

В. В. Фурдуев

**Акустика звукового
кинопоказа**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 791.43/45
ББК 85.38
В11

B11 **В. В. Фурдуев**
Акустика звукового кинопоказа / В. В. Фурдуев – М.: Книга по Требованию,
2021. – 110 с.

ISBN 978-5-458-43527-7

Предлагаемая книга охватывает комплекс вопросов прикладной акустики, связанных с техникой звукового кинопоказа. Первую часть книги составляет описание устройства и действия громкоговорящей аппаратуры, применяемой в звуковых кинотеатрах, то есть диффузорных и рупорных громкоговорителей электродинамического типа. Ко второй части относится акустика зрительного зала (включая сюда и технику изоляции зала от посторонних шумов). Авторставил перед собою задачу: разъяснить возможно более подробно физическую сущность тех акустических явлений, с которыми мы встречаемся в звуковой кинопроекции. Несомненно, что лишь отчетливое понимание физической сущности дела дает возможность технику ориентироваться не только в тех вопросах, которые рассмотрены в книге, но и самостоятельно найти правильный ответ на разнообразные вопросы, которые может поставить перед ним практика эксплуатации звуковых киноустановок. Основным признаком, на основании которого выбирался материал книги, выло его техническое, прикладное значение.

ISBN 978-5-458-43527-7

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

звуковую, характеризует эффективность электроакустического преобразования. Однако измерение этой величины очень затруднительно и требует специальной обстановки и аппаратуры, не всегда имеющейся в распоряжении даже крупных исследовательских лабораторий. Поэтому об эффективности громкоговорителя обычно судят на основании других величин, легче поддающихся измерению.

В качестве одной из таких величин обычно выбирают так называемую чувствительность; она определяется как отношение звукового давления (p) в некоторой точке неограниченного звукового поля к напряжению (U) на клеммах громкоговорителя:

$$E = \frac{p}{U}.$$

Чувствительность громкоговорителя измеряется в барах* на зольт.

Так как создаваемое громкоговорителем звуковое давление зависит от расстояния выбранной точки и от ее ориентации относительно громкоговорителя, то при определении чувствительности необходимо условиться о выборе точки наблюдения; ее выбирают обычно на оси громкоговорителя на расстоянии 1 м от него.

Нетрудно понять, что величина чувствительности определяет эффективность электромеханического преобразования вовсе не однозначно. В самом деле, подводимая к громкоговорителю электрическая мощность (P) зависит от напряжения (U) и от сопротивления (Z) громкоговорителя; как известно из электротехники,

$$P = \frac{U^2}{Z}.$$

Предположим, что два громкоговорителя с различным сопротивлением обладают одинаковой чувствительностью; это означает, что при одинаковом давлении, создаваемом ими в точке наблюдения, одинаково и напряжение на клеммах обоих громкоговорителей.

Однако, как видно из последней формулы, потребляемая громкоговорителями электрическая мощность различна: громкоговоритель с большим сопротивлением потребляет меньшую мощность и, следовательно, работает эффективнее. Таким образом нельзя сравнивать по чувствительности громкоговорители с различным сопротивлением.

Сравнение оказывается, однако, возможным, если мы будем брать отношение звукового давления (p) не к напряжению на клеммах (U), а к квадратному корню из подводимой электрической мощности

$$\sqrt{P} = \frac{U}{\sqrt{Z}}.$$

* Бар есть единица избыточного (звукового) давления, создаваемого звуковой волной в упругой среде; так как это давление, даже при громких звуках, очень невелико, то для его измерения берется достаточно малая единица: 1 бар (1 дин/см²) составляет примерно миллионную долю атмосферы (точнее, 1/981000 дж/см²).

Тогда получим величину, характеризующую эффективность электромеханического преобразования гораздо лучше, нежели чувствительность:

$$E_{abc} = \frac{p}{\sqrt{P}} = \frac{p}{U} \sqrt{Z} = E \sqrt{Z}.$$

Величина E_{abc} называется абсолютной чувствительностью; как видно из формулы, она измеряется в $\text{бар/}\sqrt{\text{вт}}$; эти единицы принято называть единицами Гартмана.

Вводя величину абсолютной чувствительности, мы получаем возможность сравнивать между собою громкоговорители различных типов.

ЧАСТОТНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Как отдача, так и чувствительность (относительная и абсолютная) громкоговорителя обычно сильно зависят от частоты. В этом и заключаются частотные искажения, вносимые громкоговорителем в передачу звука. Поэтому для суждения о качестве громкоговорителя недостаточно знать его чувствительность при какой-либо одной частоте; нужно знать целый ряд значений чувствительности при различных частотах рабочей полосы. Наиболее полное представление мы получаем из частотной характеристики громкоговорителя; эта характеристика представляет собою графическое изображение зависимости чувствительности (относительной или абсолютной) от частоты. Образец частотной характеристики дан на рис. 1; при ее рассмотрении необходимо иметь в виду, что значения чувствительности даны на графике в децибелах (цифры, отложенные по вертикальной оси, указывают, на сколько децибелов чувствительность при той или иной частоте превышает некоторое значение, произвольно выбираемое за условный нуль *).

Частотные искажения в определенной полосе частот будут тем меньше, чем ровнее характеристика. Предположим, что мы хотим знать искажения в пределах полосы частот от 100 до 4 000 гц для конусного громкоговорителя, характеристика которого представлена на рис. 1. Для этой цели мы прежде всего определяем среднюю чувствительность (E_{cp}); она определяется как высота прямоугольника (обведенного утолщенными линиями), равновеликого заштрихованной части ** частотной характеристики (от нижней границы выбранной полосы до верхней). Теперь можно определить частотные искажения двумя числами: первое из них

* Если E_0 есть некоторое значение чувствительности (например, 1 $\text{бар/}\sqrt{\text{вт}}$), условно принимаемое за нулевую точку графика, то цифры, откладываемые по вертикальной оси, вычисляются по формуле: $20 \lg \frac{E}{E_0}$. О шкале децибелов см. добавление 1.

** Так как заштрихованная площадь измеряется посредством специального прибора, называемого планиметром, то величину E_{cp} принято называть средней планиметрической чувствительностью.

(N_1) указывает, на сколько децибелов максимальная (в данной полосе) чувствительность превышает среднюю, второе число (N_2) указывает, на сколько децибелов минимальная чувствитель-

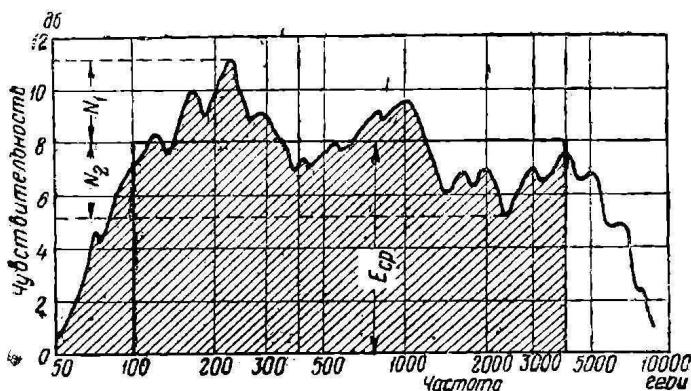


Рис. 1. К определению средней чувствительности и частотных искажений

ность лежит ниже средней (в примере, представленном на рис. 1, частотные искажения в полосе 100–4000 герц составляют: $N_1=3,2$ дБ, $N_2=-2,8$ дБ *).

АМПЛИТУДНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Величина амплитудных искажений определяется значением клирфактора (см. добавление 2). Клирфактор громкоговорителя измеряется при номинальной мощности на различных частотах рабочего диапазона.

Измеренные значения наносятся на график, представляющий собой частотную характеристику клирфактора при номинальной мощности (образец см. на рис. 18).

При испытаниях громкоговорителя на клирфактор нужно, однако, иметь в виду, что в условиях воспроизведения речи и музыки подводимая мощность распределена по различным областям частот вовсе не равномерно: наибольшие пиковые мощности приходятся на область от 250 до 500 гц для симфонической музыки и на область от 500 до 1000 гц для речи. На областях низких и верхних частот приходится относительно очень небольшая доля общей пиковой мощности. Поэтому не следует требовать от громкоговорителя, чтобы он имел одинаково малый клирфактор во

* Пусть E_{\max} и E_{\min} — максимальная и минимальная чувствительности в заданной полосе частот, тогда частотные искажения в пределах этой полосы определяются формулами:

$$+ N_1 = 20 \lg \frac{E_{\max}}{E_{\min}}; \quad - N_2 = 20 \lg \frac{E_{\min}}{E_{\max}}$$

всем частотном диапазоне. В частности, в области низких частот (50–100 гц) можно безопасно допускать при номинальной мощности клирфактор порядка 10–20% *.

