

НОВЕИШНИЕ РАБОТЫ ПО АКУСТИКЕ И ЭЛЕКТРОАКУСТИКЕ ¹

Ф. Тренделенбург, Берлин

1. Методы акустических измерений. 2. Процессы в звуковом поле. Вопросы акустики помещений. 3. Звукоизлучатели. 4. Звукоприемники. 5. Речь и слух. 6. Заключение.

В настоящей статье я сообщу о ряде новых работ по акустике и электроакустике ⁽¹⁾. ² На ряду с работами теоретического характера большое место занимают работы, касающиеся усовершенствования и подробной разработки методов акустических измерений; именно усовершенствование методов повело к значительным успехам, особенно в области прикладной акустики. Количественные измерения, например, снятие частотных и амплитудных характеристик акустического приемника и излучателя — дало возможность детально исследовать действие этих приборов и установить, в какой мере те или иные видоизменения технического устройства ведут к усовершенствованию аппарата.

Я позволю себе поэтому сначала дать очерк новейшего развития акустических методов измерения; в дальнейшем я перейду к изложению различных работ в других областях акустики: работ, посвященных звуковому полю и акустике помещений, излучателям и приемникам звука, — и в пограничных областях акустики и физиологии: речи и слуху.

§ 1. Методы акустических измерений

Наибольший практический интерес представляют в настоящее время измерения процессов звукового поля в воз-

¹ Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel. 32, 1928, H. 1—6. Пер. М. А. Чупровой.

² Цифры в скобках относятся к указателю литературы в конце статьи.

духе. Свойства звукового поля можно считать физически определенными, если в каждой точке его известна, как функция времени, одна из трех акустических величин: отклонение воздушной частицы от положения покоя, скорость колеблющейся частицы или давление в среде.

В целях упрощения рассмотрим сначала синусоидальный акустический процесс:

$$a = a_0 \sin \omega t; \quad (1)$$

скорость частицы будет

$$v = \frac{da}{dt} = \omega a_0 \cos \omega t, \quad (2)$$

а колебание давления

$$p = -\omega \rho_0 a_0 u \cos \omega t = p_0 \cos \omega t, \quad (3)$$

где u — скорость звука, а ρ_0 — средняя плотность.

Указанные соотношения относятся к проходящим плоским волнам; о некоторых других случаях мы скажем в дальнейшем.

Здесь даны только соотношения между амплитудами смещения, скорости и давления, потому что большая часть акустических измерений опирается на определение именно этих величин. В особенности амплитуда давления сравнительно легко доступна измерению. Ниже мы подробно изложим способы ее измерения. Заметим только, что акустические процессы могут быть измерены еще одним способом, а именно путем определения амплитуды колебания температуры с помощью термомикрофона; колебания температуры, согласно законам термодинамики, стоят в непосредственной связи с колебаниями давления. С термомикрофонным эффектом работал А. Гиппель (2). Абсолютные и относительные измерения температуры в стоячих звуковых волнах произвели Фризе и Ветцман (3).

Наибольшее значение для измерения основных величин, характеризующих звуковое поле, приобрели те методы, в которых для записи звука пользуются электрическими звукоприемниками, главным образом — приемниками давления. Сравнительно с данными, приведенными в моем прошлом обзоре (4) в конструкции этих приемников мало что

изменилось, так что этот вопрос может быть изложен лишь кратко. В тех случаях, когда необходимо получить в высокой степени точный прием и передачу звуков, в качестве приемников для акустических измерений, чаще всего применялись конденсаторные микрофоны, именно конденсаторный микрофон Венте ⁽⁵⁾ и высокочастотный конденсаторный микрофон Риггера ⁽⁶⁾. Для подобных измерений применяется также ленточный микрофон Э. Герлаха ⁽⁷⁾.

Ряд работ посвящен выработке методов градуировки. Так Э. Мейер ⁽⁸⁾ разработал способ измерения амплитуды давления с помощью проградуированного конденсаторного

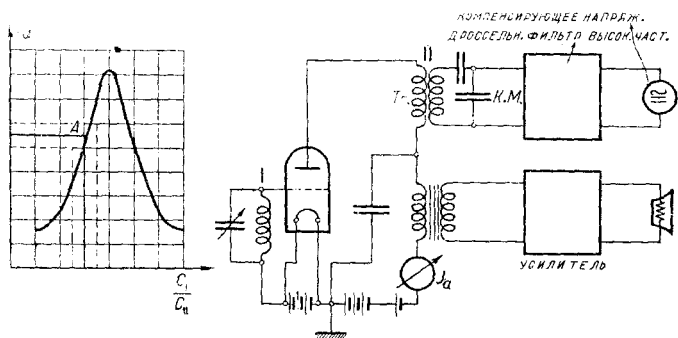


Рис. 1. Измерение амплитуды давления конденсаторным микрофоном.

микрофона, позволяющего достигнуть высокой точности. Этот метод основан на принципе компенсации, впервые примененном для акустических целей Герлахом. Герлах применял для измерения амплитуды давления ленточный микрофон: действующие на ленту силы компенсируются током соответствующей фазы и амплитуды, пропускаемым через ленту; компенсация сил, вызываемых звуковым полем, происходит благодаря электродинамическому взаимодействию между током, текущим по ленте, и магнитным полем микрофона. Установка на нуль производится на слух или посредством усилительного устройства. Мейер компенсирует действующие на мембрану конденсаторного микрофона силы с помощью сил электростатических; движение мембраны и при-

ведение ее в покой при компенсации устанавливается наблюдением изменения емкости в высокочастотном контуре. Схема устройства показана на рис. 1; конденсаторный микрофон помещается в анодном контуре по схеме Хут-Кюна. При расстройке контуров I и II, вследствие изменения емкости конденсаторного микрофона KM , изменяется постоянная слагающая анодного тока J_a . При изменении емкости микрофона, ток J_a изменяется по резонансной кривой, как изображено в левой части рис. 1. Если в качестве рабочей точки выбрать точку A , то движения микрофонной мембраны вызовут колебания постоянного анодного тока, а эти колебания будут действовать на усилитель. Для компенсации движения мембраны до нуля служит вспомогательное напряжение соответственной частоты, которое подводится к обкладкам конденсаторного микрофона через высокочастотный дроссельный фильтр. Компенсацию на нуль можно установить с помощью телефона, включенного за усилителем или, при низких частотах, с помощью включаемого там же вибрационного гальванометра. Особым преимуществом этого метода является возможность легкой градуировки прибора в абсолютных мерах: именно, если на мембрану действует определенной величины (отрицательное) давление, которое можно отсчитать по манометру Тöплера для малых давлений, то смещение мембраны можно скомпенсировать при помощи постоянного тока подходящей силы и таким образом определить абсолютную чувствительность прибора. Э. Мейер при помощи только-что описанного метода точно исследовал, в какой мере произведенные этим способом измерения звукового поля совпадают со значениями, получаемыми при помощи диска Релэя.

Значение диска Релэя для измерения звукового поля настолько велико, что я считаю уместным дать краткое изложение теории диска. Если в звуковое поле поместить диск, расположенный наклонно к направлению звуковых лучей, то диск стремится установиться перпендикулярно к направлению звуковой волны. Вращающий момент диска M , обусловленный действием звуковой волны, пропорционален квадрату скорости. Это соотношение (при условии очень

малой толщины диска) может быть выражено по Кенигу⁽⁹⁾ формулой:

$$M = \frac{2}{3} \rho_0 v_0^2 r^3 \sin 2\theta, \quad (4)$$

где r обозначает радиус диска, а θ угол между плоскостью диска и направлением звука.

Упомянутая работа Э. Мейера может служить новым и притом вполне независимым от более старых методов подтверждением правильности абсолютной применимости формулы (4).

Таблица 1 взята из упомянутой статьи Мейера.

ТАБЛИЦА 1

Частота	Конденсаторный микрофон	Диск Релэя
240 герц	45 Bar	51 эр
330 »	93 »	101 »
400 »	90 »	97 »
555 »	116 »	129 »
780 »	214 »	214 »
1150 »	88 »	97 »

В таблице приведены данные измерений (перечисленные на амплитуды давлений) звуковых колебаний в Кундтовской трубке, выполненных с помощью конденсаторного микрофона и диска Релэя. Расхождение значений, полученных обоими методами, в среднем составляет только около 8%.

Здесь следует еще упомянуть, что для определения амплитудной характеристики звукоизлучателей применялся также и электростатический компенсационный метод Мейера⁽¹⁰⁾. Звукоизлучатель возбуждается синусоидальной электродвижущей силой; при этом последовательно компенсируется сначала соответствующий возбуждению основной тон, а затем и обертоны, обусловленные различными недостатками звукоизлучателя. Мы вернемся к интересным

результатам этих исследований в главе об излучателях и приемниках звука.

Диск Релэя, действие которого мы выше вкратце описали, многократно применялся при акустических измерениях. Так, например, Тренделенбург ⁽¹¹⁾ градуировал высокочастотный конденсаторный микрофон Риггера, поместив его в звуковом поле рядом с диском Релэя, причем для возбуждения звукового поля служил „блаттхаллер“ Риггера. Гартман ⁽¹²⁾ пользовался подобной же установкой для градуировки ленточного микрофона Герлаха. Результаты этих измерений мы обсудим в главе о звукоизлучателях и приемниках при рассмотрении соответственных приборов. Диск Релэя применялся также и непосредственно для исследования звукоизлучателей. Э. Мейер с помощью диска Релэя подробно исследовал свойства громкоговорителей; к результатам этих исследований мы также вернемся в дальнейшем.

Существенные успехи были достигнуты в методах акустических измерений, служащих для получения частотных характеристик аппаратуры; их удалось настолько упростить технически, что эти измерения можно теперь производить без большой затраты времени и главное не прибегая к субъективному наблюдению. Такой способ автоматической регистрации описывают Коген, Альтридж и Вест ⁽¹³⁾. В Германии приспособление для регистрации звука создали и применили Грютцмахер и Мейер ⁽¹⁴⁾ в Государственном управлении телефонов и Э. Герлах ⁽¹⁵⁾ в Лаборатории об-ва Сименс и Гальске.

В основе устройства всех упомянутых регистрирующих приборов лежит общая идея соединения фотографической записи на барабане с таким механизмом, который определяет собой высоту тона; это делается, например, так, что за один полный оборот барабана тон изменяется через всю шкалу звуков от очень низких до самых высоких частот, которые еще могут представлять интерес, т. е. примерно до 10 000 герц.

Для возбуждения звукового поля применяется излучатель, работающий по методу биений, соединенный через подходя-

щий усилитель с громкоговорителем. Барабан для фотографической записи соединен с конденсатором переменной емкости, который определяет частоту одного из двух электрических контуров излучателя; контуры подобраны так, что

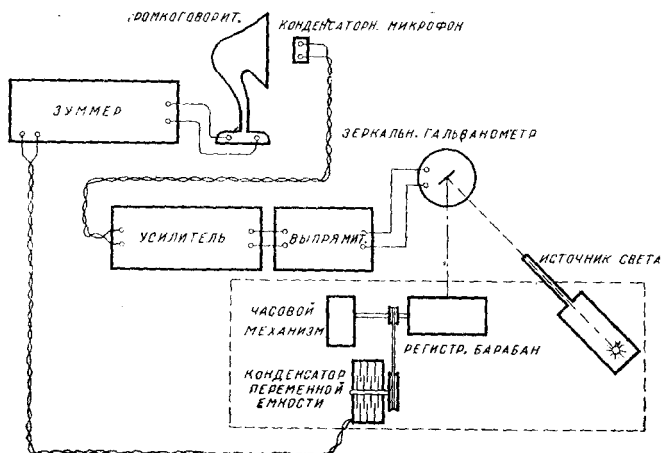


Рис. 2. Схема устройства для снятия частотных характеристик.

при повороте конденсатора от 0° до 180° тон биений проходит всю шкалу звуков. Рис. 2 показывает схематически расположение приборов. Приемником звука служит конденсаторный микрофон, кото-

рый через усилитель и выпрямитель действует на зеркальный гальванометр; отброс гальванометра записывается на барабане. С помощью искусственного приема, найденного Коном, Альтриджем и Вестом, уда-

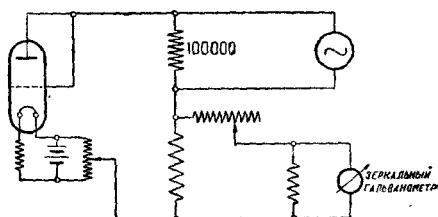


Рис. 3. Линейно работающий выпрямитель.

ется выбрать характеристику выпрямляющей лампы так, что она практически является линейной; способ включения выпрямителя указан на рис. 3. Грютцмахер и Мейер пользовались лампой с оксидированной нитью (тип В. О. Сименса и Гальске). Сетка присоединялась к аноду, а для

получения прямолинейной характеристики в анодный контур включалось сопротивление в $100\,000\ \Omega$. Небольшое добавочное напряжение на сетку берется через потенциометр от батареи накала. Измеряемое напряжение накладывается на сопротивление в $100\,000\ \Omega$. При этих условиях получается характе-

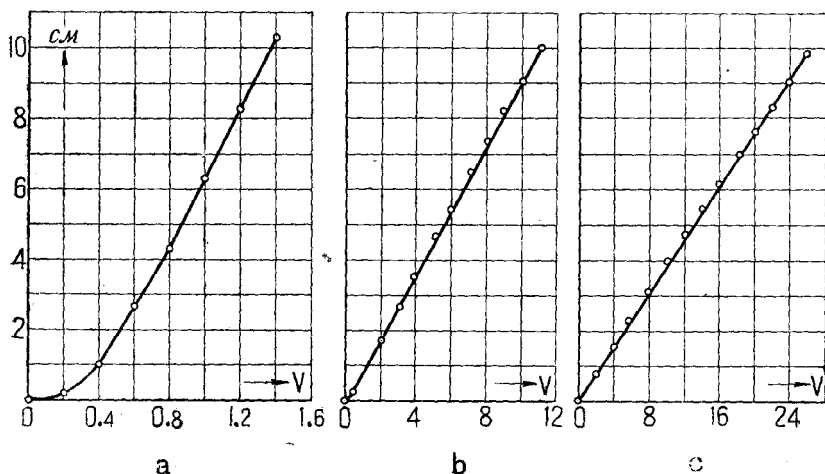


Рис. 4. Характеристики выпрямителя по схеме рис. 3.

ристика, которая в широких пределах, даже для очень малых напряжений, является линейной; на рис. 4 а — с изображены характеристики тока и напряжения. Подчеркнем, что

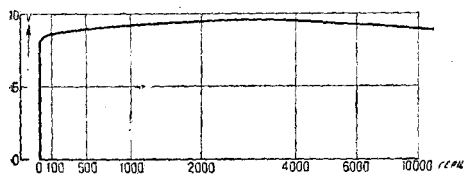


Рис. 5. Напряжение на выходе звукоизлучателя (зуммера).

описанный прием часто может с успехом применяться и при измерениях с катодным вольтметром.

Вводя соответствующие корректирующие звенья в схему излучателя, построенного по

методу биений, а также в контур усилителя за конденсаторным микрофоном, Грютцмахер и Мейер достигли полной независимости работы всего устройства от частоты. На рис. 5 изображено напряжение на выходе такого излучателя, на рис. 6 — частотная характеристика регистрирующего аппарата в целом.

К интересным результатам, полученным с помощью указанных методов автоматической регистрации, мы еще вернемся в дальнейшем.

Описанные устройства позволяют автоматически получать частотную характеристику звукоизлучателя; вслед затем

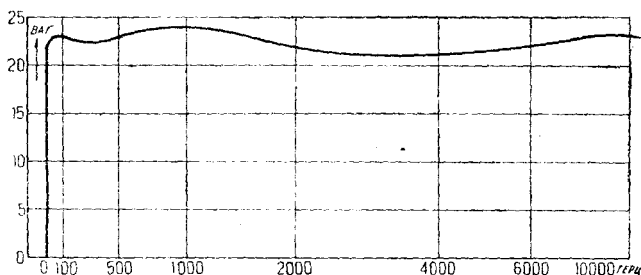


Рис. 6. Частотная характеристика регистрирующего аппарата.

была поставлена задача — на аналогичных основаниях построить аппаратуру для автоматического анализа звука, или, еще общее, для анализа смеси различных частот.

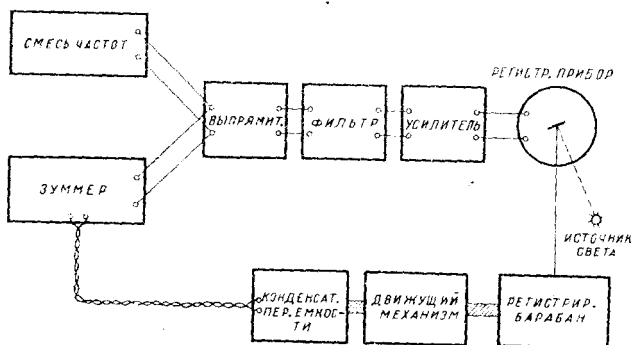


Рис. 7. Принципиальная схема автоматического анализа звука.

Подобная аппаратура была разработана Муром и Кертисом (16), а также Герлахом (17) и Грютцмахером (18).

Анализируемые частоты воздействуют на электрический звукоприемник и после соответственного усиления подаются

на сетку выпрямляющей лампы. На сетку лампы налагается, кроме того, напряжение от излучателя с биениями, частота которых может изменяться от 60 до 10 000 герц простым поворотом переменного конденсатора.

За выпрямителем помещается фильтр, пропускающий только частоты от 0 до 20 герц; за ним располагается усилитель, к которому присоединяется прибор для фотографической регистрации (рис. 7).

Действие этого автоматического анализатора звука мы поясним на практическом примере: пусть на приемник падает звук, состоящий из компонент с частотами в 200, 400 и 800 герц, так что в соответствии с этим на сетку выпрямителя задаются переменные электрические напряжения с частотами в 200, 400 и 800 герц. Эти колебания складываются с колебаниями, приходящими от излучателя. Если рабочая характеристика выпрямителя квадратична, то за выпрямителем получаются также комбинационные тоны между колебаниями излучателя и звуковыми частотами. Из всех этих комбинационных тонов звуковой фильтр, как уже упоминалось, пропускает только колебания, лежащие между 0 и 20 герц; регистрирующий прибор будет следовательно только тогда что-нибудь показывать, когда разница между частотой излучателя и одной из заданных в звуковом поле частот не превосходит 20 герц, потому что только тогда разностный тон излучателя и соответственного тона в звуковом поле сможет пройти через звуковой фильтр. Если в рассматриваемом случае плавно перестраивать излучатель с 60 до 10 000 герц, то регистрирующий прибор будет действовать в те моменты, когда частота излучателя лежит между 180 и 220 герц, затем между 380 и 420, а также между 780 и 820 герц; на регистрирующем барабане с фотографической бумагой в соответственных местах получится подъем кривой. Можно добиться того, что амплитуда этих подъемов с большой точностью будет пропорциональна амплитуде соответствующей компоненты звукового поля; таким образом легко может быть произведен автоматический анализ. Надо, однако, отметить, что изменение высоты тона должно производиться настолько медленно, чтобы можно было избе-

жать ошибок, зависящих от времени возбуждения колебаний в колеблющихся системах; таким образом можно изучать лишь такие акустические процессы, которые длятся несколько секунд.

