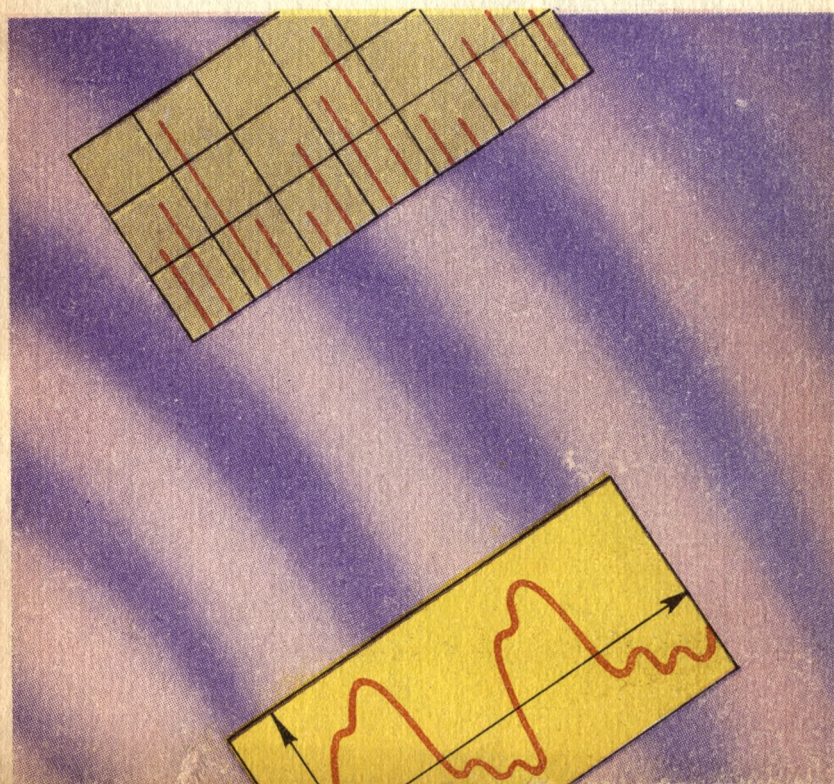


578

МИР знаний

В. И. РЫДНИК

О современной акустике



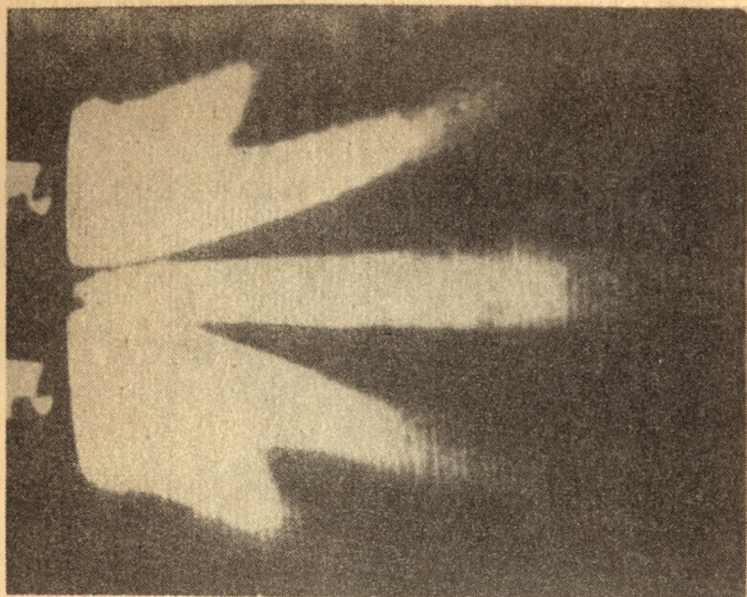


Рис. I

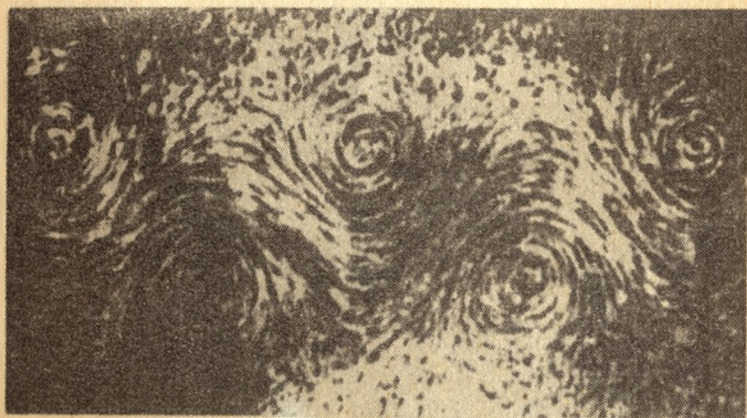


Рис. II

МИР ЗНАНИЙ

В. И. РЫДНИК

О современной акустике

Книга для внеклассного чтения

VIII—X классы

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1979

22.32
P93

Виталий Исаакович Рыдник
О СОВРЕМЕННОЙ АКУСТИКЕ

ИБ № 3365

Редактор *Г. Р. Лисенкер*
Художник *С. Ф. Лухин*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Технический редактор *Л. М. Дербикова*
Корректоры *О. В. Ивашкина, Е. С. Байкова*

Слано в набор 03.10.78. Подписано к печати 01.02.79. 84×108/32.
Бум. типогр. № 3, Гарн. об. нов. Печать высокая. Усл. печ. л. 4,20.
Уч.-изд. л. 4,01 Тираж 100 000 экз. Заказ № 2659. Цена 10 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение»
Государственного комитета РСФСР по делам издательств, поли-
графии и книжной торговли.

Москва 3-й проезд Марьиной роши, 41.

Типография № 2 Росглавлполиграфпрома, г. Рыбинск, ул. Чкалова, 8.

Рыдник В. И.

P93 О современной акустике: Кн. для внеклассного
чтения. VIII—X кл. — М.: Просвещение, 1979. —
80 с., ил. — (Мир знаний).

В книге в доступной для учащихся старших классов средней
школы форме изложены основные сведения о современной физиче-
ской и архитектурной акустике, приведены физические основы му-
зыкальной акустики, описано использование инфразвука и при-
менение ультразвука.

P $\frac{60601-369}{103(03)-79}$ 281—79 4306021100

ББК 22.32
534

© Издательство «Просвещение», 1979 г.

ВВЕДЕНИЕ

До сравнительно недавнего времени акустика стояла в стороне от магистральных направлений физики нашего века. Открытие строения атома, элементарных частиц, блестящие успехи физики твердого тела, которые привели к бурному развитию электроники, создание мазеров и лазеров, наконец, стремительный разворот физики космоса, революционные изменения взглядов на мир, которые были вызваны появлением теории относительности, квантовой механики, не менее революционные преобразования в технике, вызванные электроникой и оптикой, — все эти колоссальные достижения затмили куда более скромные на первый взгляд успехи акустики. Акустика, которая развивалась в русле старых, традиционных представлений ньютоновской, классической физики, не могла похвастаться ни радикальным изменением человеческих представлений о мире, ни впечатляющими открытиями в технике.

А между тем скромная акустика постепенно захватывала все большее пространство и в науке, и в технике, и в быту. Как-то незаметно в повседневную жизнь человека вошли и стали необходимы звуковое кино, грампластинки, магнитофоны, электронные музыкальные инструменты.

Нас уже несколько не удивляет, что звуковые волны позволяют отчетливо видеть невидимое — косяки рыбы и подводные корабли, дефекты в толще металлов и других непрозрачных тел.

Времена меняются, и люди, видимо, за последний век разучились удивляться. Во всяком случае «внутривидение» с помощью звука не вызвало и малой доли того удивления, какое вызвали первые рентгеновские снимки.

Стремительный рост числа автомобилей на улицах городов, появление реактивных самолетов привели к тому, что шум в городах далеко превысил допустимые пределы. А шум вызывает не только ухудшение слуха, но и нервное истощение и заболевания внутренних органов. Шум

стал опасным источником загрязнения окружающей среды. Борьба с шумом, защита человека от него — весьма актуальная проблема современности.

В наше время акустика вторгается в те сферы, которые еще недавно казались не имеющими никакого отношения к ней. С помощью ультразвука ученые сегодня исследуют строение молекул. С помощью звуков еще более высокой частоты — гиперзвуков — изучается атомное строение твердых тел. Оказалось, что электроны в твердых телах могут взаимодействовать со звуком, и это открытие привело к рождению новой науки (а также новой области техники) — *акустоэлектроники*.

По некоторым оценкам почти девяносто процентов всех сведений об окружающем мире человек получает по зрительному каналу, с помощью глаз, лишь пять процентов — по слуховому каналу и столько же — с помощью остальных органов чувств. Но те пять процентов информации, которые приходят к нам через уши, чрезвычайно важны. Никакой язык жестов, никакая зрительная сигнализация не способны заменить нам общения с другими людьми с помощью языка, речи, радость восприятия музыки, шума моря...

В наш электронный век возникла необходимость в общении с электронными вычислительными машинами — нашими могучими помощниками и советчиками — на нормальном человеческом языке. Но искусственное моделирование и восприятие речи — дело невероятно сложное. Чтобы это стало возможным, ученым пришлось вновь вернуться к основе основ «человеческой акустики» — к тому, как слышит человек, как он произносит звуки. А от этих исследований — один шаг до таких интереснейших возможностей, как «рисованная музыка», «цветомузыка», которые открывают перед нами новые миры творчества и восприятия.

В этой книге пойдет разговор о некоторых достижениях современной акустики. Именно только о некоторых: число этих достижений слишком велико, чтобы обо всех них можно было сколько-нибудь подробно рассказать на страницах нашей небольшой книги.

Но сначала нам необходимо вспомнить основные сведения о звуке и дать основные определения величин, характеризующих звук. Этому мы и посвятим маленькую вводную главу.

ЧТО ТАКОЕ ЗВУК

Для передачи и приема информации многие организмы, в том числе высшие животные и человек, используют волны. Глаз воспринимает световые волны, ухо — звуковые. При всей несхожести природы этих двух видов волн, у них все же много общего. Волна — это распространение колебательного движения. Если изобразить ее на бумаге, то в самом простом случае получится хорошо известная синусоида (рис. 1, а). Но такая волна еще не информация, она только носитель информации. Собственно информацией являются искажения правильной синусоидальной волны (рис. 1, б). В результате правильная, но «безжизненная» синусоида становится неправильной кривой, которая зато наполнена содержанием — сообщением, информацией. В приемнике эта информация снимается со своего носителя; сам носитель отбрасывается, а информация выделяется и прочитывается.

При распространении звуковой волны среда в целом не движется. В ней лишь несколько смещаются вперед-назад составляющие среду частицы — молекулы воздуха, воды, атомы в твердых телах. Передача колебаний происходит как бы эстафетой — от одних частиц к другим (рис. 2). Вперед-назад — это означает, что частицы перемещаются от источника колебаний и к нему, т. е. в направлении, по которому распространяется волна. Такие волны называются *продольными* (колебания частичек среды происходят вдоль направления распространения волны).

В воздухе возможны только продольные волны. При этом расстояния между соседними частицами периодически то уменьшаются, то увеличиваются по сравнению со

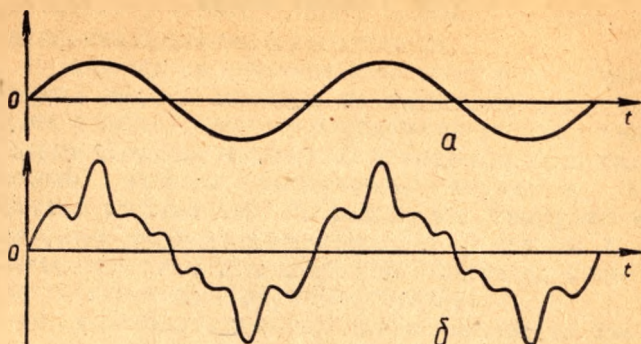


Рис. 1

средним расстоянием между ними, когда волны нет. В среде образуются сжатия в одних областях и разрежения в других, периодически сменяющие друг друга в процессе их перемещения. Поэтому продольные волны еще называются волнами сжатия и разрежения.

Чтобы представить себе, как возникают колебания частиц при распространении волны, допустим, что мы чрезмерно надули детский шарик и он лопнул. В этот момент из шарика вырвался сжатый в нем воздух. Он сдвинул окружающие слои воздуха, те — в свою очередь, следующие, и от шарика побежал импульс сжатия. Но, расширившись в том месте, где находился лопнувший шарик, воздух разрежился. Спустя какое-то небольшое время в эту область устремится окружающий воздух, и там в свою очередь образуется сжатие, после чего все повторится снова.

