

# Акустическая аппаратура для озвучения

## Часть 2. Рупорные громкоговорители

**И.А. Алдошина**

Первая часть этой статьи была посвящена анализу основных элементов конструкции рупорных громкоговорителей (а именно – формы и размеров рупоров) и оценке их влияния на выходные характеристики. В этой части мы продолжим рассматривать принципы работы остальных элементов рупорных громкоговорителей, таких как предрупорная камера, излучатель (драйвер), тепло Венте и т.д., а также остановимся на основных видах рупорных громкоговорителей, используемых различными фирмами в современной практике озвучения, звукоусиления и при проектировании бытовых и профессиональных акустических систем.

**Предрупорная камера:** поскольку излучаемая акустическая мощность громкоговорителя зависит от активного сопротивления излучения и колебательной скорости излучателя, то для ее увеличения в узкогорлых рупорных громкоговорителях используется принцип акустической трансформации сил и скоростей, для чего размеры горла рупора в несколько раз уменьшают по сравнению с размерами излучателя. Образующийся объем между диафрагмой и горлом рупора 3 называется предрупорной камерой (рис. 1). Можно условно представить ситуацию в предрупорной камере как колебания поршня, нагруженного на широкую трубу площадью  $S_1$ , переходящую в узкую трубу  $S_0$  (рис. 2). Если бы поршневая диафрагма была нагружена только на широкую трубу с площадью, равной площади диафрагмы (как в случае широкогорлого рупора), то ее сопротивление излучения было бы равно  $R_{изл} = \rho c S_1$  и излучаемая ею акустическая мощность приблизительно была бы равна  $P_a = 1/2 R_{изл} v_1^2 = 1/2 \rho c S_1 v_1^2$  (эти соотношения строго выполняются только для плоской волны, но могут при определенных допущениях применяться и в данном случае).

При установке диафрагмы в предрупорную камеру, т.е. при нагрузке ее на трубу с узким входным отверстием, возникает дополнительное сопротивление (импеданс) колебаниям диафрагмы (за счет отраженной волны, появляющейся на стыке двух труб).

Величина этого импеданса  $Z_L$  (отнесенного к месту входа во вторую трубу, т.е. при  $x = L$ ) равна:

$$Z_L = (S_1^2/S_0^2) S_0 \rho c = (S_1/S_0) S_1 \rho c.$$

Она может быть определена из следующих соображений: если допустить, что воздух в предрупорной камере несжимаем, то давление  $p$ , которое создается в камере при действии силы  $F_1$  на поршень (диафрагму)

площадью  $S_1$ , передается воздуху в горле рупора и обуславливает силу  $F_0$ , действующую в горле рупора с площадью  $S_0$ :

$$p = F_1/S_1, F_0 = p S_0.$$

Отсюда получаются следующие соотношения:  $F_1/S_1 = F_0/S_0, F_1/F_0 = S_1/S_0$ . Отношение площади излучателя к площади горла рупора  $S_1/S_0$  называется коэффициентом акустической трансформации и обозначается  $n$ . Следовательно, отношение сил можно представить как:  $F_1 = n F_0$ . Из условия равенства объемных скоростей диафрагмы и воздуха в устье рупора (т.е. из условия сохранения объема воздуха, вытесняемого диафрагмой при смещениях из предрупорной камеры) получаются соотношения  $S_1 v_1 = S_0 v_0$  или  $v_0/v_1 = S_1/S_0 = n$ , которые позволяют сделать следующий вывод: диафрагма под действием большей силы ( $F_1 > F_0$ ) колеблется с меньшей скоростью ( $v_1 < v_0$ ), значит, она испытывает большее сопротивление среды при колебаниях. Значения  $Z_L$  в таком случае (учитывая, что