Разобранные нами методы позволяют производить измерения тех акустических процессов в воздухе, при которых требуется определять амплитуду. Непосредственного определения сдвига фаз между давлением, скоростью и элонгацией мы пока не касались. Вообще говоря, фазовые соотношения и не играют никакой роли для акустических процессов в невозмущенном звуковом поле, при расстояниях от источника звука, больших по сравнению с длиной звуковой волны; по уравнениям (1), (2) и (3) мы видели, что в этих случаях фазовый угол равен 90° или нулю. Соотношения здесь получаются такие же, как для переменного электрического поля на большом расстоянии от излучающей антенны. Но вопрос становится очень сложным, когда мы хотим промерить акустические процессы в замкнутых средах, — например, в акустических фильтрах.

За последнее время наши сведения о процессах в замкнутых акустических системах значительно расширились; здесь уместно будет разобрать теорию этих систем, которые могут найти применение также и как вспомогательные средства при акустических измерениях. Вслед затем можно будет перейти к методам, разработанным специально для практического изучения таких систем. Излагая теорию этих систем, мы используем то обстоятельство, что они во многом аналогичны электрическим колебательным контурам; в частности мы будем пользоваться теорией электрических фильтров.

В свободном звуковом поле, для расстояний от источника звука больших по сравнению с длиной звуковой волны, справедливо соотношение, вытекающее из уравнений (2) и (3):

$$\frac{p}{v} = \rho_0 u = S. \quad (5)$$

Величина S называется акустическим сопротивлением. Простая зависимость (5) не действительна для замкнутых аку-

стических систем, — например для резонаторов или акустических фильтров. Здесь главную роль играет разность фаз между давлением и скоростью. В этом случае можно положить

$$\frac{p}{v} = S. \quad (6)$$

S является в общем случае величиной комплексной. Теоретические соображения приобретают для замкнутых систем наибольшую наглядность, если мы вместо скорости частицы v введем несколько иную величину, именно объемный поток V . Величина эта дается уравнением:

$$V = \frac{dV}{dt},$$

где V обозначает смещение объема (поперечное сечение проводника, умноженное на смещение); при этом выражение

$$\frac{p}{V} = Z \quad (7)$$

называют акустическим импедансом. Мы увидим, что введение этого понятия оказывается очень полезным при анализе процессов в замкнутых акустических системах; оно аналогично понятию электрического импеданса, и это дает возможность представлять себе картину звуковых процессов, исходя из соответственных электрических явлений, которые и теоретически и практически изучены во всех подробностях.

За отправную точку для наших дальнейших соображений мы возьмем известное из учения об электричестве дифференциальное уравнение электрического контура с самоиндукцией, омическим сопротивлением и емкостью (¹⁹):

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{c} q = E \quad (8)$$

или, в другой форме,

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{c} \int i dt = E, \quad (9)$$

где

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Соответствующее дифференциальное уравнение механики для материальной точки, связанной упругими силами с положением равновесия, гласит:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + cx = K. \quad (10)$$

Сравнение обеих формул показывает, что в формуле (10) dx/dt стало на место i , m на место L .

Оставим пока в стороне как член, выражающий трение, так и член, выражающий упругую силу; будем следовательно рассматривать такой процесс, при котором некоторая масса приводится в движение силой K , причем для упрощения примем, что K синусоидально, т. е. $K = K_0 \sin \omega t$. Законы, управляющие таким процессом, согласно сказан-

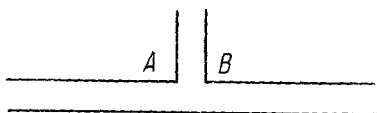


Рис. 8. Акустическая самоиндукция.



Рис. 9. Акустическая емкость.

ному выше, должны быть аналогичны тем, которые определяют характер тока при самоиндукции под действием периодической электродвижущей силы. Спрашивается, как можно реализовать акустическую аналогию электрической самоиндукции?

Представим себе, что звуковые колебания происходят в трубке, в боковой стенке которой имеется отверстие, или, еще лучше, в короткий открытый на конце отросток (рис. 8). Под действием происходящих в трубке колебаний давления, объем воздуха между A и B будет перемещаться взад и вперед; если мы обозначим через m массу этого объема воздуха, а через x его смещение, то получим соотношение:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F \cdot P_0 e^{i\omega t}, \quad (11)$$

где F обозначает поперечное сечение бокового отростка, а P_0 — амплитуду давления.

Введем в это уравнение определенную выше величину объемного потока и заменим массу m через плотность воздуха и его объем (сечение F , умноженное на длину l бокового отростка трубки); тогда мы получим

$$\frac{\rho_0 l}{F} \frac{d^2 V}{dt^2} = P_0 e^{i\omega t} \quad (12)$$

уравнение, вполне аналогичное уравнению

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} = E_0 e^{i\omega t};$$

$\rho_0 \frac{l}{F}$ является следовательно выражением для акустической самоиндукции отростка трубки.

Надо заметить, что при определении массы воздуха, приводимой в движение колебаниями давления, мы делаем еще одно упрощение, — мы не берем в расчет сопутствующих колебаний окружающего воздуха; однако часть внешнего воздуха, находящегося непосредственно у отверстия трубки, конечно, приводится в колебания. Чтобы ввести эту поправку надо по Релю к длине l прибавить еще величину $\pi R/2$, где R обозначает радиус отростка трубки. В результате для акустической самоиндукции получается выражение

$$L_{ak} = \rho_0 \frac{l + \frac{\pi R}{2}}{\pi R^2}. \quad (13)$$

Подобным же образом мы можем реализовать и акустическую емкость. Боковое отверстие трубки (рис. 9) сообщается с замкнутой камерой. Объем воздуха, заключающийся между точками A и B под действием периодических изменений давления в трубке приходит в упругие колебания. Можно доказать, что созданная этим путем акустическая емкость определяется уравнением:

$$\frac{1}{C_{ak}} = \frac{\rho_0 u^2}{V_k}, \quad (14)$$

где V_k — объем камеры, u — скорость звука.

Подобно тому, как в электрических контурах мы можем подобрать самоиндукцию и емкость так, чтобы получить

резонанс или создать фильтр, так и в акустике мы можем пользоваться рассмотренными выше элементами акустических самоиндукции и емкости для получения желаемого эффекта.

Как первый пример мы рассмотрим здесь систему, аналогичную простому резонансному электрическому контуру, а именно, обычный тип резонатора Гельмгольца.

Резонатор этот изображен на рис. 10. Заключенная в шейке резонатора масса воздуха $\rho_0 l R_1^2$ приводит в упругие колебания объем воздуха, находящийся внутри резонатора U_{res} ; согласно указанным выше формулам (20), акустическая самоиндукция будет равна $L = \frac{\rho_0 l}{\pi R_1^2}$,

а акустическая емкость $C = \frac{V_{res}}{\rho_0 u^2}$. Соответственно формуле для собственной частоты электрического контура

$$n_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

мы получим для собственной частоты Гельмгольца резонатора ¹

$$n_0 = \frac{u}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi R_1^2}{l V_{res}}} \quad (15)$$

От этой простой колебательной системы перейдем теперь к более сложным акустическим системам и остановимся прежде всего на акустических фильтрах. Стюарт первый выяснил возможность комбинирования акустических самоиндукций и емкостей для получения систем, которые задерживали бы определенную область частот и пропускали неослабленными другие частоты. Он же указал на широкие аналогии между электрическими и акустическими фильтрами.

Общая схема подобной акустической системы изображена на рис. 11. Ряд тождественных между собой акустических элементов, с импеданцем Z_1 ¹ располагаются после-

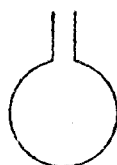


Рис. 10.
Резонатор
Гельм-
гольца.

¹ При определении l необходимо ввести поправку по Релю.

довательно; сбоку присоединены другого рода элементы с импедансом $\bar{Z}_2^1$.

Такая система аналогична электрическому фильтру, построенному по схеме рис. 12.

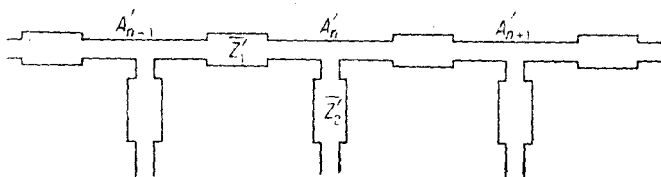


Рис. 11. Общая схема акустического фильтра.

Теория электрических фильтров требует, как известно, прежде всего, чтобы сумма токов, сходящихся в точках A_n , $A_{n+1} \dots$ была равна нулю. Точно также и теория акустических фильтров исходит из предположения, что сумма объемных потоков в этих узловых точках равняется нулю

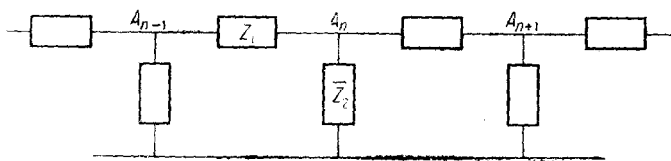


Рис. 12. Общая схема электрического фильтра.

(закон Кирхгофа для акустики). Если написать дифференциальное уравнение для напряжения и тока (и соответственно для давления и объемного потока в акустике), то можно показать, что получающийся фильтр пропускает только те частоты, для которых ¹

$$0 > \frac{Z_1}{Z_2} > -4.$$

¹ Следует отметить, что наши соображения относятся лишь к тем системам, в которых происходят квазистационарные процессы. Для этого требуется, чтобы размеры отдельного элемента акустического проводника были малы по отношению к длине волны. Обобщенную теорию акустических фильтров дает Стюарт (19).

В качестве первого практического примера рассмотрим акустический фильтр, который по характеру своей работы близко напоминает схему емкостного фильтра. Эта схема изображена на рис. 13. Последовательно включенные конденсаторы обладают большим сопротивлением для низких частот, тогда как включенные параллельно дроссели обладают для них малым сопротивлением. Таким образом низкие частоты не могут проходить через фильтр, а высокие проходят практически беспрепятственно. „Предельная частота“ для такой системы равняется

$$\omega_0 = \frac{1}{2\sqrt{L_1 C_1}};$$

более высокие частоты пропускаются фильтром.

Схему акустического фильтра для отсеивания низких частот дает рис. 14.

Акустический фильтр состоит из трубки, имеющей ряд открытых боковых отростков. Эти отростки яв-

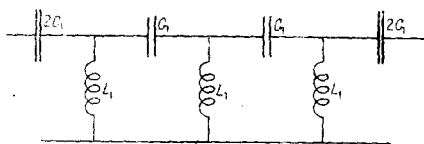


Рис. 13. Емкостный фильтр.

ляются акустическими самоиндукциями — они соответствуют дросселям, включенным параллельно, как указано на рис. 13. Акустическая емкость лежит в промежуточных участках трубки между каждыми двумя самоиндукциями. Надо однако отметить, что аналогия с простой вышеописанной электрической схемой не может быть проведена до конца, потому что эти промежуточные части трубки сами обладают значительной акустической самоиндукцией. Можно показать, что в такого рода трубке самоиндукцию и емкость приходится считать включенными параллельно. Если мы желаем получить преимущественно емкостной эффект, для контура, составленного из емкостей и самоиндукций, приходится взять очень низкий период собственных колебаний. Для частот, превышающих собственную частоту, трубка действует главным образом, как емкость. Придавая должные размеры частям трубки промежуточным между отростками, можно добиться преобладания того или другого эффекта.

В качестве второго примера рассмотрим дроссельный фильтр (рис. 15), не пропускающий частот высших, чем предельная частота:

$$\omega_0 = \frac{2}{\sqrt{L_2 C_2}}.$$

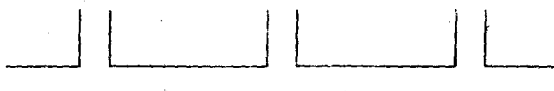


Рис. 14. Акустический фильтр, пропускающий высокие частоты.

Акустическую систему, работающую аналогично с дроссельным фильтром, дает рис. 16. При этом типе фильтра

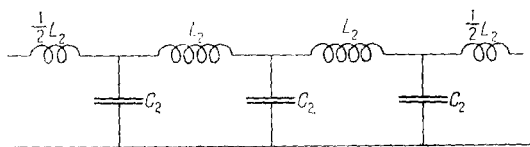


Рис. 15. Дроссельный фильтр.

боковой стенке трубки, в которой преобладает эффект самоиндукции, присоединяется ряд замкнутых на конце

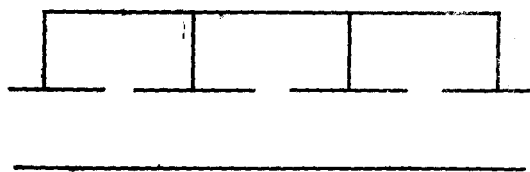


Рис. 16. Акустический фильтр, пропускающий низкие частоты.

боковых полостей. Еще целесообразнее для уменьшения неустранимой внутренней самоиндукции этих боковых полостей придавать им форму сходную с полостью резонатора, как это показано на рис. 16.

Наконец, можно построить и такой фильтр (рис. 17), который пропускает только одну определенную область частот:

$$\text{от } \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_4(C_4 + 4C_3)}} \text{ до } \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_4 C_4}}.$$

Акустический фильтр, обладающий подобными свойствами, схематически представлен на рис. 18.

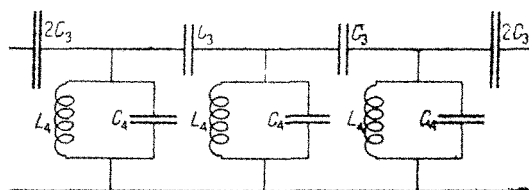


Рис. 17. Электрический фильтр, пропускающий только одну область частот.

Сказанного достаточно, чтобы показать, как плодотворен метод аналогий между процессами в электрических и аку-



Рис. 18. Акустический фильтр, пропускающий только одну область частот.

стических системах ⁽²¹⁾. Но надо еще раз подчеркнуть, что провести здесь вполне строгую аналогию часто оказы-

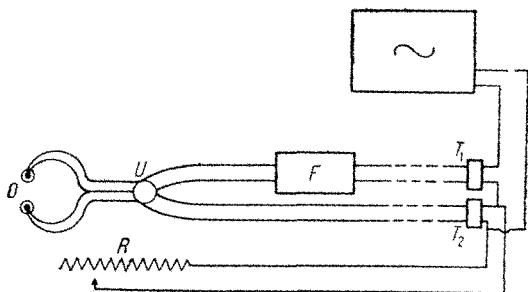


Рис. 19. Определение пропускной способности фильтра.

вается невозможным, — только что рассмотренный пример практической неосуществимости отделения акустической емкости трубки от акустической самоиндукции достаточно

ясно говорит об этом. Надо впрочем сказать, что подобные компромиссы приходится допускать и в электротехнике,

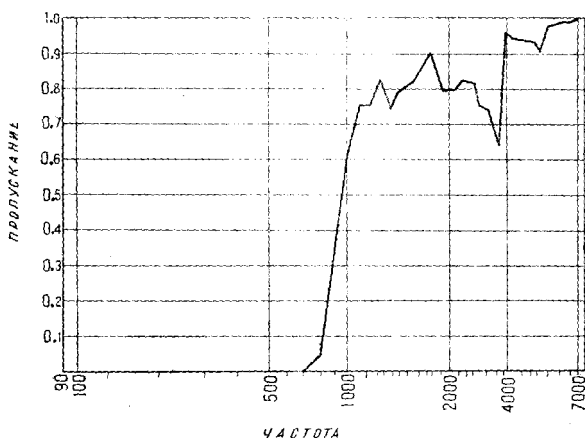


Рис. 20. Частотная характеристика фильтра, пропускающего высокие частоты.

однако там, — по крайней мере для частот, соответствующих

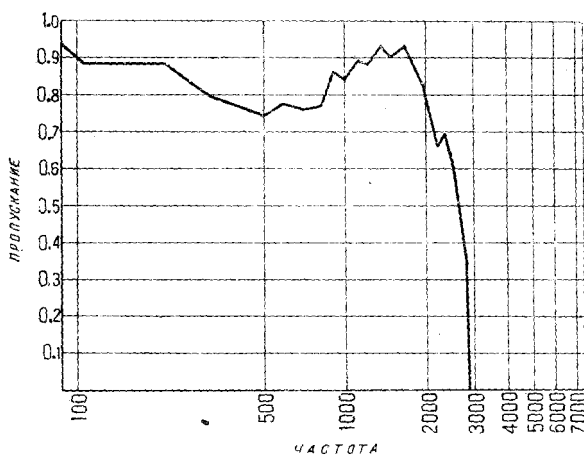


Рис. 21. Частотная характеристика фильтра, пропускающего низкие частоты.

частотам разговорной речи, — невязки незначительны проявляются лишь в одном случае, именно в случае др

селей с их неустранимой собственной емкостью; зато в электротехнике нет ничего подобного емкости с неподдающейся устранению самоиндукцией.

На практике для определения акустических свойств фильтров был выработан ряд методов. Особенно простой способ, обладающий достаточной точностью для пробных измерений, представлен на рис. 19 (22). Два телефона, T_1 и T_2 , соединяются с ушами наблюдателя: один — простой трубкой, другой — через фильтр; при помощи переключателя U к уху может быть подведен или звук, идущий через трубку или звук, проходящий через фильтр. Шунтиру-

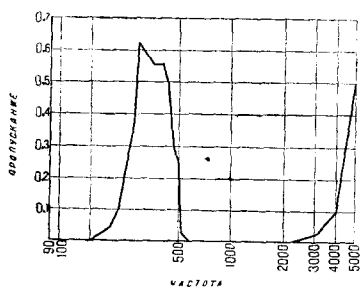


Рис. 22. Частотная характеристика фильтра, пропускающего только одну область частоты.

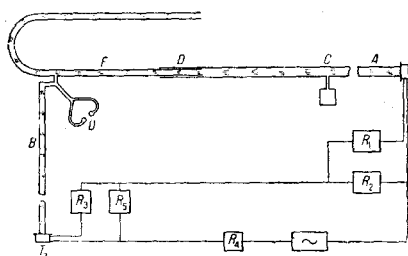


Рис. 23. Измерение акустического импеданса.

телефон параллельным омическим сопротивлением, можно ослабить один звук настолько, что оба звука будут казаться одинаковыми по силе. При условии, что работа телефонов тождественна, величина параллельного сопротивления явится мерой пропускной способности фильтра. На рис. 20 — 22 приведены результаты измерений, сделанных Стюартом (23) по аналогичному методу.

В заключение укажем еще на один метод измерений (24), который дает возможность получить в абсолютных мерах величину импеданса данной акустической системы (рис. 23).

Источник звука (телефон T_1) посылает непрерывный ряд звуковых волн через длинную, не дающую отражений трубку. Получающиеся звуки можно улавливать через слуховую трубку, присоединяемую в какой-либо точке к данной трубке. Другой телефон T_2 позволяет компенсировать

ровать до нуля воспринимаемый ухом звук. Если теперь, при помощи бокового ответвления установить сообщение трубки с прибором, акустический импеданс которого мы хотим измерить, например, с резонатором или рупором, компенсация нарушится. Варьируя величину возбуждения вспомогательного телефона и соотношение фаз обоих телефонов, можно восстановить компенсацию, причем из отношений между возбуждением и фазами до и после присоединения исследуемого прибора оказывается возможным вычислить импеданс.

§ 2. Процессы в звуковом поле. Вопросы акустики помещений

При рассмотрении процессов в звуковом поле наибольший интерес в настоящее время представляют вопросы, связанные с изучением направленного звукового излучения. Направленное действие источника звука существенно зависит от размеров источника звука по сравнению с длиной звуковой волны; отдельный и точечный источник звука не дает направленного действия, он излучает по всем направлениям равномерно разбегающиеся шаровые волны. Соотношения становятся однако очень запутанными для таких источников звука, размеры которых велики по сравнению с длиной излучаемой звуковой волны.