Возникновение в среде перемежающихся импульсов сжатия и разрежения — звуковой волны — обусловлено двумя свойствами воздуха: его упругостью и инертностью. За счет упругости воздух стремится вернуться в исходное, несжатое и неразреженное состояние. Вследствие же инертности воздух возвращается в исходное, невозмущенное состояние не мгновенно, и, кроме того, он «проскакивает» исходное состояние, чрезмерно уплотняясь после расширения или чрезмерно разрежаясь после сжатия.

Впрочем, если эти колебания не поддерживать, то с каждым новым колебанием эти «проскоки» становятся все меньшими — колебания плотности воздуха затухают. Это затухание связано с вязкостью воздуха. Вязкость есть

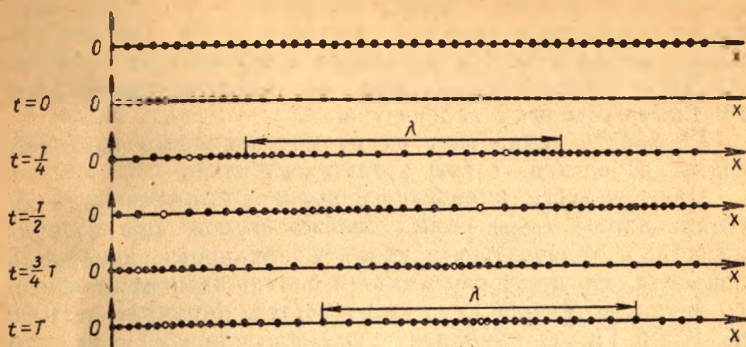


Рис. 2

результат того, что молекулы воздуха, сталкиваясь друг с другом, обмениваются количеством движения. Более быстрые молекулы при этом замедляют свое движение, более медленные — убыстряют, и их скорости в результате вскоре выравниваются и в среднем становятся такими, как до прохождения волны.

Источниками звука обычно являются колеблющиеся тела, например ножки камертона, голосовые связки, струны гитары.

Важнейшими характеристиками волны являются амплитуда колебаний и длина волны. Приемники звука обычно реагируют на интенсивность звука — величину, пропорциональную квадрату амплитуды смещения. Восприятие звука органом слуха характеризуется высотой звука и его громкостью. Высота звука зависит от частоты колебаний ν , которая связана с длиной волны λ соотношением

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

где c — скорость звука.

Скорость звука в воздухе зависит от температуры. При комнатной температуре она составляет около 340 м/с. В воде при той же температуре скорость звука составляет около 1500 м/с, а в твердых телах в зависимости от их упругих свойств скорость звука достигает 3000—6000 м/с.

Нормальное человеческое ухо воспринимает как звук колебания, частота которых лежит в диапазоне от 16 до примерно 20000 Гц. Это соответствует длинам волн в воз-

духе при комнатной температуре от 20 м до 1,7 см. Звуковые колебания с частотой, меньшей 16 Гц, принято называть инфразвуком, а колебания с частотой от $2 \cdot 10^4$ до 10^9 Гц — ультразвуком. Если же частота превосходит 10^9 Гц, то говорят о гиперзвуке.

Громкость звука зависит от интенсивности звуковой волны, но связана с нею очень своеобразно.

Прежде всего определяют *порог слышимости*, т. е. интенсивность $I_{\text{порог}}$ самых слабых звуков, еще воспринимаемых человеческим ухом. Специальные измерения показали, что порог слышимости сильно зависит от частоты звука, но в области средних частот, примерно от 1000 до 10000 Гц, он приблизительно постоянен и составляет около 10^{-12} Вт/см². На эту величину делят интенсивность I данной звуковой волны. Для наиболее громких звуков, уже близких к *порогу болевого ощущения* в ушах, интенсивность волны может достигать 1 Вт/см². Тогда отношение $I/I_{\text{порог}}$ составит 10^{12} . Громкость звука K пропорциональна логарифму от указанного отношения:

$$K = \lg I/I_{\text{порог}}.$$

За единицу громкости принимается 1Б (бел). Однако практически удобно выражать громкость в децибелах (дБ). Тогда формулу записывают так: $K = 10 \lg I/I_{\text{порог}}$.

Эта формула выражает известный психофизиологический закон, установленный еще в прошлом веке двумя немецкими учеными, Вебером и Фехнером. Этот закон гласит, что сила ощущения звука, света или другого «раздражителя» у живых организмов пропорциональна не самой интенсивности раздражителя, а логарифму ее. Значит, если сила звука меняется в 10^{12} раз, то громкость изменится лишь в 12 раз. Можно сказать, что в этом проявилась рациональность природы — оценить изменение громкости в 12 раз наш мозг может, но изменение громкости в 10^{12} раз мозг, конечно, не смог бы оценить.

Сильный удар грома, вызывающий боль в ушах, имеет громкость около 120 дБ. Звук металлообрабатывающего станка обычно имеет громкость 90—100 дБ. Громкость уличного шума на оживленной магистрали составляет около 80 дБ (шум одного автомобиля равен 70 дБ). Громкий разговор — это 60 дБ, шепот — 30 дБ. Приведенные величины, конечно, приблизительны, поскольку весьма разнообразны условия, в которых мы воспринимаем зву-

ки: близко или далеко от источника, на открытом воздухе или в закрытом помещении и т. д.

Очень важной характеристикой звука является его спектр. Под спектром понимают распределение энергии волн по частотам колебаний. Разные источники звука имеют различные спектры.

Простейший спектр отвечает так называемому *чистому тону*: в нем присутствует одна-единственная частота. Более интересным оказывается музыкальный *звук*: его спектр состоит из основной частоты и нескольких «примесных» частот, называемых *обертонами* («высшими тонами»). «Примесные» частоты кратны частоте основного тона.

От распределения интенсивности по обертонам зависит *тембр* звука. На рисунке 3 показаны спектры звуков одной высоты, взятой на разных музыкальных инструментах. Звуки разных музыкальных инструментов различаются по тембру.

Более сложным оказывается спектр сочетания музыкальных звуков, называемого *аккордом*. Как и следовало ожидать, в таком спектре присутствуют несколько основных частот вместе с соответствующими обертонами.

А вот на рисунке 4 показан один из спектров *шума*. Отличительная его особенность состоит в непрерывном распределении частот в некоторой полосе,



Рис. 3

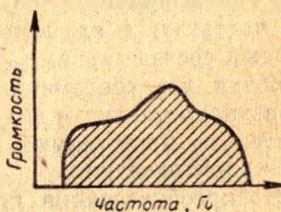


Рис. 4

КАК ИЗМЕРЯЮТ ЗВУК

Ухо — довольно совершенный приемник звука: у природы были «в запасе» миллионы лет, чтобы сделать его очень чувствительным к определению громкости звука и его высоты. Тренированное ухо улавливает очень малые изменения силы и высоты звука.

Для изучения звуков, в результате которого мы получили бы объективные характеристики, а не субъективные оценки, нужны, конечно, специальные приборы. Такие приборы измеряют силу звука и его частоту. Существуют также приборы для измерения силы звука на заданных частотах; с их помощью можно исследовать спектральный состав звука.

Почти все современные приборы, предназначенные для изучения звука и измерения его характеристик, предварительно преобразуют механические звуковые колебания в электрические.

Это преобразование стало возможным с изобретением микрофона.

В простейшем, так называемом *угольном микрофоне*, колебания давления воздуха в звуковой волне воспринимаются мембраной, а от нее передаются угольному порошку, засыпанному между двумя электродами. На эти два электрода подано электрическое напряжение, угольный же порошок оказывает сопротивление проходящему между ними току; причем если порошок уплотнен, то сопротивление меньше, и, наоборот, при меньшем уплотнении порошка его электрическое сопротивление больше. В результате сила тока в цепи колеблется в точности так же, как сила звука, действующего на мембрану.

Достаточно простым, но менее чувствительным, чем угольный, является *электродинамический микрофон*. В нем с мембраной связана маленькая проволочная катушка, которая находится в магнитном поле, создаваемом специальным магнитом. В этом микрофоне используется явление электромагнитной индукции: когда катушка колеблется вместе с мембраной, ее витки пересекают линии магнитного поля и в них наводится ЭДС индукции, колебания которой повторяют колебания силы звука. Тут же заметим, что электродинамический громкоговоритель (динамик) устроен в основном так же. Но действие его происходит в обратном порядке. Колеблющийся со звуковой частотой электрический ток поступает в катушку, прикрепленную к диффузору. Магнитное поле действует на катушку с силой, которая изменяется в такт с колебаниями тока в ней. И катушка вместе с диффузором приходит в колебательное движение; диффузор при этом излучает звуковые волны.

Хотя чувствительность электродинамического микрофона ниже, чем угольного, он воспроизводит характеристики звука лучше. Большая масса, а значит, и большая инертность катушки по сравнению с инертностью мелких частиц угольного порошка уменьшает чувствительность электродинамического микрофона, но оборачивается достоинством в отношении точности воспроизведения звука. Когда на угольный микрофон звук не действует, ток, текущий через него, не совсем постоянен, так как положения частиц порошка нерегулярно, хотя и слабо, меняются, так что меняется и сопротивление порошка. Эти малые колебания силы тока приводят, в силу своей нерегулярности, к тому, что микрофон «шумит». Собственные шумы электродинамического микрофона намного ниже.

Находит применение еще *конденсаторный микрофон*, в котором мембрана играет роль одной из обкладок конденсатора. Колебания ее вызывают изменения емкости конденсатора. В цепи появляется переменная составляющая тока. Так как колебания силы тока при этом очень слабы, они доводятся до необходимого уровня с помощью усилителя. Точность регистрации звуковых колебаний таким микрофоном очень высокая.

Для анализа спектрального состава звука используются колебательные контуры — электрические резонаторы. Как уже было отмечено, в спектрах музыкальных

звуков содержится некоторое число отдельных частот, причем по силе преобладает звук одной частоты, а остальные являются «примесями» к нему. В спектрах шумов частоты распределены непрерывными полосами.

В акустике большую роль играют и механические резонаторы. Это «набор» резонаторов в ушах, резонаторы в органах труб и т. п. Форма их может быть весьма разнообразной и порой даже неожиданной. Размеры механических резонаторов определяют собственную частоту их колебаний. Чем ниже эта частота, тем больше размеры резонаторов. Мы уже знаем, что звуковые волны имеют частоты до нескольких десятков герц. Для их анализа потребовались бы механические резонаторы метровых размеров, что не очень удобно.

Электрические же резонаторы (колебательные контуры) имеют малые размеры, а их собственная частота определяется формулой

$$\nu = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

Беря конденсаторы и катушки с достаточно большими L и C , добиваются того, чтобы колебательный контур резонировал на звуковых частотах.

Звук невидим. Но применение специальных методов позволяет многие процессы сделать видимыми в ходе их исследования. Если, например, надо изучить распределение в пространстве интенсивности звука, используют простое устройство — микрофон, присоединенный к малоинерционной неоновой лампочке. Яркость свечения лампочки будет зависеть от интенсивности звука в данной точке звукового поля. Чтобы получить картину распределения интенсивности звука в пространстве, перемещают указанный индикатор вдоль системы линий, перекрывающих исследуемую область; при этом неподвижный фотоаппарат с открытым затвором регистрирует на фотопленке положение и яркость свечения лампочки. Распределение плотности почернения на пленке и представляет собой картину распределения интенсивности звука (см. рис. 1 на 2-й стр. обложки).

Несколько сложнее сделать видимым спектральный состав звука, если он изменяется во времени. Но как раз это наиболее интересно: именно характер изменения спектра во времени и определяет неповторимое своеоб-

разие различных звуков, является как бы «визитной карточкой» звуков различных музыкальных инструментов, голосов человека и животных, шумов естественного и искусственного происхождения. Изучение зависимости спектра звука от времени производится путем получения и анализа так называемых спектрограмм. На спектрограммах по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — частота. Интенсивность звука в данный момент времени на той или иной частоте изображается плотностью почернения соответствующей точки в этой координатной плоскости. Спектрограмма состоит из линий, параллельных оси частот. Тональная плотность каждой такой линии является переменной, характеризующая распределение интенсивности звука по частоте в данный момент времени (рис. 5).