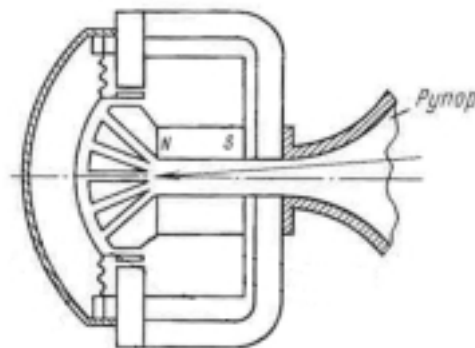


Рис. 1. Пример предрупорной камеры

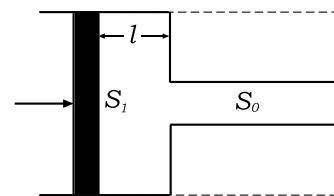


Рис. 2. Поршень, нагруженный на трубы разного диаметра

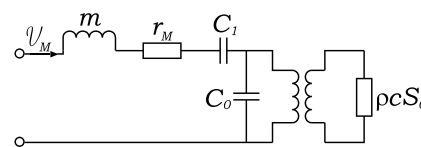


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема рупорного громкоговорителя

Примечание. Начало см. «Install Pro», 2003, №2 (21)

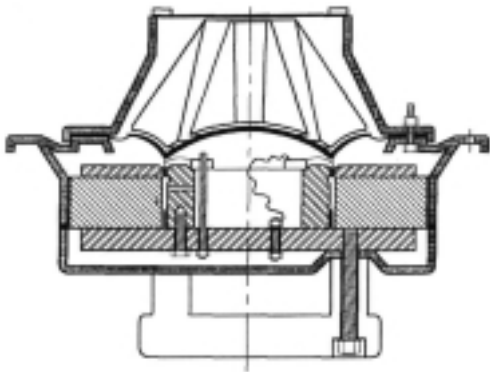


Рис. 4. Конструкция купольного драйвера

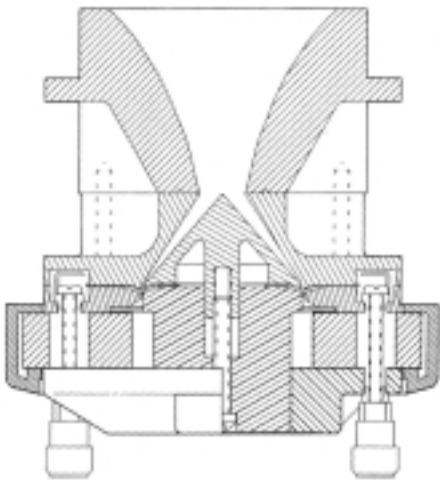


Рис. 5. Конструкция кольцевого драйвера

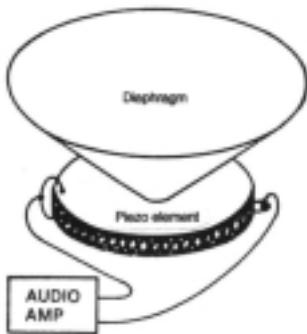


Рис. 6. Пьезоэлектрический драйвер

ющего трансформатора, что видно на соответствующей эквивалентной электрической схеме (рис. 3).

Следовательно, при наличии дополнительного сопро- тивления излучаемая акустическая мощность уве- личится и будет равна:

$$P_a = 1/2 \rho c Z_L = 1/2 \rho c S_1 v_1^2 (S_1/S_0).$$

Таким образом, использование акустической трансформации за счет предрупорной камеры позво- ляет увеличить акустическую мощность в  $(S_1/S_0)$  раз, что существенно повышает эффективность работы рупор- ного громкоговорителя. Величина коэффициента аку- стической трансформации ограничена, так как она зави- сит от площади излучателя ( $S_1$ ) и площади горла рупора ( $S_0$ ). Увеличение площади излучателя связано с возра- станием его массы. Излучатель большой массы имеет на верхних частотах большое инерциальное сопроти- вление, которое становится соизмеримым с сопротивле- нием излучения. В результате на верхних частотах уменьшается колебательная скорость, следовательно, и акустическая мощность. Коэффициент акустической трансформации увеличивается при уменьшении площа- ди горла рупора, но это также допустимо только в опре- деленных пределах, так как приводит к росту нелиней- ных искажений. Обычно коэффициент акустической трансформации выбирают порядка 15 – 20.