Для освещения вопроса о направленном действии звукоизлучателей Бакгауз и Тренделенбург⁽²⁵⁾ исследовали направленное излучение поршневых мембран; излучение подобного источника звука сравнительно легко поддается исследованию и в этом случае особенно легко проверить экспериментально результаты теоретических расчетов. В „блаттхаллере“ Риггера мы имеем излучатель, который практически с очень большой степенью приближения работает по принципу поршневой мембраны и притом охватывает почти всю область слухового восприятия, так что с ним можно производить опыты для всевозможных частот.

Для теоретического исследования вопросов звукового

излучения удобно также на ряду с определенными выше основными величинами звукового поля — элонгацией, скоростью частицы и колебанием давления, — ввести понятие о потенциале скоростей Φ . Потенциал скоростей представляет собой такую функцию, производная которой по пространственной координате дает скорость; производная же потенциала скоростей по времени пропорциональна давлению в соответственном месте звукового поля. Мы имеем:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial r}.$$

Общее выражение для звукового излучения поршневой мембраны дал Релэй. Это выражение позволяет вычислить потенциал скоростей в звуковом поле поршневой мембраны, колеблющейся в неограниченно протяженной стене:

$$\Phi = -\frac{1}{2\pi} \int \int \frac{\partial \Phi}{\partial n} \frac{e^{-ikr}}{r} dS. \quad (16)$$

Здесь dS — элемент площади мембраны, причем интегрирование надо производить по этой площади; r — расстояние рассматриваемой точки от соответственного элемента площади, $k = 2\pi/\lambda$, где λ — длина волны, n — направление нормали к поверхности мембраны.

Интегрирование легко провести для всех тех точек, которые лежат на перпендикуляре к середине мембраны, принимаемой за круг радиуса R . Амплитуда давления в этих точках получает значение

$$p_0 = k_1 \cdot \frac{2v'}{k} \sin \left[\frac{k}{2} (\sqrt{z_0^2 + R^2} - z_0) \right], \quad (17)$$

где z_0 представляет расстояние рассматриваемой точки от центра мембраны, v' — амплитуда скорости поршневой мембраны, k_1 — постоянная.

Таким образом амплитуда в зависимости от расстояния изменяется от 0 до $2v'/k$. В точках, где $\frac{k}{2} (\sqrt{z_0^2 + R^2} - z_0) = n\pi$ (n — целое число), получается полное исчезновение звука. Для этих точек можем написать соотношение

$$z_0 = \frac{(R^2/\lambda^2) - n^2}{2n/\lambda}. \quad (18)$$

Точек полного замирания может быть только конечное число. Они получаются лишь пока $n < R/\lambda$. Такие интерференционные точки получаются следовательно в тем большем числе, чем больше отношение радиуса мембраны к длине волны.

Звуковой приемник, воспринимающий амплитуду давления, при продвижении вдоль перпендикуляра к середине мембраны, должен согласно уравнению (17), показывать максимумы и минимумы; это и было подтверждено с помощью конденсаторного микрофона, помещенного в звуковом поле. Рис. 24 дает ход давления вдоль перпендикуляра

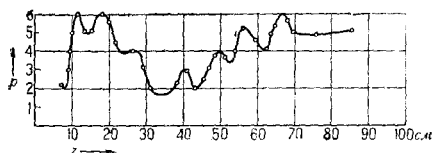


Рис. 24. Изменение давления вдоль перпендикуляра к середине поршневой мембраны.

к середине мембраны; давление измерялось с помощью конденсаторного микрофона.

В названной работе интеграл для точек, лежащих вне перпендикуляра к середине мембраны взять не

удалось, но все же можно предположительно найти распределение интенсивности вне среднего перпендикуляра на основании аналогии с соответственными проблемами оптики⁽²⁶⁾. В оптике теоретические соображения показывают, что угол между средним перпендикуляром и образующей конуса, на поверхности которого амплитуда равна нулю, подчиняется условию

$$\varphi = 0,61 \frac{\lambda}{R}$$

Вполне аналогично располагаются и акустические максимумы и минимумы в звуковом поле, возбуждаемом поршневой мембраной радиуса R . Произведение $2 \times 0,61 \lambda / R$ представляет собою телесный угол при вершине конуса, содержащего всю основную часть излучения источника звука; лежащие вне этого конуса побочные максимумы оказываются значительно меньше главного максимума и составляют лишь незначительную часть общего излучения. Опытным путем эти соотношения были прове-

рены с помощью конденсаторного микрофона, укрепленного на стержне длиной в 3 м; стержень можно поворачивать, и таким образом исследовать точка за точкой давление по окружности, описанной из центра мембраны; к результатам этих исследований мы еще вернемся.

Диффракционные явления, получаемые на большом в сравнении с размером мембраны расстоянии, были недавно количественно подсчитаны Штенцелем ⁽²⁷⁾.

Мы изложим здесь вкратце результаты его подсчетов для квадратной поршневой мембраны; эта форма наиболее близко подходит к мембране блаттхаллера. Таким образом мы будем в состоянии сравнить непосредственно опытные данные с теоретическим расчетом. Следует еще упомянуть, что работа Штенцеля трактует в общем виде вопросы звукового поля, создаваемого рядом точечных источников звука; от расположенных в ряд точечных источников звука Штенцель переходит затем к излучающей поверхности. Рассматривая распределение звукового поля в плоскости, проходящей через центр мембраны перпендикулярно к ней и в то же время параллельно одной из боковых граней мембраны, мы получим следующее выражение: амплитуда потенциала скоростей (которой, как выше было упомянуто, пропорциональна амплитуда давления) может быть выражена в форме

$$p_0 = k_2 \cdot \frac{\sin\left(\frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha}, \quad (19)$$

где k_2 — некоторая постоянная, α — угол между перпендикуляром к середине мембраны и направлением из центра мембраны к рассматриваемой точке; a — сторона квадратной мембраны.

Подставив вместо $\frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha$ величину z , мы получим

$$p_0 = k_2 \left(\frac{\sin z}{z} \right). \quad (20)$$

Кривая функции $\sin z/z$ изображена на рис. 25.

Для достаточно большой мембраны при изменении угла α

от 0 до $\pi/2$ получается целый ряд максимумов и минимумов возбуждения.

На рис. 26а представлено распределение давления в плоскости, получаемое при $a/\lambda = 1,5$ и $a/\lambda = 5$.

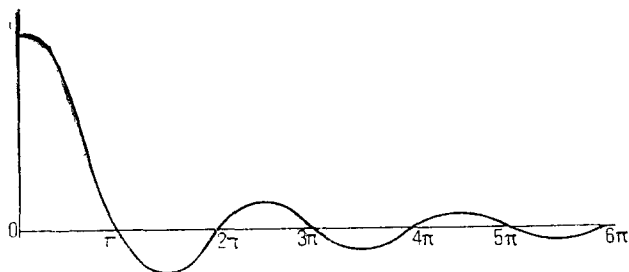


Рис. 25. График функции $\frac{\sin z}{z}$.

На рис. 26b изображено распределение давления, как оно было фактически измерено. Соответственные значения для a/λ составляли при этих опытах от 1,9 до 4,7.

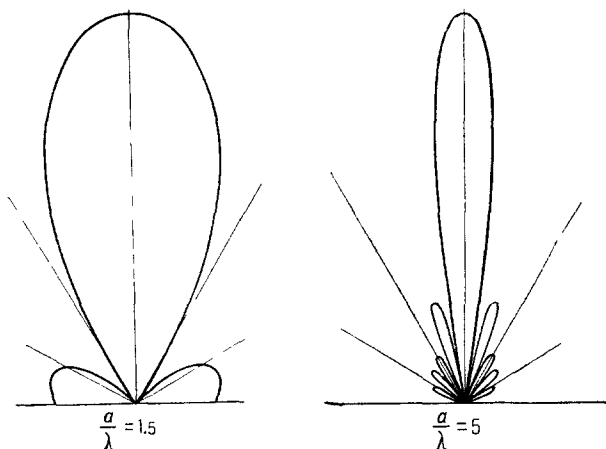


Рис. 26а. Направленное действие поршневой мембраны по вычислениям Штенцеля.

Согласие между расчетами Штенцеля и измерениями Бакгауза и Тренделенбурга можно признать хорошим. Расположение максимумов и минимумов дает удовлетворительное совпадение со значениями, вычисленными

теоретически, хотя колебания возбуждения в экспериментальных кривых и не так велики, как это предполагается по вычислению; чем объясняются эти количественные разногласия — это пока еще не выяснено.

Звуковое излучение поршневой мембраны было разобрано здесь сравнительно подробно, потому что аналогичным образом обстоит дело и для других видов звуковых излучений, напр., для излучения рупора. Именно, если длина рупора велика по сравнению с диаметром отверстия, то частицы в плоскости отверстия колеблются приближи-

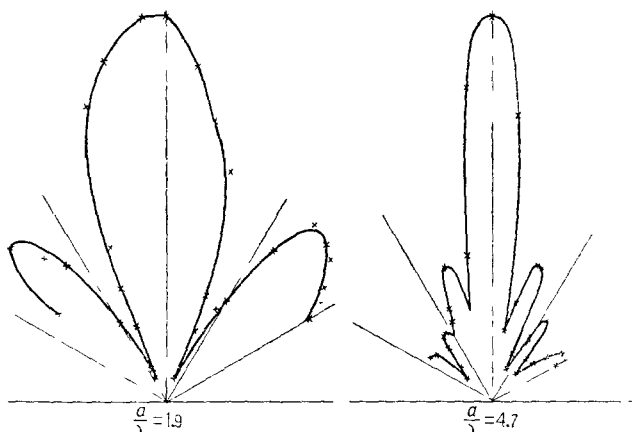


Рис. 26b. Направленное действие поршневой мембраны по измерениям Бакгауза и Тренделенбурга.

тельно в одинаковой фазе, и если сверх того отверстие само велико по сравнению с длиной волны, то звуковое поле перед отверстием получается сходным с звуковым полем перед поршневой мембраной. На рис. 27 представлено распределение давления в звуковом поле перед громкоговорителем с рупором, причем чертеж составлен несколько иначе, чем рис. 26. Именно, на рис. 27 нанесены кривые равного давления; по чертежу легко видеть, как быстро падает давление при отходе от центральной оси; для образования побочных интерференционных максимумов отношение отверстия рупора к длине волны еще недостаточно велико, и условие достаточной длины рупора

по отношению к диаметру отверстия здесь также не выполнено в достаточной мере.

Мы касались пока вопросов, связанных с возбуждением звукового поля при помощи источников звука конечных размеров. При этом мы рассматривали только звуковые поля, простирающиеся неограниченно; единственным ограничением служил тут сам источник звука. Мы ограничились также рассмотрением одних только стационарных процессов. Процессы нестационарные представляют интерес только для звуковых полей сравнительно тесно ограниченных в пространстве; так, например, процессы нара-

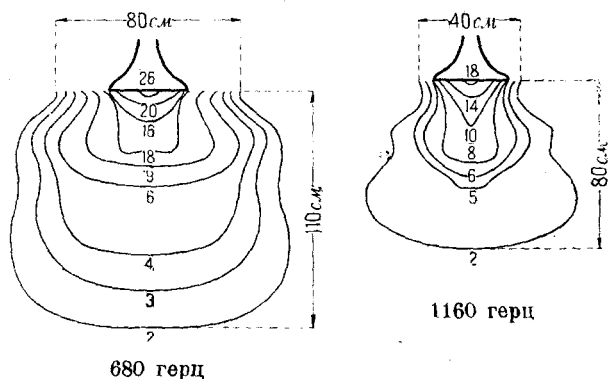


Рис. 27. Звуковое поле перед громкоговорителем с рупором по измерениям Мейера.

стания и замирания звука внутри помещений (реверберация помещений) зависят существенным образом от конфигурации и особенностей помещения.

В последнее время исследования в области акустики помещений приобрели интерес и для радиотелефонии: во всех случаях, где требуется получить наилучшие условия радиопередачи какой-либо речи или оперы, необходимо тщательно учитывать акустические качества помещения. В виду этого мы разберем вкратце новейшие работы в этой области, причем нельзя будет оставить в стороне и работы более ранние, чем большая часть рассмотренных до сих пор, — если задаться целью дать по возможности полный обзор данной области.

Исследования по архитектурной акустике касаются главным образом процессов, происходящих при отражении и поглощении звука. Изучение отражения звука может быть в значительной степени облегчено благодаря опыту, почерпнутому из области оптики; между отражением света и звука существует далеко идущая аналогия. Надо правда отметить, что в обычных случаях оптического отражения почти всегда бывает выполнено условие, что отражающая поверхность велика по сравнению с длиной волны; а при акустических отражениях это условие часто не выполняется. Исследования над отражением звука внутри помещений проводились однако и чисто акустическими методами. В. Сабин⁽²⁸⁾ делал опыты с отражением звука на моделях зданий в уменьшенном масштабе: проходящая волна получалась от треска искры; различные фазы распространения фиксировались фотографическим путем по методу Тёплера. Сам метод Тёплера, как метод оптический, мы описывать не будем.

В чем же заключается мешающее действие отражений? Между двумя слогами при нормальной речи проходит время приблизительно в $\frac{1}{3}$ секунды; если по истечении этого времени до слушателя дойдет отраженный цуг волн, то он совпадет со следующим слогом, непосредственно идущим от источника звука, и вытесность речи будет в значительной степени нарушена. Прделанные Сабин^{ом} опыты над моделями представляют собой прекрасный пример того, как надо предварительно проверять условия отражений до постройки соответственного помещения, и в случае обнаружения каких-либо помех, устранять их, изменяя форму контуров здания.

Особенно опасны многократные отражения. Э. Михель⁽²⁹⁾ сделал недавно доклад о таких многократно повторяющихся эхо. Он же провел экспериментальные исследования по этим вопросам с помощью волн на воде, причем вода наливалась в баки, стенки которых представляли уменьшенную модель контуров разреза испытуемого помещения. В качестве практического средства против таких многократно повторяющихся эхо рекомендуются поглощающие звук мате-

риалы, вносимые в помещение; большое влияние поглощения звука на акустику помещений заставляет нас вкратце коснуться этого вопроса.

Продолжительность замирания звука (реверберация) внутри помещения зависит от поглощения звука стенами и находящимися в помещении людьми и предметами, а также от внутренней поверхности и объема ¹ данного помещения. Под временем реверберации по определению Сабина (31) понимается то время, в течение которого звук от интенсивности, в 10^6 раз превышающей интенсивность на пороге слышимости, ослабляется до ее значения на пороге слышимости. Для времени реверберации t в помещении объема V Сабин установил формулу

$$t = 0,164 \frac{V}{A_R}, \quad (21)$$

где A_R обозначает общее поглощение звука в данном помещении. A_R складывается из следующих членов:

$$A_R = \Sigma a_n' f_n + \Sigma a_m'' s_m + \Sigma a_p''' v_p.$$

Здесь:

a_n' — поглощение звука на 1 м^2 поверхности залы по сравнению с 1 м^2 открытого окна;

f_n — соответствующая площадь в м^2 ,

a_m'' — звукопоглощение предметов, находящихся в зале (на каждый предмет),

s_m — число соответственных предметов,

a_p''' — поглощение звука на 1 м^3	} для всех материалов, поглощение которых зависит от объема.
v_p — объем в м^3	

Значения различных коэффициентов поглощения приведены в следующей таблице:

¹ Отношение поверхности к объему имеет существенное значение для длительности реверберации, так как от этого отношения зависит статистически определяемое число отражений звука в единицу времени, а следовательно и количество поглощаемой при этих отражениях энергии (30).

Таблица 2

открытое окно на 1 м ²	1,00
публика	0,96
занавесы со многими складками	0,5—1,00
войлок 5 см, неокрашенный	0,7
„ 2,5 см неокрашенный	0,55
„ 5 см покрашенный сверху	0,4—0,6
„ 1,5 покрашенный сверху	0,25—0,45
отверстия отопительных и вентиляционных каналов	0,5
открытая сцена, в зависимости от кулис	0,25—0,40
тяжелые ковры	0,29
масляные картины в рамах	0,28
занавесы	0,15—0,25
плотная деревянная обшивка	0,061
штукатурка	0,033
кирпичная стена	0,017—0,25
мрамор	0,01
слушатели (на каждого)	0,44—0,55
кресла, смотря по обивке (на штуку)	0,14—0,28
комнатные растения	0,11

Приведенные в таблице коэффициенты поглощения относятся к звуку с частотой в 512 герц. Коэффициенты сильно зависят от частоты; для частот более низких поглощение, вообще говоря, меньше, для более высоких — сначала значительнее. Эту зависимость можно видеть на таблице 3 ⁽³²⁾.

О ходе кривой реверберации надо сказать, что общее количество звуковой энергии в помещении убывает по экспоненциальному закону.

По Егеру ⁽³³⁾ при реверберации количество звуковой энергии в помещении может быть выражено следующим соотношением

$$E = E_0 e^{-\frac{aVt}{4V}}, \quad (22)$$

где E_0 обозначает энергию при стационарном состоянии.

Чтобы реверберация не служила помехой при слуховом восприятии, лучше всего для разговорной речи в помещениях иметь реверберацию от 0,5—1 сек; для музыкальных исполнений подходящим является более длительная реверберация; здесь можно допустить и 1½ секунды.

