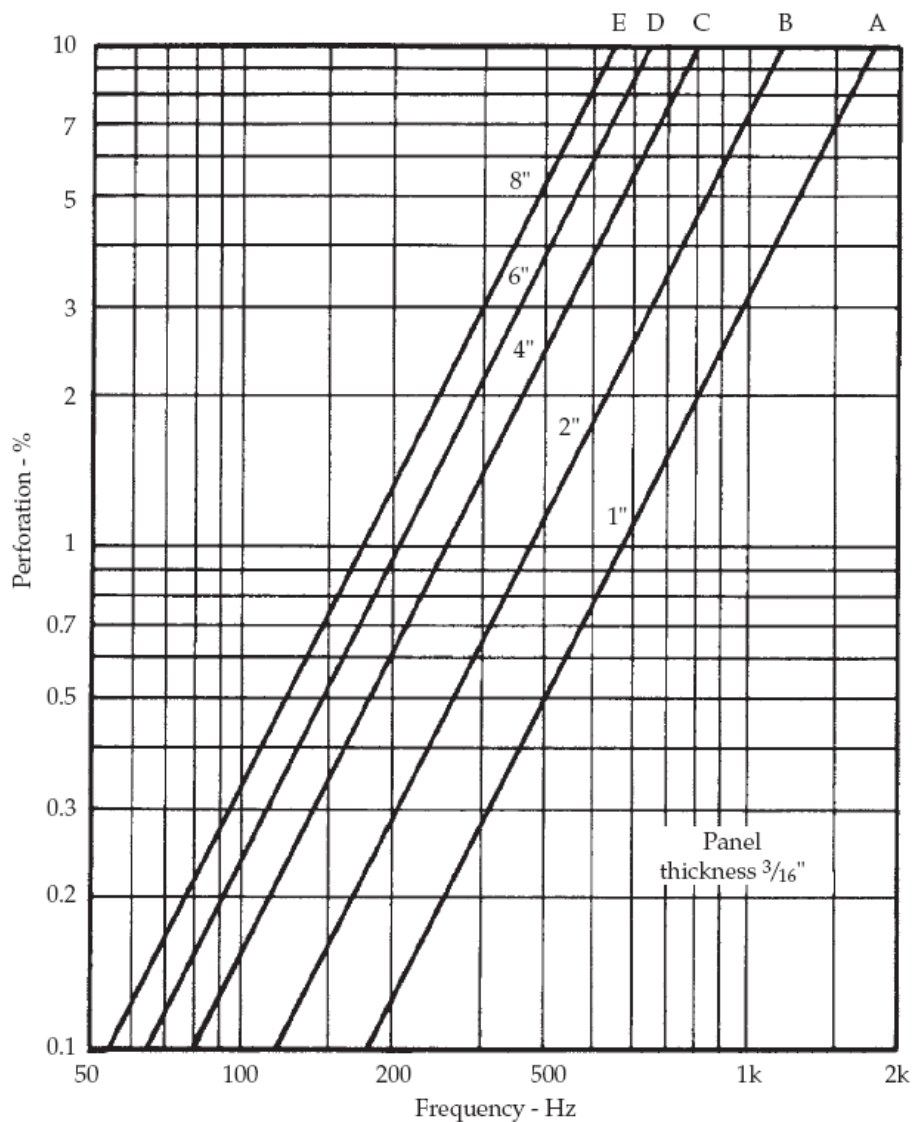


Рис. 12-34 – Графическое представление выражения (12-9) в зависимости от процента перфорации, глубины воздушной прослойки, и частоты резонанса. Линии представлены для панели толщиной 3/16" (см. также рис. 12-22). (A) – 1" брус. Линии нарисованы для обработанного бруса, так что линия для 8" соответствует глубине воздушного промежутка 7 3/4". (B) – для 2" бруса. (C) – для 4" бруса. (D) – для 6" бруса. (E) – для 8" бруса.