НАПРАВЛЕННОСТЬ

Характеристика направленности громкоговорителя показывает, как распределяется в окружающем пространстве создаваемое громкоговорителем звуковое давление. Образец характеристики направленности конусного электродинамического громкоговорителя в щите дан на рис. 2. Диаграмма строится следующим образом: на градусную сетку наносятся в определенном масштабе значения звукового давления, измеренные на одном и том же расстоянии от громкоговорителя, но под различными углами к его оси (направление этой оси соответствует отметке 0°); полученные точки соединяются плавной кривой, представляющей

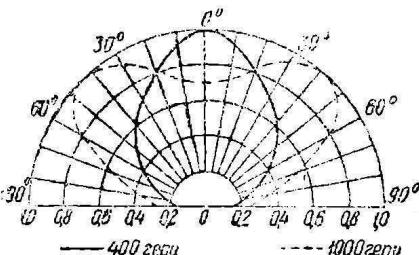


Рис. 2. Характеристика направленности конусного громкоговорителя в щите

характеристику направленности в выбранном масштабе величины радиуса, проведенного под данным углом из центра сетки до пересечения с характеристикой; при этом за единицу принимается максимальное давление при данной частоте. Пусть, например, нужно определить давление, создаваемое при частоте 400 гц под углом в 20° к оси громкоговорителя; из диаграммы (см. рис. 2) мы видим, что радиус, проведенный под этим углом, пересекает характеристику направленности в точке с отметкой 0,8. Это означает, что давление под углом в 20° составляет 80% от максимального, получающегося в данном случае на оси громкоговорителя. Давление под углом в 60° составляет, как видно из той же характеристики, только 40% от максимального. Рассматривая на диаграмме вторую характеристику, снятую при частоте 1 000 гц, мы обнаруживаем, что осевое давление (0°) составляет в этом случае 70% от максимального давления, которое создается в направлении, лежащем под углом в 45° к оси.

ИЗМЕРЕНИЯ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

Измерения громкоговорителей (определение отдачи и чувствительности в их зависимости от частоты, снятие частотных характеристик клирфактора и характеристик направленности) требуют специальной аппаратуры и обстановки. К специальной аппаратуре

* Отметим также, что чем более широкую полосу частот воспроизводит электроакустический тракт, тем более строгие требования должны быть предъявлены по отношению к допустимым амплитудным искажениям.

относятся, помимо генераторов звуковой частоты (от которых к громкоговорителю подается синусоидальное напряжение с частотой, меняющейся от 40 до 10 000 гц), измерительные усилители, прокалиброванные для измерения звукового давления, и приборы (мосты) для измерения клярифактора. В последнее время получили широкое применение разнообразные автоматические и полуавтоматические приборы, — так называемые характеристографы, — с помощью которых частотные характеристики получаются в течение нескольких минут в виде готовой кривой на специальном частот-

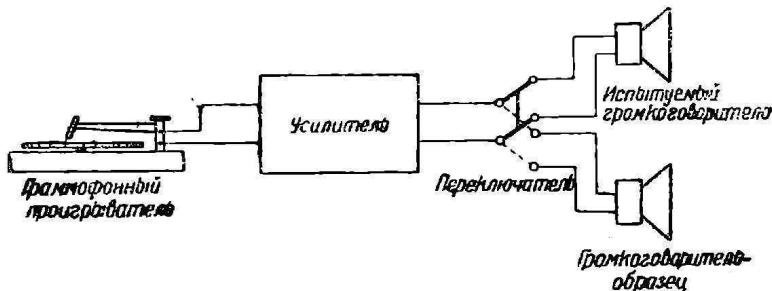


Рис. 3. Схема для субъективного испытания громкоговорителей

ном бланке. Специальная обстановка требуется для защиты измерительного микрофона от шумов и — что всего труднее — от отраженных звуковых волн, доходящих до микрофона после одного или нескольких отражений от стен, пола и потолка помещения. Поэтому измерения должны производиться либо на открытом воздухе (на акустических полигонах, расположенных вдали от городского шума, в открытой местности), либо же в звукомерных камерах, где стены, пол и потолок отделаны материалами, хорошо поглощающими звук. Такие камеры имеются при лабораториях заводов, производящих электроакустическую аппаратуру. Снятие характеристик направленности должно выполняться только на открытом воздухе.

