

## КОМНАТА ПРОСЛУШИВАНИЯ

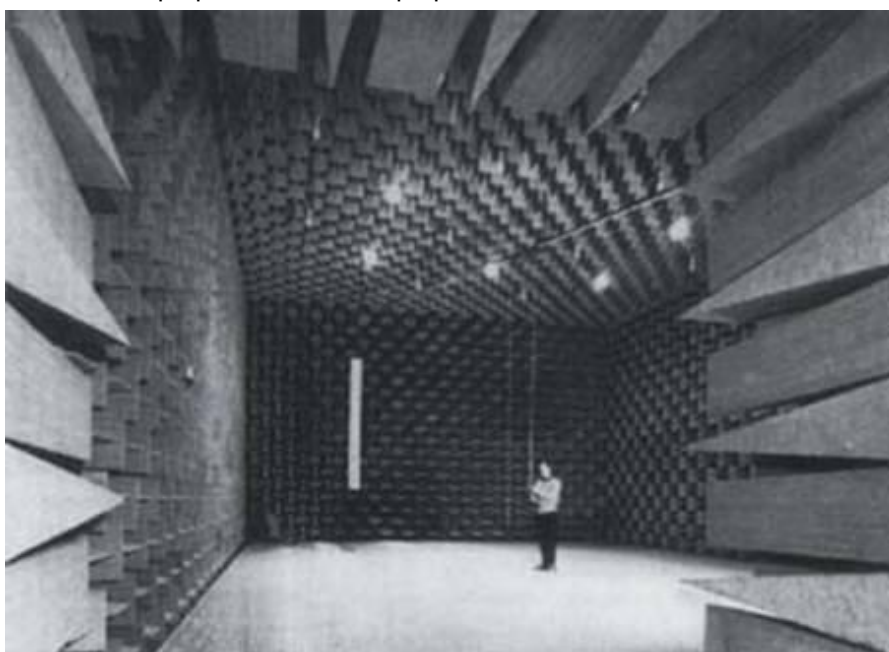
### рекомендации по проектированию

Акустика помещений может рассматриваться как ремесло или как искусство: как ремесло, поскольку для обеспечения хорошей слышимости она требует соблюдения элементарных необходимых условий; как искусство, поскольку при глубоком проникновении в своеобразие речи, музыки и слуха удается достигнуть необыкновенных эффектов.

Е. Скучик. Основы акустики

### Вместо предисловия

Комната прослушивания - звено аудиотракта. Это утверждение ни у кого не вызывает возражений. Сомнения у аудиофилов возникают только тогда, когда я пытаюсь раскрыть им глаза на то, что любая, даже самая лучшая комната прослушивания, изменяет звуки до неузнаваемости и что при помощи микрофона и осциллографа каждый может наблюдать это явление.



Звукозаглушенная камера фирмы Brüel & Kjær

Сомнения эти не случайны. Дело в том, что производители аппаратуры уже давно зомбировали многих любителей аудио, внушая им стремление к осциллографически точной передаче звуков. Но тогда неясно, почему притом, что аудиокомпоненты буквально соревнуются в такой точности, аналогичные требования не предъявляются к комнатам прослушивания? Более того, сложилась парадоксальная ситуация:

громкоговоритель, который предназначен для работы в жилой комнате и по существу должен составлять с ней единое целое, производители контролируют почему-то в безэховой, так называемой *звукозаглушенной*, камере.

Зачем они это делают? Ведь даже неспециалистам хорошо известно, что в комнате громкоговоритель ведет себя совсем иначе, чем в камере.

Объясняется это достаточно просто. Чисто инженерный подход довел разумный на первый взгляд критерий оценки качества звукопередачи до полного абсурда.

Мне не раз приходилось слышать от некоторых аудиофилов, что они мечтают слушать музыку в звукозаглушенной камере - только вот средств на ее строительство пока не хватает, и что комната прослушивания для них - лишь временный компромисс. Думаю, эти некоторые слегка кривят душой. Ведь если бы идеологи high end захотели, то давно вынудили бы энтузиастов осциллографически точного звуковоспроизведения раскошелиться, в том числе и на строительство домашних камер. Вспомните, как одной апрельской статьи (см. "АМ" № 2 (7) 96, с. 58-59) оказалось достаточно, чтобы сподвигнуть многих на возведение пирамид. А ведь оно, как известно из истории Египта, стоит немалых денег.

Оказывается, о строительстве домашних камер идеологи high end не заикаются сознательно, и тому есть объективная причина. Мало кому известно, что весьма авторитетные фирмы уже давно занимаются проведением секретных опытов по прослушиванию аудиосистем в самых невообразимых условиях, в том числе и в заглушенных камерах. Ими уже более полувека назад

было установлено, что звучание громкоговорителей в условиях полного отсутствия эха *омерзительно*.

Получается, что звучание аудиоаппаратуры способно доставлять нам удовольствие, только если в помещении прослушивания есть ощутимая *реверберация*. Но тут же возникает следующий вопрос: зачем нужна реверберация в тракте воспроизведения, если она уже имеется в записи?

Объяснение может быть только одно: многозвенный тракт записи-воспроизведения при прохождении через него музыкального сигнала производит большое количество *музыкального мусора*, очищение от которого возможно только путем рандомизации фаз этого сигнала, причем именно в конце его пути.

И снова я вынужден вернуться к возрожденному на границе тысячелетий способу исцеления музыки с помощью правильной рандомизации фаз. К счастью, все его особенности, изложенные мной в "АМ" № 5 (34) 2000, с. 145-150, остаются в силе применительно и к комнатам прослушивания. Правда, есть всего одно уточнение. Время стандартной реверберации  $T_{60}$  в комнате прослушивания должно быть не секунда, как я писал раньше, а вдвое меньше. Это отклонение от оптимума - вынужденное, и потребовалось оно для того, чтобы избежать одинаковости последовательно введенных в тракт записи-воспроизведения рандомизаций. Об опасности последовательного включения рандомизаторов, тем более с близкими параметрами, я предупреждал читателей (см. "АМ" № 4 (33) 2000, с. 159). Интересно, что задолго до этого в международных стандартах IEC, ISO, а также в рекомендациях AES для комнат прослушивания уже было предписано правильное время  $T_{60} = 0,45 \pm 0,15$  с. [1]. Удивительным является то, что установлено оно было без каких-либо теоретических обоснований. Наверное, кто-то до меня успел на эту тему пообщаться с космосом.

Итак, прочитав упомянутую статью, вы должны ясно представлять себе, к каким акустическим параметрам и характеристикам комнаты прослушивания нужно стремиться. Непривычным может показаться только то, что многочисленные требования к правильной рандомизации в архитектурной акустике обеспечиваются скромным набором средств. Пока я лишь перечислю те факторы, которые могут на нее влиять: *объем помещения, соотношение его размеров, количество и характеристики звукопоглощающих элементов, их размещение, а также местоположение громкоговорителей*.

Не считите скромность этого джентльменского набора показателем того, что рассматриваемая область науки доступна для понимания каждого. Архитектурная акустика, так же как игра в крикет, изначально была интеллигентским развлечением, а точнее игрой ума для английских и немецких

<sup>[1]</sup> аристократов, и уж совсем не ремеслом. Доктора же отечественных наук, активно выступающие в аудиопрессе за громкоговориение, ни черта не смыслят в архитектурной акустике, прежде всего потому, что воспринимают свою деятельность как ремесло. Именно в этом сказывается их пролетарское происхождение.

Как же быть любителям хорошего звучания в условиях явной нехватки гуру в области акустики? К тому же и учебников по этой дисциплине не найти. Остается только один путь - самостоятельно претворять в жизнь предлагаемые мной рекомендации, ну а для этого придется начать с "акустических гамм", точнее познакомиться с основами архитектурной акустики в адаптированном для аудиофилов и меломанов изложении.

### Из основ архитектурной акустики

Теория акустики помещений включает два комплементарных подхода: геометрический и реверберационный.

#### Геометрическая акустика

Геометрическая акустика использует наглядные методы геометрической оптики, поскольку в этих областях действуют аналогичные правила. Например, часть энергии звуковой волны, достигшей твердой поверхности, этой поверхностью поглощается (или проходит сквозь нее), а часть отражается ею, причем **угол падения равен углу отражения**. Правда, есть и некоторые отличия в поведении световых и звуковых волн.

Во-первых, звуковая волна намного длиннее световой, и потому мы должны быть всегда начеку, помня, что звук легко огибает препятствия, меньшие, чем длина его волны. Это явление называется звуковой *дифракцией*. С оптической дифракцией в повседневной жизни мы сталкиваемся значительно реже.

Во-вторых, из-за большой длины звуковой волны нам часто приходится учитывать и ее фазу. В связи с этим предлагаю запомнить правило: при отражении звука от твердой поверхности фаза давления в звуковой волне не изменяется, тогда, как фаза колебательной скорости инвертируется.

При отражении звука от более *мягкой*, чем воздух, *среды* [2] фаза волны звукового давления меняется на противоположную, в то время как фаза колебательной скорости остается прежней. Отсюда следует, что рядом с совершенно твердой отражающей поверхностью звуковое давление волны удваивается, а колебательная скорость оказывается равной нулю. На границе с идеально мягкой средой все происходит наоборот: удваивается колебательная скорость, а равным нулю становится звуковое давление.

В-третьих, в помещении может находиться один или несколько источников звука, например радиоточка, стереосистема или состоящий из нескольких громкоговорителей комплекс, например surround.

Излучение каждого отдельного источника звука, расположенного, как это обычно бывает, на некотором расстоянии от стен, пола и потолка, отражается от них так же, как свет фонаря в зеркалах. Образованные таким образом копии реального источника называют *мнимыми источниками*. Хотя мнимые источники физически не существуют, в акустике они ведут себя как настоящие и даже взаимодействуют между собой и с реальными источниками. В результате этого взаимодействия излучаемая реальным источником акустическая мощность и ее зависимость от частоты заметно отличаются от той, которая имеет место в звукозаглушенной камере.

Чтобы понять, как это происходит, рассмотрим случай взаимодействия двух находящихся на некотором расстоянии друг от друга *источников звука нулевого порядка* [3].

Известно, что мощность, излучаемая каждым таким источником, равна половине произведения его *объемной колебательной скорости* [4] и компоненты звукового давления, синфазной с этой скоростью. Если источники работают синфазно и находятся друг от

друга на расстоянии меньшем, чем  $1/4$  длины волны звука, то диафрагме каждого из них кроме собственного звукового давления приходится преодолевать такое же давление другого источника. Поскольку у низкоэффективных громкоговорителей объемная колебательная скорость практически не зависит от акустической нагрузки диафрагмы (из-за ее большой массы), удвоение звукового давления приведет к увеличению излучаемой каждым громкоговорителем мощности вдвое.

Если же источники звука работают в противофазе, то при совпадении прочих условий излучаемая каждым из них мощность не будет увеличиваться, а наоборот, из-за компенсации звукового давления устремится к нулю. Этот случай известен как *акустическое короткое замыкание*.

Все сказанное верно, пока длина волны звука заметно превышает расстояние между источниками. При сопоставимом с длиной волны расстоянии излучаемая мощность определяется через *коэффициент излучения двух источников* [2], который можно найти по формуле:

$$K_2 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sin kd}{kd} \right), \quad (1)$$

где  $d$  - расстояние между источниками, м;  $k$  - волновое число ( $k = c/w$ ).

Здесь и далее:  $c$  - скорость звука в воздухе ( $c = 334$  м/с), а  $w$  - круговая частота звука, рад/с.

Из формулы следует, что на низких частотах (при  $cd/w > 1$ ) коэффициент излучения стремится к единице. Это значит, что мощность, излучаемая двумя синфазными источниками, в 4 раза больше, чем излучаемая одним. На более высоких частотах (при  $cd/w < 1$ ), когда коэффициент излучения становится равным 0,5, излучаемая источниками мощность не увеличивается, то есть остается равной сумме мощностей источников. График зависимости коэффициента излучения от расстояния между источниками приведен на рис. 1.

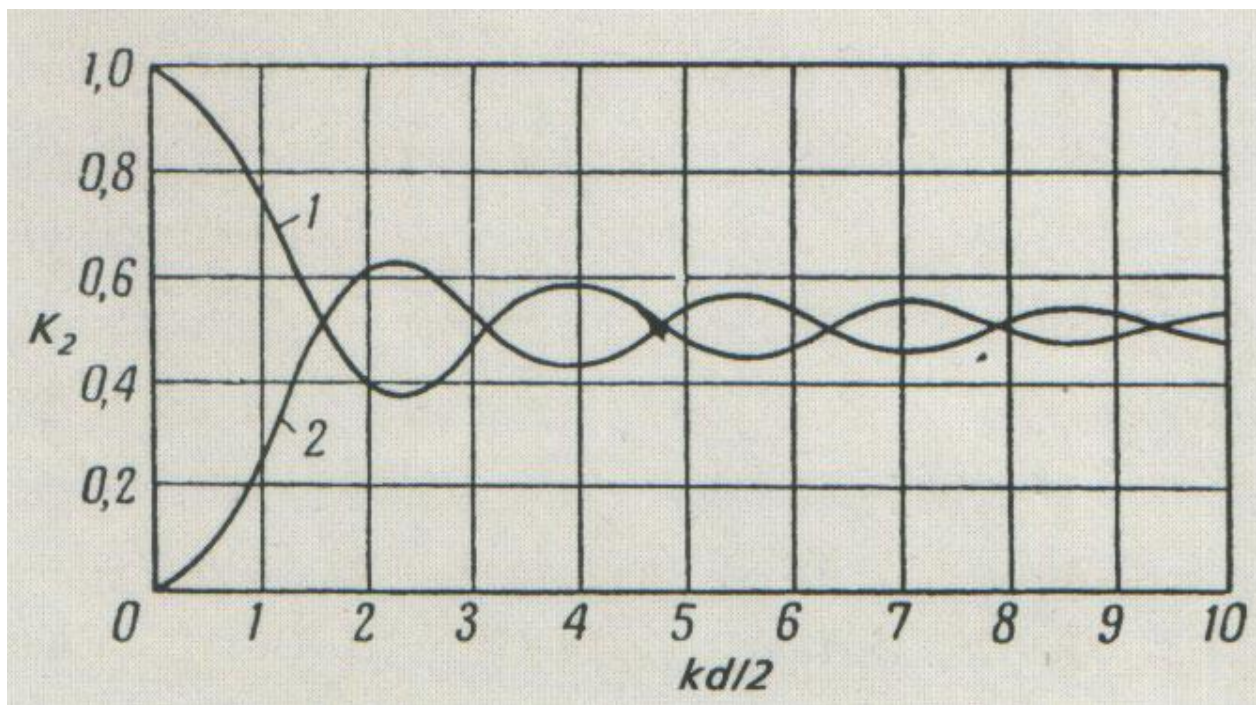


Рис. 1. Коэффициент излучения двух источников: 1- с одинаковой фазой, 2 – в противофазе.

Точно так же ведут себя мнимые источники звука по отношению к реальным. Их роль в эффективности излучения громкоговорителей будет подробно рассмотрена в рекомендациях по проектированию комнаты прослушивания.

Как вы уже убедились и убедитесь еще не раз, геометрическая акустика не может обойтись без волновой теории. Почти свободным от волновых загогулин является вопрос о фокусировании и рассеивании звука.

Если стена или потолок помещения не являются плоскими, то есть имеют искривления по размеру большие, чем длина звуковой волны, то вогнутости *фокусируют* звуки, образно говоря - действуют аналогично параболическому зеркалу фонарика. Выпуклые же поверхности *рассеивают* звук. Эти простые в житейском восприятии эффекты часто используют для достижения хорошей *диффузности* - важнейшего параметра звукового поля в помещении, но об этом речь пойдет ниже. Другие эффекты кривых зеркал, хорошо известные в оптике, в архитектурной акустике пока не применяют.

Еще раз напомним, что все материалы одновременно и отражают, и поглощают звук. Даже поверхности, которые признаны идеальными отражателями (например, мрамор, бетон, кафель, кирпич и т. п.), поглощают от 1 до 3% достигающей их звуковой энергии. В хорошем с акустической точки зрения помещении процент поглощаемой стенами энергии, естественно, гораздо выше, но, что для нас важно, - он должен быть строго дозирован. Неслучайно, к поглощающей способности материалов проявляли интерес с незапамятных времен. Между прочим, вопрос, чем покрывать стены помещений, в средние века был окружен алхимическими тайнами и поверьями. Одно из таких поверий, пока еще не подтвержденное акустикой, дошло до наших дней благодаря аудиофилам. Я имею в виду сказку о том, что лучшим поглотителем звука являются ячеистые картонные клетки для яиц.