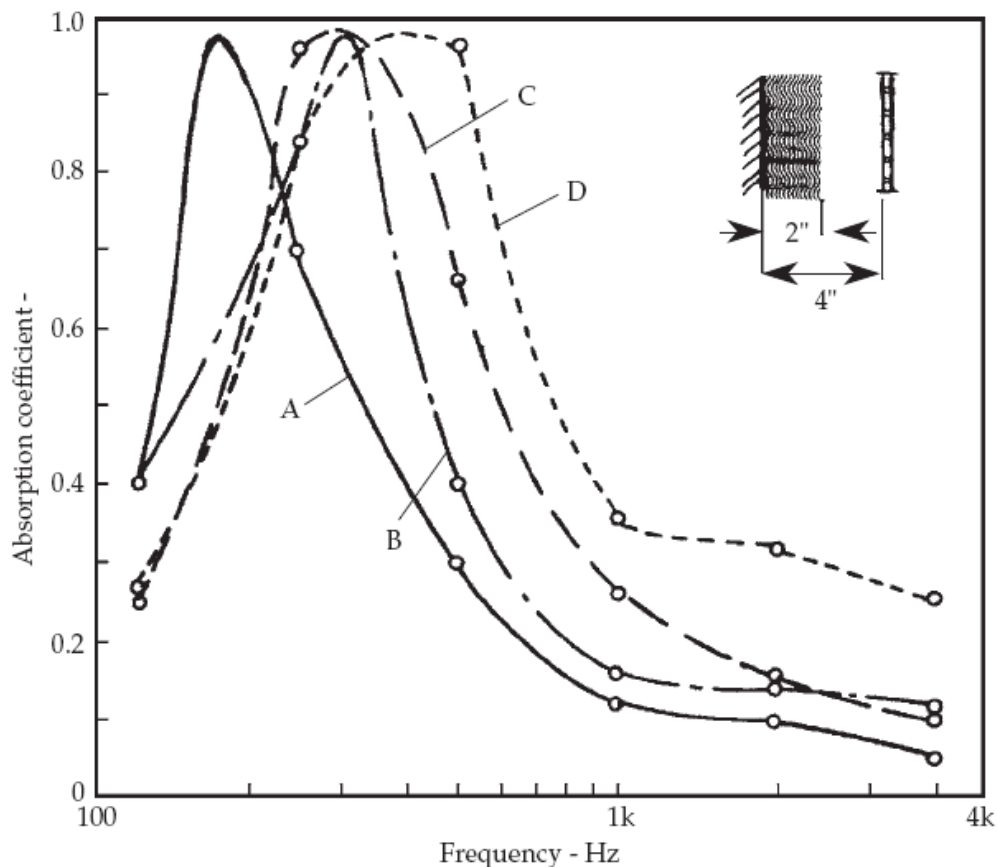


Рис. 12-35 – Измерение поглощения перфорированной панелью с воздушным промежутком 4", наполовину заполненным минватой и толщиной панели 5/32". (A) – Перфорация 0,18%. (B) – 0,79%. (C) – 1,4%. (D) – 8,7%. Присутствие минваты значительно смещает частоту резонанса относительно теоретической по выражению (12-9) и рис. 12-34 (данные от Mankovsky).

В обычно доступных перфорированных материалах, таких как перфорированные панели, отверстия являются настолько многочисленными, что резонансы, которые могут быть получены с практическим воздушным промежутком, будут располагаться на высоких частотах. Чтобы получить низкочастотное поглощение, отверстия можно рассверлить вручную. Сверление отверстий диаметром 7/32" с шагом центров 6" дает процент перфорацию приблизительно 1.0 %. Само собой, с нулевым процентом перфорации, панель ведет себя как цельный мембранный поглотитель.

Рисунок 12-35 показывает влияние площади отверстий в диапазоне от 0,18% до 8,7% при фиксированных остальных размерах. Фанера толщиной 5/32", перфорируется отверстиями диаметром 3/16", за исключением случая 8.7 %, в котором диаметр отверстия порядка 3/4". Перфорированный лист фанеры располагается на 4" от стены, и полость наполовину заполнена стекловолокном, а оставшаяся половина - воздушным пространством.

Рис. 12-36 идентичен Рис. 12-35, за исключением того, что перфорированная фанера располагается на 8" от стены, и стекловолокно, расположенное в пространстве, имеет толщину 4". Эффект этих изменений - существенное расширение диапазона поглощения.