ТАБЛИЦА 3

	Частоты (герцы)					
	128	256	512	1024	2048	4096
„Акустический зенитерм“ (Zenitherm) — пробковые зерна, спрессованные в пористые твердые кирпичи (толщ. 1,14" вес 2,06 фн./кв. фут)	0,03	0,13	0,33	0,42	0,42	0,15
„Акустолит“— $1\frac{1}{2}$ " штукатурка на известковом цементе толщиной $\frac{1}{4}$ "	0,21	0,24	0,29	0,33	0,37	0,42
„Акустический асбест“ (Asbestos-Akustikos) — войлок, смесь войлока с асбестом — толщ. $\frac{1}{2}$ "	0,10	0,18	0,36	0,60	0,63	0,57
То же, толщ. $\frac{3}{4}$ "	0,18	0,30	0,54	0,64	0,63	0,57
Шерсть „Balsam“—рыхло сваленные простеганные древесные волокна (толщ. 1", вес 0,26 фн./кв. фут)	—	0,18	0,44	0,62	0,66	—

Из сказанного следует, что определение времени реверберации имеет большое практическое значение для суждения об акустических свойствах данного помещения в целом; в деталях же ход реверберации не может быть предсказан. Также и описанные выше методы определения звуковых отражений могут дать представление только о первых моментах затихания звука, так как на модели практически невозможно точно воспроизвести условия поглощения, реально существующие в помещении. Чтобы представить себе, каков действительный ход реверберации помещения, надо поместить в зал звуковой приемник и произвести запись затихания звука; тем же приемом, разумеется, можно воспользоваться и для записи нарастания звука, и вообще для исследования всех тех звуковых явлений, которые подходят под понятие процессов выравнивания. Мейер ⁽³⁴⁾ провел подобные исследования с помощью электрического звукоприемника и осциллографа. Он произвел запись процессов выравнивания звука в помещениях с различным затуханием и для различных расстояний между источником и приемником звука. Его исследования

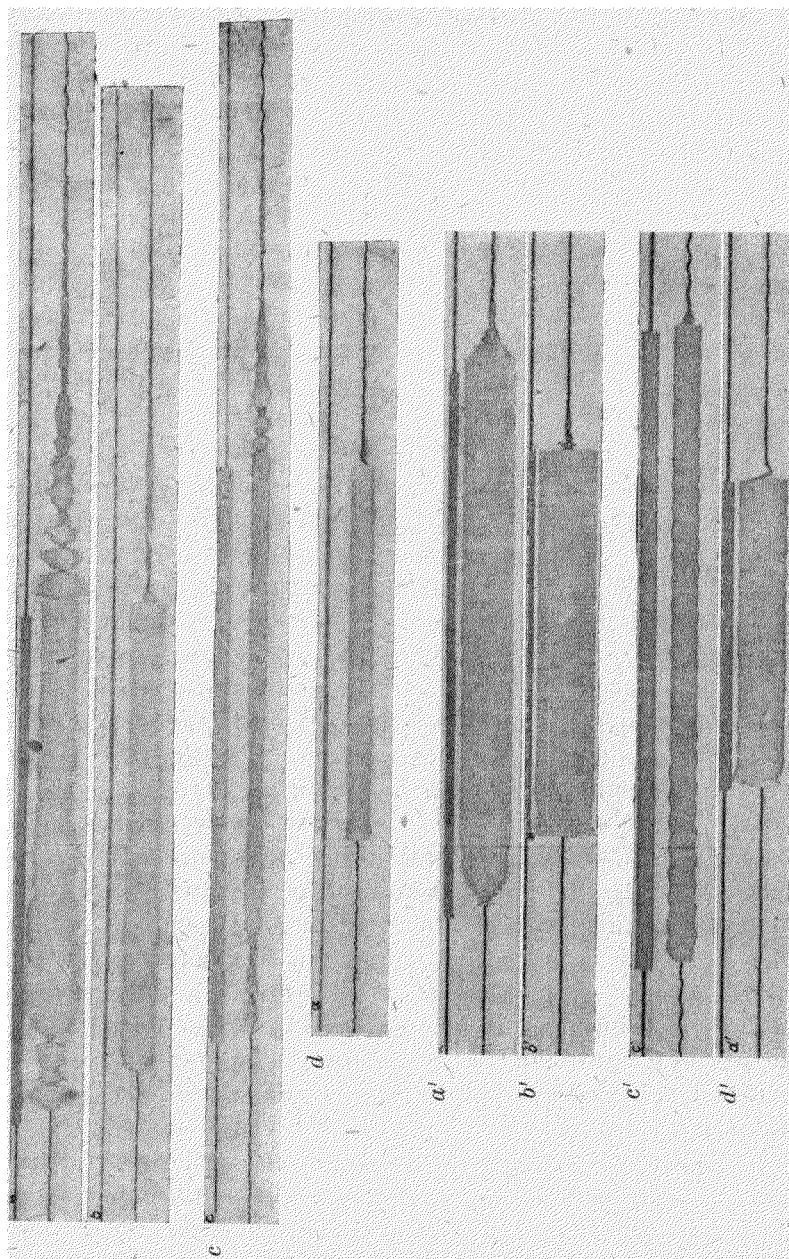


Рис. 28.

касались главным образом вопроса о том, каким образом сказывается влияние акустических условий помещения на приеме речи электрическим звукоприемником и как изменяется это влияние в связи с расстоянием между источником и приемником звука. Его результаты представлены на рис. 28, причем кривые *a*, *b*, *c*, *d* относятся к помещению с хорошо отражающими поверхностями, кривые *a'*, *b'*, *c'*, *d'* — к сильно заглушенному помещению. Сверху изображена кривая тока в громкоговорителе, снизу кривая микрофонного тока; последняя кривая представляет, следовательно, кривую изменения давления в соответственном месте звукового поля. В обоих помещениях измерения были произведены для двух частот (500 и 1300 герц) и для двух расстояний между микрофоном и громкоговорителем (кривые *a*, *a'* — при бл. 4—5 м; *b* и *b'* — при бл. $\frac{1}{2}$ м; кривые *c* и *c'*, а также кривые *d* и *d'* сняты при тех же расстояниях, но при большей частоте). Снимки как будто указывают на некоторое расхождение между опытными данными и привычным представлением о том, что затухание звука в помещении с хорошей акустикой происходит по экспоненциальной кривой. Однако экспоненциальный закон касается только общего количества звуковой энергии в помещении. Амплитуды же давления в какой-нибудь данной точке помещения слагаются из целого ряда отдельных колебаний, попадающих в эту точку частью от самого источника звука, частью от отражающих стен, причем все они приходят с самыми разнообразными фазами; этим объясняется, каким образом иногда, напр., на рис. 28, амплитуда давления еще возрастает, когда источник звука уже выключен. По этим снимкам можно также приблизительно оценить влияние акустических условий помещения на качество звукопередачи. С удалением источника звука от микрофона начинает преобладать влияние звуковых колебаний, отраженных от стен (рис. 28), причем доходящий до микрофона новый слог может при известных обстоятельствах совпасть с сильным отзвуком предыдущего слога; при малом же расстоянии между источником звука и звукоприемником преобладающее значение имеют звуковые

волны, непосредственно падающие на микрофон, так что заметного отзвука не ощущается.

Подобные же опыты по объективному исследованию качества передачи речи при помощи громкоговорителя в помещении с хорошими акустическими условиями произвел Тренделенбург⁽³⁵⁾ в Кельнском соборе.

Рис. 29 дает ход кривых процессов выравнивания звуковой энергии в некоторой точке в средней части собора, отстоящей от микрофона приблизительно на 14 м; примерно через две секунды амплитуда давления спала только на 10%. Отметим, что несмотря на сравнительно большое

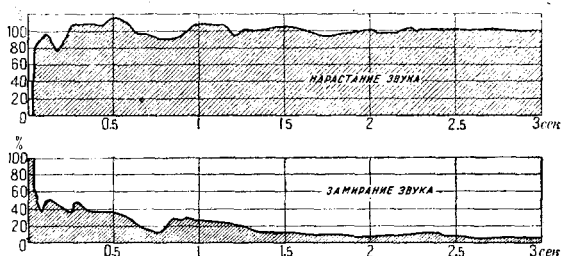


Рис. 29. Нарастание звука и реверберация в Кельнском соборе. Частота 170 герц.

расстояние от громкоговорителя до места наблюдения здесь еще преобладает непосредственно падающий звуковой луч, — внятность речи получалась еще достаточная; на чертежах видно, что при реверберации амплитуда давления очень быстро спадает приблизительно до 40% величины стационарной амплитуды.

И при этих опытах для высоких частот поглощение получилось значительно больше. На рис. 30 изображен ход кривых процессов выравнивания звука в упомянутой точке собора для частот свыше 3000 герц.

Мы уже говорили, что прием производился в тех пунктах, где внятность речи была хорошая. При большем удалении от громкоговорителя передача быстро ухудшается и речь теряется в общем гуле. Внятность речи в значительной степени зависит от скорости речи (говора); если говорят слишком быстро, то при каждом новом слове преды-

душий еще не успевает отзвучать. Этот процесс служит тем большей помехой для внятности речи, чем значительнее остаток замирающего звука по сравнению с дошедшим

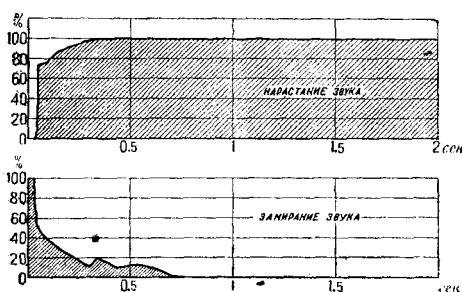


Рис. 30. Нарастание звука и реверберация в Кельнском соборе. Частота свыше 3000 герц.

в данный момент нарастающим звуком нового слога. Достаточную внятность речи можно получить следовательно только в тех точках, в которых преобладающее значение имеет непосредственное воздействие источника звука. Это обстоятельство вызывает необходимость подразде-

лять помещения с резко выраженной реверберацией на целый ряд участков с отдельными громкоговорителями.¹

Приведем еще пример измерений процессов выравнивания звука в зале с очень большой реверберацией (рис. 31), произведенных в таком месте помещения, где сильно сказываются акустические эффекты помещения. Речь идет о записи, произведенной в одном машинном зале. Помещение было около 30 м длиной, причем приемник помещался на расстоянии 20 м от громкоговорителя; внятность речи в этом месте была очень плохая, так что за чтением можно было следить, лишь сильно напрягая

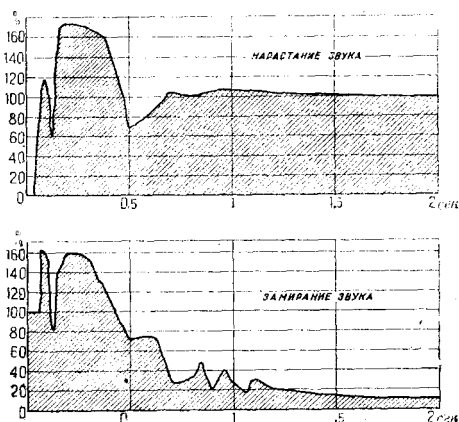


Рис. 31. Нарастание звука и реверберация в машинном зале. Частота 500 герц.

¹ Такая сеть громкоговорителей, распределенных по помещению была применена в 1925 г. при открытии Deutsches Museum (36).

внимание. Для определения коэффициентов поглощения звука Э. Мейер⁽³⁷⁾ применил недавно запись кривых реверберации электрическим методом. Чтобы исключить мешающее влияние интерференции, звуковое поле возбуждалось не постоянным тоном, а тоном, высота которого постоянно немного колебалась. Полученные таким путем кривые реверберации обнаруживают почти равномерное спадание по экспоненциальной кривой; по величине спада можно найти коэффициент поглощения звука.

Снимая кривые реверберации сначала в пустом помещении, а затем — после внесения в него звукопоглощающих материалов, можно из изменения хода кривой определить коэффициент поглощения звука внесенных материалов. Данный нами обзор исследований по акустике помещений указывает на то, что на основании теоретических и практических работ в этой области мы имеем возможность достаточно подробно предсказывать наперед акустические условия проектируемых зданий и улучшать пространственную акустику существующих зданий.¹

Архитектор и акустик, работая в тесном контакте, смогут добиться еще более значительных успехов в этой области; надо, правда, заметить, что требования, которые ставят акустики и архитекторы, часто противоречат друг другу, и приходится выбирать мало удовлетворительные компромиссные решения. Интересный этюд о проектировании помещений в акустическом отношении представляет

¹ В студиях радиопередачи часто оказывалось необходимым усилить влияние акустики помещения. Если всю поверхность зала — стены, пол и потолок — покрыть поглощающими звук материалами, как это делалось в первые годы существования радиовещания, то при приеме с наушным телефоном, при котором не сказываются акустические качества помещения, передача получалась вялая. Если же, например, заднюю стену студии сделать из материала, сильно отражающего, и соотмерить зал так, чтобы отраженные от задней стены эхо попадали на микрофон лишь через соответственные промежутки времени, можно при передаче достигнуть гораздо более полного звука⁽³⁸⁾. Известными техническими средствами можно также создать искусственную реверберацию; мы вернемся к этому вопросу ниже, в разделе о звукоизлучателях (принцип ультрафона)⁽³⁹⁾.

собой работа Ф. Оссвальда ⁽⁴⁰⁾ „К проблеме акустики большой залы общественных собраний в доме Союза в Женеве“ ⁽⁴¹⁾. В этой работе подробно разбирается, каких акустических качеств можно ожидать от каждого из чуть ли не 20 проектов для большого зала собраний Союза, а также дается новый проект формы зала с оптимальными акустическими качествами.

§ 3. Звукоизлучатели

Как теоретическое исследование, так и конструкция звукоизлучателей базируются на совершенно различных принципах в зависимости от цели, для которой эти звукоизлучатели предназначаются: для работы ли в широкой области частот или для работы в одной только узкой области тонов. Для второй группы приборов на первом плане стоит отдача прибора; для первой группы, наравне с этим, выдвигается требование равномерного действия прибора во всей интересующей области звуков; другими словами — передача должна давать точное воспроизведение звуков. Мы обратимся сначала к рассмотрению звукополучателей, пригодных для передачи широкой области частот. Мы присоединим сюда несколько замечаний о новых „настроенных“ излучателях („Ton“-sender); в конце главы будет затронут вопрос о музыкальных инструментах и издаваемых ими звуках; в этой области за последнее время познания наши значительно расширились.

Главное требование, которое должно быть соблюдено для верной передачи широкой области частот, состоит в том, чтобы в передаваемой области воспроизводящий аппарат не обладал собственными слабо затухающими колебаниями как электрическими, так и механическими и акустическими; если такие собственные колебания имеют место, то соответственная область тонов передается с преувеличенно большой амплитудой. В более старых моделях звукоизлучателей, — почти без исключения, — имелись такие колеблющиеся системы, главным образом механические и акустические. В области механики затруднения возникают

всякий раз, когда для преобразования механических колебаний в акустические посредством звена служит закрепленная по краям мембрана. Возможность многочисленных собственных колебаний закрепленной по краям мембраны хорошо известна, — и увеличение затухания этих колебаний может помочь делу лишь до некоторой степени. Чтобы получить достаточно сильное звуковое излучение, особенно для низких частот, применялся рупор; но рупор с своей стороны вызывает дальнейшую возможность по-

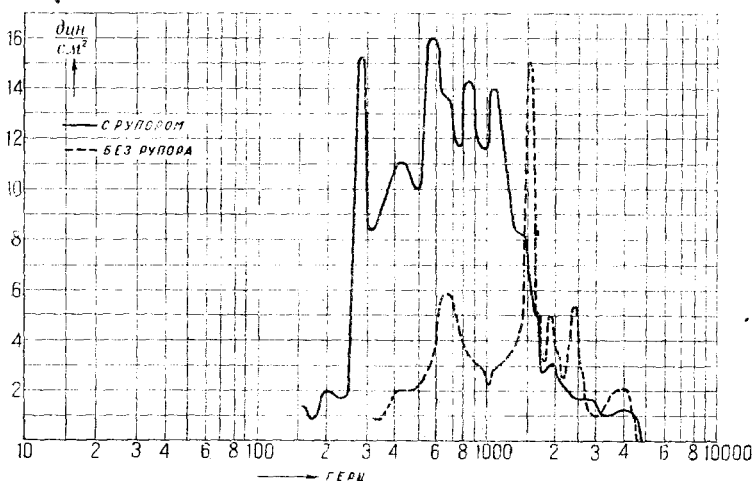


Рис. 32. Частотные характеристики электромагнитного громкоговорителя.

явления собственных акустических колебаний системы, — хотя удачным подбором формы рупора, напр., при рупоре, выгнутом по экспоненциальной кривой, эти колебания можно почти уничтожить⁽⁴¹⁾. Чтобы показать, в какой мере можно рассчитывать на приблизительно равномерную передачу при обыкновенном электромагнитном громкоговори-теле с рупором, мы приводим рис. 32, на котором пред-ставлены результаты измерений Мейера⁽⁴²⁾, сделанных им с помощью диска Релэя. Из чертежа видно, что этот тип громкоговорителя с достаточной точностью может вос-произвести около двух октав.

На долю покойного Риггера выпала заслуга впервые выяснить на основании широких теоретических соображений, каким путем может быть достигнута точная передача для всей практически важной области звуков. В своей законченной еще в начале 1924 г. работе по теории громкоговорителей ⁽⁴³⁾ он дает основы всего этого комплекса вопросов. Один из сконструированных им уже в то время типов громкоговорителей до сих пор нередко применяется на практике. Необходимость бороться с искажениями, зависящими от резонанса, ведет к требованию, чтобы для передачи применялись лишь такие системы, для которых период собственных колебаний лежит ниже или выше передаваемой области частот. Мы увидим, что по акустическим причинам вопрос может идти только о системах, настроенных достаточно низко. Во избежание акустических резонансов рупора, он совсем был уничтожен, а вместо него, для получения достаточной силы действия, была применена поршневая мембрана, возбуждаемая практически равномерно по всей поверхности. Сама поршневая мембрана помещается в отверстии неподвижной стены, имеющей размеры, достаточно большие по сравнению с размерами волн передаваемой области звуков. Релэй ⁽⁴⁴⁾ дал теорию расчета звукового поля поршневой мембраны. По Айгнеру ⁽⁴⁵⁾ излучаемая акустическая мощность равна

$$L = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^4 \omega^4 x_0^2}{4c},$$

где ρ обозначает плотность воздуха, R — радиус мембраны, x_0 — амплитуда колебаний мембраны и c — скорость звука. Эта формула пригодна, поскольку длина волны λ велика по сравнению с R .

Из формулы видно, что мощность звука увеличивается пропорционально четвертой степени частоты; чтобы обеспечить точную передачу звуков, нужно следовательно уменьшать амплитуду мембраны пропорционально квадрату частоты. А это условие выполняется в системах, собственный период колебаний которых лежит ниже передаваемой области колебаний. Риггер ⁽⁴⁶⁾ произвел расчет сопро-

тивления излучению также и для частот, лежащих вне пределов действия формулы ⁽²³⁾, т. е. и для тех длин волн, которые нельзя считать достаточно большими по сравнению с диаметром мембраны; оказывается, что сопротивление излучению возрастает недостаточно быстро для того, чтобы компенсировать уменьшение амплитуды колебаний мембраны. Тогда получается уменьшение отдачи, которое вначале однако сказывается не слишком сильно, потому что при более коротких волнах начинает проявляться направленное действие мембраны, так что в части помещения, близкой к средней нормали к мембране, передача продолжает оставаться почти правильной, и лишь дальше, по сторонам, более высокие тона начинают слабеть. Вопросы о на-

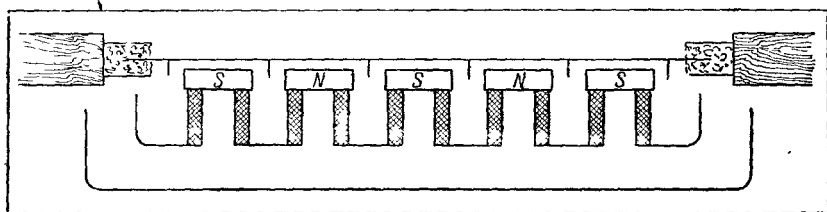


Рис. 33 Поперечное сечение блаттхаллера.

правленном действии мембраны мы здесь касаться не будем, так как эти проблемы мы подробно рассмотрели во главе 2.

Для возбуждения колебаний мембраны Риггер применил электродинамический принцип. К мембране блаттхаллера (рис. 33) плотно прикрепляется по кривой Меандера (зигзагообразно) медная лента. По этой медной ленте течет передаваемый телефонный ток; лента находится в соответственно расположенном магнитном поле. Взаимодействие проводника с током и магнитов возбуждает колебания мембраны. Мы не можем здесь детально разбирать техническое устройство этого прибора и отсылаем читателя к другим статьям ⁽⁴⁷⁾. В этой работе мы ограничимся тем, что покажем, в какой мере блаттхаллер позволяет добиться верной передачи. На рис. 34 представлены частотные характеристики различных моделей блаттхаллера, полученные с помощью диска Релэя.

Громкоговоритель Райса-Келлога (⁴⁸), о котором получилось сообщение из Америки через год после опубликования основной работы Риггера, имеет излучающую

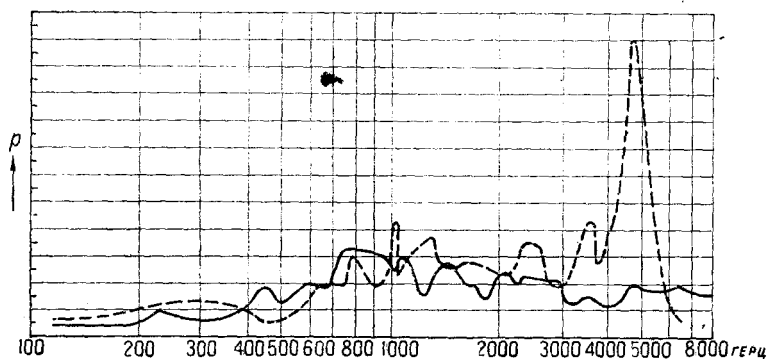


Рис. 34. Частотные характеристики различных моделей блаттхаллеров.