Некоторая ясность в вопросах звукопоглощения наступила, когда появились точные методы определения количества звуковой энергии, достигшей поверхности и ею поглощенной [3]. С этого времени способность материалов и конструкций к поглощению стали выражать количественно через *коэффициент звукопоглощения*  $a_k$ . Этот коэффициент представляет собой безразмерную величину, равную отношению энергии, поглощенной поверхностью, к падающей на нее. Для удобства расчета времени реверберации  $a_k$  определяют у образцов материала площадью  $1 \text{ м}^2$ . В этой связи поглощающую способность материалов оценивают *эквивалентной площадью 100-процентного звукопоглощения*, которая для используемого в качестве покрытия материала численно равна коэффициенту  $a_k$ , умноженному на площадь покрытия, выраженную в квадратных метрах. Эталон  $1 \text{ м}^2$  100-процентного звукопоглощения принято считать открытое окно с площадью  $1 \text{ м}^2$ .

Коэффициент поглощения у всех материалов разный, к тому же он сильно и часто непредсказуемо зависит от частоты. Из-за этого выбор поглощающих конструкций оказывается непростым делом даже для профессионалов. Существует три типа поглощающих материалов и специальных поглощающих конструкций, применяемых в различных комбинациях для достижения в помещении нужного эффекта. К ним относят *пористые материалы, резонансные панели и полые резонансные поглотители*.

### Пористые материалы

Я имею в виду пористые материалы с так называемым твердым скелетом. В них вещество заполняет небольшую часть общего объема и при воздействии звука остается неподвижным. Основной объем составляют многочисленные поры, каналы и полости, которые открыты наружу и сообщаются между собой. Такими материалами являются войлок, хлопчатобумажная и стекловолоконная вата, ковры, акустическая штукатурка и т. п.

Теория поглощения звука пористыми материалами была разработана впервые более 100 лет назад лордом Рэлеем. Она построена на допущении, что в пористых материалах существуют силы вязкости, препятствующие протеканию воздуха через поры, за счет чего твердый скелет отбирает часть кинетической энергии колеблющихся частиц воздуха, превращая ее в тепло. Согласно этой теории, поглощающие свойства пористых материалов зависят от вязкости и плотности воздуха, радиуса и количества пор на единицу поверхности, а при использовании материала в качестве покрытия твердой стены - от толщины слоя, точнее от расстояния между ним и твердой стеной. Чем меньше радиус пор и чем их больше, тем лучше поглощаются высокие частоты.

Поглотитель этого типа эффективен только на тех звуковых частотах, на которых колеблющиеся в звуковой волне частицы воздуха пронизывают пористый материал. Напомню, что непосредственно у твердой стены колебательная скорость частиц воздуха равна нулю, а значит, в этом месте любой пористый поглотитель будет неэффективен. Именно поэтому толщину поглотителя рассматриваемого типа (или расстояние между ним и стеной) выбирают равной как минимум четверти длины волны поглощаемого звука.

Рассчитать коэффициенты поглощения реальных пористых материалов до сих пор никому не удалось, однако большинство из них с достаточной точностью определены экспериментально [4]. В таблице 1 приведены  $\alpha_k$  наиболее часто используемых в архитектурной акустике материалов.

**Таблица 1**

Коэффициенты звукопоглощения различных материалов в диффузном звуковом поле						
Величина коэффициента звукопоглощения $\alpha_k$						
Материал	Частота в Гц					
	128	256	512	1024	2048	
Кирпичная стена неокрашенная	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	
Пол бетонный	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	
Пол деревянный	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	
Пол, покрытый линолеумом	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	
Стекло в рамах	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	
Мрамор или плитка	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	
Штукатурка по обрешетке	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	
Деревянные панели	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	
Занавеси легкие	0,04	0,08	0,11	0,25	0,3	
Занавеси тяжелые	0,10	0,27	0,50	0,80	0,82	
Вентиляционная решетка	0,50	0,50	0,40	0,35	0,30	
Волосяной войлок толщиной 25 мм	0,12	0,32	0,51	0,62	0,60	
Ковер на подкладке	0,10	-	0,25	-	0,40	
Ковер без подкладки	0,08	-	0,15	-	0,25	
Щиты Бекеши (холст на вате толщиной 40 мм)	0,8	0,81	0,73	0,51	0,46	
Живопись масляными красками	-	-	0,28	-	-	

### Резонансные панели

Поглотитель этого типа представляет собой упругий лист с внутренним затуханием. Его изготавливают из фанеры, цельного дерева или из других сходных по физическим свойствам материалов. По краям лист должен быть закреплен на небольшом расстоянии от твердой стены. При воздействии звуковой волны в листе возникают изгибные колебания, которые частично

переизлучаются, а частично, из-за внутреннего трения в материале листа, превращаются в тепло. Если промежуток между листом и стеной заполнен пористым поглотителем, то потери звуковой энергии возникают и в этом материале.

Объем воздуха между листом и стеной в первом приближении предопределяет изгибную упругость листа, которая вместе с его массой образует механический резонанс.

Наибольшие потери у рассматриваемого поглотителя наблюдаются именно в окрестностях частоты этого резонанса.

Панель резонирует на круговой частоте:

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{\rho}{md}}, \quad (2)$$

где  $m$  - масса листа на единицу площади, кг/м<sup>2</sup>;

$\rho$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$d$  — расстояние между листом и стеной, м.

Так как масса листа обычно велика, а упругость низка, панель резонирует и, следовательно, поглощает звук на более низких частотах, чем пористые поглотители.

Точного, пригодного для практических целей расчета резонансных панелей не существует, однако есть простые способы их настройки, аналогичные настройке барабана или литавр. О том, что и в этом случае без точных расчетов можно обойтись, свидетельствуют отделанные деревянными панелями, прекрасные в акустическом отношении старинные залы, которые, как известно, проектировались во времена, когда производить акустические расчеты еще не умели.

### Полые резонансные поглотители

Для поглощения звука часто используют металлические или гипсовые щиты с перфорацией; такие панели устанавливают на определенном расстоянии от стены, причем

объем между панелью и стеной частично заполняют пористым поглощающим материалом.

Принцип действия этого поглотителя можно понять, если представить себе, что объем за панелью разделен перегородками на равные по объему небольшие ячейки таким образом, чтобы каждое отверстие сообщалось со своей ячейкой. Каждую такую ячейку можно рассматривать как резонатор Гельмгольца с круговой частотой резонанса:

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{s}{l^*v}}, \quad (3)$$

и добротностью

$$Q = \frac{\lambda_0 l^*}{s}, \quad (4)$$

где  $\lambda_0$  - длина волны звука в воздухе на частоте резонанса, м;  $s$  — площадь отверстия, м<sup>2</sup>;  $v$  - объем одного резонатора, м<sup>3</sup>;  $l^*$  - сумма длины канала отверстия  $l$  и так называемой концевой добавки  $\Delta l = \pi R / 2$  (здесь  $R$  - радиус отверстия), м. Концевая добавка учитывает возникающую на выходе отверстия в полупространство соколеблющуюся массу воздуха.

Резонатор Гельмгольца поглощает звуковую энергию на частотах в окрестностях резонанса, причем эквивалентная площадь 100-процентного поглощения у него существенно больше, чем реальная площадь отверстия. Вспомним, что в старину в стены вмуровывали пустые горшки открытыми горлышками наружу и даже при их небольшом количестве достигался поразительный акустический эффект.

При попадании звуковой волны на панель, состоящую из множества таких резонаторов, каждая воображаемая перегородка с противоположных сторон будет испытывать синфазно меняющееся равное давление воздуха. Иначе говоря, к каждой перегородке будут приложены равные встречные силы. Именно из-за того, что они уравновешиваются, нам неважно, есть там перегородка или ее нет.

Полые резонансные поглотители часто используются в студиях звукозаписи, особенно в случаях, когда требуется акустическая коррекция помещения в области средних или низких частот. Достоинством поглотителей этого типа является высокая эффективность и то, что их легко рассчитать. Привожу схему подобного расчета - быть может, она пригодится аудиофилам-самоделыцам.

## Исходные данные для расчета панели площадью $1 \text{ м}^2$ с полыми резонаторами:

$W$  - ширина полосы звукопоглощения, в октавах;

$a_{\text{ок}}$  - требуемый коэффициент поглощения в заданной полосе.

### Расчетные соотношения

1. Акустическая проводимость отверстия:

$$G = \frac{S}{l^*} = \frac{S}{\left(l + \frac{\pi R}{2}\right)}, \quad (5)$$

2. Суммарный диаметр отверстий:

$$nG = \frac{2\pi}{\lambda_0(1 + \alpha^*)}, \quad (6)$$

где  $n$  - число ячеек на резонансной панели площадью  $1 \text{ м}^2$ ;  $\alpha^*$  - отношение активной составляющей акустического сопротивления резонатора к волновому сопротивлению воздушной среды -  $\rho c$ .

Для  $a_{\text{ок}}$  заданного в пределах одной октавы, находим  $\alpha^*$  из соотношения:

$$a_{\text{ок}} = \frac{4\alpha^*}{(1 + \alpha^*)^2}.$$

Для другой заданной ширины полосы поглощения  $W$  находим  $\alpha^*$  из соотношения:

$$W = \frac{nG\lambda_0(1 + \alpha^*)^2}{2\pi}.$$

3. Полный объем всех резонаторов панели рассчитываем по формуле:

$$nV = \frac{nG\lambda_0^2}{4\pi^2}, \quad (7)$$

где  $V$  - объем одной резонансной ячейки,  $\text{м}^3$ .

Так как мы рассчитывали панель площадью  $1 \text{ м}^2$ , суммарный объем резонаторов численно равен расстоянию от панели до стены.

## Резонансы в помещении

После того как мы обстоятельно познакомились с явлениями отражения и поглощения звука, приступим к десерту: рассмотрим явление акустического резонанса, по-прежнему оставаясь в рамках геометрической акустики, правда, опять же добавив к ней некоторое количество волновой теории.

Для начала возьмем простой случай: в уже известную читателю закрытую с обеих сторон трубу поместим у одной из крышек пистолет и микрофон. Нетрудно догадаться, что пистолет мы собираемся использовать как источник короткого импульса звукового давления практически идеальной формы. Звуковой импульс в трубе не будет стоять на месте. Он начнет двигаться со скоростью звука сначала к одной стенке, затем, отразившись от нее, направится к противоположной, пока не отразится от нее и т. д. Если бы крышки, которыми закрыта труба, не поглощали звук, бегающий туда и обратно импульс сохранялся бы в ней бесконечно долго и мы получили бы совершенное звукозаписывающее устройство. Однако идеально отражающих поверхностей в природе не существует, поэтому с каждым отражением звуковой импульс будет терять часть своей энергии, а значит, в конце концов она вся превратится в тепло. Микрофон же бесстрастно зафиксирует затухающие по экспоненте звуковые импульсы, следующие с интервалом, равным отношению удвоенной длины трубы к скорости звука.

Наблюдая за этим процессом, нетрудно догадаться, что закрытая с двух сторон труба - это простенький одномерный ревербератор. Действительно, за исключением некоторых деталей (о которых речь пойдет ниже), труба мало изменяет амплитудный спектр звукового импульса, однако разрушает его фазовую структуру. Правда, о рандомизации фаз говорить пока еще рано, так как

[5]

измененное трубой соотношение фаз сигнала остается неслучайным.

Попробуем заменить пистолет на источник синусоидальных волн. Теперь вдоль трубы, естественно, со скоростью звука, туда и обратно будет бегать синусоидальная волна. Изменяя частоту генератора, мы заметим, что амплитуда звука, фиксируемая с помощью микрофона, то нарастает, то падает почти до нуля. То есть труба демонстрирует АЧХ, по виду напоминающую гребенку, причем каждый ее зубец представляет собой *акустический резонанс*, который возникает при совпадении фаз звуковой давления волны, многократно отраженной одной и той же стенкой. Это может происходить в том случае, когда между отражающими крышками укладывается целое число половинок длины волны. И еще одна любопытная деталь: на частоте акустического резонанса звуковая волна как бы перестает бегать по трубе и "останавливается" в

ней. Остановившаяся волна получила название *стоячей* [6].

Зубцов в рассматриваемой мной гребенке получается неисчислимо много, причем в сторону высоких частот их последовательность устремляется беспредельно. Но это для нас не главное. Важной для последующих расчетов является частота самого нижнего зубца. На ней между отражающими стенками трубы укладывается только одна половинка длины звуковой волны.

Если кратность длины трубы половинкам волны не соблюдается, между отраженными волнами возникает разброд, который проявляется как минимум напряжения на выходе микрофона.

Прямоугольное помещение с физической точки зрения ведет себя точно так же, как закрытая с двух сторон крышками труба. Разница лишь в том, что в трубе всего одно (аксиальное) направление распространения звуковых волн, тогда как в прямоугольном помещении их

неисчислимо количество, причем во многих из них возникают акустические резонансы [7]. Волны, создающие резонансы, разделяют на три категории и семь классов.

К первой категории относят так называемые *осевые (аксиальные)* волны. Их подразделяют на три класса: *продольные, поперечные и вертикальные*. Звуковые волны каждого из этих классов распространяются, отражаясь только от двух противоположных стен (или от потолка и пола). Ко второй категории относят так называемые *касательные (тангенциальные)* волны, которые распространяются, последовательно отражаясь от четырех стен, как шар от бортов бильярдного стола. Выделяют три класса касательных волн. К первому относятся волны, распространяющиеся между четырьмя боковыми стенами, к двум другим - волны, курсирующие между противоположными боковыми стенами, потолком и полом.

И последняя категория - так называемые *косые* волны, ухитряющиеся отразиться последовательно от всех шести ограждающих поверхностей.

Чтобы представить себе, какие на самом деле несметные полчища резонансов разных категорий мы имеем в обычной комнате, приведу численный пример для прямоугольного помещения с размерами  $6,6 \times 4,5 \times 3,3$  м и, соответственно, объемом  $100 \text{ м}^3$ .

На частотах ниже 200 Гц мы имеем 16 осевых, 64 касательных и 64 косых.

На частотах в диапазоне от 1000 до 1200 Гц (то есть в той же полосе) их оказывается намного больше: 16 осевых, 750 касательных и 6550 косых.

В этих примерах просматривается важная закономерность: **количество резонансов помещения, приходящихся на одну и ту же полосу, с понижением частоты существенно уменьшается.** Плохо это или хорошо?

Для аудиофила, поднаторевшего в технике, чем больше резонансов в его аудиосистеме, тем хуже; для лордов, занимающихся акустикой в качестве хобби, - все наоборот.

Физик-теоретик Ф. Морз, известный своими работами в области квантовой механики, поставил точку в этом вопросе [5]. Он подсчитал, сколько в помещении должно быть резонансов в заданном интервале частот для того, чтобы удовлетворительно, то есть без искажений, "нести" форму звука длительностью порядка 0,1 с. Оказалось, что в интервале 10 Гц должно быть не менее 10 резонансов. Так как число приходящихся на заданную полосу резонансов с понижением частоты убывает, акустическое качество помещения стали оценивать дополнительно по самой низкой частоте, на которой условие Морза еще выполняется.

Конечно, подсчет резонансов помещения - дело незамысловатое, но страшно трудоемкое, поэтому обычно пользуются упрощенными формулами.

Общее число резонансов в прямоугольном помещении в частотных пределах от 0 до  $f$  приблизительно равно:

$$N = \frac{4\pi V}{3} \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi S}{4} \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{2} \left(\frac{f}{c}\right), \quad (8)$$



где  $V$  — объем помещения,  $\text{м}^3$ ;

$f$  - частота звуковых колебаний, Гц;

$S$  - площадь внутренней поверхности помещения,  $\text{м}^2$ ;

$L$  - суммарная длина сторон помещения, м.

Количество резонансных частот, попадающих в узкую полосу  $\Delta f$  в зависимости от частоты  $f$  также приблизительно равно:

$$\Delta N = \left( \frac{4\pi V}{c^3} f^2 + \frac{\pi S}{2c^2} f + \frac{L}{2c} \right) \Delta f. \quad (9)$$

Используют также формулу еще более упрощенного вида:

$$\Delta N = \frac{4\pi V}{c^3} f^2 \Delta f. \quad (10)$$

Приведенные мной формулы демонстрируют простую зависимость между качеством воспроизведения низких частот в помещении и его объемом. Чем больше объем помещения, тем лучше в нем передаются низкие частоты. Линейные же размеры помещения при расчетах по этим формулам не учитываются.

Интересное сравнение сделал все тот же Ф. Морз [5] (см. рис. 2). Он точно подсчитал число резонансов  $\Delta N$  приходящихся на интервал  $\Delta f$  в зависимости от частоты  $f$  для конкретного прямоугольного помещения с размерами  $3 \times 4,5 \times 9$  м (сплошная линия), и сравнил эти данные с кривой значений  $\Delta N$ , которые были рассчитаны по приближенной формуле (9) (пунктирная линия).