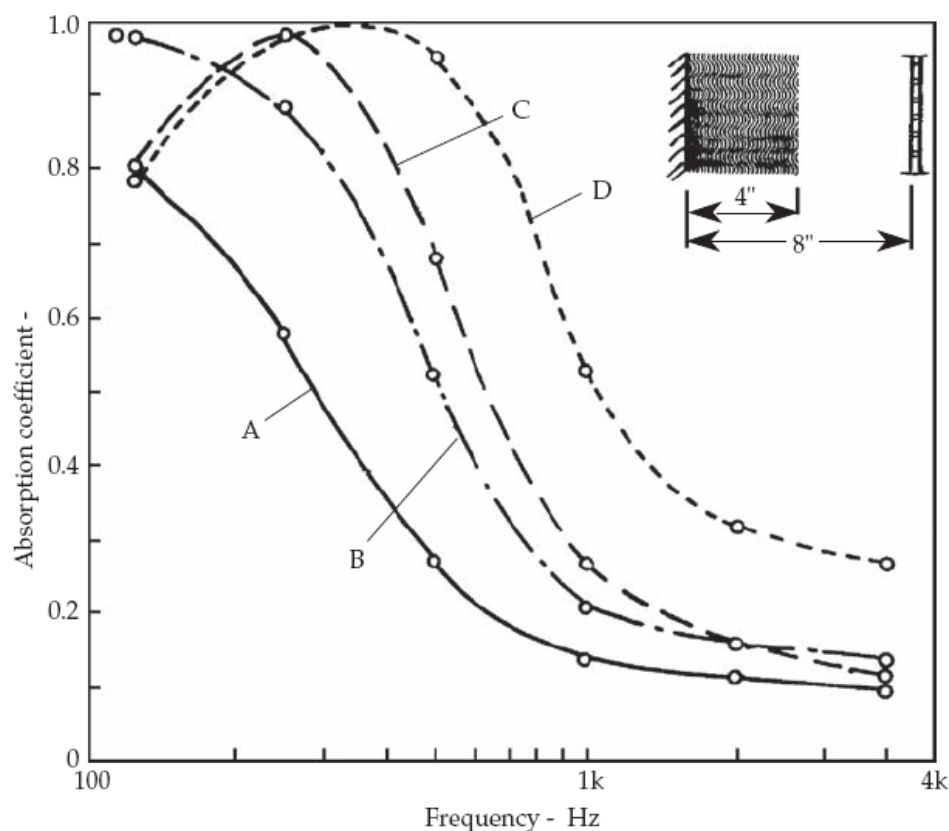


Рис. 12-36 – Измерение поглощения той же перфорированной панели что и на 12-35, за исключением того, что воздушный промежуток увеличен до 8", половина которого заполнена минватой. (A) – Перфорация 0,18%. (B) – 0,79%. (C) – 1,4%. (D) – 8,7%. Присутствие минваты значительно смещает частоту резонанса относительно теоретической по выражению (12-9) и рис. 12-34 (данные от Mankovsky).

Таблица 12-3

Depth of Airspace	Hole Diameter	Panel Thickness	% Perforation	Hole Spacing	Frequency of Resonance
3 ⁵ / ₈	1/ ₈	1/ ₈	0.25%	2.22	110 Hz
			0.50	1.57	157
			0.75	1.28	192
			1.00	1.11	221
			1.25	0.991	248
			1.50	0.905	271
			2.00	0.783	313
			3.00	0.640	384
3 ⁵ / ₈	1/ ₈	1/ ₄	0.25%	2.22	89 Hz
			0.50	1.57	126
			0.75	1.28	154
			1.00	1.11	178

Depth of Airspace	Hole Diameter	Panel Thickness	% Perforation	Hole Spacing	Frequency of Resonance
			1.25	0.991	199
			1.50	0.905	217
			2.00	0.783	251
			3.00	0.640	308
3 ⁵ / ₈	1 ¹ / ₄	1 ¹ / ₄	0.25%	4.43	89 Hz
			0.50	3.13	126
			0.75	2.56	154
			1.00	2.22	178
			1.25	1.98	199
			1.50	1.81	217
			2.00	1.57	251
			3.00	1.28	308
5 ⁵ / ₈	1 ¹ / ₈	1 ¹ / ₈	0.25%	2.22	89 Hz
			0.50	1.57	126
			0.75	1.28	154
			1.00	1.11	178
			1.25	0.991	199
			1.50	0.905	218
			2.00	0.783	251
			3.00	0.640	308
5 ⁵ / ₈	1 ¹ / ₈	1 ¹ / ₄	0.25%	2.22	74 Hz
			0.50	1.57	105
			0.75	1.28	128
			1.00	1.11	148
			1.25	0.991	165
			1.50	0.905	181
			2.00	0.783	209
			3.00	0.640	256
5 ⁵ / ₈	1 ¹ / ₄	1 ¹ / ₄	0.25%	4.43	63 Hz
			0.50	3.13	89
			0.75	2.56	109
			1.00	2.22	126
			1.25	1.98	141
			1.50	1.81	154
			2.00	1.57	178
			3.00	1.28	218