Так как измерения громкоговорителей могут быть выполнены только в специальных лабораториях, то в повседневной эксплуатационной практике приходится довольствоваться лишь субъективным испытанием громкоговорителей. Испытание производится по схеме рис. 3: граммофонная пластинка (музыка и пение) воспроизводится поочередно (с интервалом примерно в полминуты) через испытуемый громкоговоритель и громкоговоритель-образец, в качестве которого берется вполне доброкачественный прибор того же типа, что и испытуемый. При прослушивании лицо, производящее испытание, не должно тем или иным путем знать, который из громкоговорителей работает, с тем чтобы производить их сравнение только на слух.

Глава II

КОНУСНЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Если вблизи от магнита поместить проводник, по которому протекает электрический ток, то на него действует сила, перпендикулярная как к направлению магнитных силовых линий, так и к направлению тока. Направление силы определяется так называемым «правилом левой руки»: если три первых пальца левой руки расставить под прямым углом друг к другу и направить указательный палец по магнитным силовым линиям, а средний — по току, то большой палец укажет направление действующей на проводник силы. Эта сила называется электродинамической; поэтому громкоговорители, действие которых основано на использовании таких сил, принято называть электродинамическими. Чтобы понять устройство и действие конусного громкоговорителя, представим себе магнит, одним полюсом (N) которого является центральный стержень (керн), а другим (S) — плоская круглая пластина с отверстием, в которое входит конец керна так, что между ними остается кольцеобразная щель; в этой щели расположена виток проволоки, по которому можно пропускать электрический ток.

На рис. 4 изображен продольный разрез такой системы; магнитные силовые линии направлены по радиусам от керна к охватывающей его конец пластине, ток же в витке направлен так, что в верхней части схемы он идет за плоскость чертежа, а в нижней — из-за плоскости чертежа. Перспективно изображенные системы стрелок (справа от схемы) показывают применение правила левой руки. При этом обнаруживается, что ко всему витку приложена равномерно распределенная электродинамическая сила, направленная вправо.

При изменении направления тока в витке изменяется и направление электродинамической силы*. Таким образом, если пропускать по витку переменный ток и предоставить витку возможность перемещения внутри щели в одну и в другую стороны, то переменная электродинамическая сила заставит виток совершать колебания с периодом переменного тока.

Описанная схема содержит все основные черты устройства всякого электродинамического громкоговорителя. Обращаясь в

* Этот же результат получится, понятно, и при изменении полюсов магнитной системы, то есть при изменении направления силовых линий.

частности, к конусному электродинамическому громкоговорителю, рассмотрим его продольный разрез, представленный на рис. 5. Излучателем звука является бумажный конус (диффузор) 1, усеченная вершина которого прочно склеена с цилиндрической бумажной гильзой, на которой в несколько слоев уложены витки проволоки, образующие звуковую катушку 2. Конус, с катушкой подведен следующим образом: во-первых, с помощью вырезной центрирующей шайбы 3 обеспечивается центральное положение катушки внутри кольцеобразного зазора, причем за счет податливости шайбы звуковая катушка имеет возможность перемещаться в одну и другую сторону в направлении оси конуса;