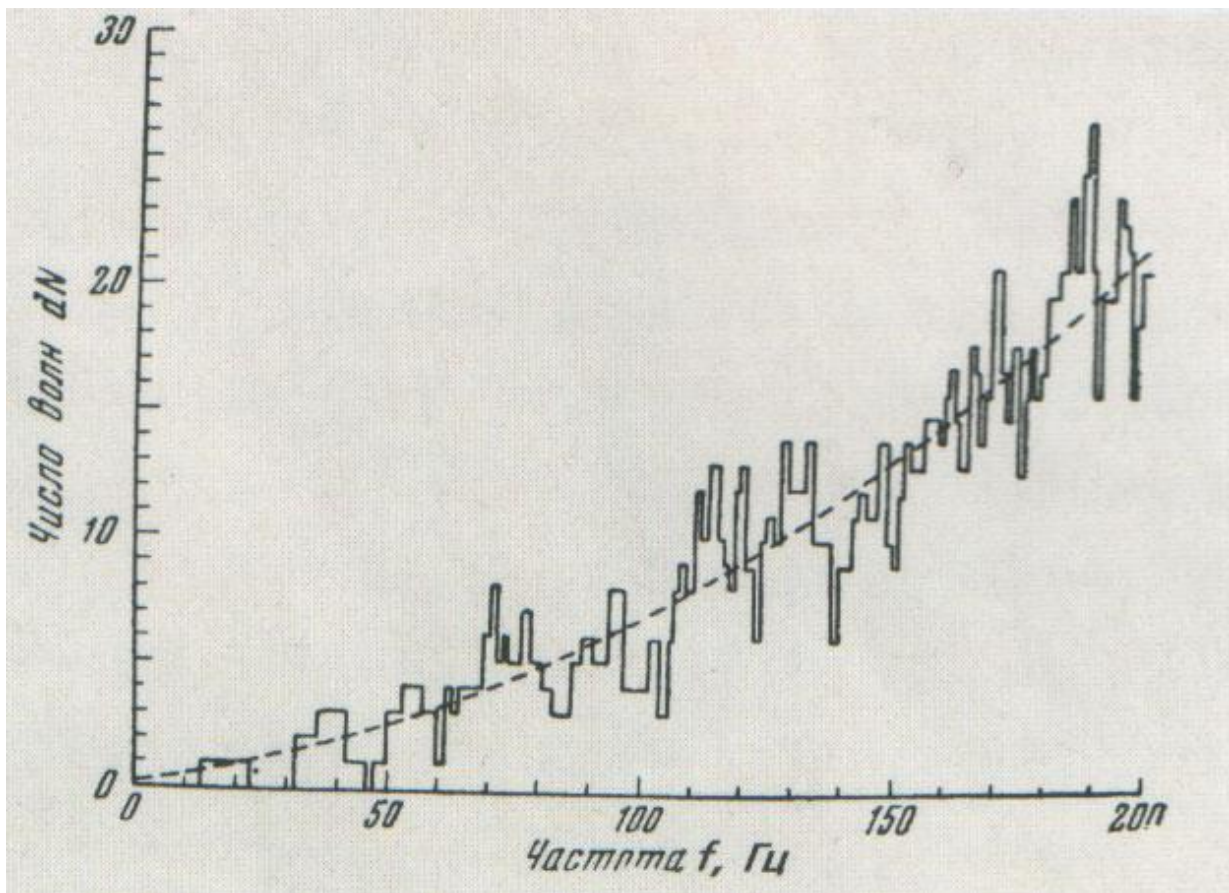


Рис. 2. Число стоячих волн  $\Delta N$  в интервале частот  $\Delta f = 10$  Гц в зависимости от частоты  $f$ : зигзагообразная кривая - результат точного расчета; плавная кривая – получена путем расчета по упрощенной формуле.

С одной стороны, изображенные графики продемонстрировали прекрасное совпадение результатов точного и приблизительного расчетов, с другой - мы замечаем раздражающую

зигзагообразность кривой, в которой учтены линейные размеры помещения, и комфортную плавность кривой, учитывающей только его объем. Однако не во всех случаях плавность лучше зигзагообразности.

Отмеченная зигзагообразность открыла нам нечто важное: при заданных линейных размерах помещения резонансы распределены по частотной шкале неравномерно, и зависит эта неравномерность от выбора упомянутых линейных размеров.

Фуррера [6] эти результаты привели к мысли, что чувствительным критерием акустического качества помещения может стать неравномерность АЧХ этого помещения [8]. Связь с графиком Морза очевидна, ведь чем равномернее АЧХ помещения, тем больше плотность и равномерность распределенных в нем резонансов.

Добавлю от себя: получить минимальную неравномерность АЧХ помещения - значит сохранить в нем неизменным модуль спектра сигнала источника звука. А это, если вы помните, является условием идеальной рандомизации фаз музыкального сигнала (см. "АМ" № 3 (32) 2000, с. 109).

Добиться приемлемой равномерности распределения резонансов можно, выбрав, например, такие размеры помещения, которые соответствуют "золотому сечению". Можно подойти к вопросу еще более радикально, отказавшись от прямоугольной формы помещения и сделав его трапециевидным, или применив рассеивающие звук поверхности и т. п. Обо всем этом я подробно расскажу во второй части статьи.

### Реверберационная акустика

Задачей реверберационной акустики является оценка статистических параметров помещения, таких как *время стандартной реверберации и радиус гулкости*.

В отличие от геометрической, реверберационная акустика исходит из предположения, что образующееся в результате многократных отражений реверберационное поле помещения по интенсивности звука распределено равномерно во всем его объеме и *диффузно*. Под диффузностью понимают примерную одинаковость значений колебательной скорости звуковых отражений, достигающих ушей слушателя из всех направлений. Стремиться к почти идеальным условиям следует не только потому, что упрощаются акустические расчеты. Однородность звукового поля, например в зале, обеспечивает равную громкость и тембр звучания концертной программы на разных слушательских местах. Диффузность же звукового поля играет особую важную роль для правильного восприятия звуковой сцены - для точного определения слушателем направления на источники звука, а также для ощущения *ясности* и формирования *пространственного впечатления* от звучания.

Однако в реальных условиях - в комнатах прослушивания, концертных залах, театрах - равномерность распределения звукового поля и его диффузность, как вы догадываетесь, весьма далеки от совершенства. Вспомним про "звуковые ямы", то есть места, в которых голоса артистов пропадают, как в Бермудском треугольнике и т. п. Ну а теперь обратимся к основным понятиям реверберационной акустики.

*а) Время стандартной реверберации  $T_{60}$*  — это измеряемое в секундах время затухания отклика помещения на звук. Его измеряют от момента окончания звука до затухания отклика на 60 дБ. Время стандартной реверберации определяют или на частоте 512 Гц, или на избранных звуковых частотах.

Формулу для расчета времени стандартной реверберации проектируемого помещения вывел Сэбин [7]. Используя статистическую модель реверберации и остроумные эксперименты, он впервые и в простом виде выразил связь времени стандартной реверберации с объемом помещения и эффективной площадью поглощения в нем звуков:

$$T_{60} = 0,164 \frac{V}{A}, \quad [c] \quad (11)$$

где  $A = \bar{\alpha}_k S$  - суммарное поглощение в помещении, м<sup>2</sup> (здесь  $\bar{\alpha}_k$  - средневзвешенный по площади помещения коэффициент поглощения).

Эта формула действительна для помещений с небольшим средним коэффициентом поглощения  $\bar{\alpha}_k < 0,3$ ; при больших значениях  $\bar{\alpha}_k$  пользуются формулой Эйринга:

$$T_{60} = 0,164 \frac{V}{-\sum_i S_i \ln(1 - \alpha_k)}, \quad [c] \quad (12)$$

### б) Радиус гулкосты

В статистическом смысле реверберационное поле в помещении прослушивания в установившемся состоянии считается равномерно распределенным, то есть не зависящим от расстояния до источника. Интенсивность прямого звука, скажем, излучаемого сферическим источником, каковыми являются все динамические громкоговорители в закрытом корпусе, при удалении от него, напротив, убывает пропорционально квадрату расстояния. Оказывается, в пространстве вокруг источника можно мысленно нарисовать круг, а точнее, сферическую поверхность, радиус которой обозначает место, где интенсивность прямого звука и поля реверберации равны. Этот радиус называется *радиусом гулкосты*.

Радиус гулкосты  $r_H$  определяют по формулам:

$$r_H = \sqrt{\frac{A}{50}} \quad (13a)$$

или

$$r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T_{60}}} \quad (13б)$$

Внутри этого круга (сферы) слушатель воспринимает в первую очередь прямой звук источника, а за его пределами слышит в основном поле реверберации. В качестве примера – радиус гулкосты в Большом зале Петербургской филармонии (где  $V = 27150 \text{ м}^3$ ,  $T_{60} = 2 \text{ с}$ )  $r_H$  (филармонии) = 6,64 м, а в оптимально спроектированной комнате прослушивания (где  $V = 80 \text{ м}^3$ ,  $T_{60} = 0,45 \text{ с}$ )  $r_H$  (комнаты) = 0,76 м.

Из этих примеров становится ясно, что музыку мы всегда и везде (кроме сидящих в первых трех рядах концертного зала) слушаем в звуковом поле, где доминирует реверберация.

Насколько можно удаляться от источника звука, то есть углубляться в поле реверберации, сохраняя при этом интерес к музыке? Проф. В. Рейхардт [8], долгое время проработавший в ГДР, с чисто немецкой пунктуальностью ответил на этот вопрос. Он выразил количественно интерес слушателя к живому звучанию музыки с помощью двух показателей:

*индекса ясности* и *индекса пространственного впечатления*, и построил график их зависимости от времени реверберации, радиуса гулкосты и расстояния от источника звука до слушательского места (см. рис. 3). На том же рисунке зеленым цветом я обозначил соответствующую концепции Рейхардта зону благоприятного с точки зрения звучания музыки сочетания перечисленных акустических параметров.

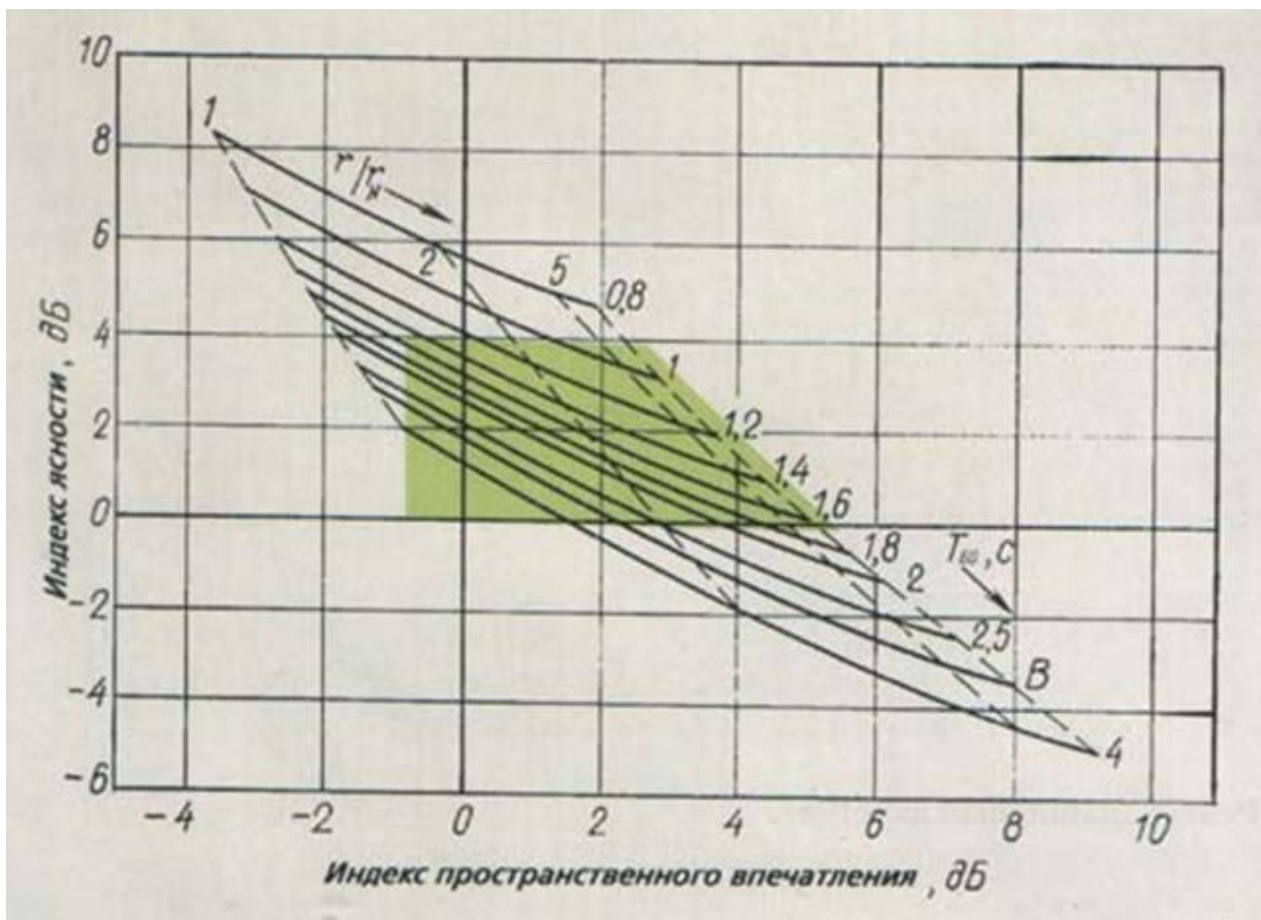


Рис. 3. Зона (обозначена зеленым цветом), в которой наилучшим образом сочетаются время реверберации  $T_{60}$  и радиус гулкосты  $r_n$  в зависимости от удаленности слушателей от исполнителей  $g$ .

Этот график, о котором, как выяснилось, ничего не знают отечественные звукорежиссеры, чрезвычайно полезен для правильной расстановки микрофонов при звукозаписи, ну а рядовой слушатель, воспользовавшись им, сможет выбрать наилучшие места в концертном зале для себя и своей подружки.

#### Литература

1. AES recommended practice for professional audio – Subjective evaluation of loudspeakers. – J. Audio Eng. Soc., Vol. 44, №5. 1996, pp. 386-401.
2. Скучик Е. Основы акустики, т. 1. ИЛ, М., 1958, с. 294-295.
3. Кнудсен Верн О. Архитектурная акустика. ОНТИ НКТП, Киев, 1936, с.166.
4. Кнудсен. Ibid, с. 186-198.
5. Морз Ф. Колебания и звук. ГИТТЛ, М. - Л., 1949, с. 428.
6. Furrer W. Modern continental practice in acoustical desing of broadcasting studios, Proc. Building Res. Congr., Div. 3, Part 1, 1951, p. 49.
7. Sabine W. C. Collected Papers on Acoustics. Cambridge, 1922.
8. Рейхардт В. Акустика общественных зданий. Стройиздат, М., 1984, с.103.

[1] Представьте, что 100 лет назад, не получая за это никакой зарплаты, лорд Рэлей, разумеется с участием прислуги, выдавал гораздо больше научной продукции, чем любой нынешний институт, имеющий в своем штате многотысячный коллектив сотрудников.

[2] Мягкой в акустическом отношении называют среду, волновое сопротивление которой меньше волнового сопротивления воздуха. Кстати, волновое сопротивление  $z = r c$  (где  $r$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  — скорость звука, м/с) называют также акустической жесткостью среды.

[3] Источник звука, создающий симметричное относительно своего центра звуковое поле, то есть сферические звуковые волны, называют источником нулевого порядка. Примером такого источника может служить громкоговоритель в закрытом корпусе, линейные размеры которого меньше длины волны излучаемого звука.

[4] Объемная колебательная скорость - это акустическая величина, которая в рассматриваемом нами

случае равна произведению аксиальной колебательной скорости диафрагмы громкоговорителя и ее площади.

[5] Предпринятая в XIX веке попытка использовать для записи звуков закрытую с двух сторон трубу (о чем я писал в "АМ" № 4 (33) 2000, с. 79) после моих разъяснений не должна восприниматься как полная глупость. Особенно если учесть, естественно, в качестве смягчающего обстоятельства, что в те времена многие весьма авторитетные ученые были заняты поиском решения вполне родственной проблемы — созданием вечного двигателя.

[6] Стоячие волны возникают в результате наложения бегущих навстречу друг другу волн. В определенных областях пространства между отражающими поверхностями эти волны суммируются, образуя неподвижные пучности, а в других — вычитаются, превращаясь в неподвижные узлы. Пучности и узлы вы можете уловить на слух, перемещаясь по комнате, в которой громкоговоритель издает синусоидальный звук с частотой ниже 1500 Гц.

[7] Имеются в виду только те направления, в которых звуки, отраженные от разных стен, возвращаются к первой стене, причем под таким углом, при котором процесс последующих отражений повторяется вновь.

[8] По предложению Фуррера, АЧХ комнаты следует измерять, поместив эталонный громкоговоритель в одном углу комнаты, а измерительный микрофон — в противоположном.