Было бы странно использовать такие перфорированные панельные поглотители без акустического поглощения в виде стекловолоконных панелей в воздушном

промежутке – без поглощения полоса поглощения очень узка. Однако есть применение и таким узко настроенным поглотителям – борьба с определенными проблемными модами комнаты или изолированными группами мод с минимальным влиянием общую акустику помещения. Когда перфорированная панель помещена поверх пористого поглотителя, она добавляет низкочастотное поглощение по сравнению с пористым материалом самим по себе. Однако панель одновременно может ухудшить высокочастотное поглощение пористого материала.

Таблица 12-3 включает расчетную частоту резонанса 48 различных комбинаций глубины воздушного пространства, диаметра отверстия, толщины панели, и шага отверстий. Эта таблица может быть полезна при поиске оптимума.

Щелевые Поглотители

Еще один тип резонансного поглотителя использует близко расположенные планки над воздушной полостью. Масса воздуха в щелях между планками реагирует с упругостью воздуха в полости, формируя резонансную систему, опять же, подобную резонатору Гельмгольца. Стекловолоконная панель, обычно расположенная позади щелей, действует как сопротивление, расширяя пик поглощения. Чем более узки щели и глубже полость, тем ниже частота максимального поглощения. Процент перфорации реечного поглотителя отображен на рис. 12-33С.

Частота резонанса щелевого поглотителя может быть определена как:

$$f_0 = 216 \sqrt{\frac{p}{(d)(D)}} \quad (12-10)$$

где f_0 – частота резонанса, Гц;

p – процент перфорации (см. рис. 12-33С)

D – глубина воздушного промежутка, дюймы;

d – толщина щелей, дюймы;

Размещение Материалов

Размещение звукопоглощающих материалов на отдельных участках, в противоположность сплошному покрытию, эффективно способствует большему поглощению. (Такое размещение поглотителей может также улучшить диффузию). Если используются несколько типов поглотителей, желательно поместить некоторое количество каждого из них на концах, сторонах, и потолке так, чтобы все три осевые моды (продольная, поперечная, и вертикальная) оказывались под их влиянием. В прямоугольных комнатах самым эффективным будет расположение поглощающих материалов возле углов и вдоль краев поверхностей комнаты. В речевых студиях поглотитель, эффективный на более высоких звуковых частотах, должен быть расположен на высоте головы на стенах. Фактически, материал, примененный на низших участках высоких стен, может быть эффективнее практически вдвое, чем как тот же самый материал, помещенный в другом месте. Необработанные поверхности никогда не должны располагаться друг напротив друга.

Время Реверберации Резонаторов Гельмгольца

Существует вероятность, что акустические резонансные устройства, такие, как поглотители Helmholtz, могут "звучать" с "временем реверберации", им свойственным, таким образом, вызывая тембральные изменения в звуковых сигналах. Верно, что у любой резонансной системы, электронной или акустической, есть определенная постоянная времени, связанная с ней. Добротность описывает ширину полосы настройки, как показано на Рис. 12-37. Когда экспериментально получена кривая настройки, ширина кривой в пределах среза на -3 децибелка дает Δf . Q системы тогда $Q = f_0 / \Delta f$ где f_0 - частота, на которую настроена система. Измерения на ряде перфорированных и речных поглотителей Гельмгольца дали значения Q приблизительно 1 или 2, в некоторых случаях до 5. Таблица 12-4 показывает, как величина затухания резонансных поглотителей с несколькими значениями Q коррелирует со временем отражения.