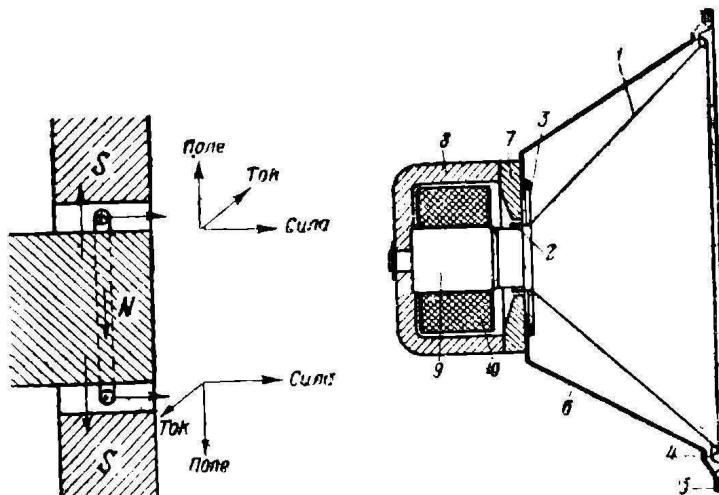


Рис. 4. Принцип действия электродинамического громкоговорителя

Рис. 5. Схема устройства конусного электродинамического громкоговорителя

во-вторых, внешний край конуса несет гофрированное кольцо 4, прижимаемое прокладкой 5 к ободу диффузородержателя 6. Магнитные силовые линии проходят в радиальных направлениях между керном 9 и пластиной 7, называемой передним фланцем магнитной системы. Керн связывается с передним фланцем скобой 8; магнитные силовые линии возбуждаются при пропускании постоянного тока через катушку возбуждения 10, надетую на керн.

При подведении к звуковой катушке переменного тока от оконечного каскада усилителя на витки катушки, пронизываемые магнитными линиями, действуют электродинамические силы, приводящие катушку в колебания; вместе с катушкой колеблется и склеенный с нею конус, излучающий в окружающее пространство звуковые волны.

Опишем теперь более подробно отдельные детали конструкции.

1. **Диффузор**, которому придается коническая форма для обеспечения достаточной жесткости, может быть изготовлен из бумажной выкройки, имеющей форму круга с вырезанным сектором (рис. 6,б). При изготовлении такой выкройки (например, при необходимости заменить поврежденный диффузор) определение ее размеров можно выполнить по следующим формулам:

$$D_1 = \frac{d_1}{\sin \frac{\alpha}{2}} ; \quad D_2 = \frac{d_2}{\sin \frac{\alpha}{2}} ;$$

$$\beta = 360^\circ \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2}\right) = 360^\circ \left(1 - \frac{d}{D}\right).$$

Здесь: D_1 — диаметр выкройки, D_2 — диаметр внутреннего кругового выреза в ней, d_1 — диаметр диффузора, d_2 — диаметр звуковой катушки, β — угол вырезаемого из выкройки сектора, α — угол раскрытия конуса. Как показывает опыт, наилучшее качество звукоспроизведения получается тогда, когда угол раскрытия α лежит в пределах от 90° до 110° ; при больших углах конус оказывается недостаточно жестким, при меньших углах — слишком тяжелым. Для облегчения расчета выкройки диффузора приводится таблица (стр. 15), в которой для различных углов раскрытия конуса приводятся углы вырезаемого из выкройки сектора (β), отношение внешнего или внутреннего диаметра выкройки к со-

ответствующему размеру конуса $\left(\frac{D}{d}\right)$ и (для удобства определения угла α) отношение $\frac{d_1 - d_2}{h}$ (рис. 6,а), определяющее при заданном угле раскрытия осевую высоту (h) конического диффузора; цифры даны с незначительным округлением.

Конуса фабричных громкоговорителей изготавливаются, как бумажной массы на специальные формы с последующей просушкой; такие конусы называются бесшовными или литьими. Помимо чисто производственных преимуществ этот способ хорош еще и тем, что он дает возможность изменять в широких пределах состав бумажной массы, а вместе с тем и физические свойства материала диффузора, от которых зависят его акустические качества: плотность, упругость,

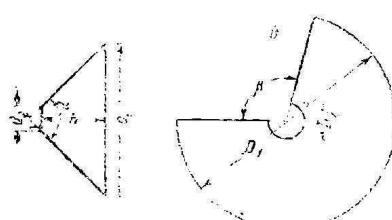


Рис. 6. Выкройка конического диффузора

внутреннее трение. При самостоятельном изготовлении диффузора следует выбирать для выкройки не слишком жесткую бумагу с плотностью порядка $3-3,5 \text{ г/дм}^2$ (типа полуватмана).