## Комната прослушивания

рекомендации по проектированию (часть 2)

Настаивать на самой высокой строгости во многих более трудных случаях означало бы вовсе исключить их из рассмотрения ввиду чрезмерности требуемого для этого объема.

*Лорд Рэлей. Теория звука*

### Интермеццо

Сооружение хорошей комнаты прослушивания обойдется вам не дороже, чем постройка звукозаглушенной камеры, но и не дешевле, чем домашней пирамиды. Это не означает, что можно отмахнуться от проблемы, сосредоточив свое внимание на подставках для аппаратуры, межблочных и сетевых кабелях и тому подобном. Для многих аудиофилов поводом не заниматься реконструкцией своей комнаты, возможно, служит то, что они ощущают себя пожизненно прикованными к какой-нибудь "хрущевке" и даже не помышляют о том, чтобы изменить эту ситуацию. Тем не менее, часто бывает, что стоимость их аудиоаппаратуры намного превышает возможные затраты на приобретение приемлемого для прослушивания музыки жилья. Экономящих одновременно и на жилье, и на аудиоаппаратуре я в расчет не беру.



Невнимание к акустическим условиям прослушивания я объясняю глубоко засевшими в нас

Комната прослушивания с непараллельными стенами и щитами Бекеши в качестве звукопоглотителей (адрес: Санкт-Петербург, Литейный 30).

социалистическими традициями и тем, что большинство аудиофилов просто недооценивает значимость этих условий. В связи с этим мне очень понравилось объявление в "АМ" № 1 (36) 2000, с. 190: "Меняю аудиоаппаратуру на квартиру...". Оно, как я думаю, содержит правильную рекомендацию для решения вставшей перед аудиофилом жилищной проблемы.

Однако чтобы сделать подобный шаг, вы должны твердо осознавать, что теряете в звучании именно из-за плохих с акустической точки зрения условий прослушивания.

Требования к параметрам и характеристикам комнаты прослушивания я уже подробно рассмотрел

в "АМ" № 5 (34) 2000, с. 147-150 <sup>[1]</sup>. В том, что многие из этих требований в реальных условиях трудно выполнимы, вы убедитесь, прочитав мою статью. В заключение интермеццо я только замечу, что комната прослушивания оказывает влияние практически на все субъективные показатели качества звучания, даже на те, которые приписывают исключительно аудиоаппаратуре;

причем диапазон этого влияния намного шире, чем те возможности, которые нам предоставляет эта аппаратура.

### Механические колебания в комнате прослушивания

После обсуждения в первой части статьи отвлеченных от практики основ архитектурной акустики, перейдем к реалиям. Важнейшая из них: стены, потолок и пол любого помещения в акустическом смысле не являются идеально жесткими. Более того, их следует рассматривать как очень большие закрепленные по краям мембраны, которые под действием звуковых волн или вибраций от источника (им может стать стоящий на полу пылесос или громкоговоритель) совершают изгибные колебания. Причем из-за большой площади, несмотря на очень небольшую амплитуду колебаний, эти мембраны эффективно *переизлучают* звуки обратно в комнату.

Положение усугубляется тем, что стены, потолок и пол колеблются с наибольшей амплитудой на частоте присущего им *основного резонанса*. К тому же в них распространяются изгибные волны, которые отражаются от стыков стен помещения, что вызывает много других, менее выраженных резонансов. Как следствие, АЧХ переизлучения имеет ужасающий вид.

Архитектурная акустика пока еще не научилась принимать во внимание одновременно акустические и механические резонансы в помещении, поэтому в расчетах звукового поля в помещении его стены, потолок и пол рассматривают как идеально жесткие. Причиной такого упрощения являются не только математические трудности. Оказывается, в отличие от акустических резонансов, переизлучение звука резонирующими стенами, потолком и полом крайне неприятно окрашивает звучание. Именно поэтому акустики старой школы всегда старались сделать границы помещения в акустическом смысле предельно жесткими. Обычно ставилась задача добиться, чтобы переизлучаемая ими звуковая энергия была как минимум на 40 дБ слабее, чем падающая на них.

Есть простой способ оценить (в децибелах) *относительный уровень переизлучения* для монолитных стен [2]. Такая стена переизлучает в комнату столько же звуковой энергии, сколько и наружу, это позволяет судить об относительном уровне переизлучения различных строительных материалов и конструкций на основе данных об их *звукоизолирующей способности* [1]. Не будем углубляться в эту обширную тему, а остановимся на установленных эмпирическим путем основных закономерностях звукоизоляции. Важнейшая из них состоит в том, что звукоизоляция (а, следовательно, и переизлучение) определяются массой стены (пола или потолка) на единицу поверхности. На рис. 1 показана зависимость средней звукоизолирующей способности стены в децибелах от ее массы на 1 м<sup>2</sup> поверхности. Из нее, например, следует, что гипрок с массой 10 кг/м<sup>2</sup> совершенно непригоден для возведения стен комнаты прослушивания.

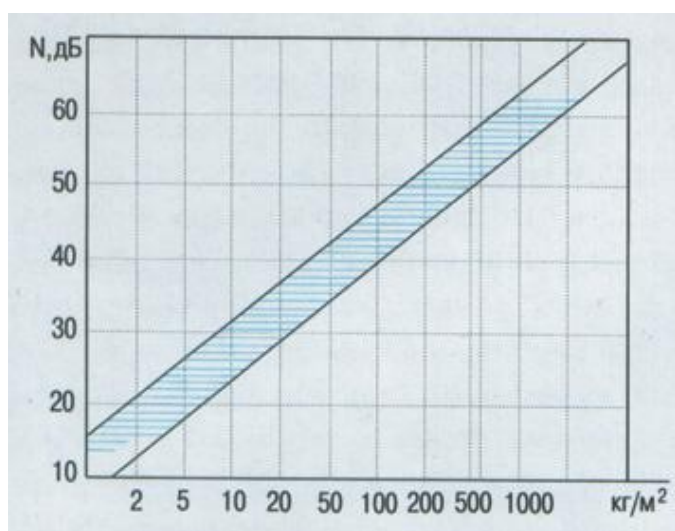


Рис. 1 Зависимость средней звукоизолирующей способности  $N$  (в дБ) перегородок от их массы на единицу поверхности

максимально. Уровень и длительность переизлучения на резонансной частоте могут быть ограничены внутренним затуханием в материале стены. По этой причине материалы с небольшим внутренним затуханием считают *звукопроводными* [2].

При прочих равных условиях кирпичная кладка менее звукопроводна, чем однородный бетон;

Заштрихованная зона характеризует разброс большого количества данных, полученных в результате измерений звукоизолирующих свойств стен и перегородок, выполненных из различных материалов. Этот разброс свидетельствует о том, что масса является не единственным фактором, определяющим звукоизолирующую способность. Важную роль играют также *жесткость на изгиб* и *внутреннее затухание* строительного материала. Такие параметры, как масса на единицу поверхности и жесткость на изгиб, объясняют существование основного резонанса стены. Его частоту в первом приближении можно определить по графику на рисунке 2. Важно иметь в виду, что на резонансной частоте звукоизоляция минимальна, а переизлучение, наоборот,

пористый кирпич и ячеистый бетон также плохо проводят звук; известковый раствор делает кирпичную кладку менее звукопроводной, чем цементный. Деревянные стены обладают очень низкой звукопроводностью.

Непомерно большая звукопроводность стен, пола и потолка в домах блочной конструкции объясняется почти полным отсутствием в использованных строительных материалах внутреннего затухания. Многие знают, что удары по трубе в одном крыле блочного дома могут быть прекрасно слышны в другом.

Чтобы переизлучение в комнате прослушивания оказалось на приемлемом уровне, стены, пол и потолок должны иметь большую массу на единицу поверхности, обладать существенным внутренним затуханием и большой изгибной жесткостью.

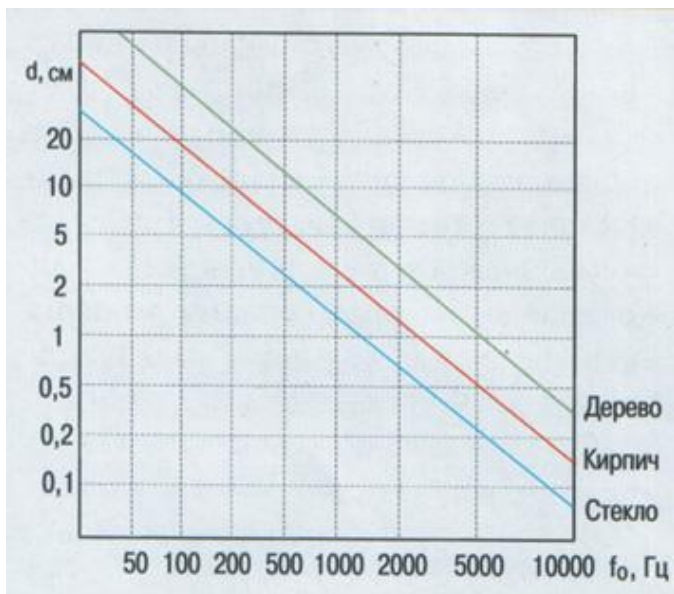


Рис. 2. Зависимость резонансной частоты  $f_0$  перегородки от ее толщины  $d$

очередь из-за того, что кроме звуковых волн он улавливает механические вибрации громкоговорителей [3].

В жилых помещениях встречаются полы разной конструкции.

В домах старой постройки пол и несущее перекрытие разделяет промежуток, частично заполненный шифером или другим, чаще всего теплоизолирующим материалом. Этот промежуток образуется, когда дощатый пол, покрытый паркетом, через виброизолирующие прокладки настилается на деревянные брусья (лаги), закрепленные на несущем перекрытии.

Такой пол защищает жильцов нижнего этажа от проникающего через межэтажное перекрытие шума шагов. Однако он не защищает аудиофила, слушающего свою аудиосистему, от шума, который возникает в результате распространения по полу вибраций, создаваемых громкоговорителями.

В современных, в первую очередь блочных домах дощатый или паркетный пол часто настилают непосредственно на несущее бетонное перекрытие, и хотя жильцы страдают от шума шагов верхних соседей, любители аудиоаппаратуры считают такой пол хорошим. Хотя хорош он только на первый взгляд. Дело в том, что паркет передает перекрытию вибрации с затуханием не более 2 дБ, а бетонное перекрытие из-за отсутствия в нем механических потерь накапливает энергию вибраций и переизлучает ее обратно в комнату, ну и, естественно, к соседям внизу. Не дай вам Бог жить в таком доме, особенно если сосед сверху - любитель heavy metal. Независимо от ваших музыкальных пристрастий, вы будете замучены периодическим уханьем баса (продуктом переизлучения низкочастотных вибраций), причем из-за деградации исходных звуков вы никогда не сможете угадать, какое музыкальное произведение слушает ваш сосед. Напомню, что такое же по характеру переизлучение НЧ-составляющих от пола вы воспринимаете, прослушивая музыку через свою аудиосистему.

Теперь, когда мы осознали, что обычный пол не годится для комнаты прослушивания, попробуем разобраться в том, каким он должен быть. Начнем с основных требований, которые, кстати, очень просты: с одной стороны, пол должен быть "мертвым", то есть не должен отбирать у громкоговорителей механическую энергию колебаний и накапливать ее; с другой - проникшую в него механическую энергию он не должен передавать перекрытию. Этим требованиям отвечает

В этом смысле наилучшим решением являются стены из деревянных брусков с деревянной обрешеткой, покрытой штукатуркой: приемлемый вариант - кирпичные стены с металлической обрешеткой и штукатуркой; наихудшими следует считать стены и перекрытия из однородного бетона.

Те, кто пережил капитальный ремонт в старом доме, наверняка обратили внимание на то, что после замены деревянных несущих (межэтажных) перекрытий на бетонные качество звучания их аудиоаппаратуры заметно ухудшилось.

### Конструкция пола

Пол гораздо в большей степени, чем стены и потолок, подвержен механическим вибрациям. В первую

очередь улавливает механические вибрации



конструкция пола, показанная на рисунке рис. 3: на несущем перекрытии, на расстоянии 0,7-1 м друг от друга должны быть положены деревянные лаги сечением примерно 12×12 см. Они крепятся торцами к стенам или бетонной стяжке к перекрытию. Промежутки между лагами заполняют битым (измельченным) стеклом, которое тщательно утрамбовывают. Стекла должно быть столько, чтобы его уровень был чуть выше верхней кромки лаг. Дощатый пол (лучше из дубовых досок) привинчивают шурупами к лагам так, чтобы доски были плотно прижаты к стеклу, без воздушных промежутков.

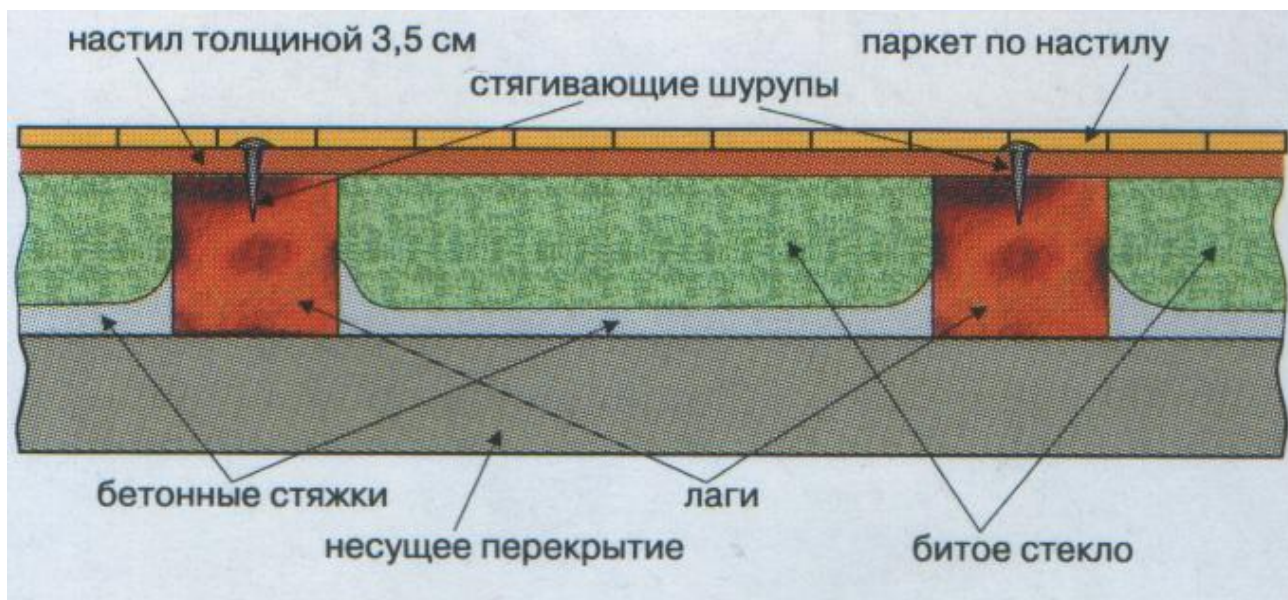


Рис. 3. Правильная конструкция пола в комнате прослушивания.

Почему приходится рекомендовать такой малопривлекательный в обращении материал, как битое стекло? По своим механическим свойствам это уникальный материал. Он обладает исключительной жесткостью, точнее "мертвостью", при этом демпфирует механические вибрации и не является их проводником. Стекло не "слеживается" под нагрузкой, а его объем не зависит от влажности воздуха. Другого строительного материала с такими достоинствами я просто не знаю.

### Объем комнаты прослушивания

Рекомендации по выбору объема комнаты прослушивания для российских аудиофилов - самый больной вопрос, поэтому не стану вывешивать в "АудиоМагазине" экстремистские лозунги вроде того, что в комнате с объемом  $V = 60 \text{ м}^3$  (площадью  $20 \text{ м}^2$ ) слушать high-end-аппаратуру невозможно. Я лишь приведу формулу, с помощью которой каждый, исходя из объема своей комнаты, сможет определить для нее нижнюю граничную частоту  $f_H$ , ниже которой звучание будет неудовлетворительным:

$$f_H = 1770 / \sqrt{V}, [\text{Гц}] \quad (1)$$

где  $V$  — объем помещения,  $\text{м}^3$ .

Эта формула не упала с неба, ее может вывести любой школьник, если включит условие Морза (один резонанс на один герц) во взятую у него же [3] формулу, приведенную мной под номером (10) в первой части статьи.

К сожалению, она выдает нам голую правду, на которую никакие заклинания повлиять не могут. Воспользуюсь ею и поставлю диагноз комнатам с наиболее часто встречающимися размерами (см. таблицу).