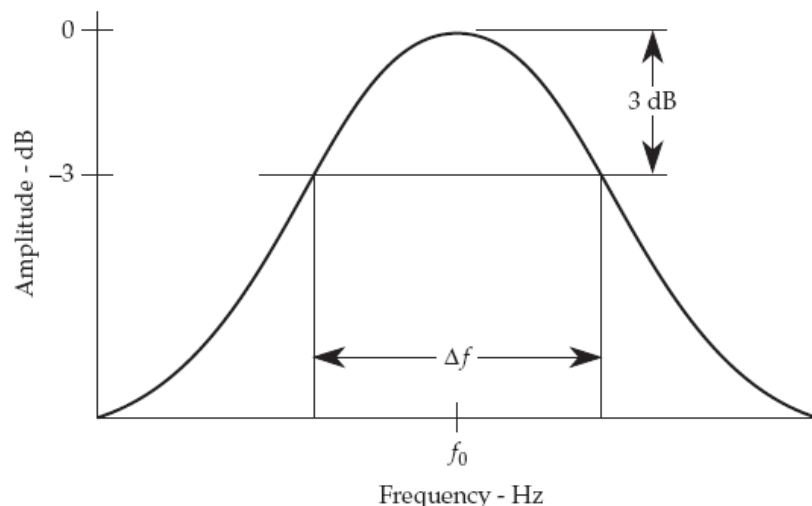


Рис. 12-37 – После того, как кривая резонанса резонатора Гельмгольца определена, её добротность (Q) может быть определена как $f_0 / \Delta f$. «Время звучания» таких резонаторов очень невелико для обычно встречающихся значений Q .

Q	Время звучания, сек
100	2,2
5	0,11
1	0,022

Табл. 12-4. Время звучания резонансных поглотителей

При применении резонансных поглотителей, у которых Q сравним с 100, может возникнуть проблема в комнатах, имеющих время реверберации порядка 0.5 секунд, так как эти поглотители продолжают воспроизводить звук в течение нескольких секунд. Однако поглотители Гельмгольца с такими коэффициентами Q – очень специализированные устройства, сделанные, скажем, из керамики. У поглотителей, сделанных из дерева со стекловолокном для расширения поглотительной кривой, значение Q не велико, таким образом, их звук затухает намного быстрее, чем студия или комната сама.

Подавление Мод Комнаты Поглотителями

Из-за относительно узкой поглотительной полосы резонансных поглотителей, они идеальны в подавлении мод комнаты. Например, используя ETF (энергия, время, частота) анализ, низкочастотная модальная структура комнаты может быть представлена, как показано на Рис. 12-38 и 12-39. Мода, которая могла вызвать слышимое искажение, дает реверберационный хвост на 47 Гц, как отмечено на крайнем левом участке Рис. 12-38. Можно предпринять некоторые действия, чтобы рассеять эту энергию так, чтобы эта мода вела себя как другие моды комнаты.

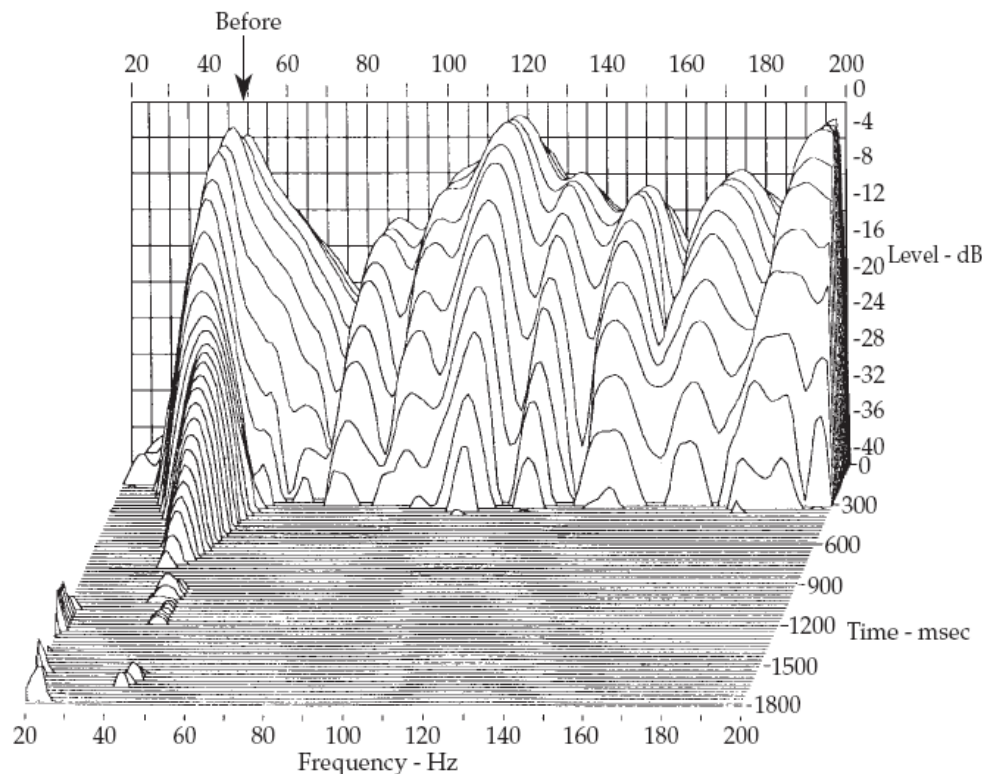


Рис. 12-38 – Низкочастотная модальная структура звукового поля малой комнаты до введения настроенного резонатора Гельмгольца.