Внешнее (бумажное) кольцо, которым конус закрепляется в ободе диффузородержателя, делается гофрированным, для того чтобы обеспечить свободную податливость подвижной системы в

осевом направлении. При литье бесшовных диффузоров это кольцо отливается вместе с конусом. Применявшиеся ранее замещевые кольца в настоящее время могут быть допущены только при от-

α	h	$\frac{D}{d}$	$\frac{d_1 - d_2}{h}$
90	105	1,414	2,00
92	101	1,391	2,07
94	97	1,368	2,14
96	92,5	1,346	2,22
98	88,5	1,324	2,30
100	84	1,305	2,38
102	80	1,287	2,47
104	76	1,269	2,56
106	72,5	1,252	2,66
108	69	1,236	2,75
110	65	1,221	2,86

существии возможности изготовить гофрированное бумажное кольцо.

2. Центрирующая шайба изготавливается из пергинакса, гетинакса или текстолита; ее отогнутый бортик (со стороны внутреннего выреза) склеивается с гильзой звуковой катушки и ко-

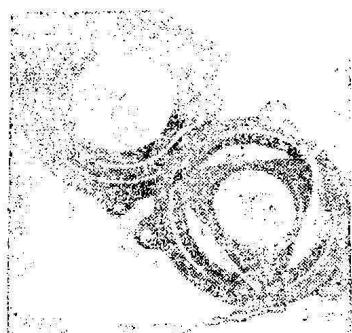


Рис. 7. Формы выполнения центрирующих шайб

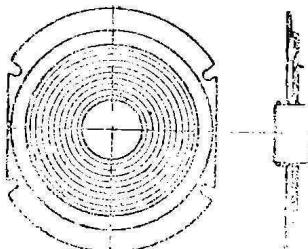


Рис. 8. Центрирующая шайба из гофрированной ткани (с шайбодержателем)

нусом. Шайба должна обладать значительной радиальной жесткостью и вместе с тем допускать достаточно свободное перемещение катушки с конусом в осевом направлении; для этой цели шайба снабжается фигурными вырезами, две формы которых изображены на рис. 7. Встречаются также и шайбы, отпрессованные ви-

де диска с кольцевой гофрировкой из бакелизированной ткани (рис. 8).

3. Звуковая катушка мотается медным проводом (ПЭ). Для обеспечения достаточной жесткости каждый слой намотки покрывается связывающим лаком (бакелитовым или целлюлозным). Для того чтобы оба вывода катушки оказались лежащими с одной стороны (именно со стороны диффузора), число слоев намотки должно быть обязательно четым. Выводы катушки делаются гибким тонким проводником и подклеиваются кусочками бумаги к обратной стороне конуса. Подклейка или подшивка концов необходима для предотвращения дребезжания, которое при колебаниях может возникнуть от прикосновения проводников к центрирующей шайбе, диффузородержателю или переднему фланцу.

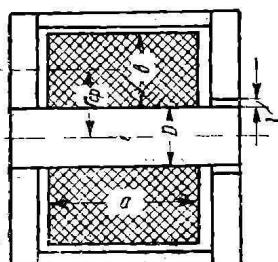


Рис. 9. К расчету магнитной индукции в зазоре и мощности возбуждения электромагнита

сплавы («альни»). Магнитопровод выполняется в форме стакана (рис. 9) или скобы (см. рис. 5); скобообразная форма является более выгодной из-за меньшего рассеяния магнитных силовых линий.

Иногда бывает необходимо ориентировочно определить величину магнитной индукции в рабочем зазоре громкоговорителя. Для этой цели можно воспользоваться приближенной формулой:

$$B = \frac{S_m i}{l}$$

Здесь: B — магнитная индукция (в гауссах); S_m — сечение меди в катушке возбуждения (в см^2); l — ширина рабочего зазора (в см); i — плотность тока в катушке возбуждения (в а/см^2). Во избежание недопустимого перегрева катушки плотность намагничивающего тока не должна превышать 300—350 а/см^2 (или 3—3,5 а/мм^2). Сечение меди S_m может быть определено по размерам a и b (см. рис. 9) по формуле

$$S_m = \kappa a b,$$

где $\kappa = 0,6—0,65$ есть так называемый коэффициент заполнения. Укажем еще формулу для расчета мощности, затрачиваемой на возбуждение:

$$P_{\text{возб}} = \rho \cdot I^2 \cdot V \text{ ватт},$$

где: ρ — удельное сопротивление (в $\Omega \cdot \text{см}$; для медного провода с учетом его нагрева нужно брать $\rho = 0,0000021 \Omega \cdot \text{см}$); i — плот-