Табл

Объем помещения, $\text{м}^3$	Примерная площадь, $\text{м}^2$	Радиус гулкости, м	Нижняя граничная частота, Гц	Прирост SPL, дБ
30	10	0,46	323,4	6,7
45	15	0,56	264	5
60	20	0,65	228	3,7

80	27	0,75	198	2,5
90	30	0,8	186	2
135	45	0,99	152	0,1

В этой таблице приведены основные параметры комнат прослушивания, где достигнуто оптимальное стандартное время реверберации  $T_{60} = 0,45\text{с}$ . Важнейшими из них, естественно, являются нижняя граничная частота, значения которой просто удручают, и прирост создаваемого громкоговорителем в зоне слушания *уровня звукового давления* (SPL – Sound Pressure Level) по сравнению с измеренным в звукозаглушенной камере на расстоянии 1 м. Этот прирост, который возникает благодаря реверберации в помещении, естественно, на руку фирмам-изготовителям аудиоаппаратуры и особенно аудиофилам, поскольку они могут в 2-4 раза уменьшить выходную мощность аудиоаппаратуры. Подробно об этом я напишу в третьем тысячелетии, в третьей части статьи "Мощность".

Остается вопрос, что же делать с нижней граничной частотой помещения? Думаю, что найдутся и такие аудиофилы, которые скажут: "Нет проблем. Можно соорудить комнату с нижней граничной частотой  $f_H = 50\text{ Гц}$ ". Конечно, можно! Такая комната должна иметь объем  $V = 1200\text{ м}^3$  и площадь примерно  $300\text{ м}^2$ . Я даже допускаю, что в недалеком будущем такую комнату смогут построить многие, однако проблемы есть.

Первая из них - отрицательный прирост SPL. Например, по сравнению с комнатой прослушивания объемом  $80\text{ м}^3$  он составляет -12 дБ. То есть выходная электрическая и акустическая мощности аудиоаппаратуры должны быть примерно в 16 раз больше, чем необходимые в обычных условиях. Домашняя аппаратура high end к такому радикальному повышению мощности, особенно громкоговорителей, плохо подготовлена, кроме нескольких очень дорогих моделей, например выпущенных фирмами "Living Voice", "Zingali" и "Tannoy". Правда, для этих целей годится и профессиональная аппаратура, предназначенная для озвучивания больших концертных площадок, но, к сожалению, она чаще всего не относится к категории high end.

Другая проблема - в какой-то степени неожиданная - заключается в необходимости использовать в такой комнате несметное количество звукопоглощающих материалов. Воспользовавшись формулой (11), приведенной в первой части статьи, можно подсчитать, что для оптимального демпфирования объема  $V = 1200\text{ м}^3$  потребуется примерно  $440\text{ м}^2$  стопроцентного звукопоглощения. О том, почему обеспечение такого звукопоглощения действительно представляет проблему, причем в каком-то смысле даже духовную, я расскажу ниже. Подобных сложностей не возникает в комнате объемом  $30\text{ м}^3$  (площадью  $10\text{ м}^2$ ), так как оптимальное время стандартной реверберации достигается при помощи одной тахты и трех полок с книгами.

Общество аудиоинженеров (AES), с учетом всех за и против, предложило в качестве разумного компромисса тестировать аудиоаппаратуру в комнатах объемом от  $50$  до  $120\text{ м}^3$  [4]. До этого Международная Электротехническая Комиссия (IEC) рекомендовала использовать для аудиоэкспертизы громкоговорителей комнаты с объемом  $V = 80\text{ м}^3$  (со следующими линейными размерами: высота - 2,8 м, длина - 6,7 м, ширина - 4,2 м) [5]. Нижняя граничная частота этой комнаты  $f_H = 198\text{ Гц}$  (см. таблицу).

К сожалению, несмотря на высший уровень акустических компромиссов, мы так и не получили ответа на вопрос, что делать с нижней граничной частотой  $f_H$ , или точнее с резонансами помещения, которые находятся ниже этой частоты.

Одно из решений предложил В. Зуев (см. "АМ" № 1 (6) 96, с. 7). По его мнению, нижняя граничная частота аудиосистемы не должна быть ниже нижней граничной частоты комнаты прослушивания. Обидно, правда, что среди огромного парка выпущенной за сто лет аудиоаппаратуры только фонографы Эдисона и ранние граммофоны отвечают этому требованию.

С моей точки зрения, есть только один путь для решения этой проблемы: до возможного предела уменьшать амплитуду и добротность резонансов, возникающих в комнате прослушивания, на частотах ниже  $f_H$ . А уж после этого надежда остается только на *бинауральное освобождение от маскировки* (см. статью "Стерео или моно?"). К вопросу подавления низкочастотных резонансов я вернусь в разделе "Звукопоглощение в комнате".

### Линейные размеры комнаты

Мы живем и слушаем аудиоаппаратуру в комнатах преимущественно прямоугольной формы. Хорошо, если у вас комната дореволюционной постройки с соотношением размеров, [\[4\]](#) соответствующим золотому сечению .

Если комната имеет неоптимальные размеры, есть опасность, что резонансы в ней будут распределены неравномерно по частоте или, что еще хуже, некоторые из них, относимые к разным типам волн, совпадут по частоте и сольются. В неудовлетворительных по форме помещениях количество "слитий" [6] по частоте резонансов разных типов волн может достигать шести. Склонностью к слитию собственных частот обладают комнаты с кратным соотношением линейных размеров. Хуже всего в этом смысле ведут себя помещения кубической формы. Чуть лучше - те, у которых пара стен или пол и потолок имеют квадратную форму. Похожие неприятности могут ждать вас и в комнатах вытянутой формы или с низкими потолками (меньше 2,1 м).

Неравномерное распределение собственных частот, в особенности их слитие, эквивалентно повышению нижней граничной частоты помещения даже в разы. Понятно, почему выбор оптимальных размеров помещения - одна из главных и, к сожалению, дорогостоящих уловок, позволяющих нам полноценно в акустическом смысле использовать объем помещения. Кстати, в этом смысле и золотое сечение не всегда дает желаемый результат. В такой комнате, так же, как во всех прямоугольных помещениях, наблюдаются акустические аномалии, обязанные своим появлением резонансам коаксиальных и касательных волн [7]. Именно из-за этих аномалий акустики-экстремисты, и я в том числе, предлагают строить комнаты непрямоугольной формы, в которых стены, пол и потолок непараллельны. Наша правда в том, что помещения с непараллельными границами не имеют резонансов коаксиальных и касательных волн, в них наблюдаются только резонансы косых волн [8]. План комнаты прослушивания с непараллельными границами показан на рис. 4. Осевая симметрия (относительно пунктирной линии) необходима для правильного стереовоспроизведения. Кроме того, передняя зона, то есть та, где расположены громкоговорители, должна иметь наибольшее сходство с прямоугольным помещением, затем комната расширяется в сторону слушателя. Потолок или пол делаются ступенчатыми либо наклонными. Непривычной для многих может быть призмовидная форма задней стены комнаты. Призма сзади слушателя в любом случае принесет пользу, так как сведет на нет продольные аксиальные стоячие волны.

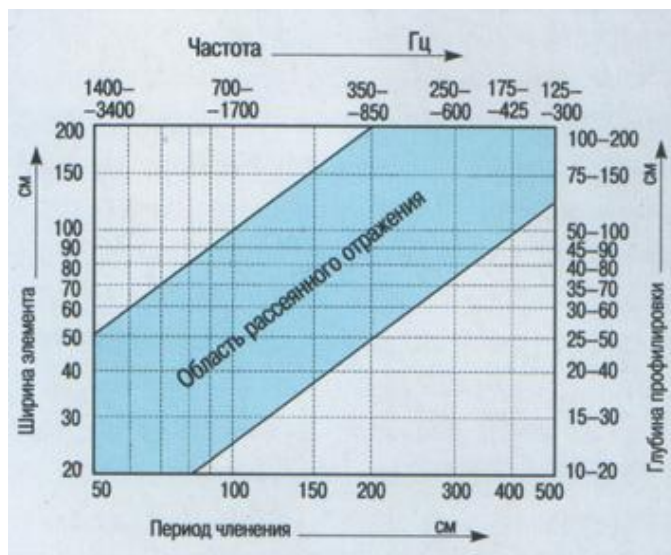


Рис. 5. Зависимость частотных пределов рассеянного отражения звука в комнате от размеров членения ее поверхности

Несмотря на явные акустические достоинства комнаты с непараллельными стенами, их сооружение в многоэтажных домах, особенно новой постройки, вряд ли возможно. Более простым с инженерной точки зрения решением является монтаж на стенах и потолке элементов рассеяния звука, так называемых рельефов [9]. Рельефы могут иметь форму полуцилиндра, полусферы, уплощенной призмы или уплощенной волны. Их изготавливают из легких жестких материалов (например, дерева или гипса), а полость внутри заполняют звукопоглощающим пористым материалом. Благодаря кривизне поверхностей даже облегченные рельефы оказываются достаточно жесткими с точки зрения рассеивания звука. В первую очередь они ослабляют аксиальные и касательные

волны и увеличивают диффузность звукового поля. Их недостатком является неэффективное рассеивание низких звуковых частот, что объясняется усилением на этих частотах дифракции звуковых волн [10]. Частотный диапазон рассеивания звука рельефами определенных размеров можно оценить по номограмме (см. рис. 5). Для заданного диапазона частот наилучший эффект достигается, когда высота рельефа составляет  $1/6$ , а ширина -  $1/3$  длины звуковой волны. Искусно комбинируя рассеивающие элементы и звукопоглощающие материалы, можно существенно улучшить рассеивание звука в помещении и ослабить действие вредных стоячих волн.

### Звукопоглощение в комнате

Поглощающие материалы и конструкции в комнате прослушивания используют для достижения

времени стандартной реверберации  $T_{60} = 0,45 \pm 0,15$  с, которое к тому же должно оставаться постоянным в диапазоне частот от 250 до 4000 Гц. За пределами этого диапазона требования к его постоянству несколько мягче. По существу это означает, что средневзвешенный по площади коэффициент звукопоглощения в заданных частотных пределах также должен быть постоянным, то есть  $\bar{\alpha}_k = const$ .

Поглощающих материалов, отвечающих этому требованию, в природе не существует. Все используемые в строительстве акустические материалы обычно имеют нечетко выраженный максимум поглощения на определенной частоте, на низких же частотах способность к поглощению пропадает. Основная задача проектировщика - подобрать комбинацию из трех или четырех типов поглотителей таким образом, чтобы выполнить условие  $\bar{\alpha}_k \cong const$ . По аналогии с терминологией, применяемой в электроакустике, такой способ поглощения будем называть трех- или четырехполосным соответственно.

Для поглощения высоких частот применяют пористые поглотители: хлопчатобумажные занавеси или портьеры, ковры и тому подобное. Для поглощения средних частот я настоятельно рекомендую дешевый и одновременно высококачественный звукопоглощающий материал - книги доперестроечного периода, размещенные на открытых стеллажах. Один квадратный метр стены, заставленной книгами, независимо от их содержания, обеспечивает примерно  $0,4 \text{ м}^2$  стоцентного звукопоглощения. В комнате прослушивания с объемом  $V = 80 \text{ м}^3$  в соответствии с формулой Айринга (см. (12) в первой части статьи) необходимо распределить по стенам около 7500 книг. Для советского интеллигента периода 1960-х библиотека с таким количеством книг считалась нормой.

Сложнее воспользоваться моим рецептом, если вы решили построить комнату прослушивания с объемом  $V = 1200 \text{ м}^3$ . В этом случае вам потребуется около 100000 книг. Тут-то вас и подстерегает духовная проблема.

Низкие частоты (но не ниже 100 Гц) прекрасно поглощаются диванами и мягкими креслами, а также посетителями [5]. Если на этих частотах требуется обеспечить звукопоглощение в большом объеме, а названных мной предметов мебели не хватает, можно прибегнуть к щитам Бекеши, которые по акустической сути - те же диваны, только поставленные на попу (см. фото в начале статьи).

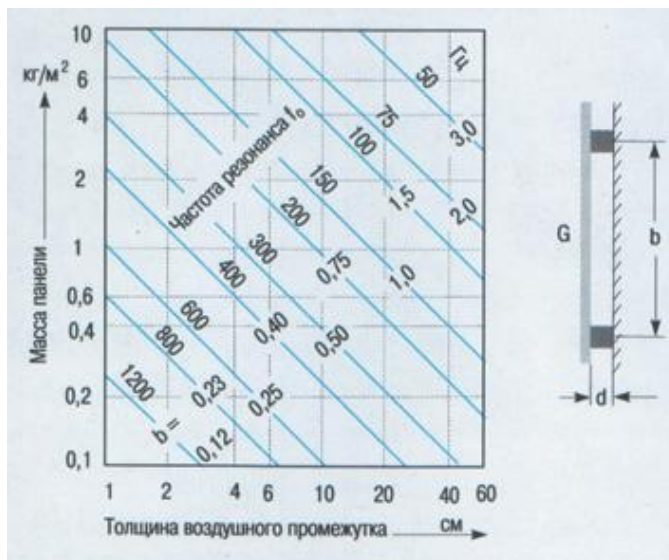


Рис. 6. Зависимость резонансной частоты  $f_0$  резонансной панели от ее массы на единицу поверхности  $G$  и толщины воздушного промежутка от стены  $d$

И все же наибольшие трудности связаны со звукопоглощением частот ниже 200 Гц. Это та область, где господствуют чрезвычайно разреженные и потому вредные резонансы. Некогда я даже счел их действие проявлением нечистой силы и назвал "барабашками" (см. "АМ" № 4 (15) 97, с. 108-109). Справиться с ними, как показывает опыт, можно только путем тщательного акустического демпфирования с помощью панелей резонансного типа, которые я советую настраивать на частоту наиболее назойливых из этих резонансов. Расчет частоты эффективного звукопоглощения вы просто и быстро выполните, воспользовавшись номограммой (см. рис. 6).

Количество звукопоглощающего материала каждого типа, требуемое для многополосного звукопоглощения, вы можете определить, обратившись к формуле Айринга. Однако из нее не следует, где именно должны быть размещены звукопоглощающие материалы. Здесь нет противоречия. Выбор мест расположения поглотителей оказывает влияние, в первую очередь, на качество затухания реверберации и на диффузность звукового поля в помещении, но это уже следующий вопрос.

### Качество затухания реверберации в помещении

Затухание считается идеальным, если его огибающая в линейных координатах имеет форму экспоненты, а в логарифмическом масштабе амплитуд идеальное затухание выражается прямой линией с наклоном относительно оси времени, который измеряется в дБ/с.

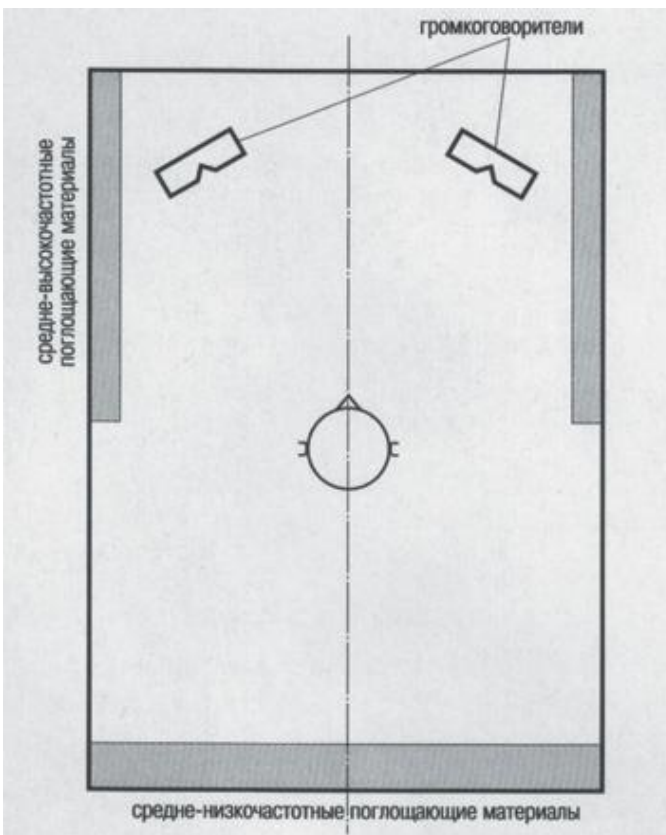
В комнатах прослушивания чаще всего наблюдается два дефекта затухания реверберации.

1. Изломы затухания - наклон затухания, начиная с какого-то момента времени, изменяется, например, становится меньше. Этот неприятный для слуха дефект возникает из-за различия скорости затухания стоячих волн разного типа. Быстрее всего затухают косые волны, поскольку в течение каждого полного цикла отражения они шесть раз встречаются с покрывающими стены поглотителями. Примерно в два раза медленнее затухают аксиальные и касательные волны, так как они меньше взаимодействуют с поглощающими материалами. Другой причиной различий скорости затухания может стать зависимость коэффициента звукопоглощения использованных материалов от угла падения звуковых волн [11].

Полностью устранить этот дефект нельзя, но можно сделать его почти незаметным, если сместить точку излома затухания на -30 дБ (или более) относительно его начального уровня.