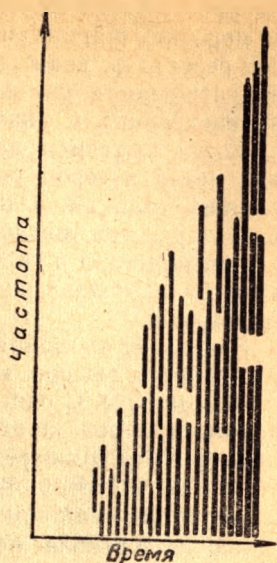


Рис. 5

Чтобы снимать спектр звука, используют целые наборы резонаторов, механических или электрических, включаемых поочередно. Иногда для этой цели приходится применять приборы, состоящие из десятков резонаторов, чтобы в достаточных подробностях охватить всю требуемую полосу частот. Для записи звука на бумаге используют, например, иглу, поочередно связываемую с каждым из резонаторов так, чтобы сила нажатия иглы на бумагу была пропорциональна силе звука (в случае электрических резонаторов — силе тока) в каждом из резонаторов. Для воспроизведения силы звука на экране осциллографа связывают выход каждого контура с цепью накала электронной пушки осциллографа, так чтобы сила тока электронного луча была пропорциональна интенсивности сигнала в контуре.

При необходимости исследовать изменение спектра звука во времени возникают дополнительные сложности, связанные с тем, что приходится регистрировать очень

близкие частоты. Но чтобы зафиксировать близкие частоты порознь, ширина полосы частот, на которые отзывается резонатор, должна быть по возможности малой, т. е. избирательность резонатора должна быть высокой (острая настройка). С аналогичной проблемой мы встречаемся, когда пытаемся настроиться на нужную радиостанцию, возле которой работает еще несколько других мешающих станций. Однако чем выше избирательность резонатора, тем медленнее в нем формируется сигнал, т. е. информация о силе звука на данной частоте, которая затем будет подана на иглу самописца или на пущку осциллографа.

Возникает знакомая всем специалистам в области связи проблема выбора между точностью и быстротой работы аппаратуры. С одной стороны, чем уже *полоса пропускания*, или полоса отзывчивости, каждого элемента аппаратуры (того же резонатора), тем более точным будет анализ по частотам, но тем хуже он при этом будет по амплитудам: слишком длительный процесс установления выходного сигнала исказит распределение амплитуд в анализируемом исходном звуковом сигнале. Выход из этого положения, конечно, компромиссный: приходится выбирать такую полосу отзывчивости резонаторов, чтобы время формирования выходного сигнала в каждом из них было значительно меньше длительности звукового сигнала.

В одном из приборов для снятия спектрограмм человеческой речи используется, например, всего 12 резонаторов (*LC*-контуров), или *фильтров*, называемых так потому, что каждый из них вырезает из всего диапазона звуковых частот свою полосу. Каждый резонатор имеет ширину полосы частот по 300 Гц, а всего они охватывают диапазон частот от 0 до 3600 Гц. Выход каждого из фильтров связан с электрической лампочкой, свет от которой направляется на светочувствительную бумагу или флуоресцирующий экран, протягиваемые мимо лампочек с помощью электрического двигателя. В результате записываются 12 «звуковых дорожек», причем потемнение бумаги или яркость экрана пропорциональны интенсивности звукового сигнала в полосе частот каждого из резонаторов. Получается спектрограмма,

КАК МЫ СЛЫШИМ И ГОВОРИМ

Орган слуха человека — ухо устроено весьма сложно. Отвлекаясь от слухового прохода, который выполняет функцию небольшого предварительного усиления звука (на 5—10 дБ на своей резонансной полосе частот 2000—5000 Гц), сразу начнем с замыкающей этот проход мембраны — *барабанной перепонки*.

От нее звук переходит к системе косточек, чем-то напоминающей механизм клавишей фортепиано, — к молоточку, наковальне и стремени, а от них — к овальному окну. Эта система косточек выполняет роль настоящего усилителя звука: давление, передаваемое на овальное окно, почти в 100 раз превышает давление, действующее на барабанную перепонку. Далее давление передается жидкости, которая заполняет находящуюся за овальным окном *улитку*.

Улитка является собственно аналогом микрофона. Как она функционирует, стало ясным лишь лет сорок назад благодаря работам венгерского ученого Бекеша. Улитка — это тоже косточка, но затянута двумя мембранами, одна из которых называется основной. Эта мембрана наиболее тонка и сильнее всего натянута возле овального окна, а ближе к хвосту улитки она все более утолщается и натяжение ее ослабевает. Это очень важно. В результате такого устройства мембраны звуки разпой частоты приводят в интенсивные колебания разные ее участки. Высокочастотные звуки наиболее сильно возбуждают участки возле овального окна, а низкочастотные — на хвосте улитки. Улитка, таким образом, представляет собой как бы набор резонаторов.

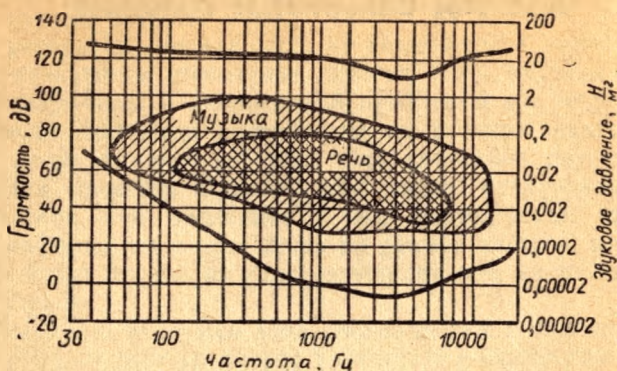


Рис. 6

Над основной мембраной располагается еще одна мембрана, а между ними, соединяя их, — *кортиева орган*, представляющий собой набор из 23 500 волосковых клеток. Эти клетки и производят преобразование звука в электрические сигналы, когда колебания основной мембраны вызывают деформацию волосков. В роли «батареек» выступают сами клетки: изгибание волосков вызывает в них электрохимические реакции, в результате которых и вырабатываются электрические сигналы; эти сигналы распространяются далее по слуховому нерву в мозг. Таким образом, получается, что волосковые клетки вместе с мембраной выполняют функцию не только микрофона, но и одновременно — набора резонаторов: клетки, расположенные над тем участком мембраны, который возбуждается (выпучивается) наиболее сильно на какой-либо частоте, передают в мозг информацию именно об этой частоте.

Но дальше начинается область сплошных загадок. В сущности, все они являются частями одной большой загадки: как в ухе и в нервном канале кодируется информация о громкости, высоте и длительности звука? То, что это кодирование достаточно сложно, можно увидеть уже из рассмотрения зависимости громкости от его частоты для разных уровней силы звука от порога слышимости до болевого порога (рис. 6).

Приглядимся к этому графику повнимательнее. Прежде всего видно, что диапазон частот слышимых зву-

ков не обрывается резко на частотах 16 и 20 000 Гц, а плавно подходит к этим графикам: по мере приближения к ним соответствующие звуки все более слабо слышны. Видно также, что лучше всего звук данной силы слышен в диапазоне частот примерно от 200 до 2000 Гц. Но именно в этом диапазоне сосредоточены основные частоты большинства естественных звуков в окружающей природе (звуки, издаваемые водопадами, ветром, животными, и звуки человеческой речи).

Уже из этого видно, что в отличие от «объективного» преобразования звука в электрический ток в микрофоне, «субъективное» преобразование в ухе и в нервной системе имеет приспособительный характер. При колоссальной ширине диапазона изменения интенсивности слышимого звука громкость меняется лишь в сравнительно небольших пределах. И даже в этих пределах выделяется область наиболее важных звуков, несущих информацию о состоянии окружающей среды, о возможных опасностях, и, наконец, звуков общения человека с другими людьми.

Как же происходит кодирование звука в ухе? Мы знаем об этом еще очень мало. Но известно, что кодирование производится, скорее всего, путем изменения частоты электрических импульсов, передаваемых по слуховому нерву. Волосковые клетки, по-видимому, все одинаковы и в этом отношении не похожи на резонаторы, используемые для анализа звукового спектра. Но они прикреплены к разным местам основной мембраны и должны колебаться синхронно с этими участками. Синхронно — это, конечно, не означает, что электрический импульс в соответствующем нервном волокне будет иметь ту же частоту колебаний. Она может быть и меньшей, но кратной частоте звукового сигнала. Например, при частоте звука 400 Гц нервная клетка может вырабатывать 100 импульсов в секунду, при частоте 800 Гц — 200 импульсов (нерв работает не непрерывно, а импульсами, с промежутками покоя, когда ток отсутствует).

На повышение интенсивности звука нервные клетки реагируют повышением частоты электрических разрядов. Исходя из этого, можно понять смысл «логарифмической» реакции нервных клеток на силу звукового сигнала. Если сила звукового сигнала изменяется на 12 порядков величины, то при пропорциональности частоты разрядов силе звука нерву пришлось бы вырабатывать отдельные

электрические сигналы с частотой, чуть ли не равной частоте света. Не говоря уже об обработке таких сигналов в мозгу, сама их передача по «непрозрачным» для них первам была бы совершенно невозможной. «Логарифмический» же ответ укладывает всю полосу частот нервных электрических разрядов примерно в область, соответствующую наиболее отчетливо различимым звукам. Если за нижнюю границу этой области принять 150 Гц (именно с такой средней частотой следуют самопроизвольные электрические разряды в нерве при отсутствии звуков), то изменение силы звука на 12 порядков даст верхнюю границу частоты импульсов лишь $12 \cdot 150 = 1800$ Гц.

Закодированные таким (а может быть, и не совсем таким) путем звуковые сигналы направляются по слуховым нервам в расположенную неподалеку височно-затылочную часть коры головного мозга, где производится их окончательный анализ. Здесь, выражаясь словами кибернетиков, располагается «черный ящик»: мы знаем, какие сигналы поступают в этот «ящик», и немного понимаем, какие сигналы выходят из него (на основании изучения реакции человека и подопытных животных на исходные сигналы). Но мы почти ничего не знаем о том, как работает этот «ящик», как в нем анализируется поступающая информация и вырабатываются ответные сигналы.

Однако ясно, что все необычайно сложно. Так, известно, что в мозгу у кошек всего лишь около 60% нервных клеток реагируют на чистые тоны, а остальные 40% — на звуки более сложного спектрального состава (например, шумы различной продолжительности). Впрочем, это можно понять: природа создавала человека отнюдь не в качестве слушателя симфонических концертов. Подавляющее большинство естественных звуков — это сложные шумы. И человек должен был разбираться в них для целесообразного поведения в полном опасностей окружающем мире. А восприятие музыки пришло значительно позже.

Но даже и те первые клетки, которые реагируют на чистые тоны, делают это удивительно сложным образом. Одни из них в ответ на звук повышают частоту электрических разрядов, другие понижают ее, третьи реагируют только на начало звука, четвертые — на его окончание. Одни группы нейронов в «слуховой коре» имеют очень узкие частотные полосы отзывчивости, другие — широ-

кие, а третьи вообще реагируют только на изменение частоты звука.

Зачем человеку или животному такое разнообразие нейронов в «слуховой коре»?

Дело в том, что огромное разнообразие воспринимаемых звуков вряд ли удалось бы быстро и эффективно проанализировать, располагая даже очень совершенными, но одинаковыми звуковыми спектрометрами. Лучше подходят связанные друг с другом спектрометры разного устройства. Одни, например, — «сторожа», запускающие главные анализаторы при появлении необычного звука и выключающие их после его окончания. Другие извещают о движении источника звука (частота звука при этом непрерывно меняется вследствие эффекта Доплера). Третьи предназначены для анализа коротких звуков, часто являющихся сигналами опасности (треск сучка, шорох травы, звук выстрела). И все это — за десятую долю секунды: именно такое время в среднем требуется «черному ящику», чтобы проанализировать поступивший в него звуковой сигнал.

Подводя итог, можно еще раз сказать, что мы еще не очень хорошо понимаем, как мы слышим. Мы по существу проникли лишь в работу волосковых клеток. Дальше идет сложнейшая область кодирования звуковых сигналов в нервном тракте и расшифровки этого кода в «слуховой коре» головного мозга. Здесь вся работа еще впереди, и наверняка она принесет множество удивительных открытий.

Непременно лучше мы понимаем, как мы говорим (хотя анатомия речевого тракта изучена довольно хорошо). А между тем уже возникла настоятельная потребность в говорящих и распознающих речь устройствах, например для прямых диалогов с современными электронными вычислительными машинами. В этих условиях на важное место в акустике выдвинулись проблемы, связанные с анализом и синтезом речи.