поверхность, работающую приблизительно по принципу поршневой мембраны. Излучающая звук поверхность громкоговорителя Райса-Келлога сделана в виде конуса с

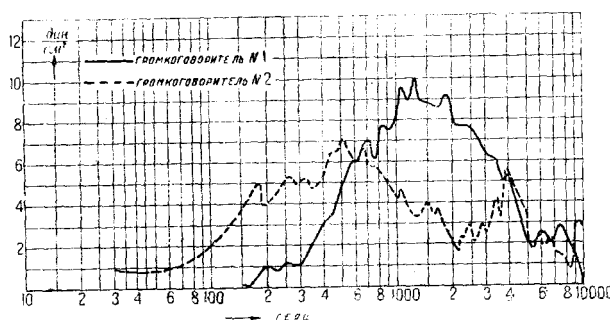


Рис. 35. Частотные характеристики громкоговорителей: электростатического (№ 1) и электродинамического (№ 2).

притупленным концом, на котором сидит катушка, охватываемая полем горшковидного магнита. Конус, изготовляемый из бумаги, при низких частотах колеблется всей своей поверхностью; при более высоких частотах конус перестает быть жестким и амплитуда его колебаний к

краям уменьшается. Частная характеристика ⁽⁴⁹⁾ громкоговорителя, работающего по этому принципу, представлена на рис. 35 (кривая 2). На том же рисунке (кривая 1) дана характеристика громкоговорителя с электростатическим возбуждением, у которого мембрана сделана из резины.

Упомянем также далее о громкоговорителе со складчатой мембраной (Faltenlautsprecher), о котором Герлах ⁽⁵⁰⁾ сделал в 1926 г. сообщение на годичном собрании Союза электротехников. Схема этого громкоговорителя изображена на рис. 36 и 37. Излучающим органом громкого-

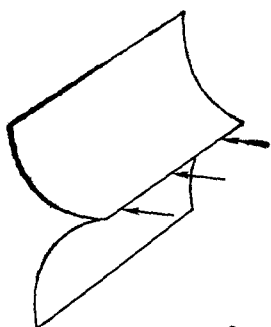


Рис. 36. Схема громкоговорителя со складчатой мембраной.

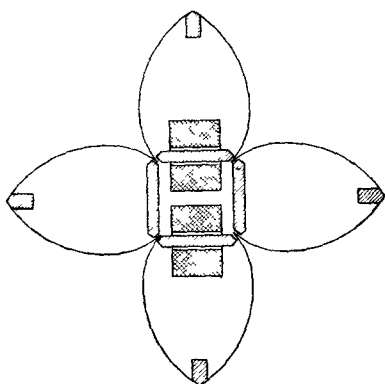


Рис. 37. Схема электродинамического громкоговорителя со складчатой мембраной.

рителя является некоторая поверхность: сложенный складками листок из пертиакса. Эта поверхность обладает очень низким переходом собственных колебаний. Возбуждение получается или электродинамическим путем при помощи медного проводника, укрепленного на складке или же, в другой модели (громкоговоритель „Протос“) также электромагнитное. Об области охватываемых частот дает представление рис. 38, полученный Герлахом с помощью выработанного им автоматического метода регистрации ⁽⁵¹⁾; как приемник применялся при этом ленточный микрофон. Подчеркнем, что в отличие от остальных характеристик на этой кривой амплитуды нанесены в

логарифмическом масштабе, так что непосредственное сравнение кривых невозможно.

Мы разобрали здесь только те работы, целью которых служило систематическое выяснение акустических свойств

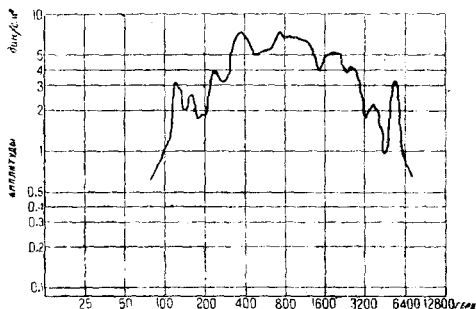


Рис. 38. Частотная характеристика громкоговорителя „Протос“.

громкоговорителей. В изложение многочисленных технических достижений в этой области мы вдаваться не будем⁽⁵²⁾. Нам кажется однако уместным привести ряд кривых, полученных Грютцмахером и Мейером⁽⁵³⁾ при исследовании диапазона частот головных телефонов. Приемником в этом случае служил конденсаторный микрофон, который соединялся с испытуемым телефоном посредством искусственного уха. Искусственное ухо состояло при

емником в этом случае служил конденсаторный микрофон, который соединялся с испытуемым телефоном посредством искусственного уха. Искусственное ухо состояло при

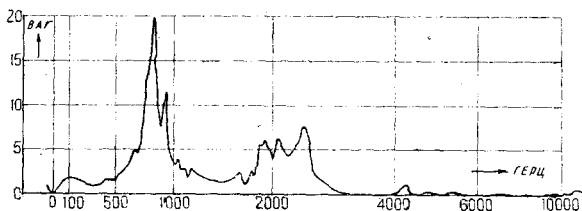


Рис. 39. Частотная характеристика электромагнитного телефона.

этом из небольшой полости, окруженной латунью. Отметим, что полость эта, в отличие от человеческого уха, не поглощает звука, а потому резонансные точки характеризуются меньшим затуханием, чем то бывает на практике.

На рис. 39 дана частотная характеристика большого низкоомного электромагнитного телефона, а на рис. 40— характеристика электростатического телефона, в котором покрытая угольной пылью резиновая мембрана колеблется перед решетчатым электродом.

Мы разобрали пока вопрос о верной звуковой передаче только с одной точки зрения: насколько велика передаваемая громкоговорителем область частот? Теперь мы должны разобрать вопрос с другой, также очень существенной точки зрения, а именно с точки зрения линейности передачи. К каким значительным ошибкам в передаче приводят отклонения от линейности — об этом можно судить из следующих соображений. Положим, что сила, прилагаемая к излучающей звук системе, имеет две слагающие с угловыми частотами ω_1 и ω_2 . Таким образом пусть

$$k = k_1 \sin \omega_1 t + k_2 \sin \omega_2 t. \quad (24)$$

Если имеются отклонения от линейности, то в вынужденных колебаниях на ряду с первоначальными частотами ω_1 и ω_2 появятся новые частоты ω_k (комбинационные тоны), которые образуются по закону $\omega_k = m\omega_1 \pm n\omega_2$, причем, m и n принимают значения ряда последовательных целых чисел. Ясно, что образование таких новых

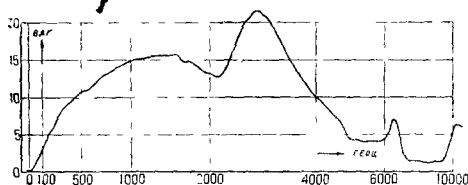


Рис. 40. Частотная характеристика электростатического телефона.

тонов, совершенно не имевшихся в излучаемом звуке, приводит к искажениям. Положим, например, что звукоизлучатель должен передать гласную *а* (главные форманты — 800 и 3000 герц); при передаче это *а* перейдет в *э* ($3000 - 800 = 2200$, т. е. тон, лежащий в области форманты *э*).

В отношении линейности передачи системы, возбуждаемые электродинамическим путем, обладают большими преимуществами, проявляющимися главным образом тогда, когда требуется получить большую мощность излучения. Так, например, мембрана блаттхаллера может совершать колебания с очень большой амплитудой, и однако, проводники не выходят из поля и линейность не нарушается; и в других случаях предполагаемая линейность передачи этого именно типа громкоговорителя подтвердилась в полной мере.

Сообщим теперь кратко об измерениях линейности передачи, произведенных недавно Э. Мейером⁽⁵⁴⁾. Мерой искажений, зависящих от нелинейности передачи, служит у него отношение эффективной амплитуды давления для обертонов к эффективной амплитуде давления для основного тона. Кюпфмюллер⁽⁵⁵⁾ предложил назвать это отношение фактором дребезжания (Klirrfaktor). Для измерения фактора дребезжания Мейер возбуждает испытуемый излучатель при помощи синусоидального тона, причем измерение распределения давления в звуковом поле он производит компенсационным методом с помощью конденсаторного микрофона.

В таблице 4 приведены факторы дребезжания двух электромагнитных мембранных громкоговорителей с постоянным магнитом, в зависимости от частоты. Один из громкоговорителей (*a*) имеет обычный жестяной рупор, в другом — железная мембрана неподвижно соединена с конусовидной бумажной мембраной.

Т а б л и ц а 4

Герцы:	160	200	250	300	400	500	700	1000	1400
<i>a</i>	2,8	1,2	0,6	0,05	0,1	0,02	0,02	0,005	0,005
<i>b</i>	0,3	0,6		0,5	0,3		0,1	0,04	0,04

Оба громкоговорителя возбуждались током в 2 мА. Поражающе велик фактор дребезжания для низких частот. Это обстоятельство вызывается тем, что в данном типе громкоговорителей низкие частоты излучаются плохо; поэтому низкие основные тоны заглушаются лучше передаваемыми обертонами.

На таблице 5 дана зависимость фактора дребезжания от величины возбуждающего тока, причем измерения для громкоговорителя *a* были произведены при частоте в 250 герц, а для громкоговорителя *b* приблизительно 300 герц.

Т а б л и ц а 5

mA:	0,5	1	2	4
<i>a</i>	0,1	0,2	0,3	0,7
<i>b</i>	0,1	0,3	0,5	0,3

Из таблицы видно, что фактор дребезжания сильно возрастает с увеличением возбуждения. Э. Мейер указывает следующие возможные причины этих нелинейных искажений:

1. Амплитуда мембраны перестает быть достаточно малой по сравнению с расстоянием между полюсом магнита и мембраной.

2. Переменный магнитный поток в мембране и железном сердечнике перестает быть малым по сравнению с постоянным магнитным потоком.

3. Кривая намагничения не прямолинейна.

Которая из перечисленных возможностей способна оказать наибольшее влияние, — мы здесь разбирать не будем.

Э. Мейер исследовал еще другой тип электромагнитных громкоговорителей, в которых возбуждение производится системой, работающей по типу поляризованного релэ; якорь, на котором помещается также обмотка переменного тока, находится посредине между полюсами постоянного магнита. Подобное расположение отличается лучшей линейностью. На таблице 6 приведены значения фактора дребезжания громкоговорителя, построенного по этому типу.

ТАБЛИЦА 6

Герцы:	160	300	600	800	1400
	0,1	0,1	0,03	0,02	0,01

Громкоговорители с электростатическим возбуждением также обладают довольно значительным фактором дребезжания, обусловливаемым отчасти тем, что здесь нельзя пренебречь величиной возбуждающего переменного напряжения по сравнению с напряжением постоянным. С другой стороны фактор дребезжания велик еще и оттого, что амплитуда колебаний мембраны в этом случае недостаточно мала по сравнению с расстоянием между мембраной и находящимся против нее электродом. Как раз это последнее обстоятельство трудно устранимо, так как с увеличением этого расстояния отдача быстро падает. Таблица 7 дает факторы дребезжания для электростатического

громкоговорителя со свободной (*a*) и с натянутой мембраной (*b*).

ТАБЛИЦА 7

Герцы:	200	400	800
<i>a</i>	0,4	0,2	0,02
<i>b</i>	0,3	0,1	

В отношении фактора дребезжания наилучшим способом оказалось электродинамическое возбуждение. Так, напр., измерения показали, что фактор дребезжания Риггеровского блаттхаллера даже и для низких частот остается ниже 0,01.

Для краткого обзора новейшего развития вопроса о громкоговорителях мы можем удовлетвориться приведенным материалом. Данные эти дают в частности возможность составить себе представление о том, в какой мере нам сейчас доступна точная звукопередача и где лежат источники ошибок.

Укажем еще на две работы ⁽⁵⁶⁾, имеющие значение для вопроса о механических и акустических свойствах телефонов. Э. Ветцман и К. Шустер исследовали связанные колебания непрерывных систем (*kontinuierliche Teilsysteme*). Опыты были проведены в помещениях, причем воздушные колебания возбуждались мембранными телефонами. Теорию связанных колебаний телефонных мембран и воздушных пространств дал Шустер. Эту проблему можно разрешить с любой степенью точности при помощи метода Ритца. В работе дается также метод приближенного решения задачи.

Мы перейдем теперь к исследованиям записи и воспроизведения звуков при помощи говорящих машин. В интересах более цельного изложения относящихся сюда работ, нам придется уже сейчас затронуть ряд вопросов, которые собственно входят в следующую главу — о звукоприемниках. Таков прежде всего вопрос о современных усовершенствованных способах нанесения звуковой записи на пластинки.

До последнего времени и в специальной литературе и в учебных руководствах можно было найти лишь очень скудные и по большей части только самые общие данные о говорящих приборах, — факт, объясняющийся тем, что фирмы, изготовлявшие приборы, всячески старались хранить в тайне особенности своих конструкций: более широкая трактовка задач и методов работы говорящих машин стала распространяться лишь очень недавно.

Изобретенный Эдисоном в 1877 г. фонограф имел в качестве звукоприемника мембрану (по большей части из слюды, дерева или стекла), снабженную острием (обыкновенно из сапфира). Колебания мембраны записываются острием на восковом валике в виде борозды, глубина которой меняется соответственно изменениям в размахе колебания. Движение острия здесь перпендикулярно к поверхности, на которую наносится запись. Для воспроизведения звуков служит подобным же образом устроенная мембрана; ее игла пробегает по борозде, в свою очередь приводя в движение передающую мембрану. Фонограф скоро был вытеснен граммофоном, описание которого дал в 1898 г. Э. Берлинер. Преимущества граммофона в том, что тут достигается большая сила звука и более точная передача его. Граммофон устроивается таким образом, что записывающее острие движется перпендикулярно к поверхности, на которую наносится запись, а параллельно ей, и принимает запись не валик, а горизонтальная пластинка. Между мембраной и острием, так же как и между иглой и воспроизводящей мембраной, имеется рычажная передача, при помощи которой достигается более значительный эффект, чем в простом фонографе.

При описании отдельных частей граммофона, мы прежде всего вкратце познакомимся с той его частью, которая по существу одинакова во всех его системах и тип которой на практике вполне выработан: мы говорим о граммофонной пластинке.

О свойствах граммофонных пластинок и в особенности о получающихся на них кривых записи можно найти данные в работе Гермерсгаузена (67). Он указывает,

что ширина борозды равняется приблизительно 0,06 мм, а среднее расстояние между двумя бороздами около 0,24 мм. Если радиус пластинки равен 300 мм, то можно (оставляя свободной от записи центральную часть пластинки, диаметром в 120 мм), нанести на пластинку борозду, длиною, примерно, в 240 м. Само собою разумеется, что для иглы воспроизводящего аппарата необходимо выбирать материал особенно высокого качества, отличающийся наибольшей прочностью, так как она должна пробегать этот длинный путь, по возможности мало стираясь.

Для амплитуды кривой остается, как явствует из вышесказанного, всего лишь около 0,1 мм. Мы разберем теперь вкратце, как надо вести запись, чтобы наилучшим образом использовать имеющееся в распоряжении пространство⁽⁵⁸⁾. Допустим, что начальное звуковое поле создается акустическим процессом вида $p_1 \sin \omega t$. Этот акустический процесс дает при записи на пластинке кривую $x = x_1 \sin \omega t$, и нас теперь прежде всего занимает вопрос: какую зависимость от частоты колебаний мы должны установить для x , чтобы наилучшим образом использовать пластинку; а когда эта зависимость будет установлена, то при конструкции воспроизводящего аппарата, мы должны будем строго ее придерживаться, так как иначе не сможем получить точного воспроизведения частот первоначального акустического процесса.

На первый взгляд представляется наиболее выгодным вести запись так, чтобы при изменении частоты ω амплитуда наносимой на пластинку кривой оставалась постоянной; или, другими словами, чтобы отношение давления в звуковом поле к амплитуде кривой не зависело бы от частоты. Такой способ записи позволил бы, правда, хорошо использовать пространство между двумя соседними кривыми, но зато привел бы к существенному неудобству. С увеличением частоты, длина отдельных волн на пластинке убывает, и таким образом, радиус кривизны синусоидальных волн в точках поворотов становится все меньше и меньше, и делается, наконец, настолько мал, что запись, и в особенности последующее воспроизведение подобной кривой для высоких

частот наталкивается на непреодолимые трудности. Поэтому приходится вести запись так, чтобы одинаковым давлением в звуковом поле соответствовали бы не одинаковые амплитуды, а одинаковые скорости. Следовательно, требуется чтобы

$$x = \frac{P}{\omega} \quad (25)$$

Для очень низких частот (примерно ниже 200 герц.) приходится допускать отступления от требования (25); если мы хотим для акустически наиболее важных областей достигнуть возможно более верной передачи, то амплитуду кривой нельзя брать слишком малою (по абсолютной величине), — иначе очень мешает шум движущейся иглы. А при этом условии для самых низких, — акустически менее важных, — частот кривая захватывала бы уже соседнюю борозду. Поэтому, для таких наиболее низких частот приходится мириться с компромиссом, и вести работу уже с постоянной амплитудой. С другой стороны, для самых высоких частот (выше 5000 герц) выясняется необходимость брать не постоянную скорость, а постоянное ускорение, чтобы избежать слишком малого значения радиуса кривизны. Эти вынуждаемые условиями компромиссы ведут к искажениям звуков в самых низких и самых высоких регистрах.

Обратимся теперь к способам нанесения кривой на пластинку. При этом мы можем оставить в стороне чисто механические приемы записи, хотя еще недавно они и были общепринятыми в технике говорящих машин: теперь их совершенно вытеснили развившиеся за последнее время электро-механические методы. Недостатком чисто механического способа записи являлись неустранимые при этом искажения звуков, связанные главным образом с резонансом мембраны и рупора, а также малая чувствительность аппарата, повысить которую в достаточной степени не удавалось. Малая чувствительность приборов вела, например, к тому, что при записи оркестровых номеров приходилось совершенно искусственным образом размещать инструменты в оркестре, а это конечно не могло не ощущаться, как большое неудобство и лицом, ведущим запись, и арти-

стами, и в то же время самое впечатление от музыки нарушалось.

Большим шагом вперед было применение электрических звукоприемников. У лучших электрических приемников порог чувствительности не ощущается. Они обладают почти равномерной чувствительностью во всей акустически важной области частот и в высшей степени верно передают амплитудные соотношения. Передача музыки приобретает большую естественность, так как здесь нет надобности отступать от обычного размещения инструментов и артистов ⁽⁵⁹⁾ Больше всего выиграет при этом передача оркестровых и хоровых номеров. Электрический звукоприемник может быть помещен на сравнительно большом расстоянии от источника звука, благодаря чему картина получается значительно более равномерная.

К конструкции электрических звукоприемников и качеству получаемой с их помощью передачи мы вернемся позднее, в главе о звукоприемниках, а сейчас займемся вопросами, связанными с получением звуковой записи на пластинке при помощи звукоприемника, работающего на усилитель. При этом мы будем предполагать, что передача остается верной вплоть до оконечной лампы усилителя, и следовательно напряжение на сетке оконечной лампы усилителя остается всегда пропорциональным амплитуде давления звукового поля, и в особенности, что соотношение это не зависит от частоты.