Задача эта, как я уже писал, радикально может быть решена путем исключения (или ослабления) мод колебаний, обязанных своим появлением аксиальным и касательным волнам. Напомню, что волны эти исчезают в помещениях с непараллельными стенами или со стенами, отделанными большим количеством рассеивающих звуки элементов. Другое, правда, менее эффективное, решение - это неравномерное распределение по стенам звукопоглощающих материалов [12], например, в виде "пятен", чередующихся с элементами рассеяния звука. К сожалению, этот путь требует от исполнителя высочайшей квалификации.

2. Флуктуации затухания. Периодические и непериодические флуктуации затухания возникают, когда собственные частоты помещения сильно разрежены или когда между частотами доминирующих в этом помещении резонансов отчетливо просматриваются большие промежутки  $\Delta f$ . Флуктуации наносят заметный ущерб звучанию, когда  $1 \text{ Гц} < \Delta f < 16 \text{ Гц}$ . Поясню физику образования флуктуации на простом примере. Представим себе, что звуковой сигнал от громкоговорителя возбуждает сразу три резонанса помещения, частоты которых удалены друг от друга на один и тот же интервал частот  $\Delta f$ . Естественно, что в спектре отклика помещения, наблюдаемом нами после прекращения звука будут доминировать те же три частоты. Из учебников по основам радиотехники известно, что спектру, в котором доминируют три отстоящих друг от друга на равный интервал  $\Delta f$  частоты, обязательно соответствуют амплитудно- и/или частотно-модулированные колебания с частотой модуляции равной  $\Delta f$ .



В более общем случае, когда число возбуждаемых сигналом собственных частот помещения две или более трех, а также когда интервалы между этими частотами не равны друг другу, флуктуации затухания реверберации также возникают, но это уже более сложные случаи.

Получается, что ниже частоты  $f_H$  (когда  $\Delta f > 1 \text{ Гц}$ ) неприятных для слушателя флуктуаций затухания реверберации в принципе не избежать, и мы должны с этим смириться. Непростительно, когда флуктуации возникают на средних частотах. Происходит это из-за доминирования в этом диапазоне некоторых слабо затухающих собственных частот. Такое доминирование наблюдается, когда имеют место "слития" этих частот, а также если возникают стоячие волны между параллельными участками незаглушенных стен, выполненных из "идеально" отражающих строительных материалов, например, кафеля, мрамора, стекла или монолитного бетона. Наличие таких элементов, помимо появления флуктуации затухания,

Рис. 7. Правильное распределение поглощающих материалов в комнате прослушивания

приводит к нарушению диффузности звукового поля. Отсюда - важное правило.

Все первичные (в том числе покрываемые затем поглотителем) поверхности комнаты должны быть частично поглощающими, например, отделаны деревом или штукатуркой, скажем известковой песочной на металлической обрешетке [6].

Последний уже давно назревший вопрос: как наилучшим образом неравномерно распределять в комнате поглощающие материалы?

Столетнее развитие архитектурной акустики как точной науки выводит нас на следующее, полученное чисто эмпирическим путем, распределение поглощающих материалов в комнате прослушивания - см. рис. 7. Как показывает опыт, такое распределение обеспечивает монотонность затухания реверберации и хорошую диффузность звукового поля, правда с некоторым доминированием поперечных по отношению к оси симметрии комнаты мод колебаний. Это доминирование следует рассматривать как достоинство, так как оно увеличивает пространственный эффект, то есть приводит к осязательному расширению стереосцены, а также способствует улучшению бинаурального освобождения прослушиваемой музыки от помех, вызванных отражениями в комнате прослушивания.

### Литература

1. Кнудсен Верн О. Архитектурная акустика. Киев, 1936, с. 185-198.
2. Контюрн Л. Акустика в строительстве, Госстройиздат, М., 1960, с. 204.
3. Морз Ф. Колебания и звук. М.- Л., 1949, с. 437.
4. AES recommended practice for professional audio, - Subjective evaluation of loudspeaker. - J. Audio Eng. Soc. Vol. 44, # 5, 1996, p. 388.
5. IEC recommendation 268-13, Listening Tests on Loudspeakers, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1985, p. 9.
6. Морз Ф. Ук. Соч., с. 433.
7. Контюрн Л. Ук. Соч. с. 124-126.
8. Морз Ф. Ук. Соч., с. 433-435.
9. Контюрн Л. Ук. Соч., с. 134-137.
10. Морз Ф. Ук. Соч., с. 381-383.
11. Скучик Е. Основы акустики, т. 2. М., 1958, с. 208-210.
12. Морз Ф. Ук. Соч., с. 441.

[1] Там не уделено внимания только пространственным характеристикам помещения, в частности диффузности звукового поля, так как к рандомизации фаз они прямого отношения не имеют.

[2] Для оценки переизлучения многослойных стен этот способ неприменим. Такие стены, так же как потолок, пол, двери и окна, особенно при наличии между слоями воздушного промежутка, обеспечивают хорошую звукоизоляцию, однако оказываются обычно источниками повышенного переизлучения.

[3] Вибраций динамического громкоговорителя обусловлены действием третьего закона Ньютона. В результате протекания в звуковой катушке громкоговорителя переменного тока между диффузором (вместе со звуковой катушкой) и магнитной системой возникают внутренние встречные переменные силы. Переменная сила, действующая на магнитную систему, вызывает вибрацию громкоговорителя. Такая вибрация называется *моторной*.

[4] Золотое сечение (или иначе *божественная пропорция*) - эстетически значимая геометрическая пропорция, в которой целое относится к большей своей части, как его большая часть к меньшей. Понятие золотого сечения ввел Леонардо Да Винчи.

[5] Площадь стопроцентного поглощения одним посетителем равна примерно  $0,4 \text{ м}^2$ .

[6] Многие современные архитекторы считают рецепт этой штукатурки окончательно утерянным.

**Комната прослушивания**  
**(рекомендации по проектированию)**  
Часть третья

Проверка квартиры была произведена; не думая больше о покойном племяннике, ни о квартире, содрогаясь при мысли об опасности, которой он подвергался, Максимилиан Андреевич, шепча только два слова "Все понятно! Все понятно!" — выбежал во двор.

*М. Булгаков. "Мастер и Маргарита"*

Если узнать всю акустическую подноготную комнаты прослушивания, то следовало бы бежать из нее без оглядки, однако мы не собираемся этого делать, наверное, потому, что аудиопресса долгие годы представляла нам проблемы архитектурной акустики в розовом свете и, в конце концов, внушила, что для домашнего прослушивания музыки годится любая комната, а если проблемы и возникают, то они решаются путем перестановки дивана или вывешивания ковра.

На самом деле создание комнаты прослушивания несколько не проще, чем создание любого компонента аудиосистемы, только вот просчет в проектировании комнаты обходится много дороже. Известно, что ошибки, допущенные в схеме усилителя, устраняются заменой конденсатора или резистора, причем в течение нескольких минут. Чтобы исправить ошибку, допущенную при акустической реконструкции помещения, нужно пригласить бригаду рабочих с кувалдами или отбойными молотками.

Ошибки в архитектурной акустике, несмотря на их высокую цену, совершались довольно часто. Их допускали даже известные специалисты. Например, в процессе реконструкции зала в Карнеги Холл непререкаемый авторитет Лео Беранек применил акустические рассеиватели звука стоимостью в несколько миллионов долларов и окончательно испортил акустику помещения.

Подобные ошибки происходят вовсе не из-за небрежности в расчетах. Точно рассчитать конструктивные параметры привлекательного для слуха помещения просто невозможно. Именно поэтому при акустическом проектировании прибегают к методам последовательных приближений, дополняя расчеты акустическими измерениями.

В наиболее ответственных случаях акустические измерения производят на миниатюрной модели проектируемого помещения с применением ультразвуковой техники. По результатам этих измерений корректируют размеры помещения, места размещения рассеивающих и звукопоглощающих элементов, и только после этого начинают строительство. Для не слишком больших помещений, таких как комната прослушивания, способ коррекции, основанный на использовании уменьшенных моделей, считается чрезмерной роскошью. Поэтому в рассматриваемом нами случае акустические измерения следует проводить непосредственно в строящейся комнате. Измерения эти выполняют в три этапа.

На первом этапе измерения нужно произвести после того, как возведены стены, пол и потолок, но еще не установлены рассеивающие и звукопоглощающие элементы. Основная задача этих измерений - выявить области концентрации, *слития* собственных частот комнаты, а также аномалии диффузности звукового поля: *фокусировки*, предрасположенность к *флаттеру* и тому подобное. По результатам этих измерений производят геометрическую коррекцию помещения.

На втором этапе измерения производят после того, как проектируемая комната заполнена, в соответствии с расчетом, рассеивающими и звукопоглощающими элементами, а также мебелью, декоративными украшениями, книгами, картинами и тому подобным. Проводимые в этом случае акустические измерения называют *реверберационными*. Их осуществляют всегда в условиях, максимально приближенных к реальным, с одной целью - уточнить количество поглощающих и рассеивающих звуки элементов.

На третьем этапе измерения производят для того, чтобы определить наилучшие места в комнате для размещения громкоговорителей и слушателя. Строго рассчитать эти места нельзя, однако, чтобы не искать их вслепую, как иголку в стоге сена, некоторые полезные для такого поиска расчетные соотношения я приведу ниже.

А теперь одно замечание. К сожалению, не все акустические и механические процессы,

происходящие в помещении, поддаются объективному контролю. Особенно это относится к так называемым *скрытым резонансом* [1], причиной которых может стать переизлучение звука стенами, полом и потолком на частотах их механических резонансов. Скрытые резонансы потому и называются скрытыми, что их нельзя обнаружить на АЧХ. Обычно они выявляются с помощью тонких фазовых измерений, которыми в архитектурной акустике редко пользуются, в основном из-за сложности организации подобных измерений. И тогда нам ничего не остается, кроме как воспользоваться мудрым советом лорда Рэля [2]: "Прямо или косвенно, все вопросы, связанные со звуком, должны решаться ухом, как органом слуха; оспаривать заключения, которые делаются ухом, уже не приходится".

**Первый этап.** Измерение собственных частот помещения, образуемых аксиальными и касательными волнами.

Почему следует обращать внимание на волны именно этого типа, я уже рассказал в "АМ" № 2 (37) 2001, с.184. Напомню только, что *аксиальные и касательные* волны затухают значительно медленнее, чем *косые*, а поэтому их аномальное распределение в помещении в наибольшей степени влияет на характер затухания реверберации, вызывает его *изломы и флаттер*.

Если комната прямоугольная, то собственные частоты, разумеется, проще вычислить, чем измерить. Такой расчет выполняют по формуле Морза [3]:

$$f = \frac{c}{2} \left[ \left( \frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{l_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z}{l_z} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $f$  - собственная частота помещения, Гц;

$n(n_x, n_y, n_z)$  - коэффициенты, представляющие собой ряды натуральных чисел ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ), с индексами  $x, y$  или  $z$ , каждый из которых соотносится с одной из осей комнаты;

$l_x, l_y, l_z$  - линейные размеры помещения, м;

$c$  - скорость звука, м/с.

Собственные частоты комнаты, проявляющиеся в результате возбуждения в ней аксиальных волн, находят по этой формуле, приняв коэффициент  $n$ , соответствующий интересующему нас направлению волн  $x, y$  или  $z$ , не равным нулю, тогда как другие коэффициенты приравнивают нулю.

Собственные частоты, возникающие в результате возбуждения касательных волн в плоскости  $xy, xz$  или  $yz$ , находят, приравняв нулю оставшийся коэффициент  $n$ .

Если комната имеет непрямоугольную форму, подсчитать ее собственные частоты по формуле невозможно, поэтому приходится прибегать к трудоемким измерениям. Измерение собственных частот производят в пустой, незаглушенной комнате на частотах  $f < 2f_n$  где  $f_n$  - расчетная *нижняя граничная частота* помещения (см. "АМ" №2 (37) 2001, с. 181).

Я уже сообщал, что цель таких измерений (или расчетов) - выявить области наибольшей неравномерности распределения собственных частот помещения, образованных касательными и аксиальными волнами, а также определить частоты их *слития*. И еще: на этом же этапе можно оценить, насколько комната прослушивания предрасположена к образованию флаттера.

### Средства измерений

Для измерений собственных частот комнаты необходимо иметь генератор звуковой частоты, низкочастотный контрольный громкоговоритель закрытого типа (с усилителем мощности), вольтметр переменного тока (с диапазоном измеряемых напряжений 0,1-3мВ) и *направленный* микрофон [1] (с чувствительностью от 3 мВ/Па и выше).

Направленный микрофон в процессе измерений облегчит сортировку аксиальных и касательных волн, а также позволит отделить их от косых.

### Процедура измерений

При определении собственных частот помещения, образованных аксиальными волнами, микрофон размещают поочередно на поперечной -  $x$ , вертикальной -  $y$ , и продольной -  $z$  оси комнаты, недалеко от стены (потолка) в зоне *узла* [2] стоячей волны, а контрольный громкоговоритель устанавливают на этой же оси, близко от центра противоположной стены (пола)



(см. рис. 1). Измерения производят в направлении каждой оси комнаты.

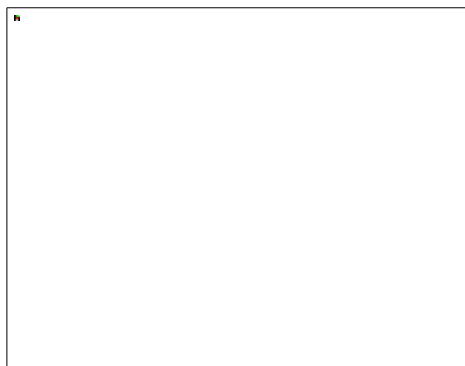


Рис. 1. Места размещения контрольного громкоговорителя в комнате при измерениях собственных частот, образованных аксиальными стоячими волнами.

При определении собственных частот, образованных касательными волнами, контрольный громкоговоритель размещают там же, где его размещали при измерениях аксиальных стоячих волн, но при этом ось максимальной чувствительности микрофона ориентируют вдоль отрезков прямой, соединяющих середины сторон комнаты, лежащих в плоскости распространения измеряемых стоячих волн  $xu$ ,  $xz$  или  $yz$  (см. рис. 2). Сам микрофон располагают в зоне узла измеряемой стоячей волны.

Измерения производят последовательно в каждой плоскости  $xu$ ,  $xz$ ,  $yz$ , при этом учитывают только те собственные частоты, которые имеют наибольшие амплитуды.

В спорных случаях, то есть когда волны разного типа по амплитуде трудноразличимы, их идентифицируют по направлению распространения. Направление

определяют по максимуму амплитуды сигнала с выхода микрофона при плавных поворотах его оси. Собственные частоты помещения наносят на график зависимости от частоты в виде вертикальных линий и обозначают соответствующими индексами:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и  $xu$ ,  $xz$ ,  $yz$ .

В помещении с оптимальной геометрией собственные частоты учитываемых нами типов волн должны быть равномерно распределены по шкале частот. Если их распределение неравномерное, комнату придется настраивать, причем до размещения в ней звукопоглощающих материалов.

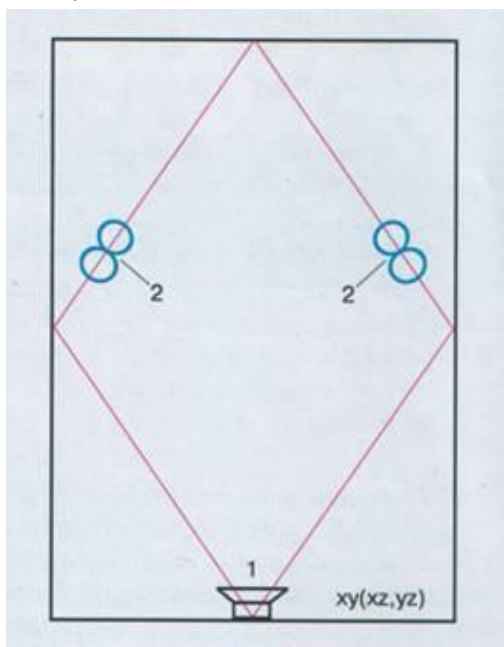


Рис. 2. Места размещения направленного микрофона в осевых плоскостях  $xu$ ,  $xz$  или  $yz$  при измерениях собственных частот, образованных касательными стоячими волнами:  
1 - громкоговоритель, 2 - микрофон (его характеристика направленности).

Настройка комнаты на этом этапе может потребоваться и для устранения "геометрических" причин образования флаттера. Эту настройку нужно сделать как можно раньше, чтобы флаттер не появился после завершения строительства, когда затруднительно вносить какие-либо изменения в конструкцию комнаты. Именно поэтому предрасположенность комнаты к образованию в ней флаттера оценивают на первом этапе. Обычно эту предрасположенность выявляют на слух. Задача облегчается тем, что флаттер в пустом помещении даже заметнее, чем в заглушенном. И это понятно, ведь в незаглушенном помещении затухание уровня звука длится очень долго, около 5 секунд, поэтому характерные для флаттера модуляции (см. "АМ" № 2 (37) 2001, с. 184) хорошо слышны. Предрасположенность к флаттеру оценивают на прерываемых третьоктавных полосах "розового" шума в диапазоне частот от 315 до 3150 Гц.