Решение - точно настроенный поглотитель, помещенный в комнату в месте высокого давления моды 47 Гц. Точки с высоким давлением моды 47 Гц располагаются согласно возбуждению комнаты синусоидальной волной 47 Гц громкоговорителем и измерением отклика измерителем звукового уровня. Местоположение, которое и удобно и эффективно, возможно, будет располагаться в углу. Иллюстрация 12-39 показывает низкочастотную модальную структуру той же самой комнаты после введения настроенного поглотителя-резонатора Гельмгольца.

Резонатор, показанный на Рис. 12-40, может быть построен из бетонной трубы, распространенной в хозяйственных магазинах. На оба конца трубы помещаются точно подогнанные пробки из многослойного дерева. Длина ПВХ трубы, формирующей вход в эту трубу, может быть различна, в соответствии настройкой резонатора на определенную частоту. Резонатор можно частично заполнить поглотителем.

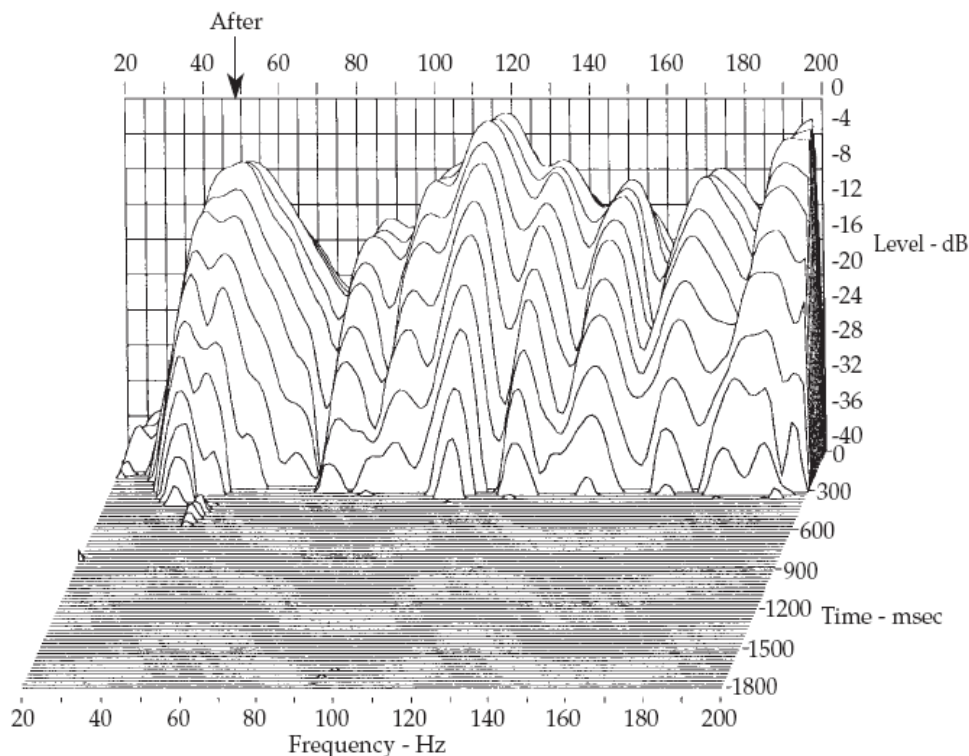


Рис. 12-39 – Низкочастотная модальная структура звукового поля малой комнаты *после* введения настроенного резонатора Гельмгольца.