Известно, что все издаваемые человеком звуки можно разделить на гласные и согласные. Гласные звуки издает аппарат, подобный «эоловой арфе» — набору струн, на которых играет ветер. Когда человек произносит звуки, роль ветра играет выдыхаемый из легких воздух, а роль струн — голосовые связки, находящиеся в хрящевой трубке — гортани. При произнесении согласных звуков мы

создаем препятствия на пути воздуха, выходящего из рта. Для этого служат язык, зубы и губы, а голосовые связки в произнесении таких звуков не участвуют. Однако сколько хитростей скрыла природа в этой простоте!

Возьмем хотя бы голосовые связки. Они не «молчат», даже когда мы не произносим звуков. Специальные датчики показывают, что когда мы мысленно (порой даже не отдавая себе в этом отчета) разговариваем или поем, то голосовые связки все равно колеблются так, словно мы это делаем вслух. Таким образом, можно определить характер голоса человека и тогда, когда он молчит!

Голосовой аппарат в целом оказывается ближе, скажем, к скрипке (помимо струн, у нее есть еще корпус — резонатор, который усиливает звук). Такими резонаторами у человека являются горло и полость рта. В зависимости от формы и размеров этих резонаторов больше усиливаются звуки, частоты которых лежат в том или ином диапазоне, — более низкие частоты (около 500 Гц) у мужчин и более высокие (около 3000 Гц) у детей и женщин. Эти полосы частот называются соответственно мужской и женской *формантами*. Существование формант человеческого голоса было впервые обнаружено лет шестьдесят назад английским ученым Пейджетом, а сегодня развитие техники анализа звука позволяет легко наблюдать их в виде широких темных полос на спектрограммах (рис. 7).



Рис. 7

Интересно отметить, что при изучении спектрограмм голосов оказалось, что в спектрах голосов прославленных певцов отчетливо видна сильная женская форманта! Этот «горловой свист» певцов и объяснил секрет «дальнобойности» таких сильных голосов: указанная форманта попадает в область наиболее хорошей слышимости и придает голосу яркость, звонкость. Но мы этой форманты не улавливаем отдельно от основного низкого тона.

Спектральная картина даже при произнесении одних гласных звуков (пение без слов) очень сложна. Доведение к гласным согласных

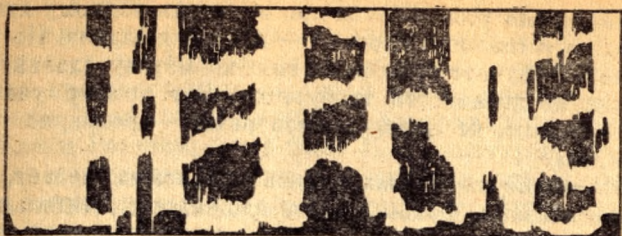


Рис. 8

(речь) еще более усложняет звуковую картину. Любой отрезок речи в конечном счете состоит из отдельных звуков (см. спектрограмму на рисунке 8). Эти звуки называются *фонемами*. Иногда слово состоит из одной фонемы (например, союз «и»). Но чаще слово состоит из нескольких фонем. Наш мозг, как оказалось, распознает именно фонемы, из набора фонем он «конструирует» слова, а из слов — фразы. Но при этом мозгу приходится решать очень трудные задачи.

Прежде всего, фонемы при произнесении слов не отделяются друг от друга, а следуют одна за другой слитно. Между тем, чтобы опознать слово, надо уловить составляющие его фонемы по отдельности. Далее, фонемы, соответствующие даже близким на слух звукам речи, часто имеют весьма несходный спектральный состав. Наконец, мы без труда улавливаем фонему независимо от того, произнесена она мужчиной, женщиной или ребенком, хотя совершенно ясно, что спектры звука при этом совершенно различны. Это значит, что наш мозг обладает чрезвычайно высокими способностями не только к спектральному анализу отдельных звуков, но и к синтезу из них осмысленных звуковых сочетаний, означающих отдельные слова и целые фразы.

Приведем несколько примеров. Чисто гласные фонемы в речи редки; обычно фонема состоит из гласных и согласных звуков. Но согласный звук часто слышен лишь в начале или в конце фонемы: середина же фонемы занята практически чистым гласным звуком. Анализ спектрограмм показывает, что спектры звука «э», например, в словах «метод» и «этот» заметно различны. Отсюда и проистекают тонкости правильного произношения, которые нами

бессознательно усваиваются при обучении родному языку. Описать эти тонкости словами — нелегкая задача. Но учитель часто обучает произношению по методу «делай, как я», пока не добивается требуемого. Вот почему учиться произношению, не слыша живой речи, — чрезмерно трудная задача.

Добавление согласных звуков к гласным делает, как мы уже сказали, фонемы более сложными. Длительность согласных звуков гораздо меньше, чем длительность гласных (в сущности они представляют собой кратковременные шумы, возбуждаемые прерыванием воздушного потока языком, зубами и губами).

Длительное исследование отдельных звуков, фонем, слов и целых фраз, произнесенных различными людьми, тщательный анализ их спектров, проводимый в последние годы с помощью электронных вычислительных машин, позволили установить многие закономерности фонемообразования и даже разработать что-то вроде спектрального атласа «усредненных» фонем, при воспроизведении которых нельзя даже сказать, каким голосом они произнесены, хотя такие фонемы мозг вполне разбирает. Эта работа легла в основу очень интенсивных в последние годы попыток построить анализаторы и синтезаторы речи — распознающие и говорящие устройства на базе электронных вычислительных машин.

Работы по синтезу речи, однако, начались еще задолго до того, как стали понятными основные закономерности фонемообразования. Первые говорящие устройства были созданы еще в XVIII веке, но они использовали для этой цели прямую имитацию процессов, происходящих в голосовом тракте человека. Легкие в них были заменены воздуходувками, голосовые связки — колеблющимися язычками наподобие тех, что имеются в духовых музыкальных инструментах, специальные резонаторы имитировали гортань и полость рта. Некоторые из таких механических устройств говорили довольно хорошо и отчетливо.

Затем, по мере развития техники, на смену механическим устройствам пришли электрические.

Мы уже видели, что контуры, состоящие из конденсаторов и катушек индуктивности, обладают колебательными свойствами. Располагая достаточным числом таких контуров, настроенных на резонансные частоты различных участков голосового тракта, используя электрическую

батарею вместо легких и связав эти контуры с громкоговорителем, удалось довольно удачно моделировать человеческую речь. Первая такая говорящая машина, способная произносить по заданной программе целые предложения, была создана в 1957 г. американским физиком-акустиком Розеном; в ней было 13 LC-контуров, имитировавших отдельные участки голосового тракта, и, несмотря на такую сравнительную простоту устройства, качество «произношения» было весьма хорошим.

Следующим этапом было создание говорящих машин. Спектрограммы отдельных звуков и фоном записываются на магнитофонной ленте. Информация о спектрах и продолжительность звуков вводится в запоминающее устройство электронной вычислительной машины. Машине также задаются правила извлечения из ее памяти записанной в ней информации и приемы произношения звуков. После этого машине показывают напечатанный текст и она его прочитывает вслух.

Большое значение таких синтезаторов речи состоит еще и в том, что их применение позволяет необычайно экономно использовать каналы связи. Как известно, частотный диапазон слышимых звуков составляет 20 000 Гц. Однако для достаточно качественного воспроизведения речи и ее передачи по каналам связи можно ограничиться и впятеро более узким диапазоном частот, т. е. диапазоном шириной 4000 Гц. Но и такой диапазон является слишком широким при многоканальной связи по одной линии. Применение синтезаторов звука позволяет сузить полосу частот каждого канала связи в 10 раз, т. е. увеличить в 10 раз пропускную способность линии связи.

Быстрый прогресс в развитии синтезаторов речи — говорящих машин, в которых используются новейшие достижения в электронной вычислительной технике, — позволяет надеяться, что уже в ближайшие годы говорящие ЭВМ станут распространенным и не вызывающим удивления устройством.

Что касается анализаторов речи — слушающих машин, то успехи здесь более скромны. В отличие от ЭВМ, которая будет говорить одним «средним» голосом, слушающая машина должна разбирать речь многих людей. Нет двух одинаковых голосов, да и каждый человек в разные периоды своей жизни, при разном физическом и душевном состоянии говорит разными голосами. Мы при этом не только

ухитряемся понимать речь разных людей (иногда действительно ухитряемся, настолько она неразборчива или даже вовсе неправильна из-за плохого знания языка), но и нередко можем сказать, в каком состоянии находится говорящий. Пока что разобраться в таком фантастическом разнообразии звуков речи не под силу даже самым совершенным машинам.

И дело даже не только в том, чтобы разобраться во всех звуках. Наша речь несет огромную избыточность по сравнению с той информацией, которая заключена в передаваемом сообщении. Специалисты по кибернетике подсчитали, что полная спектрограмма фразы, произнесенной, скажем, в течение одной минуты, содержит около 2 млн. единиц информации (бит), или около 35 000 бит в секунду. Скорость же переработки информации в мозгу среднего человека составляет не более 45 бит в секунду. Иными словами, если мы поняли сообщение, заключенное во фразе, значит, мы использовали всего лишь примерно одну тысячную долю акустической картины фразы! Колоссальная избыточность речи позволяет нам не только понимать собеседника, но и узнавать его среди тысяч других людей. Однако остается еще во многом загадочным, как ухо и мозг уплотняют информацию, как из всего спектра звуков, слов и фраз они извлекают только самое существенное: что сказано и как сказано. Когда эта «отжимка» ценной информации станет понятной, создание слушающих машин превратится в чисто техническую задачу, что уже во многом достигнуто в создании говорящих машин.

В КОНЦЕРТНОМ ЗАЛЕ

В обязанности архитекторов входит не только создание внешнего облика здания, но и продумывание внутренней планировки, с тем чтобы помещения по возможности лучше соответствовали той цели, которой они будут служить. Уже архитекторы древнего мира встретились с проблемой планировки больших общественных помещений, в которых люди могли бы отчетливо слышать не только друг друга, но и тех, кто обращается к ним со сцены (речь, пение, игра на музыкальных инструментах и пр.).

Архитекторы прошлых веков планировали залы для общественных собраний, руководствуясь методом проб и ошибок. Постепенно накапливался опыт, планировка в целом получалась все более удачной. Древние греки и римляне додумались до амфитеатра — рядов полукруглых трибун, возвышающихся над центральной сценической площадкой. Уже в те времена они знали акустические секреты, поражающие даже наших современников: на сцене можно разорвать кусок бумаги, и этот слабый звук будет отчетливо слышен на самом верху амфитеатра, за десятки метров от сцены.

В старинных храмовых зданиях — церквях и мечетях — сегодняшним экскурсантам демонстрируют не менее впечатляющие акустические эффекты: экскурсовод шепотом говорит в одном углу здания, а в противоположном углу, на большом расстоянии, шепот прекрасно различим. При строительстве открытых амфитеатров и закрытых храмовых помещений зодчие использовали основные явления акустики: прежде всего, отражение, преломление и фокусировку звуковых волн. Правильное

использование этих явлений позволило тогдашним архитекторам достичь подлинных акустических чудес.

Бывали и неудачи. Собственно говоря, неудач было намного больше, чем случаев удачной планировки. Практический опыт, не освещенный научным знанием, не гарантирует от неудач. В старые времена такого понятия, как типовый проект, не существовало, каждый архитектор, напротив, стремился строить так, чтобы его творение не было похоже на другие. Удачное решение при одной планировке здания было трудно перенести на другую планировку. Стоило хотя бы только пропорционально увеличить размеры удачного зала, — и новый зал оказывался совершенно неудачным. В зале, предназначенном для слушания музыки, речь становилась неразборчивой, и, наоборот, зал, спроектированный для собраний, оказывался малопригодным для музыки. Достаточно было отсыреть стенам или половине посетителей не явиться по случаю ненастной погоды, — и акустические характеристики зала резко менялись.

В девятнадцатом веке появились большие здания для общественных собраний, прежде всего концертные и театральные залы. Такое строительство, в свою очередь, неизбежно привело к появлению специальной отрасли науки, изучающей распространение звука в закрытых помещениях, — *архитектурной акустики*. Родоначальником ее является американский физик Валэк Сэбин.

Что, в сущности, требуется от хорошего концертного или зрительного зала? Прежде всего, конечно, чтобы звук, рожденный на эстраде или на сцене, был достаточно громким для всех находящихся в зале слушателей. Но звук есть волновое движение; по мере удаления от своего источника он расплывается по все большему объему, и в результате его интенсивность в каждой точке уменьшается. Кроме того, звук поглощается воздухом, и из-за этого уменьшение громкости по мере удаления от источника происходит еще быстрее.