Эффективность рупорного громкоговорителя мож- ет быть приблизительно оценена по формуле:

$$КПД = 2R_E R_{ET} / (R_E + R_{ET})^2 \cdot 100\%,$$

где  $R_E$  – активное сопротивление звуковой катушки;

$R_{ET} = S_0(BL)^2 / \rho c S_1^2$ , где  $B$  – индукция в зазоре;  $L$  – длина проводника. Максимальное КПД равно 50% достигается, когда  $R_E = R_{ET}$ , что на практике получить не удается.

**Излучатель**, используемый для рупорных громкого- ворителей, представляет собой обычный электродина- мический громкоговоритель. Для широкогорлых рупоров (без предрупорной камеры) – это мощный низкочастот- ный громкоговоритель. Широкогорлые рупоры часто ис- пользуются сейчас в качестве низкочастотного оформле- ния в ряде конструкций акустических агрегатов, кино- театральных мощных акустических систем и др.

В узкогорлых рупорных громкоговорителях приме- няются специальные типы электродинамических гром- коговорителей (обычно они называются драйверы). Пример конструкции показан на рис. 4. Как правило, они имеют купольную диафрагму из жестких материа- лов (титановая, бериллиевая, алюминиевая фольга, пропитанная стеклоткань и др.), изготовленную вместе с подвесом (синусоидальной или тангенциальной гофри- ровки). К наружному краю диафрагмы крепится звуко- вая катушка (каркас из алюминиевой фольги или жест- ких видов бумаги с двух- или четырехслойной намот- кой). Подвес закрепляется специальным кольцом на верхнем фланце магнитной цепи. Кроме купольных, иногда применяют диафрагмы других видов, например кольцевые (пример такого драйвера модели 2490 фир- мы JBL показан на рис. 5). Диафрагма, имеющая в этом случае вид жесткого кольца, излучает через узкую кру- говую щель. Такие кольцевые драйверы позволяют обеспечить высокое КПД (до 30%), но выдерживают

импеданс по определению есть отношение силы к ско- рости колебаний  $Z_L = F_1/v_1$  будут равны с учетом выше- приведенных соотношений:

$$Z_L = F_1/v_1 = S_1 p/v_1 = S_1 p/(v_0 S_0/S_1) = (S_1^2/S_0^2) S_0 p/v_0. (*)$$

Если бы поршень стоял на входе узкой трубы, то его сопротивление было бы равно  $R_{изл} = \rho c S_0$ , при этом по определению  $R_{изл} = F_0/v_0 = S_0 p/v_0$ , т.е.  $S_0 p/v_0 = \rho c S_0$ , подставив это выражение в формулу (\*), получим ука- занное выше соотношение:

$$Z_L = (S_1^2/S_0^2) S_0 \rho c = (S_1/S_0) S_1 \rho c.$$

Такое умножение импеданса  $\rho c S_0$  на коэффициент  $(S_1^2/S_0^2)$  эквивалентно применению некоторого понижа-

подводимую мощность не более 25 Вт, поэтому их применяют в основном для высокочастотных громкоговорителей.

Самым дешевым вариантом драйвера для высокочастотных рупорных громкоговорителей является пьезоэлектрический преобразователь, принцип действия которого показан на рис.6. В нем переменный сигнал подается на пьезоэлектрический элемент, в котором под действием тока происходят механические колебания, за счет чего возбуждается прикрепленная к нему диафрагма, соединенная с рупором.