Максфильд и Гаррисон ⁽⁶⁰⁾ дали подробный анализ электромагнитного аппарата для записи граммафонных кривых, который мы вкратце опишем.

Аппарат изображен на рис. 41. Пишущее острие приводится в движение при помощи якоря поляризованного релэ. Чтобы судить о работе этого прибора, Максфильд и Гаррисон исходили из соображений аналогии между такой механической системой и соответственно построенным электрическим фильтром. Уже в первой части нашего обзора мы указывали на аналогии между акустическими и электрическими колебательными контурами; в частности, мы показали, что к акустическим фильтрам можно приме-

нить те же соображения, которые подробно разработаны для электрических фильтров. Также и к механическим системам, способным колебаться, можно применить аналогичные соображения. Такой сложный прибор, как изображенный выше электромагнитный аппарат для граммофон-

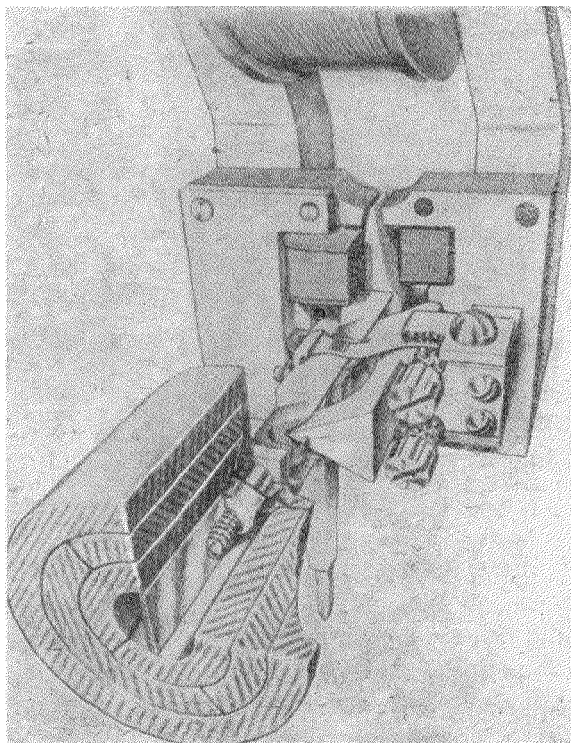


Рис. 41. Электромагнитный аппарат для граммофонной записи.

ной записи, можно рассматривать, как систему связанных колебательных контуров и соответственно с этим заменить подходящую схемой.

На основании соображений, подобных тем, к которым мы прибегали при построении теории акустических фильтров в главе I, может быть построена следующая сравни-

тельная схема соответственных механических и электрических величин.

Механические величины

Сила f (дин)
 Скорость v (см./сек.)
 Смещение s (см.)
 Импеданс z (дин. сек./см.)
 (Для дин. сек./см употребляется также выражение „механический ом“)

Механическая емкость¹ c (см./дин)
 Масса m (грамм)

Электрические величины

Напряжение e (вольт)
 Ток i (ампер)
 Заряд q (кулон)
 Импеданс z (ом)

Емкость C (фарады)
 Самоиндукция L (генри)

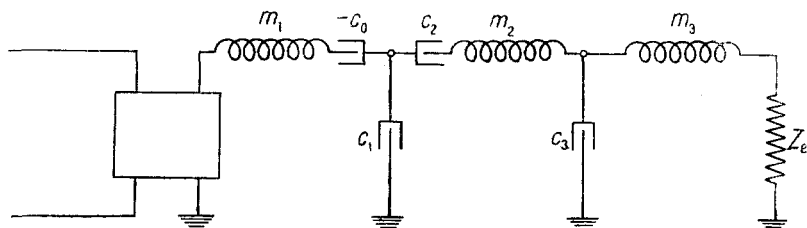


Рис. 42. Электрическая аналогия к рис. 41.

Электрическая схема, которую дают Максфильд и Гаррисон для истолкования изображенного на рис. 41 аппарата, представлена на рис. 42. Согласно вышесказанному, к аппарату должно быть предъявлено требование, чтобы в акустически важных областях звуков амплитуда скорости записывающего острия была пропорциональна амплитуде напряжения на сетке последней лампы — и следовательно, амплитуде давления, — и в особенности, чтобы соотношение оставалось независимым от частоты. Нам надо, значит, рассмотреть, имеет ли подобным же образом построенный электрический фильтр равномерную

¹ Выражение „механическая емкость“ дано здесь взамен принятого в американской литературе слова „Compliance“. Обратное значение величины, обозначаемой как механическая емкость, есть направляющая сила (Direktionskraft).

можно видеть на рис. 44; в качестве рупора, ради сбережения места, применялась складчатая воронка, выгнутая по экспоненциальной кривой. Электрическую „схему замещения“ дает рис. 45, кривую градуировки — опять-таки в логарифмическом масштабе — рис. 46.

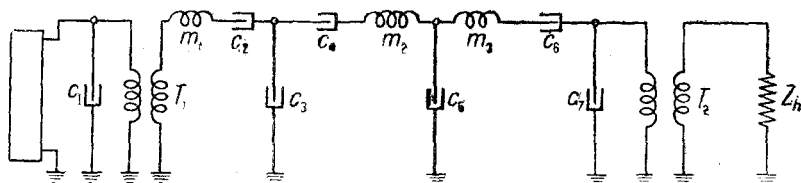


Рис. 45. Электрическая аналогия к рис. 44.

Следует также упомянуть, что для воспроизведения звука, особенно в том случае, когда требуется большая акустическая мощность, выгодно пользоваться электрическим приспособлением для воспроизведения звука (Тонабnehmer), соединенным с громкоговорителем. Это позволяет, при надлежащем выборе громкоговорителя, лучше выявить самые низкие частоты и, даже при большой силе звука, сохранить достаточную линейность передачи.

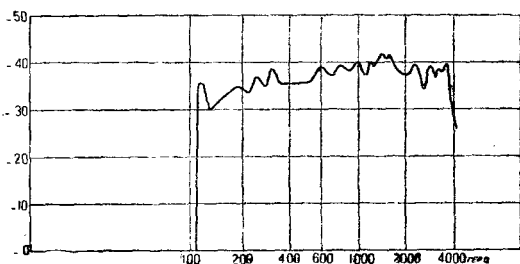


Рис. 46. Частотная характеристика воспроизводящего механизма.

Келлог⁽⁶¹⁾ описывает конструкцию электрического звукоприемника. Он указывает, что очень многое зависит от того, чтобы передаточный рычаг, при малом весе, был достаточно жесток.

Келлог дает также

обзор конструкций магнитных систем таких аппаратов.

В связи с вопросом о граммофонах, укажем здесь еще кратко на новейшие усовершенствования в фотографической записи звуков, — область работ, имеющая особое значение для говорящих фильм. О так называемом способе „Три-

Эргон" говорит в своей книге Энгль⁽⁶²⁾. В этой же области работал Ранкин⁽⁶³⁾. Входить здесь в подробное рассмотрение этих вопросов было бы однако неуместно, так как относящиеся сюда задачи более касаются фотографической оптики, нежели акустики или электроакустики. Акустические же проблемы, ставящиеся в связи с говорящими фильмами, относятся к вопросу о восприятии звуков и их передаче, о чем уже шла речь выше.

Мимоходом коснемся здесь еще так называемого „Ультрафон“-принципа⁽⁶⁴⁾. Если на одну и ту же борозду граммофонной пластинки поставить два звукоприемника так, чтобы одна игла опережала другую примерно на $1/10$ сек, то субъективно громкость значительно увеличивается, при условии, что каждый приемник имеет свой рупор. Надо заметить, что этот выигрыш в звучности чисто кажущийся; иллюзия слуха обусловлена сильно выраженным стерео-акустическим эффектом. Если передается, например, речь или пение, то вслед за каждым слогом тотчас воспринимается ухом быстро следующее за ним эхо; это создает иллюзию большей полноты звука.

До сих пор мы занимались аппаратами, для которых на первый план выдвигается требование верной звукопередачи в широкой области частот. Обратимся теперь к работам, посвященным звукоизлучателям, настроенным на тон определенной частоты. Чисто акустическая работа над усовершенствованием настроенных звукоизлучателей („Tonsender“) была произведена по большей части уже раньше; — я имею в виду прежде всего камертоны, играющие такую выдающуюся роль при акустических измерениях, как стандарты частот, о сиренах⁽⁶⁵⁾, свистках и т. п. Упомянем здесь также об электродинамическом излучателе Феессендена и электромагнитном излучателе Общества подводной сигнализации. В одной специальной области, лежащей, собственно говоря, вне области акустики, именно в недавнее время достигнуто очень быстрое развитие. Это — область ультразвуковых излучателей. Толчок к этим работам дали главным образом практические соображения. Оказалось, что с ультра-звуковыми колебаниями сравнительно легко получить

направленное действие, благодаря чему достигается более высокая концентрация энергии в звукоприемнике. Для задач передачи звука под водой (для обозначения входа в гавань, напр., и т. п.) направленный ультра-звуковой луч оказывается очень пригодным.

Для возбуждения ультра-звуковых волн пользуются обыкновенно пьезоэлектрическими кристаллами, — метод, указанный Ланжевром ⁽⁶⁶⁾ для подводной телеграфии, применяющей ультра-звуковые колебания. Как известно, пьезоэлектрический кристалл легко может быть приведен в механические колебания действием переменного электрического напряжения. Пьезокристаллы с успехом употребляют

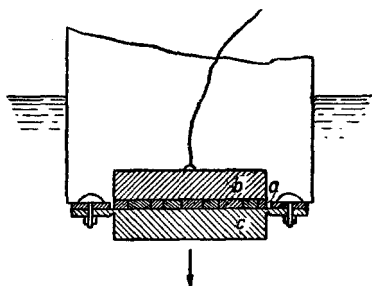


Рис. 47. Подводный звуко-излучатель.

ся, например, как стандарты частот ⁽⁶⁷⁾ в области радиотелеграфии. Пьезоэлектрический подводный звукоизлучатель был сконструирован Ланжевром. Так как достаточно большие кристаллы кварца находить не легко, Ланжевен составлял излучатель из мелких кусочков, собранных в виде мозаики, причем толщина отдельного кусочка едва достигала 2 мм. На рис. 47 дан поперечный разрез излучателя: *a* — мозаичная прокладка, *b* и *c* — стальные пластинки, толщиной около 3 см, к которым приклеен кварц. На стальные пластинки накладывается переменное напряжение, приводящее в действие прибор. Частота собственных колебаний такого колебательного контура лежит в области 40 000 герц. Технические применения этого ультра-звукового излучателя, как, например, для измерения морских глубин по методу эхо, лежат вне рамок нашего обзора. Мы отсылаем читателя по этим вопросам к другим работам ⁽⁶⁸⁾.

Пьезокварц с успехом был использован и для получения воздушных колебаний высокой частоты. Так Пирс ⁽⁶⁹⁾ применял подобные излучатели для измерения скорости звука в воздухе при самых высоких частотах, вплоть

до $1,5 \cdot 10^6$ герц. Упомянем здесь еще об исследованиях Вуда и Лумиса ⁽⁷⁰⁾ над пьезокварцем, погруженным в масло; при этих исследованиях кварц подвергался действию очень мощных источников электрической энергии, и произведенные опыты обнаружили новые и своеобразные явления. Вуд и Лумис возбуждали пьезокварц с помощью электронной лампы мощностью в 2 kW; напряжение на кристалле равнялось около 50 000 V. В приборе взяты были кварцевые пластинки от 7 до 14 мм толщиной, которые давали возможность вести работу в области от 100 000 до 700 000 герц. Звукоизлучатель находился на дне стеклянного сосуда, наполненного маслом. Под действием звукового давления на поверхности жидкости над излучателем получался бугор масла до 7 см высотой. Капельки масла выбрасывались вверх на расстояние до 40 см. Давление на приложенную к поверхности стеклянную пластинку, диаметром в 8 см, было так велико, что ее можно было нагрузить тяжестью в 150 г. Энергия колебаний вызывала в сосуде с маслом совершенно необычайные эффекты; так, например, наблюдались интересные биологические эффекты: маленькие рыбки и лягушки, подвергнутые действию звуковых волн, были убиты через несколько минут.

Мы считаем невозможным закончить обзор работ о звукоизлучателях, не коснувшись хотя бы кратко еще одной группы их, которая по своему разнообразию заслуживала бы особого интереса; однако именно вследствие этого разнообразия она оставалась до сих пор мало доступной для систематического изучения с физической точки зрения; это — область музыкальных инструментов. С того времени, как работами Гельмгольца и лорда Релэя создана была классическая акустика, за долгий период, истекший с тех пор до наших дней, было сделано лишь небольшое число систематических исследований в области физической акустики музыкальных инструментов, и только очень недавно началось детальное экспериментальное и теоретическое изучение этого типа звукоизлучателей. Здесь прежде всего нужно назвать индусского ученого Рамана ⁽⁷¹⁾, который совместно со своими сотрудниками собрал исключи-

тельно ценный материал по музыкальным инструментам. Особенно подробно занимался Раман теорией смычковых и ударных струнных инструментов. Им были проведены обширные теоретические исследования над движением струн. Была изучена зависимость колебаний струны от давления и скорости смычка или ударяющего молоточка. Сколько-нибудь подробное изложение этих вопросов потребовало бы слишком большого для нашего обзора углубления в частные проблемы теории, и мы можем от этого здесь отказаться тем легче, что Раман сам дал краткий обзор этих вопросов. Другие исследования были посвящены изучению характера звуков музыкальных инструментов, причем задачей было найти возможность по качеству звука строить заключения об особенностях работы самих инструментов. Знакомство со свойствами звуков музыкальных инструментов имеет в то же время непосредственное практическое значение, — вспомним хотя бы о задачах точной передачи звуков, для чего знание их качеств в высокой степени важно. В виду этого, мы позволим себе здесь остановиться на работах именно в этой области.

Штумпф, о чрезвычайно важных работах которого по исследованию разговорной речи мы имели случай говорить уже раньше ⁽⁷²⁾, дал потом, в виде приложения к своей книге о звуках речи ⁽⁷³⁾, изложение вопроса о звуках музыкальных инструментов.

Мы отмечали уже раньше, что до сих пор еще не окончательно разрешен основной вопрос, — определяются ли звуки музыкальных инструментов только относительным распределением обертонов, или же они характеризуются абсолютным положением определенных и постоянных областей частот в звуковом спектре (подобно формантам разговорной речи).

По исследованиям Штумпфа, на ряду с подвижными формантами, здесь действительно присутствуют и постоянные форманты; и надо сказать, что с точки зрения физики вполне естественно ожидать для колебательных систем, имеющих определенную пространственную конфигурацию, определенных областей преимущественно преобладающих

тонов или резонансных полос. Штумпф приводит следующую таблицу характерных областей тонов для различных инструментов:

Инструмент	Основ- ной тон	Приблизитель- но-постоянные максимумы	Подвижный основной формант
Тромбон	c	c ¹ — e ³	c ² — c ³
Труба В	c ¹		g ² — g ³
	c ²	c ² — c ³	g ³ — c ⁴
Кларнет А	cis		cis ² — cis ³
	cis ¹		gis ² (cis ³) — gis ³ (cis ⁴)
	fis ¹		fis ³ — cis ⁴
	fis ²		fis ⁴ — cis ⁵
Кларнет В	c ¹	d ⁴ — b ⁴	e ³ — b ³
	c ²		c ⁴ — d ⁵
	c ³		c ⁵
Контрафагот	c	c ² — g ² , c ⁴ — e ⁴	g ¹ — c ²
Фагот	g		d ² — g ²
	c		c ² — g ²
	c ₁		c ³ — g ⁴

От изучения свойств звуков музыкальных инструментов можно ждать — в особенности в настоящее время — ценных результатов в смысле углубления нашего знакомства со свойствами и физической стороной работы самих инструментов; благодаря широкой систематической работе над усовершенствованием записи звуков теперь имеется возможность с большою точностью, достаточной для самого детального исследования, записывать и анализировать звуки. О таких исследованиях, проведенных до сих пор, правда, только по отношению к одному инструменту — главному инструменту современного оркестра — скрипке, сообщил Бакгауз (74) в 1927 г.

В качестве звукоприемника в этих опытах употреблялся высокочастотный микрофон Риггера; микрофон действовал через усилитель на сопротивлениях на петлю осциллографа, настроенную на высокий тон.

Отметим прежде всего, что одно весьма своеобразное наблюдение, сделанное уже раньше исследователями, рабо-

тавшими с более простой аппаратурой, было теперь вновь подтверждено: вновь оказалось, что для очень низких нот скрипки основной тон мало выделяется (75). Так некоторые анализы показывают, что амплитуда основного тона (g , 192 герц) составляет всего 3% в одном, 32% в другом случае, если мы амплитуду наиболее сильного обертона (в нашем случае второго) примем произвольно за 100%. Объяснения этого факта Бахгауз ищет в особенностях

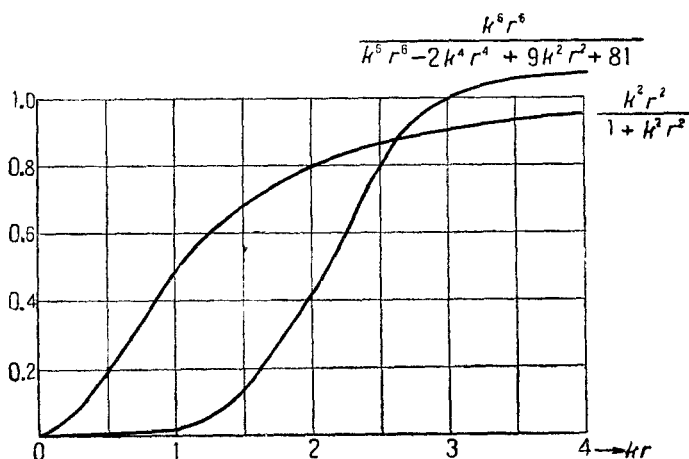


Рис. 48. Мощности шарового и секториального звукоизлучателей.

звукового излучения корпуса скрипки: именно, если вычислить по формуле Релэ мощность шаровых волн, то получаются соотношения, изображенные на рис. 48. Абциссами в этой диаграмме служат величины $k \cdot r$, где r — радиус шара, а $k = \frac{\pi}{\lambda}$. Ординаты же пропорциональны мощности, отнесенной к постоянной амплитуде скорости, излучающей поверхности. Одна из кривых представляет функцию

$$\frac{k^2 r^2}{1 + k^2 r^2}, \quad (26)$$

которая дает выражение для мощности шарового излуча-

теля нулевого порядка. Другая кривая соответствует функции

$$\frac{k^6 r^6}{k^6 r^6 - 2k^4 r^4 + 9k^2 r^2 + 81} \quad (27)$$

Это выражение дает мощность секториального излучателя второго порядка. На основании исследований Зейфферта (76) скрипку, повидимому, можно приравнять к секториальному излучателю второго порядка. Если теперь на рис. 49 мы проследим ход кривой для мощности колебаний излучателя второго порядка при возрастающем значении $k \cdot r$, т. е., другими словами, при возрастающей частоте, то мы увидим, что мощность при известном значении $k \cdot r$ (примерно равном 1,5) начинает быстро расти; более высокие частоты излучаются много сильнее, низкие же очень слабо. Если радиус сферы в связи с размерами скрипки принять равным 18 см и вычислить в этих условиях kr для частоты (g) 192 герц, которая в полученных записях соответствовала основному тону, то мы получим $kr: 0,67$, — величину которая, судя по нашей кривой, указывает на очень слабое излучение. Отметим здесь еще, что физическое, объективно очень значительное ослабление основного тона, субъективно почти не ощущается, так как физически слабый основной тон вновь выступает для уха, благодаря образованию комбинационных тонов (77).