Дальше. Необходимо, чтобы звук, доходящий до слушателей, где бы они ни располагались, при своем распространении по залу не искажался, чтобы его спектральный состав, сколь сложным он ни был, оставался таким же, как возле самого источника. Наконец, как бы быстро ни следовали друг за другом изменения интенсивности звука, они должны достаточно отчетливо улав-

ливаться слушателями: иначе даже нормальная человеческая речь, не говоря уже о скороговорке, превратится в невнятное бормотание, а быстрая музыкальная пьеса — в какую-то кашу звуков.

Однако эти три главных естественных требования к акустике зала взаимно противоречивы. Например, для точечных источников звука закон обратных квадратов привел бы к тому, что на расстоянии 20 м от сцены интенсивность звуковой волны была бы в 100 раз меньше, чем в 2 м от сцены, а громкость была бы меньше на 20 дБ. Правда, в закрытых помещениях закон обратных квадратов не действует; это вызвано тем, что звук отражается от стен, потолка и пола помещения, причем прежде чем окончательно затухнуть, он может испытать такие отражения много раз. Многократное отражение звука приводит к явлению *реверберации* — увеличению длительности звуков. В явлении многократного отражения звука скрыт главный секрет акустических качеств помещения. Благодаря ему помещение озвучивается так, как оно, например, освещается лампой, свет которой направлен на потолок: гораздо равномернее, чем по закону обратных квадратов расстояния. В помещении, обладающем хорошей акустикой, громкость уменьшается с расстоянием значительно медленнее, чем по закону обратных квадратов: вместо уменьшения громкости на 20 дБ происходит ее уменьшение на 5 дБ.

Но вот какая неприятность: чем сильнее реверберация, тем медленнее затухает звук в помещении. За время реверберации условились принимать такой промежуток времени, в течение которого интенсивность звука ослабевает в миллион раз (громкость при этом уменьшается на $10 \lg 10^6 \text{ дБ} = 60 \text{ дБ}$). В случае звучания симфонического оркестра или речи это соответствует уменьшению громкости до порога слышимости.

А теперь сделаем несложный подсчет. Пусть при каждом отражении от стен и потолка помещения звук теряет только 5% своей интенсивности. Тогда он затухнет, т. е. уменьшит свою громкость на 60 дБ, после 270 отражений. Можно определить, какой полный путь проходит звуковая волна до своего затухания. Конечно, этот путь зависит от размеров и формы помещения. Но можно найти некоторый средний путь затухания звука: он равен учетверенному объему помещения, деленному

на площадь его внутренней поверхности, т. е. на общую площадь стен, потолка и пола. Пусть, например, помещение имеет форму параллелепипеда с размерами $24 \times 15 \times 9$ м; легко подсчитать, что в этом случае средний путь звуковой волны (при 270 отражениях) равен примерно 2450 м. Поделив этот путь на скорость звука в воздухе при комнатной температуре, мы найдем, что время реверберации составляет 7,2 с.

Много это или мало? За 7 с даже неторопливо говорящий человек может успеть произнести до 20 слогов (фонем). В результате в один и тот же момент в ухо попадут и первые (пусть сильно ослабленные) и последние, только что произнесенные фонемы. Такая накладка фонем вызовет, конечно, полную звуковую кашу; речь станет совершенно неразборчивой. О таком помещении говорят, что оно слишком гулкое. В результате длительных исследований было установлено, что наилучшим временем реверберации является 0,5—1,5 с, причем нижняя граница этого интервала соответствует речи, а верхняя — музыке. Дело в том, что в среднем в фонемах интенсивность звука меняется быстрее, чем при исполнении музыкальных произведений; поэтому картина звуковых спектров у речи меняется более динамично, чем у музыки.

Приведенный упрощенный расчет времени реверберации отражает суть дела, лишь когда длины звуковых волн много меньше размеров помещений или препятствий, встречающихся на пути волн. Но, как мы уже говорили, наиболее важная в информационном отношении область частот заключена примерно в интервале от 200 до 3500 Гц. При таких частотах длины волн в воздухе лежат в пределах от 1,7 м до 10 см и действительно будут существенно меньше размеров зала. Они, однако, того же порядка, что и размеры препятствий — стульев, слушателей. И хотя общая поверхность этих препятствий мала по сравнению с площадью стен и потолка, присутствие слушателей приходится учитывать при расчете акустических свойств залов.

Известно, что все построенные в старину залы, будучи пустыми, звучат более гулко, чем при заполнении публикой. Например, в заполненном зале Большого театра в Москве время реверберации составляет 1,55 с, а в пустом зале — 2,06 с. Различие вроде бы не

очень велико, но все же существенно. Связано это с тем, что одежда слушателей — очень хороший поглотитель звука, и в результате при отражении от партера звук поглощается намного сильнее, чем при отражении от стен и потолка. Чрезвычайно важно сделать так, чтобы акустические свойства помещения не зависели от степени его заполнения людьми. Не должно быть большой разницы между характером звучания во время репетиции и на спектакле.

Сегодня все концертные залы проектируются с учетом этого требования. В них устанавливаются кресла специальной конструкции, имеющие одно и то же поглощение звука вне зависимости от того, сидят на них или нет.

Архитекторы лучших старинных концертных и театральных залов эмпирически установили многое из того, к чему путем тщательных расчетов пришла впоследствии архитектурная акустика.

Архитектурная акустика указывает и пути исправления акустических свойств неудачно спроектированных концертных залов. Существует, например, в Лондоне построенный около века назад зал Ройял Альберт-холл. Он оказался чрезмерно гулким, даже будучи заполнен слушателями. Мало того — купол этого зала имел крупный недостаток: он действовал как огромное акустическое зеркало и создавал в некоторых местах зала такое сильное отражение звука, что слушатели даже испытывали боль в ушах. Около десяти лет назад была начата реконструкция зала. Прежде всего, чтобы устранить эффект эха от купола, подвесили к потолку более сотни дисков из стекловолокна, каждый диаметром в несколько метров. Диски не только поглощали звук, но и рассеивали его, так как имели кривизну, противоположную кривизне купола (выпуклой стороной они были обращены вниз). На сцене позади оркестра был установлен огромный отражатель звука, тоже из стекловолокна. В результате слушатели даже в последних рядах зала смогли воспринимать музыку почти без всяких искажений.

На акустические свойства помещений сильно влияет выбор материалов для покрытия потолка, стен, кресел, Коэффициент звукопоглощения всех материалов в той или иной степени зависит от частоты звука. Неудачный

выбор материалов может привести к тому, что будет искажен спектральный состав звуков.

Обычные материалы, применяемые при строительстве зданий, — дерево, штукатурка — поглощают не более 3% энергии падающего на них звука. Гораздо сильнее поглощают звук ткани: например, одежда одного человека поглощает в среднем столько же звуковой энергии, сколько 20 м² штукатурки. Но обитые бархатом ложи отошли в прошлое, пришел век искусственных материалов; место тяжелых драпировок заняли легкие, прочные, огнестойкие и дешевые пористые материалы. Многие такие материалы поглощают до 40—50% падающей на них энергии звука, причем коэффициент поглощения их практически постоянен в важном частотном интервале от 200—300 до 3500—4000 Гц. Поглощая звук, они не искажают его спектра, не портят звучания. Легкие звукопоглощающие материалы все шире используются не только в концертных залах, но и в жилых домах для защиты от шумов.

В настоящее время многие исследования по архитектурной акустике проводятся в помещениях, которые можно было бы назвать абсолютно глухими камерами (аналог абсолютно черного тела в оптике): их стены и потолок поглощают практически 100% падающей на них энергии звука. Достигнуто это не только применением многослойных щитов из пористых поглотителей. Сами стены оштетинились ребристыми выступами, на которых звуковая волна дробится, рвется на отдельные волночки. В конце концов, мечась от выступа к выступу, волночки полностью поглощаются. В таких заглушенных камерах проводятся также точные исследования характеристик звукоизлучающих и звуковоспринимающих приборов — громкоговорителей, микрофонов и др.

А вот модель театрального зала. На потолке, стенах и креслах закреплены крошечные микрофоны. Модель предназначена для акустических испытаний. Размеры модели во много раз меньше размеров прототипа. Для сохранения подобия акустических явлений во столько же раз должна быть уменьшена длина звуковой волны. Вот почему на сцене модели установлен не музыкальный инструмент, а генератор высокочастотных ультразвуковых колебаний.

С помощью микрофонов определяется, как зависит интенсивность звука в различных местах зала от времени (реверберация), не искажается ли спектр звука при его отражении и поглощении стенами, потолком, креслами. А чтобы сделать картину реверберации видимой, на сцене устанавливают поблизости друг от друга два электрода и прикладывают к ним напряжение. Проскакивая между электродами, искра образует ударную волну. Сфотографировав ее на темном поле, получают снимки, на которых можно увидеть светлые кривые линии — положения фронтов отраженных волн в различные моменты времени после возникновения звукового импульса. Именно точные расчеты и испытания на моделях позволяют сегодня проектировать и строить концертные и театральные залы, обладающие отличным акустическими характеристиками.

МУЗЫКА И ФИЗИКА

Войдем в концертный зал, займем места и приготовимся слушать симфоническую музыку. Оглядывая зал в ожидании дирижера, остановим взгляд на эстраде, на которой расположился оркестр. На переднем плане мы увидим группы оркестрантов, играющих на струнных музыкальных инструментах, — слева скрипачей, справа виолончелистов, посредине между ними, чуть отступя вглубь, — альтистов и в глубине справа — контрабасистов. Число исполнителей на струнных инструментах превышает половину состава оркестра. Это неудивительно: им предстоит играть вместе с исполнителями на духовых инструментах, а эти инструменты имеют намного большую громкость. Духовики сидят на втором плане (в середине оркестра), ближе — исполнители на деревянных духовых инструментах (гобое, фাগоте, кларнете), сзади них — исполнители на медных духовых инструментах (трубе, валторне, тромбоне, тубе). А слева, позади скрипачей, сидят арфистки, стоят ударники — они играют на барабанах, литаврах, тарелках, треугольнике, ксилофоне, челесте; порой в этом углу оркестра можно обнаружить гонг и бубен, а иногда еще один инструмент — фортепиано. Всего можно насчитать немногим более двадцати типов музыкальных инструментов.

Такой состав симфонического оркестра складывался веками. И разнообразие его звучания удовлетворяло композиторов и слушателей на протяжении многих веков. Лишь в нашем веке симфонический оркестр перестал отвечать смелым замыслам современных компози-

торов. Быстро меняющийся мир потребовал новых средств музыкальной выразительности, на которые традиционный оркестр оказался неспособным. Тогда и начали один за другим рождаться новые, электрические музыкальные инструменты, которые, однако, не смогли ужиться с другими инструментами в оркестре. Появилась и особая музыка для новых инструментов, из которых стали создавать целые оркестры. Но эти новые оркестры не могут быть конкурентами традиционным симфоническим оркестрам. Ансамбль электромузыкальных инструментов не отменяет и не заменяет симфонического оркестра, равно, как, скажем, эстрадная песня не вступает в соперничество с оперной арией. Это просто другая музыка, другой музыкальный мир, ставящий перед собой совсем другие задачи и рассчитанный на другую аудиторию слушателей.

Разные группы инструментов, которые мы увидели в оркестре, различаются механизмом, каким в них создается звук: возбуждение колебаний струн (струнные инструменты), воздушного столба (духовые инструменты), мембран (ударные инструменты). Но как все эти инструменты оркестра могут звучать в одном строе, не противореча друг другу?

Ответ на этот вопрос надо искать в механизме восприятия музыкальных звуков нашим ухом.

«Безжизненность» чистого тона, отвечающего одной-единственной частоте звука, неприятна именно потому, что наше ухо никогда не встречается с ним в реальном звучащем мире. Любой музыкальный звук всегда сопровождается обертонами (высшими тонами). Мы уже говорили о том, что именно спектральный состав звука определяет в основном его тембр. Важнейшее богатство оркестра, которое с таким мастерством используют выдающиеся композиторы, — это различие тембров одновременно звучащих в оркестре инструментов. Любой звук оркестрового инструмента имеет множество обертонов (их еще называют гармониками). Но, как правило, чем дальше отстоит по частоте гармоника от основного тона, тем меньше ее интенсивность. Характерный тембр звука определяется обычно лишь несколькими гармониками, ближайшими к основному тону.