**Тело Венте:** одной из причин ограничения частотного диапазона в области высоких частот у рупорных громкоговорителей является то, что звуковые волны, приходящие от разных частей диафрагмы, могут оказаться в противофазе, и это приводит к уменьшению звукового давления в горле рупора. Для предотвращения этого еще в 30-е годы E. Wente предложил специальную конструкцию акустической линзы, или противоинтерференционный вкладыш, являющийся частью конструкции купольного драйвера на рис. 4. Его применение позволяет выровнять сдвиги фаз от разных частей диафрагмы и расширить таким образом частотный диапазон. Тело Венте изготавливается в виде вкладыша со специальными прорезями (формы их могут варьироваться), который обычно отливается из пластмассы.

Методы расчета рупорных громкоговорителей в области низких частот главным образом используют теорию Thiele-Small (основанную на методе электромеханических аналогий), на которой построены методики расчета обычных диффузорных громкоговорителей. В частности, измерение параметров Thiele-Small для драйвера (о методах их измерений было рассказано в предыдущих статьях «Акустические измерения») позволяет оценить форму АЧХ для низкочастотных рупорных громкоговорителей. На рис. 7 показана форма АЧХ, где частоты перегиба кривой определяются следующим образом:

$$f_{LC} = (Q_{ts}f_s)/2; f_{HM} = 2f_s/Q_{ts}; f_{HVC} = R_e/\pi L_e;$$

$$f_{HC} = (2Q_{ts})f_s V_{as}/V_{fs},$$

где  $Q_{ts}$  – общая добротность;  $f_s$  – резонансная частота излучателя;  $R_e$ ,  $L_e$  – сопротивление и индуктивность звуковой катушки;  $V_{as}$  – эквивалентный объем;  $V_{fs}$  – объем предрупорной камеры.

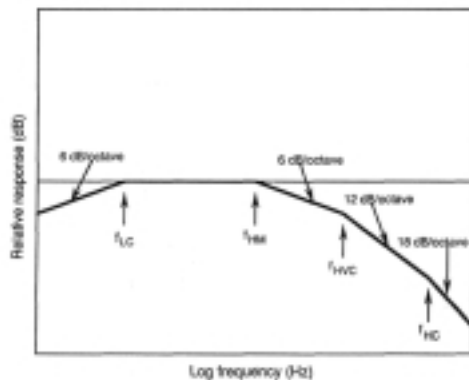


Рис. 7. Форма АЧХ низкочастотного рупорного громкоговорителя

Основное внимание в докладах на конгрессах AES и в многочисленных статьях уделяется проблемам нелинейных искажений в рупорных громкоговорителях, причины возникновения которых объясняются как обычными процессами, происходящими в громкоговорителях: нелинейным взаимодействием звуковой катушки с магнитным полем, нелинейной гибкостью подвеса и др., так и особыми причинами, а именно высоким давлением в горле рупора. При обычном уровне характеристической чувствительности на расстоянии от устья рупора 1 м порядка 105 – 110 дБ/Вт/м в горле рупора развивается давление до 150 дБ и более. При таком давлении начинают сказываться термодинамические эффекты, нелинейная компрессия воздуха в предрупорной камере, а также искажения формы звуковой волны по мере распространения ее вдоль рупора. Звуковая волна представляет собой, как известно, чередования зон сжатия и разрежения, распространяющихся в воздухе с одинаковой скоростью. При больших уровнях звукового давления сжатия имеют большую скорость распространения, чем разрежения, что и приводит к искажению формы фронта волны, которое вызывает появление нелинейных искажений как гармонических, так и интермодуляционных. Причем измерения показали, что величины этих искажений могут быть довольно значительны. Волна искажается тем сильнее, чем больше давление в горле рупора, поэтому нельзя выбирать очень узкое горло (коэффициент трансформации и берется поэтому в пределах 15 – 20). Кроме того, искажения формы волны возрастают при медленном расширении рупора, так как при этом зоны сжатия успевают значительно сместиться относительно разрежений, а также при увеличении частоты, так как длина волны уменьшается и уже небольшое относительное перемещение зоны сжатия сильно искажает форму волны. Еще в 90-е годы фирма JBL разработала новую форму высокочастотного рупора с более быстрым расширением площади сечения (с большим показателем расширения), что позволило снизить уровень второй гармоники на 10 дБ. Поскольку этот принцип нельзя применить к низкочастотным рупорам по причинам, о которых уже было сказано выше, в современных мощных рупорных системах для озвучения используется многополосный принцип построения с разными конструкциями рупоров для низко-, средне- и высокочастотного диапазонов.