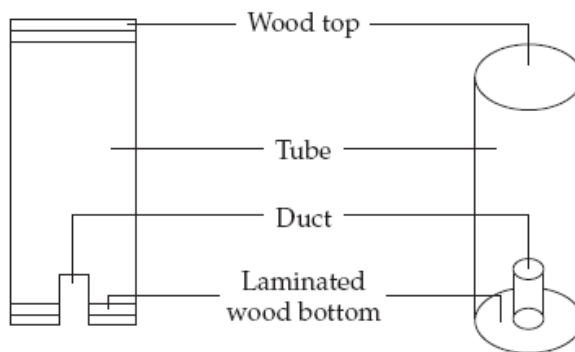


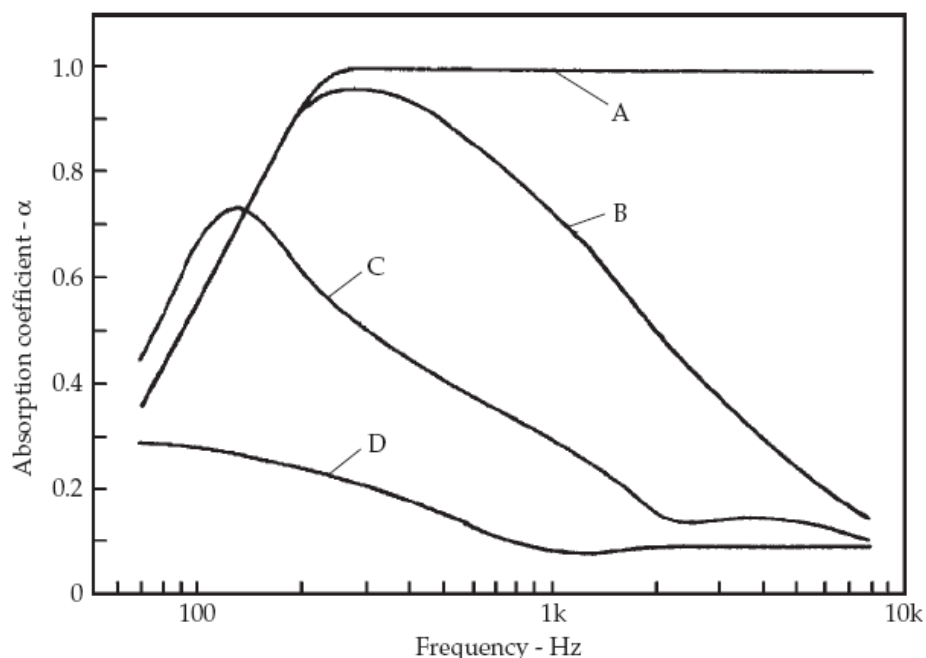
Рис. 12-40 – Элементы конструкции резонатора Гельмгольца

Увеличение Времени реверберации

Резонаторы Гельмгольца с низкой добротностью предрасположены к сокращению времени реверберации с увеличением поглощения. Резонаторы с высоким Q могут увеличить время реверберации посредством хранения энергии как описано у Гилфорда (Gilford). Для достижения необходимых высоких значений Q , в качестве основного материала резонатора фанера, ДСП, оргалит, и другие подобные материалы не подойдут, но подойдут такие, как керамика, гипс и бетон. Увеличение времени реверберации может быть достигнуто надлежащей настройкой резонаторов на целевые частотные диапазоны.

Акустические Модули

Компания Би-Би-Си предложила модульный подход к акустической обработке их малых голосовых студий. Этот подход был применен в нескольких сотнях таких студий с удовлетворительными акустическими результатами. В этом проекте стены покрыты модулями стандартного размера, скажем, 2х3 фута, с максимальной глубиной порядка 8". Они могут быть размещены на стенах, чтобы дать эффект излишка поверхности, как в обычной комнате, или могут быть превращены в коробки с решетчатым покрытием, установленные на стенах в обычные наборы. Все модули могут быть сделаны внешне идентичными, но это подобие - только внешнее.



... модулем, состоящим из ... решеткой из стеклопластика плотностью 9 - 10 lb/ft³ позади перфорированного покрытия. (A) Без перфорированного покрытия вообще, или не менее 25% перфорации. (B) 5 % перфорированное покрытие. (C) 0.5 % перфорированное покрытие. (D) покрытие из 3/4" фанеры, по существу чтобы нейтрализовать модуль. (Данные от Brown)

#

Обычно есть три, или, возможно, четыре различных типа модулей, каждый, с его собственным отличительным акустическим действием. Иллюстрация 12-41 показывает радикально различные характеристики поглощения, получаемые исключительно за счёт смены покрытия стандартного модуля. Для модуля с размерами 2х3 фута, 7" воздушным промежутком и внутренней 1" полужесткой стекловолоконной панелью плотностью 3 lb/ft. Широкополосный поглотитель обладает сильно перфорированным покрытием (25 % или больше процента перфорации) или без покрытия вообще, что приводит к полному поглощению вниз приблизительно до 200 Гц. Еще лучшее низкочастотное поглощение достигается разбивкой воздушного пространства делением на подобие корзины для яиц из