А теперь рассмотрим простейшие сочетания звуков — аккорды из двух нот. Для удобства примем, что звук рож-

ден идеальным инструментом, в спектре которого присутствуют все возможные гармоник. Вспомним музыкальные интервалы — от прима до октавы. Октава получается, если звучащую струну нажать посередине. Тогда длина укладываемой на ней стоячей волны уменьшится в два раза и соответственно во столько же раз повысится частота звука. Для основных тонов в октаве отношение частот равно 2:1. Если зажать струну не посередине, а на $\frac{1}{3}$ ее длины, получится квинта; отношение частот для основных тонов этого аккорда равно 3:2 и т. д.

Теперь можно составить следующую таблицу благозвучия таких простейших аккордов (натуральная диатоническая гамма). Из этой таблицы легко увидеть, что по мере того, как падает доля совпадающих гармоник, аккорд из консонантного (благозвучного) превращается в диссоциирующий (неблагозвучный).

	Степень	Отношение частоты к частоте I степени	Доля совпадающих гармоник, %	Слуховое ощущение
I	прима	$1:1=1,000$	100	Абсолютный консонанс
II	секунда	$9:8=1,125$	11,8	Диссонанс
III	терция	$5:4=1,250$	22,4	Несовершенный консонанс
IV	кварта	$4:3=1,333$	29,2	Совершенный консонанс
V	квинта	$3:2=1,500$	41,6	Совершенный консонанс
VI	секста	$5:3=1,666$	26,7	Несовершенный консонанс
VII	септима	$15:8=1,876$	9,6	Диссонанс
VIII	октава	$2:1=2,000$	75	Абсолютный консонанс

Это связано с особенностью нашего уха слышать не только обе воздействующие частоты, но и их разностную частоту. На разностной (довольно низкой) частоте интенсивность звука будет меняться, «пульсировать». Именно эти пульсации тем неприятнее, чем ближе друг к другу частоты каких-либо интенсивных не совпадающих по частоте гармоник, что и создает ощущение диссонанса.

Конечно, современное ухо куда более привычно к диссонансам, вносимым в мир порождениями современной техники, чем ухо даже наших ближайших предков. Нас не только не смущают, нам даже порой нравятся вопиющие диссонансы современной музыки. Более того, музыка без диссонансов вообще почти невозможна, сплошные консонансы скоро приедаются. Поэтому развитие музыкальных фраз всегда идет от консонансов к диссонансам, и обратно.

Рассмотрим теперь взаимные расстояния между отдельными интервалами, называемыми *ступенями гаммы* — в данном случае *натуральной*, или, как ее еще называют, *диатонической*. Сразу видно, что эти расстояния непостоянны: от прима к секунде 0,125, от секунды к терции тоже 0,125, затем только 0,083, после этого два раза по 0,166, далее сразу 0,209 и, наконец, опять, как вначале, 0,125.

О чем это говорит? Да о том, что если инструмент (например, арфу или флейту) настроить по этой гамме, то любое произведение можно будет исполнять на нем только в единственной тональности. Стоит перейти в другую тональность (транспонировать), например, начав исполнение с ноты, которая отстоит на секунду или терцию от прежней, и произведение начнет звучать нестерпимо фальшиво, все прежние интервалы «поползут».

Такая неприятная особенность выявлялась давно уже при настройке самих инструментов. Чтобы охватить весь звукоряд, пользовались квинтами (это предложил еще Пифагор). Очевидно, спустя 12 квинт мы должны вернуться к исходному звуку, только семью октавами выше. Но при такой настройке мы должны добраться до звука, частота которого больше частоты исходного звука в $(1,5)^{12} \approx 130$ раз, тогда как 7 октав повышают частоту только в $2^7 = 128$ раз. А это огромная разница для нашего чуткого уха!

Малоизвестный органист Веркмейстер, живший в середине XVII в., предложил замечательно простой выход: немножко укоротить все квинты, так чтобы 12 квинт «влезли» точно в 7 октав! И, как по мановению волшебной палочки, все расстояния между соседними звуками (полутонами, которых в октаве стало точно 12) стали одинаковыми. Образовавшийся строй получил название *равномерно темперированного*. Такой строй имеет подавляющее

большинство современных музыкальных инструментов. Стоит в оркестре настроить инструменты по одному общему тону (это звук «ля» первой октавы — тот самый звук, который издает гобой перед началом концерта), и многие инструменты будут играть согласованно, не допуская фальши.

Стандартизация музыки путем внедрения равномерно темперированного строя, конечно, как всякая стандартизация, явилась огромным достижением. Но вместе с тем упификация звукоряда оказалась тесной клеткой, особенно в таком творческом деле, как музыка. Страсти за и против темперации разгорелись уже при ее появлении. Великий немецкий композитор Бах горячо пропагандировал ее, написав с этой целью свой знаменитый сборник прелюдий и фуг, который так и называл: «Хорошо темперированный клавир». Его современник и соотечественник Гендель, тоже великий композитор, новинки не принял. Он спроектировал особый орган, в котором были специальные промежуточные клавиши для «подчистки» фальшивых звучаний. В недавнем прошлом из оков двенадцатиступенной темперации пытался вырваться замечательный русский композитор А. Н. Скрябин. Для своих оркестровых произведений он требовал исполнения в натуральных тонах, а там, где это было невозможно, использовал трель соседних звуков, чтобы получился звук средней, промежуточной частоты, которого не доставало в темперированной гамме. Подобно Генделю, он пытался сконструировать рояль с дополнительными натуральными тонами. Такие рояли впоследствии были построены, но в практику не вошли: играть на них было слишком сложно.

Означает ли это, что темперированному строю, так удачно найденному три века назад, уготовано вечное существование? Отнюдь нет. Мы не зря сказали, что современное ухо более привычно к диссонансам, чем ухо людей, живших всего лишь за одно — два поколения до нас. Восприятие музыки тоже постоянно меняется. В прошлом веке музыка Чайковского была для всех откровением, а сегодня очень многие из нас вполне воспринимают музыку Шостаковича, в которой нет почти ничего от мелодического и гармонического строя музыки Чайковского. Развитие музыки способствует развитию музыкального слуха, и обратно. В последние годы в этот про-

цесс активно включилась музыкальная акустика, которая не только, говоря словами пушкинского Сальери, «пове-ряет алгеброй гармонию», но использует для этой цели и сложнейшие физические приборы, и кибернетические машины, с помощью которых пытается моделировать та-инственный еще во многом процесс воспроизведения музыки.

В музыкальную жизнь все шире вторгаются электро-музыкальные инструменты.

Первый электромузыкальный инструмент появился в 1897 г. Его изобрел англичанин Кэхилл; назывался этот инструмент «телармониум». В нем использовались громоздкие электромеханические генераторы, приводившиеся в движение электродвигателями и вырабатывавшие напряжение, которое менялось со звуковой частотой. Но еще в 1833 г. швейцарский изобретатель Деллезен запатентовал способ получения музыкальных звуков при взаимодействии электромагнита с фигурно вырезанным железным колесом. Этот же принцип использовал и Кэхилл. Однако построенный им инструмент оказался необычайно громоздким: он весил около 200 т, больше даже такого музыкального «слона», как орган!

После Кэхилла изобретатели предприняли много попыток усовершенствовать конструкцию электромеханического инструмента. Наконец, в 1934 г. чикагский часовщик Хэммонд придумал, пожалуй, одну из наиболее удачных конструкций органа, и с его легкой руки этот инструмент распространился по всему миру. В этом органе стальные колесики волнообразного профиля, вращаясь на валу, проходят мимо постоянного магнита. Это приводит к изменению магнитного потока и наведению электродвижущей силы в небольшой катушке, насаженной на магнит. Возникающий в цепи этой катушки ток колеблется с частотой, зависящей от числа «волночек» на профиле диска. Всего в генераторе используется 91 диск, и производимые звуки охватывают диапазон в 7,5 октавы. Прекрасным свойством этого органа является то, что он навечно держит строй — интервалы между тонами остаются неизменными. Меняя же напряжение и тем самым скорость вращения вала электродвигателя, на который насажены диски, можно весь строй сдвигать вверх и вниз, подстраивая инструмент к другим инструментам ансамбля. В органе можно получить и широкий

одного инструмента всего богатства тембров существующих инструментов и, более того, «сконструировать» совершенно необычные тембры. Для этого в электромузыкальных инструментах, кроме делителей частоты, устанавливают еще и умножители частоты. При этом уровень выходного сигнала для гармоник подбирают так, чтобы в сумме основной тон и его гармоники имитировали спектр звуков традиционных инструментов. Смешивание основного тона с его гармониками можно производить в автоматическом режиме. Исполнителю достаточно нажать нужную клавишу, например «гобой» или «виолончель».

Очень важное значение имеет и *вибрато*, или как его еще называют, *подтональная вибрация*. Наш слух устроен так, что звук, даже «обогащенный» полноценным тембром, звучит безжизненно, если он имеет строго фиксированную частоту. Особенно это относится к продолжительным звукам, возникающим, например, при пении или игре на скрипке. Поэтому певцы или скрипачи вибрируют звук, т. е. слегка и не очень быстро колеблют его частоту. Практика показывает, что наиболее приятная и впечатляющая звучность достигается, когда вибрато имеет частоту, равную в среднем 6 Гц. Слишком быстрое вибрато, равно как и слишком медленное или неравномерное, одинаково неприятны для слуха.

Вибрато в электромузыкальном инструменте создать нетрудно. Для этого обычно модулируют частоту задающих генераторов с помощью дополнительного генератора вибрато, вырабатывающего колебания с частотой примерно 6—8 Гц. В некоторых конструкциях инструментов вибрато создается тем, что группы громкоговорителей приводятся во вращение. При этом звуковая волна доходит до слушателя в каждый момент в другой фазе («фазовое вибрато»). Такого же эффекта можно достичь, влияя на спектр звука так, чтобы периодически менялась относительная интенсивность гармоник основного тона. Все эти способы в конечном итоге приводят к тому, что получается «живое дыхание» звука. Но автоматическое вибрато не может удовлетворять искушенного слушателя. Он привык к тому, что вибрато отражает душевное состояние исполнителя и тем самым усиливает выразительность произведения. Например, при исполнении спокойной по характеру музыки вибрато может быть медленным, взволнованная мелодия сопровождается быстрым вибрато, а музыка

скорбного характера может исполняться «безжизненно», без всякого вибрато. Для этой цели в электромузыкальные инструменты встраивают приспособления, позволяющие делать «пальцевое вибрато»: оно получается, когда исполнитель незначительно раскачивает клавишу пальцем.

Очень важным элементом музыкального звука является и *атака*. Это — специфический переходный процесс, в течение которого устанавливаются стабильные характеристики звука — его громкость, тембр, высота. В самом деле, не надо думать, что достаточно ущипнуть гитарную струну или провести смычком по струнам скрипки, нажать клавишу рояля или, наконец, вдунуть воздух в кларнет — и мгновенно возникает неизменный уже далее звук. Нет, любой музыкальный звук проходит три стадии — начало, середину и конец, причем и начальная, и конечная стадии имеют некоторую продолжительность. Начальная стадия и называется атакой.

Длится она по-разному: у щипковых, ударных и некоторых духовых инструментов — от 0 до 20 мс, у фюгота — от 20 до 60 мс. Атака — это не просто нарастание громкости звука от нуля до некоторого установившегося значения, она может сопровождаться таким же изменением высоты звука и его тембра. Сложность заключается еще и в том, что характеристики атаки различны для разных экземпляров одного и того же инструмента и, более того, неодинаковы еще в разных участках его диапазона, при разной манере игры на инструменте. Скрипка по богатству выразительных возможностей, предоставляемых разнообразием возможных способов атаки, вероятно, является наиболее совершенным инструментом.

Применяемые в электромузыкальных устройствах приспособления для имитации атаки (а также, что не менее важно, для управления затуханием звука) называются манипуляторами. Как и в случае вибрато, такое управление может быть либо автоматическим, либо пальцевым. В последнем случае достигается наибольшая выразительность звучания инструмента. Для пальцевого управления атакой клавиши в манипуляторах связаны со специальными электронными схемами, которые сглаживают резкие щелчки, возникающие при включении схемы нажатием клавиши, а также делают более плавным затухание звука при выключении схемы, когда клавиша отпускается. Применение переменных резисторов позволяет вместе с тем

менять громкость звука в зависимости от силы нажатия клавиши. Специальный подбор конденсаторов в таких схемах дает возможность при затухании звука быстрее глушить высокочастотные гармоники (по сравнению с низкочастотными), т. е. имитировать то изменение спектра, которое наблюдается у традиционных музыкальных инструментов.