Полный расчет структуры звукового поля, излучаемого рупорными громкоговорителями, в том числе с учетом нелинейных процессов, производится численными методами (МКЭ или МГЭ), например с помощью пакета программ <http://www.users.bigpond.com/dmcbean/>

В современной звукотехнике используется большое количество рупорных громкоговорителей таких известных фирм, как JBL, Altec Lansing, Community, Klipsch, Reavey, Funktion One и др.

В этих громкоговорителях применяется огромное многообразие форм рупоров, основные из которых следующие:

- экспоненциальный рупор используется в большинстве рупорных громкоговорителей для озвучения открытых пространств (улиц, площадей и др.) и для служебной связи (например, в мегафонах), поскольку это



Рис. 8. Экспоненциальный рупор

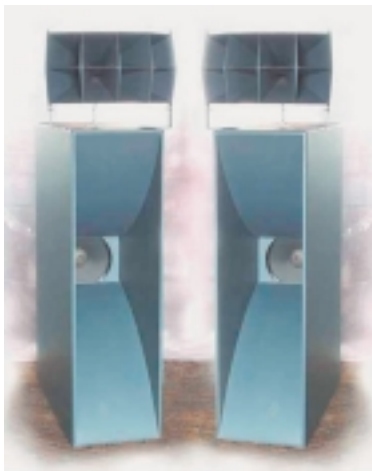


Рис. 9. Секционные рупоры

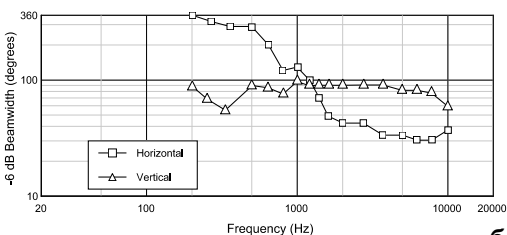
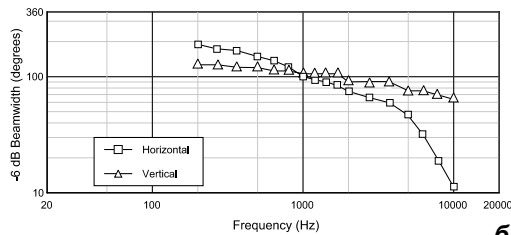


Рис. 10. Радиальный рупор: а – пример конструкции; б – ширина диаграммы направленности на разных частотах



а



б

Рис. 11. Дифракционный рупор: а – форма рупора; б – ширина диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскости

наиболее технологичный для производства тип рупора. Примером могут служить отечественные модели 50ГРД9, 100ГРД-1 и др. (рис. 8);

- *секционные* рупоры были разработаны еще в 30-е годы для борьбы с обострением характеристики направленности на высоких частотах (рис. 9). В течение почти 20 лет они широко применялись, например, в кинотеатрах. Секционный рупор состоит из некоторого количества рупоров сравнительно небольших размеров, соединенных вместе горлами и устьями. При этом их оси оказываются развернутыми в пространстве веером, хотя направленность каждой ячейки обостряется с частотой, общая направленность группового излучателя в вертикальной и горизонтальной плоскостях остается достаточно широкой. Правда, с повышением частоты появляется сильная изрезанность полярной диаграммы в горизонтальной плоскости с неравномерностью до 10 дБ, что ухудшает однородность покрытия слушательской зоны;