рифленной бумаги, чтобы препятствовать нежелательным резонансным модам. Покрытие толщиной $\frac{1}{4}$ " с 5% перфорации достигает максимума в диапазоне 300...400 Гц. Басовый поглотитель получается покрытием с низкой перфорацией (перфорация на 0.5 %). Если нужны модули, по существу нейтральные, они могут быть покрыты фанерой с толщиной $\frac{3}{8}$ или $\frac{1}{4}$ ", которая дала бы относительно низкочастотное поглощение с пиком приблизительно на 70 Гц. Используя эти три или четыре модуля как стандартные акустические блоки, может быть разработан желаемый для студии эффект подбором числа распределения каждого из основных типов.

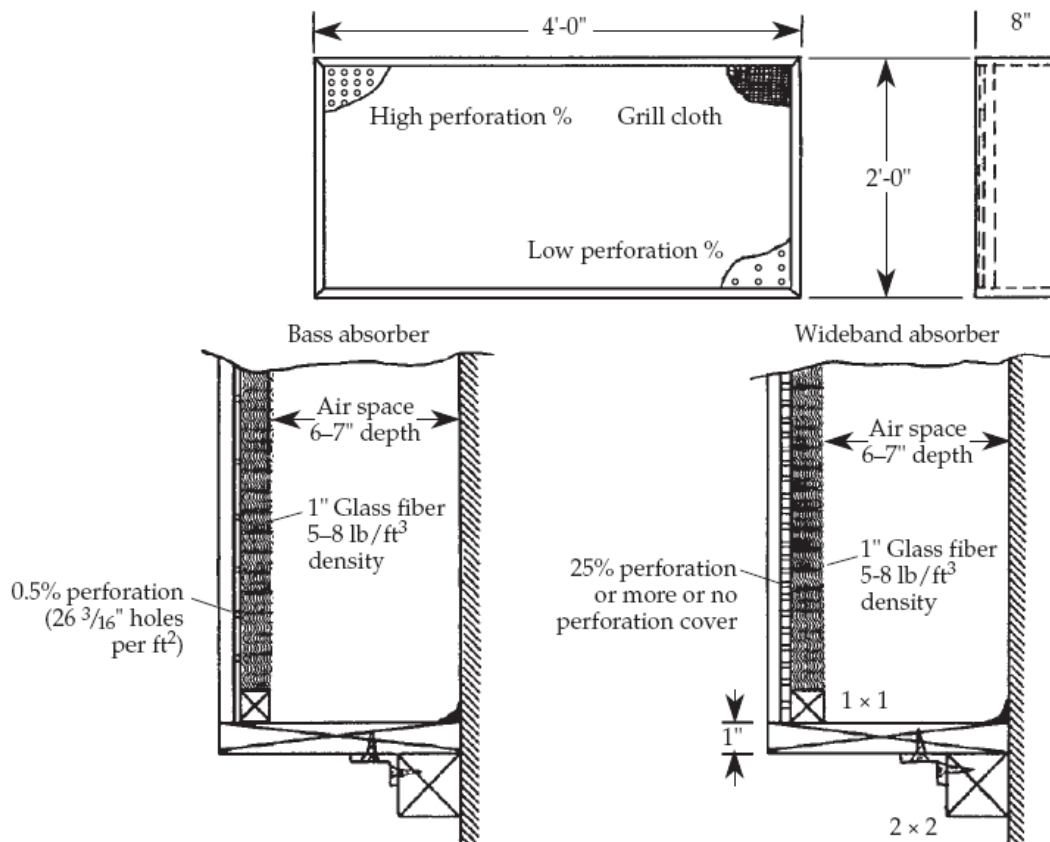


Рис. 12-42 – Модульные поглотители с использованием стены в качестве основания. Слева – басовый поглотитель, Справа – широкополосный.

Иллюстрация 12-42 показывает адаптацию практики Би-би-си. В этом случае, размер модуля составляет 2x4 фута. Модули прикреплены к установочным рейкам 2x2", которые в свою очередь прикреплены к стене. Стена студии 10 футов высотой и 23..24 фута длиной могла бы использовать 20 модулей различных типов – четыре модуля в высоту и пять в длину. Хорошая практика – располагать акустически различные модули напротив друг друга на противоположных стенах. Опыт Би-би-си показал, что продуманное распределение различных типов модулей приводит к адекватной диффузии.