Заметим, что электрогитару, строго говоря, вряд ли можно отнести к электромузыкальным инструментам. Она представляет собой сочетание звукопроизводящего устройства и электронного усилителя. Звук ее имеет очень мало общего со звуком обычной гитары, так как в процессе усиления звука возникают искажения. Дело в том, что характеристики усилителя имеют очень мало общего со свойствами резонатора (корпуса) гитары. Время нарастания сигнала в усилителе велико, поэтому исчезает атака, придающая гитарному звуку столь характерный тембр; в равной мере это относится и к стадии затухания звука. И хотя звук электрогитары довольно своеобразен, он куда менее выразителен, чем звук обыкновенной гитары.

Электронным музыкальным инструментам можно предсказать дальнейшее развитие. По-видимому, эти инструменты уже не сойдут со сцены. Слишком многими преимуществами перед традиционными инструментами они обладают. Прежде всего, это расширение исполнительских возможностей, сочетание в одном инструменте голосов различных музыкальных инструментов (от незатейливой флейты до фортепиано) и возможность получения таких тембров, какие неведомы всем традиционным инструментам. Электромузыкальные инструменты делают возможным исполнение в сколь угодно больших помещениях без использования звукоусилительной техники. Они могут работать синхронно с другими устройствами, создающими зрительные и другие эффекты, что открывает большие перспективы перед цветомузыкой, «музыкой запахов», о которых мечтал провозвестник новых синтетических искусств композитор Скрябин.

Интересны электромузыкальные инструменты и в отношении возможности автоматического создания музыки с помощью специальных электронных вычислительных машин. Достигшему в древности определенного развития синкретическому, нерасчлененному искусству, соединявшему в одном произведении разные виды искусств (сло-

во, музыку, графику, танец), суждено, быть может, в наше время возродиться и подняться на новые высоты. Может быть, и в самом деле когда-нибудь станет реальностью «симфония си-минор в синем цвете среди запахов сосен и моря в потоках свежего ветра и шелесте волнующихся трав», подобная той, о которой мечтал Н. А. Ефремов в «Туманности Андромеды».

Понятно, что исполнять такие произведения можно будет лишь с помощью электронных инструментов. Эти инструменты имеют безграничные возможности для своего дальнейшего развития и совершенствования.

СУДЬБА ФОНОГРАФА

Развитие техники связи в нашем веке таково, что информация все шире «доставляется на дом» (телефон, радио, телевизор, магнитофон и пр.). Но все же люди ходят и, наверное, всегда будут ходить в театры и на концерты; видимо, ощущение зала, присутствия других людей, вместе переживающих действие или музыку, очень важно для восприятия. И люди мирятся с неудобными местами в театре, с шумами в концертном зале: атмосфера дорога!

Но все же сколь велик прогресс в технике звукозаписи и звуковоспроизведения, если он позволил нам в домашних условиях наслаждаться целыми концертами, да еще при качестве звучания порой куда более высоком, чем в концертном зале! И почти все это достигнуто в XX веке, а по существу и вовсе за полвека. Прошло уже целое столетие с того времени, когда Томас Эдисон создал первый аппарат для записи звука — фонограф. Он состоял из цилиндра, покрытого оловянной фольгой, и мембраны с иглой. Человек говорил в трубу, звуковое давление передавалось от мембраны к игле, и та чертила бороздку на фольге, когда барабан вращали рукой. С тех пор аппаратура для записи звука необычайно изменилась, но принцип ее действия и все основные узлы механических звукозаписывающих аппаратов остались такими же. Однако внедрение электричества в технику грамзаписи, происшедшее полвека назад, существенно улучшило качество записи и воспроизведения звука.

Послушайте какую-нибудь старую граммофонную пластинку, выпущенную на заре нашего века. Густое шипе-

ние, непрерывный треск, щелчки, сквозь которые время-
ми прорывается голос, глухой и вместе с тем резкий. Это —
не только от старости, от заигранности пластинки. Не мно-
гим лучше она звучала и тогда, когда ее только что выпу-
стили в свет. И сравните звучание такой пластинки с чи-
стым, отчетливым, полнокрасочным звучанием современ-
ной пластинки. Как же достигается в наше время высоко-
качественная запись и воспроизведение звука?

Первый этап состоит в записи звука, — но не непосред-
ственно на грамофонную пластинку, а на магнитофон.
Значит, прежде чем родится высококачественная пластин-
ка, необходимо получить не менее качественную запись
на магнитной ленте. Можно много рассказывать о том,
как совершенствовались электродвигатели, с тем чтобы по-
лучить высокостоянную скорость движения магнитной
ленты, как совершенствовались сама лента, чтобы магнит-
ный порошок распределялся по ней совершенно равномер-
но и был достаточно мелкозернистым, как совершенство-
вали наиболее ответственную часть магнитофона — маг-
нитную головку.

Но попытаемся понять, от чего зависит верность запи-
си и воспроизведения звука. Все современные звукозапи-
сывающие системы состоят из электронных схем, многие
характеристики которых могут быть нелинейными, что
приводит к изменению спектра сложных электрических
сигналов. Это искажение неодинаково при различной силе
звука. С изменением громкости меняется спектральный
состав воспроизводимого звука, причем более сильный
сигнал больше искажается. Используемые микрофоны в
электроакустических установках и громкоговорители до-
бавляют свои нелинейные искажения. Поэтому прохожде-
ние сигнала характеризуют специальным коэффициентом
нелинейных искажений. Практика показывает, что че-
ловеческое ухо не улавливает эти искажения, если ко-
эффициент нелинейных искажений не превышает до-
лей процента для чистого тона и 1—2% для сложных
звуков.

По этим причинам в электронных схемах высококаче-
ственных звукозаписывающих и звуковоспроизводящих
устройств должны использоваться элементы, характери-
стики которых линейны в достаточно широком диапазоне
громкостей (по крайней мере до 60 дБ) и в достаточно
широком диапазоне частот (от 30 до 15 000 Гц).

Далее, все электронные схемы обладают собственными шумами (шумят, например, электронные лампы из-за неравномерной эмиссии электронов с нити накала). Необходимо сделать так, чтобы уровень этих шумов был по крайней мере на 15—20 дБ ниже уровня самых слабых сигналов.

И это еще не все. Из рассмотрения характеристик слуха мы знаем, что субъективное ощущение громкости звука зависит от его частоты. По мере уменьшения громкости чувствительность уха к звукам низших и высших частот падает быстрее, чем к звукам средних частот. Поэтому необходимо, чтобы зависимость частотной характеристики усилителя от коэффициента усиления компенсировала зависимость частотной характеристики слуха от громкости (тонкомпенсация). Разумеется, тонкомпенсация должна осуществляться автоматически. Также автоматически должна происходить компенсация нелинейных искажений, вносимых электронной системой. И, наконец, надо обеспечить безынерционность механических устройств, используемых при записи и воспроизведении звука (например, громкоговоритель должен быстро прекратить звучать при исчезновении сигнала).

Но вот магнитофонная запись получена и откорректирована. Теперь запись надлежит перенести на металлическую матрицу — диск, покрытый тонким слоем ацетатного лака. Для этого выходной электрический сигнал подается с магнитофона на устройство, приводящее в колебательное движение звукозаписывающую корундовую иглу, укрепленную в очень легком, почти безынерционном держателе.

Полученный диск называется первым оригиналом. Его бережно хранят, как настоящий эталон, на который и пылинке сесть не дают. С него изготовляют второй оригинал. Для этого на поверхность первого оригинала наносят тончайший слой серебра, а поверх него толстое электролитическое покрытие. После разъединения второго и первого оригиналов слой серебра на втором оригинале быстро окисляется и легко удаляется, а на покрытии образуется перевернутое изображение записи — своего рода негатив, на котором вместо канавок, прочерченных иглой, выступают холмики. С этого оригинала получают прочный штамп, который может выдержать изготовление многих тысяч копий на пластинках из винилитовой смолы.

Раньше запись вели вглубь: чем сильнее сигнал, тем глубже погружалась игла. Это оказалось по ряду причин неудовлетворительным. В частности, держатель иглы (тонарм) должен был быть достаточно массивным, что противоречило требованию малой его инертности. Кроме того, при многократном проигрывании пластинок капавка записи быстро разрушалась. Сейчас применяют поперечную запись: канавка на всем протяжении имеет постоянную глубину и ширину, но чем сильнее сигнал, тем размах колебаний канавки в плоскости диска шире.

Но так нарезка производится только на монофонических пластинках. Движение иглы на стереофонических пластинках значительно сложнее. Такие пластинки вошли в жизнь только лет двадцать назад, хотя впервые стереофонический эффект был продемонстрирован почти век назад: на сцене Гранд-Опера в Париже были установлены два микрофона, и каждый слушатель получил по паре наушников; в один из них звук поступал от первого микрофона, в другой — от второго.

Стереофония, конечно, очень важное явление, хотя бы потому, что она позволяет определить направление на источник звука, что очень существенно для ориентировки. Но, кроме того, слышать звук исходящим как бы из одного источника, когда на самом деле его источники широко распределены в пространстве концертного зала, — это значит лишать себя подлинного художественного восприятия.

Как производится стереозапись? Для этого нужно воспользоваться не менее, чем двумя микрофонами. Специальные исследования стереофонического эффекта привели к интересным результатам. Оказалось, что при определении направления на источник звука, частота которого меньше примерно 800 Гц, человек использует различие в фазах волн, поступающих в каждое ухо. Он поворачивает голову так, чтобы свести эту разность фаз к нулю, т. е. ориентирует ее в направлении на источник звука. Тогда уши равноудалены от источника, и фазы обеих волн одинаковы. Но при частотах, больших 800 Гц, человек при ориентации на источник звука реагирует на различие в интенсивности волн, достигающих его ушей. Однако при частотах, меньших 300 Гц, стереофонический эффект не наблюдается.

При высококачественной стереозаписи два микрофона устанавливают на расстоянии около 20 см друг от друга. Они играют роль ушей «искусственной головы», — муля-

жа, сделанного из материала, как можно лучше имитирующего акустические свойства человеческой головы. Для получения менее качественных записей вместо такого муляжа можно обойтись прямоугольной звукопоглощающей перегородкой, на которой по обе стороны укрепляются микрофоны. Вопреки распространенному мнению, расстояние между микрофонами вовсе не обязано быть равно среднему расстоянию между ушами. Их можно разнести и до 10 м (однако при еще большем расстоянии начинает сказываться неприятный «эффект дыры» посредине между микрофонами). Важно, чтобы микрофоны были установлены перед источником звука (например, оркестром) достаточно близко от него, так чтобы «угол слуха» (угол между направлениями от микрофонов на крайние точки оркестра) составил 30—45°. В противном случае качество записи падает из-за малого различия интенсивности волн, приходящих к обоим ушам.

Каждый микрофон при стереозаписи имеет свой канал связи, и сигналы с микрофонов подаются, например, на ленту двухдорожечного магнитофона с двумя головками. При записи на стереофоническую грампластинку сигналы с магнитофона подаются соответственно на две катушки, управляющие движением одного резца. Если при монофонической записи достаточно одной катушки, колеблющей резец в плоскости диска, то при стереофонической записи две катушки колеблют резец в двух взаимно перпендикулярных направлениях, образующих углы 45° с плоскостью диска. В результате на каждой из стенок треугольной по форме канавки появляется своя дорожка. Этот способ стереофонической записи был изобретен еще в 1931 г., но только к 1958 г. инженеры смогли преодолеть трудности, стоявшие на пути его осуществления.

Повышение качества записи и воспроизведения звука не ограничивается, однако, тем, что было рассказано. Современная техника позволяет также улучшать качество записи по сравнению с ее реальным прототипом и, более того, создавать такие записи, у которых не было никаких прототипов, т. е., по существу, создает неслыханные звучания. Это стало возможным благодаря появлению магнитофона, и в последние десятилетия запись звука все более сближается с записью изображения, а методы обработки записи звука на ленте — с приемами кинематографа. Важнейший из этих приемов — монтаж,

Слово монтаж не надо понимать примитивно — как соединение с помощью ножниц и клея различных кусков магнитофонной ленты. Конечно, каждый любитель магнитофонных записей знает, что без этих операций не обойтись, но главная цель того монтажа, о котором мы говорим, — это прежде всего совершенствование звучания записи. Примером монтажа может служить работа по реставрации старинных граммофонных записей.