Интересны также записи, полученные для струн из различного материала при одинаковой высоте тона. Различия в структуре полученных снимков, конечно, должны быть главным образом отнесены за счет разницы в величине трения между смычком и тою или другою струною. Трение и давление смычка, по исследованиям Рамана (78), оказывают влияние на форму колебаний самой струны. На ряду с такой формой кривой колебаний струны, при которой имеется в каждом периоде один только перегиб (зубцообразная кривая, тип колебаний Гельмгольца или тип колебаний первого порядка), встречаются также формы колебаний с несколькими переломами; порядок их обозначается по числу перегибов. На кривой каждого по-

рядка преобладают частичные колебания соответственного порядка. Один из анализов дает отрезок записи полного хода смычка свободной металлической струны скрипки Страдивариуса (тон e_2). Здесь можно видеть, что форма колебаний лишь короткое время соответствует первому типу, позднее же переходит к типу более высокого порядка. Можно ожидать далее интересного материала от предпринятых в настоящее время исследований, касающихся одновременно и колебания струны и издаваемого ею звука.

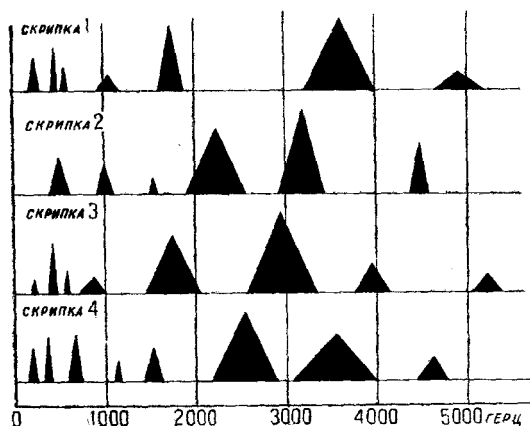


Рис. 49. Резонансные области различных скрипок.

Из многочисленных снимков различных звуков скрипок разного типа были сделаны выводы о положении резонансных областей для скрипок. На рис. 49 изображены качественные результаты этих исследований. Мы видим, что установлено существование сильного резонанса между 3000—4000 герц; область резонанса лежала тем выше и тем резче выделялась, чем „лучше“ был испытуемый инструмент. Бакгауз занялся также вопросом о том, в чем коренится разница между хорошими и плохими скрипками. Вопрос этот изучался раньше Хьюлеттом⁽⁷⁹⁾, который пользовался для исследований диском Релая и резонаторами. Хьюлетт пришел к заключению, что скрипка кажется тем лучшей, чем большая энергия концентрируется

в основном тоне сравнительно с обертонами. Бакгауз имел возможность проверить это на прекрасном материале. В числе взятых для исследования скрипок было десять старинных итальянских, каждая из которых отличалась высокими качествами и общепризнанною исключительною красотой звука. При этом утверждение Хьюлетта не подтвердилось. Напротив, снимки, полученные от скрипки Карло Бергонци, сделанной в 1737 г., и одной скрипки Страдивариуса 1707 г. показали, что налицо имеются обертоны даже значительной высоты с довольно большой амплитудой, и повидимому, для высокого качества скрипки оказывается весьма важным, чтобы очень высокая область тонов от 3000—4000 герц передавалась с большою силою. Такое распределение силы звуков, видно, например, на рис. 50 (верхний спектр) для скрипки Страдивариуса. Работа Бакгауза показывает, как далеко удастся теперь проникнуть в эти интереснейшие области исследователю, вооруженному современной техникой, построенной на точных физических основах. Можно надеяться, что постепенно будет собран дальнейший экспериментальный материал, и эти исследования будут еще теснее примыкать к теоретической работе, уже сделанной в этой области.

§ 4. Звукоприемники

По сравнению с многочисленными работами в области излучателей, имеющими частью важное принципиальное значение, в области звукоприемников за последнее время сделано мало. Работы в этой области касаются не каких-нибудь принципиально новых конструкций, а главным образом дальнейшей разработки методов, описанных уже нами в обзоре работ по анализу звуков⁽⁸⁰⁾. В этих исследованиях наибольшие успехи были достигнуты в области точного выяснения работы приемников, в частности получения точных амплитудных и частотных характеристик приемников.

Упомянем прежде всего о ряде исследований Грютцмахера и Мейера⁽⁸¹⁾. Они пользовались методом электро-

акустической компенсации и применяли микрофон, сконструированный по образцу микрофона Венте. Мембрана этого микрофона была изготовлена из латуни (толщина

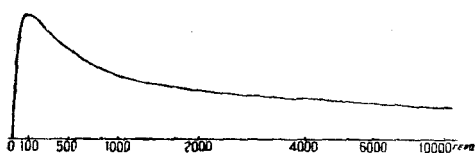


Рис. 50. Частотная характеристика конденсаторного микрофона.

0,005 см, диам. 25 см) и сильно натянута. Частотная характеристика микрофона изображена на рис. 50; ее вид определяется главным образом воздушным слоем за мембраной,

который с возрастанием частоты все более и более противодействует мембране. Причина спадания кривой при низких частотах лежит в свойствах примененного усилителя на сопротивлениях.

Чтобы еще ближе изучить работу конденсаторного микрофона были сняты характеристики при уменьшенном влиянии воздушной прослойки. На рис.

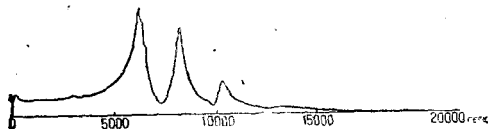


Рис. 51а. Частотная характеристика конденсаторного микрофона при давлении 40 мм Hg.

51а приведена частотная характеристика, снятая при давлении в 40 мм Hg. При этом давлении наиболее низкий собственный период мембраны лежит приблизительно при

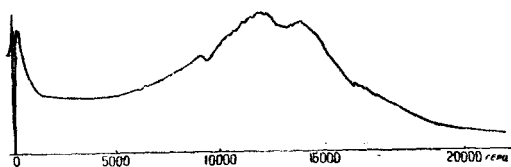


Рис. 51б. Частотная характеристика конденсаторного микрофона при давлении 160 мм Hg.

6000 герц. Для мембран, закрепленных по краям, типично появление высоких, негармонических по отношению к основному колебанию, собственных периодов.

Рис. 51б дает ха-

рактеристику мембраны при 160 мм Hg, на которой уже ясно видно влияние воздушной прослойки.

Для конденсаторного микрофона Риггера Ф. Тренделенбург⁽⁸²⁾ снял частотные и амплитудные харак-

теристики методом, описанным в главе 1 (при помощи сравнения с диском Релэя). Рис. 52 дает амплитудную характеристику этого звукоприемника. Рис. 53 дает его частотную характеристику. Тем же методом исследовал микрофоны Гартман (⁸³). На рис. 54 изображена частотная характеристика нормального телефонного микрофона; на рис. 55 дана для него же амплитудная характеристика. Измерения с ленточным микрофоном Герлаха дали результаты, представленные на черт. 56 и 57.

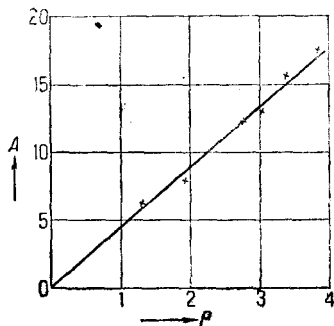


Рис. 52. Амплитудная характеристика микрофона Риггера.

Обратим еще раз внимание на то, что на обеих последних частотных характеристиках, в отли-

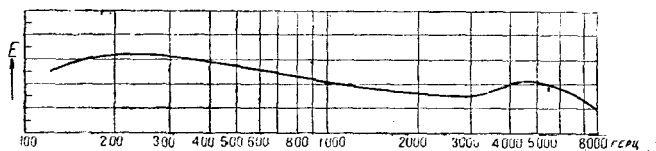


Рис. 53. Частотная характеристика микрофона Риггера.

чие от первых, ординаты нанесены в логарифмическом масштабе, — обстоятельство, которое нельзя упускать из виду при сравнении кривых рисунков 50, 53, 54 и 57.

Электрические звукоприемники за последнее время были использованы также для целого ряда специальных назначений. Так, например, очень важная для теоретической и практической медицины задача — получение безупречно точной записи сердечных

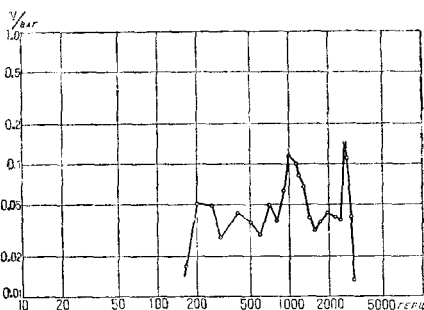


Рис. 54. Частотная характеристика нормального телефонного микрофона.

тонов и легочных шумов пред-

ставляла до сих пор большие трудности, потому что эти звуковые процессы с одной стороны обладают весьма малой интенсивностью, а с другой — захватывают широкие области частот. В настоящее время для этой цели применяется высоко-

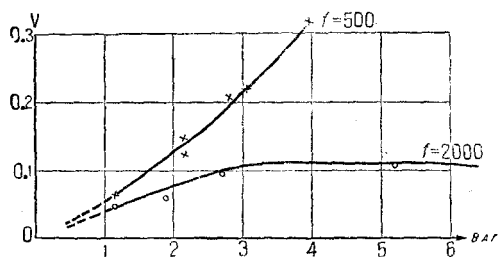


Рис. 55. Амплитудные характеристики нормального телефонного микрофона.

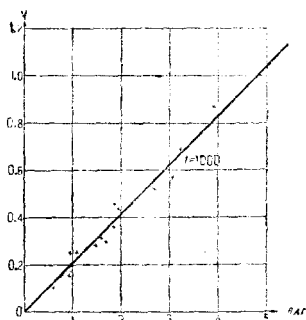


Рис. 56. Амплитудная характеристика ленточного микрофона.

частотный конденсаторный микрофон Риггера, который оказался в этом случае весьма подходящим звукоприемником. С помощью такого звукоприемника Тренде-

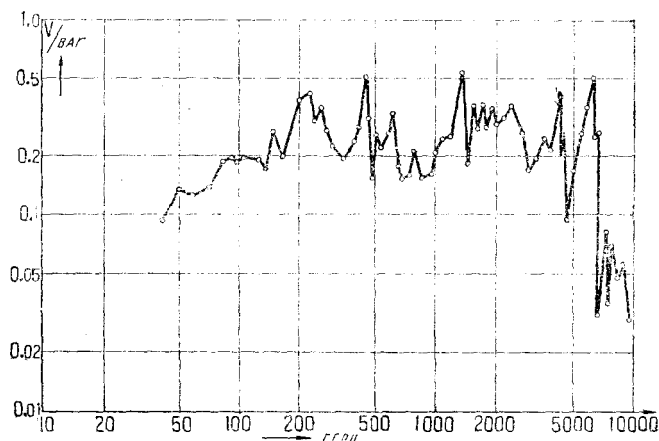


Рис. 57. Частотная характеристика ленточного микрофона.

ленбург⁽⁸⁴⁾ произвел подробное исследование физических свойств сердечных тонов у здоровых и больных людей; это исследование дало целый ряд новых данных, существенных в физическом и физиологическом отношении.

Подобным же образом весьма успешно применил этот метод к изучению легочных шумов Э. Басс (85).

Э. Ветцман (86) сделал недавно сообщение об электрическом подземном звукоприемнике. На рис. 58 изображен звукоприемник, которым пользовались во время войны для подслушивания шумов, связанных с работой минирования. Основание прибора составляет тяжелая пластина диаметром около 15 см. Снизу в пластине имеется небольшая полость, замыкаемая мембраной из белой жести. Нижняя полость посредством трубки, проходящей через пластину, соединяется со второй небольшой полостью, замыкающейся мембраной микрофона. Приемник прикладывается жестяной мембраной к земле, и шумы в земле могут таким образом восприниматься микрофоном.

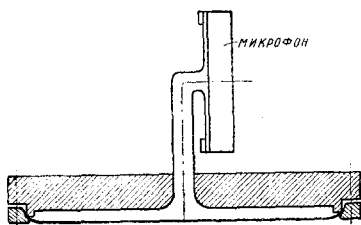


Рис. 58. Схема подземного звукоприемника.

5. Речь и слух

Тот факт, что каждому звуку речи соответствуют определенные и по своей абсолютной высоте постоянные области тонов, — области формант, — и что лежащие в этих областях обертоны выступают в данном звуке с особою интенсивностью, был мною подробно разобран в сообщении (87) неоднократно здесь цитированном.¹ В частности, там приведены данные о положении областей формант, поскольку оно выясняется путем опытного изучения. Я указал на выдающееся значение исследований Штумпфа; позднее сам Штумпф опубликовал обширную работу, в которой дал обзор своих исследований (88). В этой работе приведены

¹ Кривые гласных звуков, по записям Тренделенбурга, вырезались на окружности круглого диска и с помощью фотоэлемента вновь преобразовывались в электрические колебания, которые могли восприниматься слухом. При правильно выбранной основной частоте оценка соответственного звука речи получалась вполне верная, тогда как при изменениях частоты точность оценки быстро терялась.

многочисленные данные, извлеченные частью из неопубликованных еще опытов по выяснению характера звуков речи. Данные получены были теми тремя методами, которыми Штумпф пользовался с таким большим успехом: анализ звуков с помощью резонирующих камертонов, анализ и синтез звуков при помощи интерференционных труб и искусственный синтез звуков речи.

Крендалл, о ценных работах которого в области изучения речи с физической точки зрения (выполненных частью в сотрудничестве с Сация и Меккензи) мы уже раньше говорили, настоятельно указывает в своей последней работе (89) на характерные особенности в положении

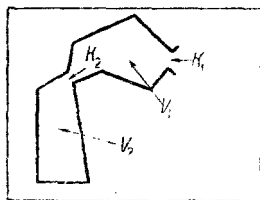


Рис. 59а

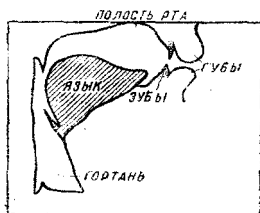


Рис. 59б

Схематическое изображение системы гортань-полость рта.

областей формант гласных, приводящие к любопытным заключениям об условиях происхождения этих гласных. Именно, если сопоставить между собой области формант, характеризующих отдельные звуки речи, то обнаруживается, что в спектре частот большей части гласных для каждого звука намечаются две обособленные области формант; при этом само собой напрашивается заключение, что по всей вероятности в первоначальном возникновении этих звуков принимает участие система из двух резонаторов. Такой двойной резонатор естественно может быть предположен в комбинации гортани и полости рта. Рис. 59б дает эскизную схему органов речи; рис. 59а — схему соответственного двойного резонатора; здесь V_1 и V_2 — объемы воздуха в первой и второй части резонатора, а K_1 и K_2 —

акустические проводимости ¹ отверстия первого резонатора и соединительной трубки. На рис. 60 схематически представлены формы полости рта, характерные для каждой из взятых гласных. Крендалл поставил себе задачей, опре-

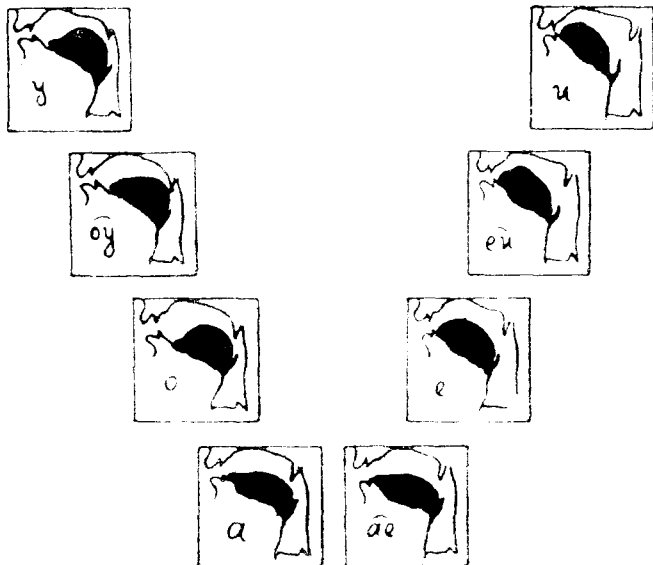


Рис. 60

¹ Акустическая проводимость определяется из выражения:

$$V = K \cdot \Phi,$$

где V — объемный поток, а Φ — потенциал скоростей внутри полости (²⁰). Можно показать, что собственная частота резонатора может быть при этом выражена формулой:

$$\omega_0 = c \sqrt{\frac{K}{V}}.$$

Акустическая проводимость отверстия радиуса r есть $2r$; для трубки, длина l которой велика по сравнению с радиусом.

$$K = \frac{\pi r^2}{l}.$$

Вышеприведенные соотношения могут быть проверены путем расчета на основании выражений для акустической емкости и самоиндукции (гл. 1).

деляя положение формант, вычислить затем значения V_1 и V_2 или K_1 и K_2 , соответствующие каждой форме полости рта. При этом ему удавалось установить для суммы объемов V_1 и V_2 каждый раз подходящие довольно близкие к действительности величины. Также и величину K_1 (проводимость отверстия губ) можно приблизительно высчитать по размерам отверстия. Затухание, которое можно было бы приблизительно подсчитать лишь постольку, поскольку оно является затуханием вследствие излучения (Strahlungsdämpfung), оставлялось без рассмотрения.

При помощи указанных расчетов можно сделать также некоторые выводы об особенностях связи и надстройки получающихся двойных резонаторов и выработать схему, которая удовлетворительным образом объясняет происхождение гласных звуков. Работа Крендалла представляет собой дальнейшее развитие основной резонансной теории гласных, созданной Гельмгольцем. Хотя в свое время теория эта исходила из представления о системе простых единичных резонаторов, она лежит в основании также и этой более общей теории.

О резонансной теории гласных, как таковой, мы сделаем еще одно замечание: по резонансной теории Гельмгольца источником звука во время пения гласных являются колебания голосовых связок. Колебания эти содержат многочисленные обертоны. Обертоны, совпадающие с собственными частотами полости рта и глотки, усиливаются благодаря резонансу и излучаются в окружающую среду с особенно большой интенсивностью. Таким путем звуку придается характерная окраска.

В противовес этой резонансной теории гласных была выдвинута Германом другая. Теория Германа рассматривает не весь последовательно протекающий процесс колебания голосовых связок, а выделяет из него один период. Она кладет в основу дальнейших соображений тот (правильный для грудного регистра) факт, что голосовая щель в течение значительной части отдельного периода остается закрытой и открывается каждый раз только на сравнительно короткие промежутки времени. В то мгновение, когда щель

раскрывается, через нее одним быстрым толчком выталкивается в глотку некоторый объем воздуха и возбуждает собственные колебания полости рта; эти колебания затем постепенно затухают. Когда щель снова раскрывается, толчок повторяется; раскрытие щели возобновляется периодически, а вместе с тем периодические серии затухающих волн излучаются в окружающую среду. Относительно правильности той или другой теории в свое время разгорелся горячий спор, длившийся годами, который однако теперь может считаться разрешенным: уже Релэй⁽⁹¹⁾ указал на то, что противоречие двух теорий происхождения гласных лишь кажущееся. Обе теории пользуются одними и теми же исходными данными для расчета вынужденных колебаний полости рта и тембра излучаемого звука: собственным периодом и затуханием возбуждающей и резонирующей систем. Различаются они только по взгляду на детали возбуждения прерывистого процесса в гортани, вызываемого колебаниями голосовых связок.