### Геометрическая настройка комнаты

Я не предлагаю двигать стены или смещать потолок комнаты. Геометрическая настройка включает в первую очередь применение резонансных поглотителей звука в зонах аномального распределения собственных частот и в местах образования флаттера. В тех случаях, когда добавление звукопоглощения нежелательно, используют рассеиватели звука. Поверхность

резонансных поглотителей и рассеивателей звука в этом случае ориентируют фронтально относительно направления аномально проявивших себя стоячих волн.

**Второй этап.** Измерение стандартного времени реверберации в зависимости от частоты

Измерения стандартного времени реверберации производят после того, как комната построена и в ней размещены все найденные с помощью расчетов звукопоглощающие и рассеивающие элементы, а также установлены декоративные части интерьера.

Проводить эти измерения необходимо, так как погрешность расчетов требуемого количества поглощающих материалов остается очень велика. Именно из-за этой погрешности комнату

прослушивания приходится настраивать, ориентируясь на результаты измерения *стандартного времени реверберации*.

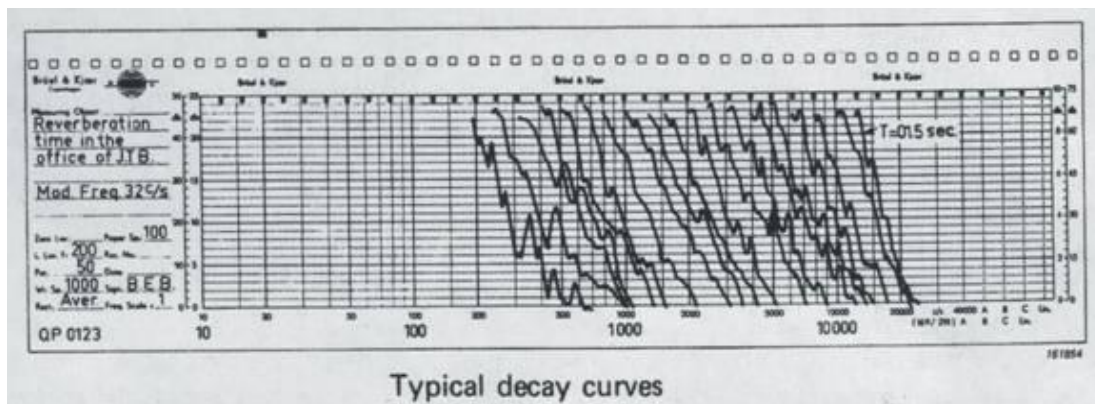


Рис.3. График зависимостей затухания уровня звука от времени, зарегистрированных с помощью самописца уровня #2307 фирмы "Брюель и Кьер"

Известно множество способов таких измерений [4]. Классическим среди них считается способ, основанный на построении графика затухания уровня звука. Этот график (см. рис. 3) регистрируется с помощью быстродействующего самописца уровня. Предусмотренные в нем логарифмическая шкала уровней звука и линейная шкала текущего времени преобразуют экспоненциально затухающую реверберацию в спадающую прямую линию. Если спад уровня звука имеет какие-либо аномалии, то на графике они проявятся отклонением от этой линии. Стандартное время реверберации на таком графике определяют с помощью линейки, для этого отсчитывают время спада реверберации на 30 дБ и затем умножают результат на 2.

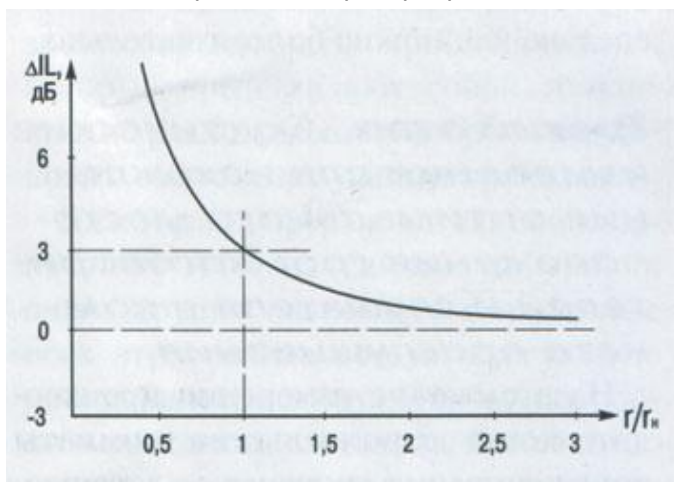


Рис. 4. Зависимость прироста уровня интенсивности стационарного звука  $\Delta IL$  (в дБ) относительно уровня поля реверберации в зависимости от расстояния до источника. Это расстояние на графике выражено числом радиусов гулкости.

Классический способ измерения стандартного времени реверберации очень удобен и точен, однако в домашних условиях он вряд ли приемлем, прежде всего, из-за высокой стоимости самописца

уровня [3]. По этой чисто материальной причине я рекомендую аудиофилам взять на вооружение простой и совсем недорогой способ измерения времени реверберации [5]. Основу его составляет зависимость прироста уровня интенсивности *стационарного* звука  $\Delta IL$  от расстояния до его источника в закрытом помещении (см. рис. 4). Эта зависимость в нелогарифмированном виде (см. "АМ" № 2 (7) 96, с. 65) задана формулой:

$$I = N_{ak} \left( \frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right), \quad (2)$$

Где  $N_{ak}$  - излучаемая источником акустическая мощность, Вт;  $r$  - расстояние до источника звука, м;

$R$  - постоянная помещения (характеризует способность стен, пола и потолка поглощать звук),  $m^2$ .

Первый член формулы (в скобках) выражает зависимость интенсивности прямого звука от расстояния до источника. Второй член, который описывает поле реверберации, зависит только от звукопоглощения в помещении и не зависит от расстояния до источника звука.

На расстоянии от этого источника  $r = r_0$  называемом *радиусом гулкости*, оба члена выражения (2) будут равны друг другу (см. "АМ" № 2 (7) 96, с. 69) и сложатся как две равные мощности, следовательно, уровень интенсивности звука на этом месте возрастет на 3 дБ по сравнению с

уровнем, наблюдаемым в чистом поле реверберации. Ориентируясь на этот прирост, радиус гулкосты в помещении нетрудно измерить с помощью линейки. Для этого микрофон, находящийся в поле реверберации, нужно плавно приближать к источнику звука до тех пор, пока уровень звука не увеличится на 3 дБ. Расстояние от источника звука до найденного места и есть искомый радиус гулкосты -  $r_H$ .

Теперь, если объем помещения  $V$  (в  $m^3$ ) вам известен, легко вычислить стандартное время реверберации  $T_{60}(v)$ , используя знакомую по второй части статьи формулу:

$$r_H = 0,057 \sqrt{V / T_{60}}, \quad (3)$$

### Средства измерений

Для измерения стандартного времени реверберации комнаты нужно иметь контрольный громкоговоритель с круговой характеристикой направленности и произвольной АЧХ, полный усилитель, проигрыватель компакт-дисков, а также "АМ Тест-CD 1", на котором записаны третьоктавные полосы "розового" шума. Следует также раздобыть трехметровую линейку и шумомер с линейной характеристикой (или с характеристикой "С"). Вместо него можно использовать любой ненаправленный микрофон с чувствительностью не хуже

3 мВ/Па и вольтметр переменного тока, имеющий диапазон измеряемых напряжений 0,1-3 мВ.

### Процедура измерений

Установите контрольный громкоговоритель примерно в том месте комнаты, где должен находиться один из громкоговорителей вашей стереосистемы, а шумомер (микрофон) - на расстоянии не менее 4 метров от этого громкоговорителя; затем воспроизводите третьоктавные полосы "розового" шума, начиная с дорожки 39 и заканчивая дорожкой 58. В течение 30 с, пока звучит одна полоса шума, приблизьте шумомер (микрофон) к работающему громкоговорителю на расстояние, при котором уровень звукового давления увеличится на 3 дБ. Измерьте и запишите это расстояние. Сделайте такие замеры на каждой полосе шума в диапазоне от 100 до 8000 Гц. Затем вычислите частотную характеристику стандартного времени реверберации  $T_{60}(f)$ , используя для этого преобразованное из формулы (3) соотношение:

$$T_{60}(f) = 3,25 \cdot 10^{-3} \frac{V}{r_H^2(f)}, \quad (4)$$

где  $V$ - объем комнаты прослушивания,  $m^3$ ;

$r_H(f)$  - радиус гулкосты на избранной частоте, м.

### Настройка реверберации в помещении прослушивания

Ухо человека различает около 50 градаций времени реверберации в диапазоне от 0,5 до 3 с, то есть часто используемых ее значений [6]. Эти данные свидетельствуют о том, что наше слуховое восприятие - феноменально тонкий акустический инструмент. Именно по этой причине общество аудиоинженеров (Audio Engineering Society) [7] установило жесткие требования к допуску на стандартное время реверберации в зависимости от частоты в комнатах прослушивания:

$$T_{60}(f) = 0,45 \pm 0,15c \quad (5)$$

в диапазоне частот  $250 \text{ Гц} < f < 4 \text{ кГц}$ .

Столь жесткий допуск был задан, несмотря на то, что самые точные расчеты времени реверберации в комнатах прослушивания дают значительно большую погрешность. Именно поэтому стандартное время реверберации приходится сначала рассчитывать, а затем настраивать комнату, контролируя результаты настройки измерениями. В связи с трудоемкостью этого процесса возникла потребность в упрощении процедуры таких измерений. Предлагаемый мной метод позволяет это легко сделать, если отказаться от вычислений времени реверберации и ограничиться определением двух значений радиуса гулкосты, представляющих собой, исходя из требований, записанных в выражении (5), допустимые пределы:

$$\text{от } r_H(\min) = 0,084 \sqrt{V} \text{ до } r_H(\max) = 0,087 \sqrt{V} \quad (6)$$

В области высоких и средних частот настройку звукопоглощения в комнате производят добавлением (изъятием) штор или занавесок. Недостающее звукопоглощение на низких частотах достигается в результате сооружения щитов Бекеши или панелей резонансного поглощения звука. Аномальное повышение времени реверберации в какой-нибудь узкой полосе частот устраняется размещением настроенных на эти частоты полых резонансных поглотителей.

Хотя на частотах ниже 250 Гц допуск на время реверберации не очень жесткий, тем не менее, и в этом диапазоне настройка комнаты должна быть сделана как можно более тщательно.

**Третий этап.** Акустические измерения для нахождения оптимального местоположения громкоговорителей и слушателя в комнате прослушивания

На этом этапе измерения производят, когда строительство комнаты прослушивания, включая ее заглушение, полностью закончено и вам осталось разобраться, где наилучшим образом разместить громкоговорители вашей аудиосистемы и в каком месте должен находиться слушатель.

С объективистской точки зрения размещение громкоговорителей и слушателя является правильным, когда:

- в районе головы слушателя нет вредных отражений звука, то есть таких, которые запаздывают относительно начала прямого звука менее чем на 3 мс <sup>[4]</sup> ;

- неравномерность общей АЧХ стереопары громкоговорителей, вызванная их взаимодействием между собой и с комнатой прослушивания, минимальна.

Определять с помощью измерительных приборов время прихода отражений нет необходимости. Их просто нужно исключить, воспользовавшись правилом:

**Удаленность громкоговорителей, а также слушателя от границ помещения должно быть такой, чтобы длина прямого пути звука от любого громкоговорителя до головы слушателя была минимум на 1 м (но не более 10 м) меньше длины этого пути, включающего одно отражение звука от любой стены, потолка или пола.**

Это требование может быть выполнено аудиофилом самостоятельно. Для этого нужно на практике применить знания по геометрии, полученные в средней школе.

С определением неравномерности общей АЧХ громкоговорителей в комнате прослушивания дело обстоит намного сложнее. Чтобы разобраться в этом вопросе, придется в очередной раз углубиться в акустическую теорию.

Каждому понятно, что АЧХ громкоговорителя, измеренная в условиях комнаты прослушивания, не должна совпадать с измеренной в звукозаглушенной камере хотя бы потому, что в комнате микрофон улавливает не только прямое излучение громкоговорителя, но и создаваемое им поле реверберации. К сожалению, этого чисто качественного знания недостаточно для практического применения, а потому нам придется остановиться на физических аспектах этого явления более подробно. Сначала вспомним (см. выражение (2)), что интенсивность прямого излучения громкоговорителя при удалении от него убывает пропорционально квадрату расстояния, тогда как интенсивность поля реверберации от расстояния не зависит. Когда расстояние между микрофоном и громкоговорителем становится больше радиуса гулкостности ( $r > r_H$ ), интенсивность поля реверберации начинает доминировать в результатах измерений. Этот случай соответствует условиям прослушивания музыки через аудиоаппаратуру, ведь расстояние между громкоговорителем и слушателем обычно составляет от 2 до 3 радиусов гулкостности. Это очень важное утверждение, так как оно открывает глаза на то, что слушатель, а, следовательно, и микрофон, с помощью которого мы собираемся производить измерения, находятся в практически "чистом" поле реверберации. Именно поэтому АЧХ громкоговорителя, измеренная в комнате с места, где сидит слушатель, представляет нам уже не громкоговоритель, а систему *громкоговоритель - комната*.

Последнее утверждение не означает, что эту общую АЧХ можно объявить *суммарной* для громкоговорителя и комнаты прослушивания [8]. Даже когда комната прослушивания не вносит искажений в общую АЧХ (гипотетический случай, когда АЧХ комнаты *линейная*), характеристика громкоговорителя, прописанная в условиях реверберации, все равно будет значительно отличаться от полученной в звукозаглушенной камере.

Объясняется это тем, что измеренная в камере АЧХ учитывает только осевое излучение громкоговорителя, то есть в направлении линии, соединяющей его и микрофон, тогда как АЧХ в поле реверберации *интегрирует* излучение громкоговорителя во всех направлениях, благодаря отражениям от стен, пола и потолка. Чтобы не возникало терминологической путаницы, АЧХ, измеренную в звукозаглушенной камере, далее будем называть *осевой*, а прописанную в поле реверберации - *мощностной* [9].

В области средних и высоких частот различие между мощностной и осевой АЧХ возникает из-за неодинаковой роли направленности громкоговорителя в формировании сопоставляемых характеристик. В мощностной АЧХ, на частотах, где направленность обострена, образуются провалы, которых на осевой характеристике нет. У реальных громкоговорителей провалы наблюдаются в окрестности частот разделения полос излучения, когда характеристика направленности громкоговорителя сужается с повышением частоты, а затем, при переходе на более высокочастотную головку, резко расширяется.

Проявившиеся на мощностной характеристике провалы не являются чисто метрологическими

фокусами. Они ощущаются как *окраска* звучания на частотах стыков полос. Избавиться от этих фокусов путем специальной настройки комнаты нельзя. Выход только один: приобрести новую акустическую систему с равномерной мощностной АЧХ на средних и высоких частотах.

Думаю, у читателей уже не осталось сомнений в том, что мощностная АЧХ громкоговорителей более адекватна слуховому восприятию, чем осевая.

В области низких частот несоответствие мощностной АЧХ осевой характеристике объясняется взаимодействием громкоговорителя с *мнимыми* источниками звука, которые образуются в результате зеркального отражения реального громкоговорителя в боковых стенах и в полу. Как я уже писал (см. "АМ" № 1 (36) 2001, с. 162), мнимые источники ведут себя точно так же, как настоящие. Они изменяют сопротивление излучения реального громкоговорителя, причем в зависимости от частоты. Эти изменения становятся еще большими, когда начинают взаимодействовать между собой громкоговорители стереосистемы. Из-за всех этих взаимодействий неравномерность низкочастотного участка мощностной АЧХ в комнате прослушивания может возрасти до 24 дБ. Понятно, что свалившаяся с неба неравномерность мощностной АЧХ нас не радует, но зато ее можно ослабить и, как оказалось, почти бесплатно, например, путем выбора расстояний от громкоговорителей до ближайших стен и пола, а также относительно друг друга. Но это уже тема акустической настройки аудиосистемы в комнате прослушивания (см. ниже), а пока обратимся к измерениям мощностной АЧХ громкоговорителей.

#### *Некоторые особенности измерения мощностной АЧХ*

При измерении осевой АЧХ обычно используют синусоидальный сигнал. При измерении мощностной АЧХ такой сигнал не пригоден. Винаваты в этом полчища собственных частот (резонансов) комнаты прослушивания, которые представляют собой тонкие, плотно расположенные пики, чередующиеся со столь же узкими провалами.