- *радиальный* рупор имеет различную кривизну по разным осям (рис.10 а, б): в горизонтальной плоскости прямые стенки заканчиваются дугами окружности, в вертикальной стенки изменяются по экспоненциальному закону. Ширина диаграммы направленности показана на рис. 10 б, из которого видно, что в горизонтальной плоскости она почти постоянна, в вертикальной – уменьшается с частотой. Обычно такие рупоры обеспечивают покрытия 90 x 40° или 60 x 40°. Фирма Altec Lansing разработала особую конструкцию радиального рупора с перегородками внутри устья для расширения ХН в определенной области частот. В основном рупоры отливают из алюминия, пластмассы или стеклопластика. Радиальные рупоры часто применяются в современных студийных мониторах, кроме того, в кинотеатральных системах и т.д.;

- *дифракционный* рупор является особой разновидностью радиального. Он имеет очень узкую ширину устья в вертикальной плоскости. В горизонтальной (пер-

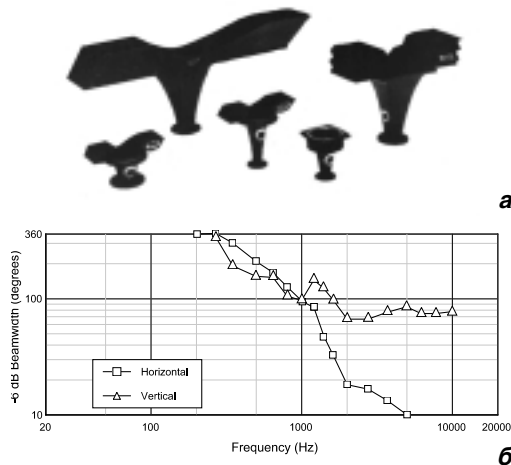


Рис. 12. Акустические линзы: а – форма; б – ширина диаграммы направленности

пендикулярной к узкой щели) – широкую и почти постоянную диаграмму направленности, в вертикальной – более узкую. Варианты таких рупоров часто используются в современной звукоусилительной технике, например, фирма JBL выпускала целую серию таких рупоров. Модель 2397 с углом раскрытия устья  $120^\circ$  и ее характеристика направленности показаны на (рис. 11 а, б);

- акустические рассеивающие линзы (рис. 12 а, б), которые для расширения характеристики направленности в рупорных громкоговорителях в 50-60-е годы предложила фирма JBL и начала широко применять в своих студийных мониторах, представляют собой либо набор наклонных пластин, либо набор перфорированных пластин, которые, как и оптические линзы, служат для рассеивания звука. Звуковая волна, выходящая из центра, и звуковые волны, проходящие через лабиринт слоев боковых пластин, складываются с определенной задержкой во времени. Это позволяет сформировать довольно широкую характеристику направленности в горизонтальной плоскости, но узкую – в вертикальной, что допустимо в мониторах, поскольку они используются в узкой вертикальной зоне (звукорежиссер обычно сидит за пультом). Необходимо отметить, что на низких частотах, чтобы этот эффект был заметен, линзы должны быть достаточно больших размеров, поэтому их применяют в основном в высокочастотных громкоговорителях;

- рупоры равномерного покрытия были впервые предложены в 1975 г. фирмой Electro-Voice как результат многолетнего исследования, выполненного под руководством D.Keele. Целью работ было оптимизировать форму рупора таким образом, чтобы получить широкую и постоянную по частоте ширину характеристики направленности как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях. Форма рупора представляла собой соединение гиперболической поверхности у горла с конической у устья, причем для регулировки характеристики направленности в области средних частот на кромках были установлены наклонные фланцы. Такая форма рупоров позволила получить практически постоянную ширину характеристики направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Работа D.Keele послужила