Подведя итог, можно сказать: „Теория гласных звуков, созданная Гельмгольцем, дала общие основы. Теория Германа разбирает частный случай, когда звук, производимый голосовыми связками, образует периодическую серию кратких толчков, и может легко объяснить некоторые особенности явления, а именно, затухающие серии волн“⁽⁹²⁾.

Эти теоретически и практически достаточно обоснованные воззрения и до сих пор еще вызывают нападки. Так, недавно появились работы Скрипчура⁽⁹³⁾, в которых как первое положение в теории гласных звуков выставляется следующее: „в гласных звуках не наблюдается основного тона в физическом смысле“. Утверждение это выводится из того факта, что все анализы гласных звуков дают картину, в которой основной тон или вполне отсутствует или же он совершенно незначителен. А между тем следует отметить, что именно те самые записи Тренделенбурга (которые Скрипчур также приводит в качестве доказательства в пользу своего воззрения) показывают, что основное колебание присутствует в звуке гласных, притом по большей части с значительной амплитудой. Это можно непо-

средственно видеть на соответствующих записях. Именно строгая периодичность основного тона в записях Тренделенбурга является самым убедительным доказательством правильности Гельмгольцевой теории гласных.

Здесь не место входить в подробный разбор высказанных Скрипчуром взглядов. Мы ограничимся приведенными выше замечаниями по поводу попыток поколебать установленные ранее физические законы.

Но мы считаем нужным сказать несколько слов еще об одной работе В. С. Казанского и С. Н. Ржевкина⁽⁹⁴⁾, опубликовавших свои звуковые записи. Заметим предварительно, что, к сожалению, их ценный материал получен с помощью аппаратуры, которая не вполне отвечает современным требованиям точности звукопередачи. Звукоприемник употреблялся мембранный, с мембраной из пробки; для усиления звука применялся рупор, для записи колебаний — приспособление подобное фонодейку с поворачивающейся иглой Рамана⁽⁹⁵⁾.

Отметим здесь любопытный факт. Авторы констатировали, что кривые колебаний для гласных, спетых опытными певцами, нередко обнаруживали пульсацию; именно у тех певцов, голоса которых казались „наиболее красивыми“, особенно часто наблюдается такое „vibrato“, которое естественно ведет к тому, что отдельные периоды уже не строго тождественны. Эти наблюдения — мы особенно это подчеркиваем — не противоречат тому факту, что звуки гласных, спетых на одной определенной ноте, повторяются строго периодически; они показывают только, что опытный артист часто бывает склонен усилить блеск своего голоса легким вибрированием. Впечатление большей красоты звука, получающееся при этом, должно очевидно покоиться на физиологических или психологических эффектах, которые еще предстоит выяснить. Авторы приводят также данные о различии певческого и разговорного голоса. При этом замечается для низких и средних регистров мужского певческого голоса очень резкое преобладание немногих (одного или двух) гармонических обертонов, тогда как для непевческих голосов такого преобладания отдельных гармониче-

ских обертонов не наблюдается. Напротив, оказываются усиленными многие обертоны.

После исчерпывающих исследований, произведенных в частности американскими учеными по вопросам, касающимся физической стороны слуха, новых существенных работ, которые рассматривали бы вопрос преимущественно с физической точки зрения еще не было. Работы, касающиеся вопросов о пороге возбуждения слуха в зависимости от величины амплитуды давления слышимого ухом звука, а также о так называемых явлениях маскировки звука, равно как работы по более общим вопросам теории слуха подробно разобраны Э. Мейером ⁽⁹⁶⁾.

Отметим здесь еще интересную статью В. Кнудсена ⁽⁹⁷⁾, хотя содержание ее и не входит в круг вопросов, разбираемых в настоящей главе. Кнудсен систематически исследовал вопросы, касающиеся „слушания“ при помощи осязания. Он затрагивает следующие пункты:

1. Определение самой низкой и самой высокой частоты для колеблющегося тела, движения которого еще могут восприниматься осязанием.

2. Зависимость чувствительности осязания от частоты.

3. Чувствительность к различию в амплитуде.

4. Чувствительность к различию в частоте.

Любопытно в особенности, что порог чувствительности к различиям в амплитудах сравнительно низок (в зависимости от абсолютной величины амплитуды она лежит между 5 и 10%). Автор считает, что ценным вспомогательным средством при восприятии речи глухими была бы возможность путем осязания следить за средней амплитудой речи при помощи соответственной аппаратуры — на ряду с обычно принятым наблюдением за губами говорящего (которое помогает в особенности уловить согласные).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В своем обзоре мы сделали попытку познакомить читателя в общих чертах с новейшими работами по акустике и в особенности по электроакустике. Опыт показывает, что

современный подход к вопросам акустики стоит в теснейшей связи с теми методами работы, которые оказались плодотворными в других областях физики. Многочисленные примеры указывают, например, на тесную связь между акустическими, электрическими и оптическими проблемами.

Мы позволим себе в заключение привести несколько слов, высказанных недавно видным сторонником точной методики и математического обоснования акустических проблем⁽⁹⁸⁾.

„Равнодушие, с которым физики относились к проблемам акустики, повело к тому, что связь ее с другими отделами физики все больше и больше утрачивалась; дело зашло уже так далеко, что акустику, как научную дисциплину, начали относить не к чистой физике, а к физиологии, хотя эта идея никогда не возникала относительно оптики. Лишь в последнее время физики усмотрели, что проблемы гидродинамики и теории упругости и особенно общие проблемы акустических колебательных процессов не менее увлекательны, чем какие-либо другие вопросы физики. Любопытно, что толчком к этому повороту послужили потребности техники, — образцовая иллюстрация того положения, что техника, делая заимствования у чистой науки, отплачивает ей сторицею. Как поднялся за последние годы интерес к вопросам акустики, — об этом можно судить уже чисто внешним образом потому, например, что Америка вырабатывает тип специалистов — инженеров-звукотехников, что спрос на хорошо подготовленных акустиков все более и более возрастает, причем в Германии он не успевает удовлетворяться, и что союз немецких инженеров несколько лет назад основал особый Комитет для изучения колебаний, созывающий ежегодные съезды и ведущий ценную работу в области науки и практики“.

ЛИТЕРАТУРА

1. В журнале *Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel.* 28, 54, 84, 1926 я дал очерк методов и результатов звукового анализа. В настоящем обзоре, составленном по просьбе редактора того же журнала, я смогу рассмотреть дальнейшее развитие этого комплекса проблем, а также ряд дальнейших работ в области акустики и электроакустики.

2. A. v. Hippel. *Ann. d. Phys.* (4), 75, 521; 76, 590, 1925. Ср. также заметку J. Friese und E. Waetzmann. *Ann. d. Phys.*, 76, 39, 1925.

3. J. Friese und E. Waetzmann. *ZS. f. Phys.*, 29, 110, 1924; 31, 50, 1925; 34, 131, 1925.

4. F. Trendelenburg. *Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel.*, 28, 54, 1926.

5. E. C. Wente. *Phys. Rev.* 10, 39, 1917; 19, 498, 1922.

6. H. Rigger. *Wiss. Veröff. a. d. Siemenskonzern* 3, H. 2, 67, 1924; F. Trendelenburg. *Ebenda*, S. 43, ср. также F. Trendelenburg. *Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel.* 28, 54, 1926.

7. E. Gerlach. *Wiss. Veröff. a. d. Siemenskonzern*, 3, H. 1, 139, 1923.

8. E. Meyer. *El. Nachr.-Techn.*, 4, 86, 1927.

9. W. König. *Wied. Ann.* 43, 43, 1891.

10. E. Meyer. *El. Nachr.-Techn.*, 4, 509, 1927.

11. F. Trendelenburg. *Wiss. Veröff. a. d. Siemenskonzern*, 5, H. 2, 120, 1926.

12. C. A. Hartmann. *El. Nachr.-Techn.*, 4, 375, 1927.

13. B. S. Cohen, A. J. Altridge und W. West. *Journ. Am. Inst. El. Eng.*, 44, 1023, 1926.

14. M. Grützmaier und E. Meyer. *El. Nachr.-Techn.*, 4, 203, 1927.

15. E. Gerlach. *ZS. f. techn. Phys.*, 8, 515, 1927.

16. C. R. Moore and A. S. Curtis. *Bell. Syst. Tech. Journ.*, 6, 216, 1927.

17. E. Gerlach. *ZS. f. techn. Phys.*, 8, 515, 1927.

18. M. Grützmaier. *El. Nachr.-Techn.*, 4, 533, 1927.

19. Ср. также Fr. Canac. *Filtres acoustiques*. *Journ. de Phys.* (6), 7, 161, 1926. Исчерпывающая теория акустических фильтров и практические нормы для подобных фильтров даны Стюартом (G. W. Stewart). Важнейшие его работы следующие: *Phys. Rev.* 20, 528, 1922; 25, 90, 1925; 28, 1038, 1926; 29, 220, 1927; ср. далее: Н. В. Рессоок. *Phys. Rev.* (2), 23, 525, 1924; W. P. Mason. *Bell. Syst. Techn. Journ.*, 6, 258, 1927; *Phys. Rev.* (2), 31, 283, 1928.

20. Ср. также E. G. Richardson. *Sound*. London, 1927, p. 224.

21. Электрические аналогии оказались особенно применимыми при разработке теории рупоров. См. напр. J. B. Crandall. *Theory of vibrating systems and sound*. New-York, 1926, p. 166.

22. Ср. Fr. Canac. *Journ. de Phys.*, 7, 167, 1926.

23. G. W. Stewart. Phys. Rev. (2), 30, 528, 1929. Там же имеются данные о конструкции фильтров.
24. G. W. Stewart. Phys. Rev. (2), 28, 1040, 1926.
25. H. Backhaus und F. Trendelenburg. ZS. f. techn. Phys., 7, 630, 1926.
26. Cp. F. Trendelenburg. ETZ, 48, 1685, 1927.
27. H. Stenzel. El. Nachr.-Techn., 4, 240, 1927.
28. W. C. Sabine. Collected papers on acoustics. Cambridge, 1923. p. 180.
29. E. Michel. Deutsche Bauhütte. 1927. S. 124.
30. См. G. Jäger. Wien. Ber., 120, H. 5. Abt. IIa, 613, 1911.
31. W. C. Sabine, *ibid.*, p. 43.
32. Извлечение из таблицы в статье: F. R. Watson. The absorption of sound by materials Engineering experiment station University of Illinois, Urbana, 25, № 13, 1927 (Bulletin 172).
33. G. Jäger, *ibid.*
34. E. Meyer. ZS. f. techn. Phys., 7, 609, 1926; El. Nachr.-Techn., 4, 135, 1927.
35. F. Trendelenburg. Wiss. Veröff. a. d. Siemenskonzern, 6, H. 1, 276, 1927.
36. Cp. H. Gerdien. Telefunk. Ztg., VIII, №№ 43 u. 44, 1926; W. O. Schumann. ETZ, 47, 294, 1926; J. Zenneck. Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel., 26, 177, 1925.
37. E. Meyer. El. Nachr.-Techn., 5, 293, 1928.
38. W. Schäffer. El. Nachr.-Techn., 4, 387, 1927.
39. Cp. H. Hollmann. El. Nachr.-Techn., 4, 180, 1927.
40. F. M. Osswald. Schweiz. Bauztg. 90, № 5, 1927.
41. О рупорах см., например, J. B. Crandall. Theory of vibrating systems and sound. New-York, 1926, p. 152; дальнейшие соображения по этому вопросу также см. C. R. Hanna. Journ. Am. Inst. El. Eng., 47, 253, 1928.
42. E. Meyer. El. Nachr.-Techn. 3, 293, 1926.
43. H. Riegger. Wiss. Veröff. a. d. Siemenskonzern, 3, H. 2, 67, 1924.
44. Lord Rayleigh. Theory of sound. II, § 302.
45. F. Aigner. Unterwasserschalltechnik, S. 114 ff.
46. H. Riegger, *ibid.*
47. Например, F. Trendelenburg. ETZ, 48, 1685, 1927.
48. C. W. Rice and E. W. Kellogg. Journ. Am. Inst. El. Eng., 44, 985, 1925.
49. Заимствовано из статьи: E. Meyer. El. Nachr.-Techn., 3, 295, 1926.
50. E. Gerlach. V. D. E. — Fachber. d. 31. Jahresvers. d. Verb. d. Elektr., Wiesbaden, 1926.
51. E. Gerlach. ZS. f. techn. Phys., 8, 515, 1927.
52. См. например J. Engl. Der tönende Film, Braunschweig. 1927, S. 76 (есть русск. перевод: Дж. Энгль, Говорящая фильма. ГИЗ, М.-Л.

1928, см. стр. 80. *Ред.*). Там описан электростатический говоритель Фогта, Энгля и Массоло. Дальнейшие данные о различных системах громкоговорителей см. E. Gerlach. Lautsprecher в справочнике Banneitz'a (Taschenbuch d. drahtl. Telegr., Berlin, 1927, S. 548 ff.); F. Trendelenburg. ETZ, 48, 1685, 1927. Здесь следует также указать на подробное изложение вопроса об электрических звукоизлучателях в статье: H. Lichte. Hdb. d. Phys., Bd. VIII, Kap. 6.

53. M. Grützmaier und E. Meyer. El. Nachr.-Techn., 4, 203, 1927.

54. E. Meyer. El. Nachr.-Techn., 4, 509, 1927.

55. K. Küpfmüller. Fachber. d. 31. Jahresvers. d. V. d. E., 1926, S. 87.

56. F. Waetzmänn und K. Schuster. Ann. d. Phys. (IV), 84, 507, 1927; K. Schuster. Ann. d. Phys. (IV), 84, 525, 1927.

57. W. Germershausen. Helios, Fachzeitschr. f. Elektrot., 28, 229, 241, 1922. В особенности следует указать еще на работу: L. Hajek. Mutschr. f. Ohrenheilkunde u. Laryngo-Rhinologie, 62. Jahrg., 808, 1928.

58. См. в особенности: J. P. Maxfield und H. C. Harrison. Bell. Syst. Techn. Journ., 5, 493, 1926.

59. См. в особенности H. Backhaus. Siemens-ZS. H. 5, 1928.

60. J. P. Maxfield und H. C. Harrison, *ibid.*

61. E. W. Kellogg. Journ. Am. Inst. El. Eng., 46, 1041 1927. По этому вопросу см. также: K. Norden. ETZ, 48, 261, 1927.

62. J. Engl. Der tönende Film. В книге имеются данные о рассмотренных выше проблемах электротехники граммофона.

63. A. O. Rankine. Proc. Phys. Soc. 31, 242, 1919; 32, 78, 1920; Nature, 108, 276, 1921; Proc. Opt. Convention, 2, 909, 1926.

64. См. E. Lübecke. VDI, 70, 496, 1926.

65. О сигнальных sireнах см. W. Kunze. Jahrb. d. Hafenbautechn. Ges., 9, 185, 1926.

66. Ср. Bureau hydrographique international, Monaco, Publication speciale, № 3, Oct. 1924 и № 14, Août, 1926; La techn. moderne, 19, 425, 1927.

67. См. A. Scheibe. Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel. 29, 120, 1927.

68. Литературу см. в прим. 66; кроме того: E. Lübecke. VDI, 71, 1245; 1927.

69. G. W. Pierce. Proc. Am. Acad., 60, 271, 1925. обстоятельную работу о пьезокварце в качестве излучателя и приемника высокочастотных звуковых колебаниях опубликовал F. W. Hehlhans. Ann. d. Phys. (IV), 86, 587, 1928.

70. R. W. Wood und A. L. Loomis. Phil. Mag. (VII), 4, 417, 1927. (См. также П. Н. Беликов. УФН, 8, 222, 1928. *Ред.*)

71. C. V. Raman. Hdb. d. Phys. Bd. VIII, Kap. 8.

72. F. Trendelenburg. Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel. 28, 84, 1926.

73. C. Stumpf. Die Sprachlaute. Experimentell-phonetische Untersuchungen nebst einem Anhang über Instrumentenklänge. Berlin, 1926. Ср. также C. Stumpf. ZS. f. Phys., 38, 745, 1926.

74. H. Backhaus. *ZS. f. techn. Phys.*, 8, 509, 1927; дальнейшие сообщения, в особенности о направленном излучении скрипки и о форме колебаний корпуса скрипки см. H. Backhaus. *ZS. f. techn. Phys.*
75. Этот факт был недавно снова подтвержен. См. M. Grützmacher. *ZS. f. techn. Phys.*, 8, 506, 1927, в особенности приведенную там фиг. 4 и табл. IX; W. S. Kasansky und S. N. Rschewkin. *ZS. f. Phys.*, 47, 233, 1928.
76. A. Seifert. *Arch. f. Musikwiss.*, 4, 456, 1922.
77. Об опытах над изменением тембра звука при исключении основного тона и нескольких обертонов см. H. Fletcher. *Phys. Rev.*, 23, 427, 1924.
78. C. V. Raman. *Ind. Assoc. Bull.*, 15, 1—158, 1918.
79. C. W. Hewlett. *Phys. Rev.*, 35, 359, 1912.
80. F. Trendelenburg, *ibid.* О технических особенностях различных электрических звукоприемников см. F. Weichart. *Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel.*, 28, 120, 1926.
81. M. Grützschacher und E. Meyer. *El. Nachr.-Techn.*, 4, 203, 1927. О способе включения приемника, работающего по типу микрофона Венте, см. A. J. Jakowleff. *Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel.* 31, 85, 1928.
82. F. Trendelenburg. *Wiss. Veröff. a. d. Siemenskonzern*, 2, H. 2, 120, 1926. О теории конденсаторного микрофона см. также. A. J. Jakowleff. *Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel.*, 30, 151, 1927.
83. C. A. Hartmann. *El. Nachr.-Techn.*, 4, 375, 1927.
84. F. Trendelenburg. *Wiss. Veröff. a. d. Siemenskonzern*, 5, H. 3, 175, 1927; 6, H. 2, 184, 1927. Там же см. литературу.
85. E. Bass. *ZS. f. ges. experim. Med.*, 59, 133, 1928. В этом же журнале должны быть напечатаны дальнейшие работы Басса.
86. E. Waetzmann. *Naturwiss.*, 15, 401, 1927.
87. F. Trendelenburg. *Jahrb. d. drahtl. Tel. u. Tel.* 28, 84, 1926. Из дальнейших работ, посвященных проблеме формант, следует назвать: V. Engelhardt und E. Gehrke. *Wiss. Abt. d. Phys.-techn. Reichsanstalt*, 11, H. 2, 360, 1928.
88. См. прим. 73.
89. J. B. Crandall. *Bell Syst. Techn. Journ.*, 6, 100, 1927.
90. Cp. H. Backhaus. *Hdb. d. Phys.*, Bd. VIII, Kap. 4, Ziff. 16.
91. Lord Rayleigh. *Theory of sound*, II, p. 473. London, 1926.
92. F. Trendelenburg. *Hdb. d. Phys.* Bd. VIII, Kap. 10.
93. E. W. Scripture. *ZS. f. Sinnesphysiol.*, 58, 195, 1927; 59, 83, 1928.
94. W. S. Kasansky und S. N. Rschewkin. *ZS. f. Phys.*, 47, 233, 1928.
95. C. V. Raman and A. Dey. *Phil. Mag.*, 39, 145, 1920.
96. E. Meyer. *Hdb. d. Phys.*, Bd. VIII, Kap. 11.
97. V. O. Knudsen. *Journ. of gener. psychol.*, 1, 320, 1928.
98. E. Waetzmann. *Moderne Probleme der Akustik. Unterrichtsblätter f. Mathem. u. Naturwiss.*, 33, № 12, 377, 1927.