Даже при непрерывной записи мощностной АЧХ на самописце уровня очень трудно разглядеть в частотоле всех этих резонансов интересующую нас характеристику. Чтобы освободиться от этого частотола, необходимо отказаться от сигналов с точечным спектром и перейти к сигналам со сплошным спектром, то есть вместо синусоидального нужно использовать либо частотно-модулированный (воющий) синусоидальный сигнал, либо третьоктавные полосы "розового" шума. Мы выбрали третьоктавные полосы "розового" шума, так как их можно воспроизвести с компакт-диска "АМ Тест-CD 1".

Другая вызывающая некоторые затруднения особенность: для измерений мощностной АЧХ требуется специальный вольтметр *среднеквадратичных значений* (СКЗ). Подавляющее большинство вольтметров переменного тока, оказывается, рассчитаны на измерение эффективных значений синусоидальных напряжений и не пригодны для измерения сложных, в том числе шумовых, сигналов из-за возникающих в этом случае погрешностей.

Вольтметр СКЗ не является редкостью, помимо существования множества так называемых RMS-измерителей зарубежного производства, его выпускали в СССР под маркой "ВЗ-40".

#### **Средства измерений**

Мощностную АЧХ в комнате прослушивания определяют, используя громкоговорители той аудиосистемы, через которую в дальнейшем вы намерены слушать музыку. Аудиосистема должна включать проигрыватель компакт-дисков, с помощью которого вам придется воспроизводить третьоктавные полосы "розового" шума с компакт-диска "АМ Тест-CD 1". Следует иметь также микрофон чувствительностью 3 мВ/Па с известной АЧХ в диапазоне частот от 31,5 Гц до 1 кГц и круговой характеристикой направленности, а также вольтметр СКЗ с диапазоном измеряемых напряжений 0,1-3 мВ.

#### **Процедура измерений**

Установите громкоговорители там, где, по вашему мнению (или по расчету), они должны стоять, а микрофон - в том месте, где вы собираетесь расположиться, чтобы слушать музыку. Подайте на оба громкоговорителя в режиме R+L "розовый" шум в полосе 200-1000 Гц (дорожка 27) и отрегулируйте громкость шума так, чтобы на вольтметре он был ниже максимума шкалы на 12 дБ, после чего воспроизведите третьоктавные полосы "розового" шума, начиная с дорожки 32 и заканчивая дорожкой 49. Последняя воспроизводит верхнюю частоту (1000 Гц) измеряемого диапазона.

В течение 30 с, то есть пока звучит каждая дорожка, вы можете успеть снять показания вольтметра, а также записать произносимую диктором среднегеометрическую частоту полосы шума. Нанесите измеренные значения на график зависимости уровня звука (в условных дБ) от частоты. Полученный график и есть мощностная АЧХ громкоговорителей вашей стереосистемы в комнате прослушивания.

#### **Расчет местоположения громкоговорителей и слушателя**

Зависимость излучаемой громкоговорителем мощности от частоты в реальном помещении одним из первых исследовал Л. Беранек [10]. Он определил (см. рис. 5), что при установке громкоговорителя в углу комнаты излучаемая им на низких частотах мощность возрастает более чем на 9 дБ, по сравнению с мощностью, которую излучает громкоговоритель, размещенный в центре комнаты. Позже эти явления подробно исследовал Р. Ф. Аллисон [11]. На его некоторые теоретические положения и результаты опытов я буду опираться далее.

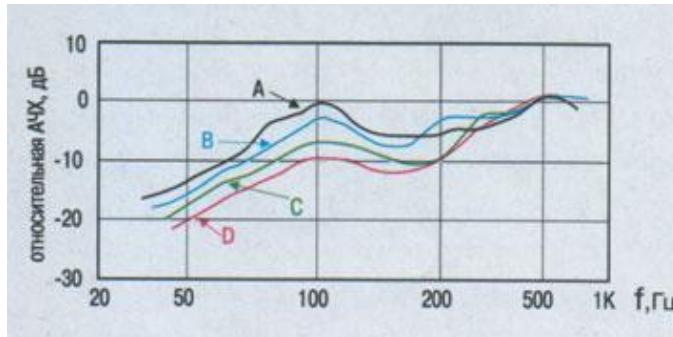


Рис. 5. АЧХ громкоговорителя, установленного в прямоугольном помещении в 4 позиции: А – в углу, В – у пола в середине стены, С – у центра стены, D – в центре комнаты.

Рассмотрение вопроса начнем со взаимодействия находящихся на расстоянии  $d$  двух синфазно работающих громкоговорителей закрытого типа. Из-за этого взаимодействия их сопротивление излучения меняется в зависимости от частоты, а, следовательно, и совместная мощностная АЧХ отличается от АЧХ одного громкоговорителя. Это отличие, которое выражено изменением уровня интенсивности  $\Delta L$  в зависимости от частоты, показано на рис. 6. Для удобства пользования частота на этом рисунке - *нормированная*, то есть представлена отношением расстояния  $d$  к длине волны звука  $\lambda$ .

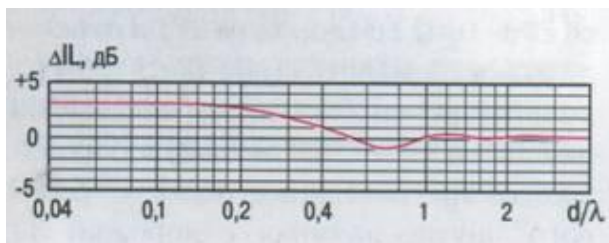


Рис. 6. Изменение мощностной АЧХ двух громкоговорителей, вызванное их взаимодействием на расстоянии  $d$  к длине звуковой волны  $\lambda$

Из рисунка видно, что при  $d > 0,5\lambda$  оба громкоговорителя излучают примерно столько же мощности, сколько они излучают в сумме, находясь отдельно друг от друга. Когда расстояние между громкоговорителями уменьшается так, что  $d < 0,5\lambda$ , суммарная акустическая мощность возрастет на 3 дБ, то есть становится больше суммы мощностей, излучаемых громкоговорителями отдельно друг от друга. Обратите внимание, что, несмотря на различие масштабов шкал, АЧХ на рис. 6 очень похожа на приведенную в "АМ" № 1 (36) 2001 (с. 163) зависимость *коэффициента излучения двух точечных источников звука* от произведения *волнового числа  $k$  на расстояние  $d$* .

Прирост акустической мощности на низких частотах аудиофилы обычно воспринимают как усиление и углубление баса и, следовательно, как главный аргумент в защиту стереофонии. Я бы с этим согласился, если бы не досадная мелочь: провал в мощностной АЧХ громкоговорителей в области  $\lambda > d > 0,5\lambda$ . Этот провал, который Аллисон называет "седловиной", в рассматриваемом случае составляет 1 дБ. Конечно, на него можно было бы не обратить внимания, но, как оказалось, в реальных условиях он часто достигает 12-14 дБ. Провал такой глубины может появиться из-за взаимодействия громкоговорителей между собой и еще с тремя *мнимыми* источниками звука, которые являются отображениями этих громкоговорителей в боковых стенах и в полу. Изгнать из комнаты прослушивания мнимые источники мы не в состоянии, так как не располагаем сверхэффективными поглотителями низких звуковых частот. Мы можем только частично управлять этими источниками, меняя расстояние от громкоговорителя до ближайших стен и пола.

Обозначим в связи с этим расстояние до задней стены буквой  $X$ , до боковой стены буквой  $Y$ , до пола буквой  $Z$ , а между громкоговорителями - как обычно, буквой  $d$ . Расстояние между действительным громкоговорителем и каждым мнимым источником определяется как  $d_X, Y, Z$

$$=2(X, Y, Z).$$

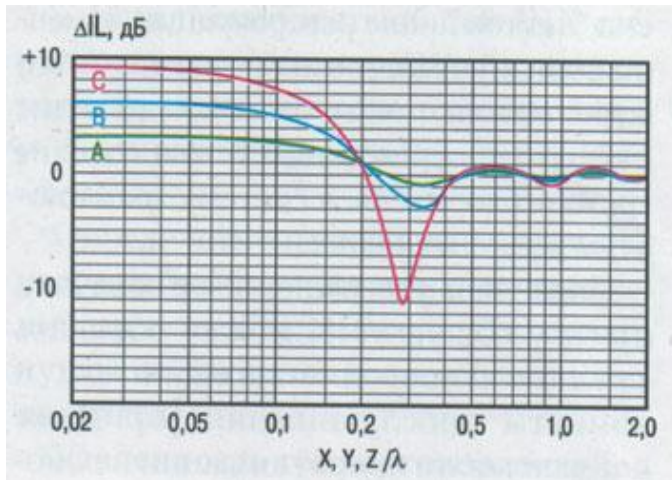


Рис. 7. Изменение мощностной АЧХ громкоговорителя, вызванное его взаимодействием с границами помещения: А – с одной стеной, расположенной на расстоянии  $X$ ; В – с двумя пересекающимися под прямым углом стенами на расстояниях  $X$  и  $Y$ ; С – с тремя взаимно перпендикулярными стенами на расстояниях  $X, Y, Z$ . Кривые В и С даны для случаев  $X=Y$  и  $X=Y=Z$  соответственно; ось частот выражена отношением расстояния от стен  $X, Y, Z$  к длине волны  $\lambda$ .

На графике (см. рис. 7), показана зависимость прироста излучаемой мощности  $\Delta IL$  от нормированной частоты  $F_{\text{н}} = X, Y, Z / \lambda$  для случаев, когда громкоговоритель взаимодействует с одним, двумя и тремя мнимыми источниками звука. Из этого графика видно, что каждое взаимодействие, независимо от размеров  $X, Y, Z$ , на частотах  $F_{\text{н}} < 0,05$  приводит к приросту на 3 дБ излучаемой громкоговорителем мощности.

Соотношение размеров  $X, Y$  и  $Z$ , как оказалось, влияет в основном на глубину упомянутого провала. Она максимальна и составляет 11,5 дБ при  $X = Y = Z$ , причем может увеличиться еще на 3 дБ, когда в аудиосистеме не один громкоговоритель, а два и если  $X = Y = Z = 0,5d$ . Подъем на 12 дБ и провал на 12-14 дБ - вот откуда взялась упомянутая мной выше неравномерность мощностной АЧХ - 24 дБ.

Повлиять на низкочастотный подъем мы не в состоянии. Удаляя громкоговоритель от стен и пола, мы только понизим частоту, с которой этот подъем начинается. Но у нас есть возможность свести к минимуму провал. Для этого размеры  $X, Y, Z$  и  $0,5d$  следует выбрать не равными друг другу. Возникает вопрос, что означает не равные? Ответ лежит на поверхности. Нужно компенсировать седловину, образующуюся из-за взаимодействия громкоговорителя с одним мнимым источником, нечетким максимумом, который возникает в результате взаимодействия этого громкоговорителя с другим мнимым источником. Такую компенсацию полезно сделать в каждой паре взаимодействующих источников звука. Как видно из рис. 7, для такой компенсации нужно среди размеров  $X, Y, Z$  и  $0,5d$ , произвольным образом взять две пары и затем установить в каждой из них отношение размеров равное 1,7. В комнате прослушивания такое соотношение может быть без затрат определено (см. рис. 8).

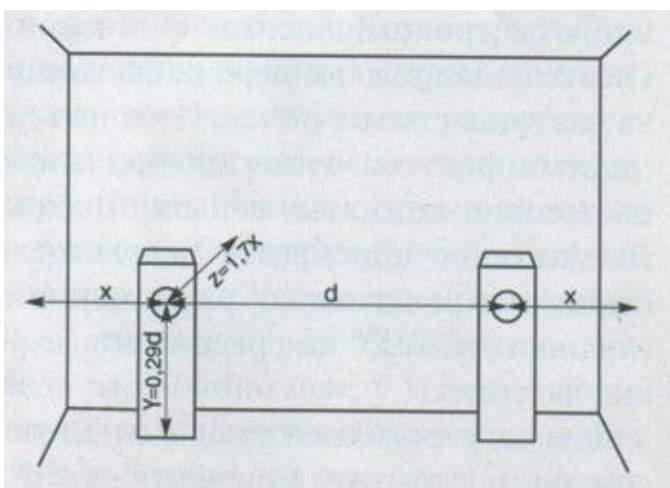


Рис. 8. Наилучшее соотношение размеров  $X, Y, Z, d$ , которого следует придерживаться при размещении стереосистемы в комнате прослушивания.

После того как громкоговорители установлены в рассчитанное положение, свободное соотношение между размерами  $X$  и  $Y$  (или  $Z$ , и  $d$ ) желательно уточнить по результатам измерений

общей мощностной АЧХ громкоговорителей, а еще правильнее - основываясь на оценке характера звучания басовых нот контрабаса и литавр.

Уточнения необходимы не только из-за приближенности приведенного мной расчета. Есть еще и не учтенные в расчете факторы, такие, например, как индивидуальная неравномерность АЧХ громкоговорителей, неоднородное распределение в комнате низкочастотных резонансов, плохо управляемое на низких частотах время реверберации и т. п. Уточнить расстояние до стен и пола придется также тогда, когда вы используете громкоговорители с пассивным излучателем или фазоинвертором.

И последнее, о чем я хотел рассказать, - это о местонахождении слушателя в комнате прослушивания. Хитростей в этом вопросе никаких нет. Слушатель должен находиться на равном расстоянии от громкоговорителей стереосистемы, причем угол между ними (с вершиной у его головы) должен составлять от 50 до 70°. Кроме того, он обязательно должен быть в зоне баланса

<sup>[6]</sup> амплитуд *четных* и *нечетных*, продольных, аксиальных стоячих волн. Сразу замечу, что этого баланса вы не получите, если попытаетесь расположиться в центре комнаты, так как там могут быть только нулевые амплитуды (узлы) нечетных стоячих волн. Требуемый баланс нужно искать, отступив от центра комнаты на расстояние, которое составляет 10-15% ее длины. Проще всего место этого баланса искать на слух. Проиграйте через аудиосистему запись органной музыки, и, двигая кресло, в котором вы сидите, взад и вперед, добейтесь приемлемой *артикуляции* и *легкости* звучания баса.

### Литература

1. *Toole F. E., Olive S. E.* The Modification of Timbre by Resonances: Perception and Measurement, J. Audio Eng. Soc., Vol. 36, #3, 1968, pp. 122-141.
2. *Стретт Дж. В. (ЛордРэлей)*. Теория звука т. 1, М., ГИТТЛ, 1955, с. 23.
3. *Морз Ф.* Колебания и звук. М., ГИТТЛ, 1949, с. 424-425.
4. *Беранек Л.* Акустические измерения. М., ИЛ, 1952, с. 542-564.
5. *Лихницкий А.* Качество звучания. Новый подход к тестированию аудиоаппаратуры. Л., "Пик", 1998, с. 33.
6. *Кремер Л.* Объем информации, требуемый для акустической характеристики помещения/в сб. Проблемы современной акустики. М., Изд-во Академии наук СССР, 1963, с. 137-140.
7. AES recommended practice for professional audio – Subjective evaluation of loudspeaker. – J. Audio Eng. Soc., Vol. 44, #5, 1996, pp. 386-401.
8. *Контюрн Л.* Акустика в строительстве. М., Госстройиздат", 1960, с. 137.
9. *Allison R., Berkovitz R.* The Sound Field in Home Listening Rooms. – J. Audio Eng. Soc., Vol. 20, #6, 1972, pp. 439-469.
10. *Beranek L.* Acoustics. – McGrawHill, N.Y., 1954, p. 320.
11. *Allison R.* The Influence of Room Boundaries on Loudspeaker Power Output. – J. Audio Eng. Soc., Vol. 22, #5, 1974, pp. 314-319.





Меломаны в комнате прослушивания. Слева направо:  
А. Лихницкий, И. Кузьменко, В. Волков

[1]

Для этих целей годится микрофон типа *приемник градиента давления*, его характеристика направленности имеет вид восьмерки. Ленточные микрофоны с такой характеристикой выпускались в СССР заводом "Октава". Подробно о направленных и ненаправленных микрофонах см. в "АМ" № 4 (5) 95, с.69-71

[2]

Узлы - это зоны в стоячей волне, где звуковое давление равно нулю, а колебательная скорость частиц воздуха максимальна.

[3]

В последнее десятилетие вместо дорогостоящих самописцев уровня стали применять специальным образом запрограммированные персональные компьютеры.

[4]

3 мс - это время запаздывания, достаточное для того, чтобы первые отражения не были слышны, так как попадают в зону действия эффекта Хааса. Об этом эффекте см. в "АМ" № 2 (37) 2001, с. 159

[5]

Рой Аллисон известен тем, что сконструировал в 1970-х годах акустическую систему "AR-3a".

[6]

Четные продольные аксиальные стоячие волны - это когда в формуле (1)  $p_x = 2, 4, 6, \dots$ , а нечетные - когда  $p_x = 1, 3, 5, \dots$