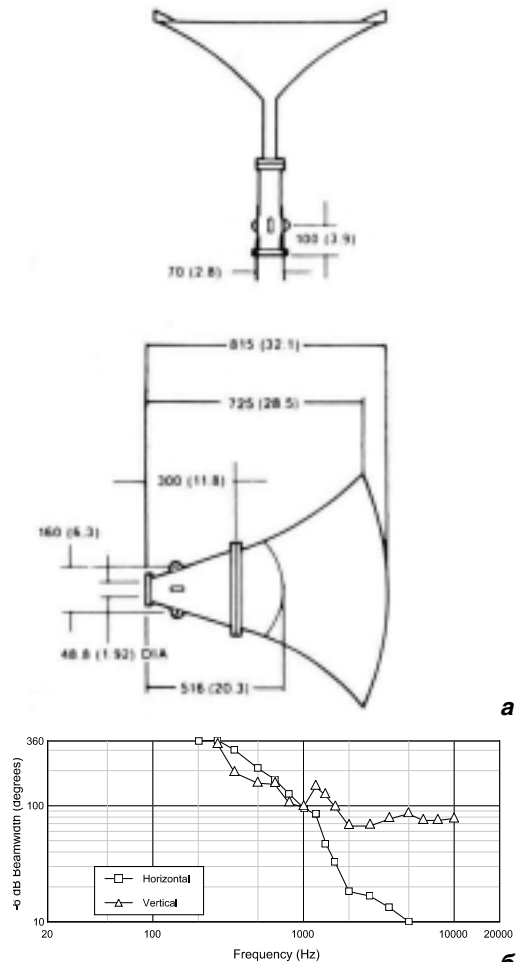


Рис. 13. Рупоры равномерного покрытия: а – форма; б – ширина характеристики направленности

толчком для дальнейшего развития этой идеи, в результате появились рупоры с уменьшенной шириной устья в вертикальной плоскости для снижения дифракционных эффектов, которые получили название *Manta-Ray*-рупоры. Примеры таких рупоров конструкции фирмы Altec Lansing и их характеристики направленности показаны (рис. 13 а, б). Рупоры такой сложной геометрической формы обычно изготавливаются из стеклопластика. D.Keele, продолжая свои работы уже на фирме JBL, усовершенствовал форму фланцев на рупорах *Manta-Ray* для снижения дифракционных погрешностей и получил рупоры, которые стали называться *бирадиальными*. В настоящее время многие фирмы с помощью компьютерного моделирования отработали различные конструкции рупоров равномерного покрытия, которые широко используются в системах звукоусиления.

Существует довольно простая связь между частотой  $f_0$  (Гц), на которой рупор такого типа может достичь желаемого угла раскрытия  $\theta^\circ$ , и размерами устья  $h$  (см):

$$f_0 = 10^6 / (2,54\theta h),$$

например, если взять рупор с размерами устья 78,74 см в горизонтальной плоскости, то угол покрытия  $90^\circ$  (со спадом -6дБ) можно получить от этого рупора, начиная с частоты 358 Гц, что совпадает с данными на



Рис. 14. Низкочастотный свернутый рупор



Рис. 16. Свернутый рупор с фазоинвертором

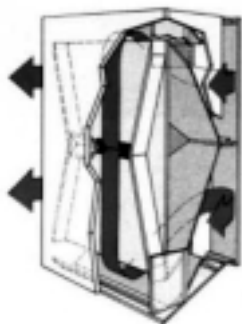


Рис. 15. Структура системы Klipshorn



Рис. 17. Свернутый рупор системы Lowther



Рис. 18. Портальная рупорная система

рис. 13 б. Если размер рупора в вертикальной плоскости так же составляет 78,74 см, то угла покрытия 40° можно достичь, начиная с частоты 806 Гц, что тоже совпадает с данными рис. 13.

Существует еще одна особенность рупоров равномерного покрытия: поскольку у них индекс направленности остается постоянным в широком диапазоне частот, то для компенсации спада АЧХ на высоких частотах за счет инерционности диафрагмы желательнее увеличивать подводимую мощность на высоких частотах, т.е. сделать некоторую коррекцию АЧХ.

Однако основное достоинство рупоров такого типа, а именно обеспечение стабильной ширины характеристики направленности в широком диапазоне частот, дает им большие преимущества для применения в системах озвучения.

Перечисленные выше конструкции рупоров используются главным образом для воспроизведения средних и высоких частот. При воспроизведении низких частот с помощью рупорных громкоговорителей возникают серьезные проблемы, так как снижение критической частоты требует значительного увеличения длины и размеров устья рупора. Поскольку рупорные громкоговорители стали широко применяться в концертно-театральных системах (например, в порталных системах) и других системах озвучения, то стремление снизить нижнюю частоту диапазона привело к созданию особой формы низкочастотных рупорных громкоговорителей со свернутыми рупорами;

- *свернутый рупор* – это компромисс между сохранением большой длины рупора и приемлемыми габаритами. Для этого длинный рупор как бы разделяется на несколько частей, и одна часть вкладывается в другую, создается своего рода лабиринт. Типичный пример показан на рис. 14. Свернутые рупоры нашли широкое применение в профессиональных акустических систе-

мах, одним из пионеров их использования был Paul Klipsh, создавший знаменитую систему Klipshorn, попеременный разрез которой показан на рис. 15. Система предназначена для установки в углу комнаты, камера сзади за излучателем создает дополнительное сопротивление и тем самым увеличивает отдачу на низких частотах. Акустические системы такого типа выпускаются этой фирмой вплоть до настоящего времени. Пример такой конструкции с дополнительным фазоинвертором, используемым для низкочастотных блоков, показан на рис. 16. Еще одним интересным направлением в применении свернутых рупоров являются рупоры типа *tractrix*, изобретенные P.Voigt еще в 30-е годы, которые начали применяться английской компанией Lowther и продолжают выпускаться до настоящего времени, причем акустические системы с такими рупорами высоко ценятся за хорошее качество звучания. Пример расположения свернутого рупора показан на рис. 17. Интересная конструкция свернутого рупора, в котором выдержаны только прямые угловые соединения, что сильно облегчает его производство, была предложена еще в 1956 г. и успешно используется в низкочастотных блоках систем Hi-Fi.

В большинстве конструкций современных мощных профессиональных систем применяются низкочастотные широкогорлые рупоры в качестве оформления, при этом еще часто добавляется фазоинвертор. Широкогорлые рупоры используются без предрупорной камеры, поэтому они не могут обеспечить значительного повышения эффективности, но конструктивно могут быть достаточно короткой длины, имеют более широкий низкочастотный диапазон и меньшие нелинейные искажения. Пример мощной порталной системы (рис. 18) показывает, что рупорные громкоговорители используются для всех четырех полос воспроизведения как низкочастотные (широкогорлые свернутые), так и средне-, высоко-



*Рис. 19. Контрольный агрегат фирмы Genelec*



*Рис. 20. Современный дизайн бытовых рупорных АС*

частотные (узкогорлые, секционные, радиальные и др.). В практике озвучения больших концертных залов, дискотек, стадионов и др. применяются также подвесные комплекты рупорных громкоговорителей, называемые *кластерами*.

Рупорные громкоговорители широко используются не только для АС, предназначенных для систем звукоусиления, но даже в контрольных агрегатах, где требования к качеству звучания очень высоки, особенно часто их применяет фирма JBL. Причем в связи с новой идеологией создания «бессредных» контрольных комнат, одним из инициаторов которой является Филип Ньюэлл, такие контрольные агрегаты особенно часто применяются для цифрового звука, так как обеспечивают высокую чувствительность, большой динамический диапазон и широкую высокочастотную полосу воспроизведения, что очень важно в условиях почти полного звукопоглощения в таких комнатах. Интересно, что фирма Genelec в своих контрольных агрегатах также применяет принцип рупорного построения корпуса, получившего название Wave-guide (рис. 19), т. е. это фактически аналог широкогорлого рупора, используемого для формирования характеристик направленности.

Рупорные громкоговорители часто используются в служебной связи, а также в бытовых акустических системах, что позволяет создать иногда весьма причудливый дизайн (рис. 20).