Сохранились записи голоса знаменитого русского певца Ф. И. Шаляпина. Записи эти, конечно, по современным понятиям некачественны, и ко всему еще пластинки совершенно заиграны. Голос певца временами почти не слышен из-за сильного шипения, треска. При реставрации пластинку сначала переписывают на магнитофонную ленту, установив на входе магнитофона специальное устройство — шумоподаватель. Он действует по принципу неравномерного усиления сигнала: слабый сигнал усиливает слабее, чем сильный, и в результате трески и шумы звучат тише, чем голос солиста. Часто шумоподавление производят избирательно: разлагают звук на несколько спектральных полос и в каждой полосе шумы глушат по-разному. Это, конечно, сложное дело. Но после нескольких таких повторных записей с применением шумоподавателей шум и треск почти совершенно исчезают. Заодно избавляются в значительной степени от неудачного хора, с которым пел Шаляпин. Вместо него записывается новый хор. Обе записи — старая (солиста) и новая (хора) — тщательно совмещаются на одной ленте, и запись возрождена.

«Хирургия» ленты способна и на большее. Применяя при записи специальные устройства — ревербераторы, добиваются эффекта, будто солист поет в большом и гулком зале. Ревербератором может служить любой долгозвучающий предмет (мембрана, пружина); звук, который он производит, накладывают на записываемый звук певца. Ревербератором может быть и специальный магнитофон, в котором склеенная в кольцо пленка при движении касается сразу нескольких головок: одна записывает, другая воспроизводит, третья частично стирает сделанную только что запись, ослабляя ее громкость. Каждый звук по многу раз повторяется, причем так, что любой следующий повтор тише предыдущего. Звук при этом обогащается отголосками. Можно регулировать скорость движения ленты так, что отголоски будут находиться ближе или дальше от

основного звука. Применение ревербератора хорошо имитирует гулкий зал. Сегодня можно по радио и телевидению нередко услышать записанные таким путем эстрадные песни; для их исполнения вполне достаточно даже небольшого голоса певца и невысоких акустических свойств помещения; остальное сделает ревербератор.

О записях, на которые накладываются разного рода естественные и искусственные шумы, можно было бы и не рассказывать: это — старый и общезвестный прием звукового кино, позволяющий добиваться совершенно потрясающих эффектов.

Но звуковое кино натолкнуло людей на идею рисованного звука. В самом деле, как выглядит звуковая дорожка на киноплёнке в старых фильмах? Это длинная строчка из зубчиков разной формы: скажем, для флейты зубчики напоминают пологие волны, для кларнета — прямоугольнички. А что, если такие звуковые дорожки рисовать нарочно, искусственно, и не только такие, но и другой формы, которая не отвечает никакому известному музыкальному инструменту? Тогда должны получаться новые, дотоле неведомые звучания. Эта идея еще в 20-х годах пришла в голову советскому инженеру Шолпо.

Но, как легко понять, здесь все было совсем не просто. Конечно, можно нарисовать какую угодно звуковую дорожку. Но как это прозвучит? Сначала предстояла долгая кропотливая работа по установлению связей между рисованной дорожкой и реальным ее звуковым выражением. На эту работу ушли многие годы, и только в конце 30-х годов Шолпо впервые смог создать оригинально звучащие произведения на основе рисованного звука. В последующие годы к этой работе привлекли электронную вычислительную машину (ЭВМ), которая управляет движением светового луча. Программу же ЭВМ задает, конечно, композитор. Так стало возможным сочинять необычную музыку, в которой звучат неслыханные тембры. Здесь даже нельзя говорить об отдельных инструментах — звучит сразу целый электронный «оркестр», единый инструмент, которому и названия не придумано. Композитор может тут же вносить необходимые коррективы, стирать неудачное, придумывать новое ради более сильной выразительности.

Что же, несмотря на свою сложность, работа композитора с подобным «синтезатором музыки» будет достиже-

нием несомненно большим и, можно сказать, лежащим в русле развития техники искусства. Ведь в самом деле технические достижения обогащают традиционные виды искусства и, более того, приводят к появлению новых его видов. Появление кино было бы немыслимым до открытия фотографии, а открытие голографии обещает произвести переворот в кинотехнике. В последние десятилетия в нашу жизнь широко вошло телевидение, в котором нашли воплощение не одно, а многие важнейшие физические открытия и технические изобретения нашего века — от электрона до люминесцирующих веществ.

Так и в музыке. Электронные музыкальные инструменты расширили палитру композиторов, но все же они остаются в традиционном русле развития музыкального исполнительства, — сохраняют солистов и оркестр. Синтезатор музыки, первые шаги в создании которого сделал Шолпо полвека назад, — это принципиально новое изобретение, это «человек-оркестр», играющий на инструменте, который не просто заменяет большой симфонический оркестр, не повторяет его, а звучит совершенно по-новому. И, быть может, со временем этому инструменту станут подвластны не только звуки, но и цвета, и запахи, и другие ощущения. Быть может, в будущем исполнять музыку будет сам композитор, управляя синтезатором звука не с помощью кнопок или клавиш, а биотоками своего мозга!

А тецерь мы на время покинем область слышимых звуков и заглянем в ее окрестности. На оси частот слева от нее, в области более низких частот, располагаются *инфразвуки*, справа, в области более высоких частот, — *ультразвуки* и *гиперзвуки*. Начнем с инфразвуков — области, изученной пока довольно слабо.

В то время как исследование высокочастотных звуков в значительной мере стимулировалось развитием техники (многочисленными применениями ультразвука в различных областях промышленности, транспорта и в военном деле), инфразвуки имеют в основном естественное происхождение и до недавних пор их изучение представляло чисто познавательный интерес. Но развитие геофизики в последние десятилетия способствовало расширению исследований инфразвуков.

Важнейшим источником инфразвуковых волн в воздухе являются турбулентные движения в атмосфере. Известно, что жидкости и газы могут совершать движения двух основных видов — ламинарное и турбулентное. При небольших скоростях и малой вязкости среда движется ламинарно, параллельными струйками. Но с повышением скорости и вязкости в среде возникают вихри. Давление в среде, постоянное или плавно меняющееся при ламинарном движении, при переходе к турбулентному движению начинает пульсировать. Поскольку возникающие вихри имеют неодинаковые размеры, нерегулярную частоту возникновения и изменяющуюся скорость движения, эти пульсации давления охватывают довольно широкий спектр частот. Они и воспринимаются как *вихревой звук*.

Нередко вихри возникают в жидкости или газе при обтекании ими каких-либо тел. Если, например, наблюдать за течением воды в реке возле моста, то можно заметить, что в воде, проходящей мимо опор моста, появляются регулярные цепочки вихрей — так называемая *вихревая дорожка* (рис. II на 2-й стр. обложки). Возникновение ее сопровождается и звуковыми волнами в воде. Частота такого вихревого звука определяется простой формулой

$$f = A \frac{u}{d},$$

где A — численный коэффициент (его значение близко к единице), u — скорость потока и d — характерный размер обтекаемого тела. Для тела в форме цилиндра $A \approx 0,2$. Если, например, цилиндр имеет диаметр 1 м, а скорость потока 10 м/с, то частота вихревого звука равна 2 Гц. Это инфразвуковые колебания.

Именно таково происхождение «голоса моря» — инфразвуковых волн, приходящих с моря к берегу и предупреждающих о приближении шторма. Впервые эти волны были исследованы советским ученым В. В. Шулейкиным. Когда на море возникает значительное волнение, ветер при обтекании волн срывается вихрями с их гребней. Скорость ветра при этом довольно большая, но значительный характерный размер (амплитуду) имеют и волны на воде. Допустим, что высота волн 3 м, а скорость ветра 30 м/с; тогда, используя приведенную выше формулу и условно считая, что $A \approx 0,2$, получаем частоту инфразвука приблизительно 2 Гц. Инфразвуковые волны распространяются со скоростью обычного звука. Но поскольку их частота очень низка, они испытывают лишь малое поглощение в воздухе. Двигаясь к берегу, они намного опережают морские волны и «докладывают» о шторме, начавшемся далеко в море, задолго до его подхода к берегу. Интересно, что даже если нет шторма, то сами колебания больших водных поверхностей, например в результате приливов и отливов, тоже являются источниками инфразвуков, только совсем уже низкочастотных, частота их в этом случае составляет только доли герца.

Наиболее распространенными источниками инфразвуков в технике являются разного рода компрессоры, воздуходувки, в том числе, конечно, и двигатели реактивных самолетов. В отличие от естественных источников, кото-

рые, как правило, возбуждают инфразвуки малой интенсивности, искусственные технические устройства могут создавать достаточно интенсивные инфразвуковые волны; это делает инфразвуковой «шум» от них нередко очень опасным для здоровья.

Еще одним видом инфразвуковых волн, но распространяющихся уже не столько в воздухе, сколько в толще земли, являются так называемые сейсмические волны. Это упругие волны в земной коре, возникающие при землетрясениях. Их скорость равна нескольким километрам в секунду, длина волны составляет несколько километров, так что их частоты нередко попадают в инфразвуковой диапазон. Мощные инфразвуковые волны и в воздухе, и в земле возникают при извержении вулканов, взрывах атомных бомб. Во всех этих случаях инфразвук имеет сплошной спектр; «музыкальных инфразвуков», а тем более чистых тонов в природе не найти.

Хотя инфразвуки непосредственно не воспринимаются ухом, все же наш организм довольно сильно реагирует на них. Специально поставленные опыты показали, что облучение людей сильным инфразвуком может вызвать потерю чувства равновесия; люди испытывали поташнивание, им казалось, что какая-то сила заставляет их вращаться, глазные яблоки при этом совершали непроизвольное вращение. Правда, все эти явления наблюдались при высокой интенсивности инфразвука — при «громкостях» выше 100 дБ.

Многих животных, однако, природа наделила значительно более высокой чувствительностью к инфразвуку. Например, известно, что мелкие морские блохи уходят на берег, а медузы отплывают подальше в море при приближении шторма, чтобы их не перемолола поднятая волнами галька. Домашние животные, например кошки и собаки, проявляют беспокойство перед землетрясениями, стремятся покинуть дома. Механизм восприятия инфразвука животными и человеком пока еще не вполне ясен.

В шестидесятых годах систематическими исследованиями искусственных инфразвуков занялся французский ученый Гавро. Начало этим исследованиям положило случайное наблюдение: лаборатория Гавро буквально сотрясалась от мощных вибраций, а микрофоны не регистрировали никаких звуков. Причиной оказался неисправный вентилятор в соседнем помещении, вращающийся с малой

скоростью! После этого Гавро с сотрудниками сконструировал несколько источников мощного инфразвука. Одним из них был гигантский свисток, издававший инфразвук интенсивностью более 150 дБ. После нескольких минут работы с ним исследователи испытывали сильнейшие боли, затем могли наступать и внутренние кровоизлияния. Другой генератор явился реальным воплощением легендарной библейской иерихонской трубы, звуки которой, по преданию, разрушали крепостные стены. При работе этого генератора даже не на полную мощность на потолке и стенах лаборатории появлялись трещины.

Инфразвукам соответствуют очень большие длины волн в воздухе (например, около 100 м при частоте 3 Гц). Поэтому неудивительно, что обычными микрофонами их не удастся зарегистрировать. Для этой цели приходится конструировать микрофоны метровых размеров. В последние годы исследования естественных и искусственных инфразвуков приобретают все больший размах.

Значительно продвинулись исследования сейсмических инфразвуковых волн. Сегодня они широко используются для изучения строения земного шара, предупреждения о землетрясениях, поиска полезных ископаемых, контроля за подземными ядерными взрывами, исследования грунтов под будущие сооружения и решения многих других научных и инженерных задач.

Сейсмические волны в земной коре могут быть продольными, поперечными и поверхностными (на границе земли и воздуха). Быстрее всех распространяются продольные волны; скорость поперечных волн приблизительно в 2 раза меньше; еще меньше скорость поверхностных волн. При этом интересно отметить, что скорость поверхностных сейсмических волн не зависит от их частоты.

Если бы земной шар имел однородное строение, то записи сейсмических волн, сделанные с помощью специальных приборов — *сейсмографов*, имели бы сравнительно простую форму, легко поддающуюся расшифровке. Однако Земля состоит из нескольких слоев с различной плотностью. По современным представлениям, земная кора имеет толщину всего лишь несколько десятков километров. Под ней находится слой толщиной около 1200 км и плотностью около 3,5 г/см³. Далее залегает промежуточный слой толщиной около 2900 км и плотностью 6,4 г/см³. Наконец,

вплоть до центра Земли располагается ядро плотностью $9,6 \text{ г/см}^3$. Границы между этими слоями достаточно резкие, так что на них упругие волны могут отражаться, преломляться и, более того, взаимопревращаться: например, продольная волна может целиком или частично превратиться в поперечную, и наоборот. Одна и та же волна может испытать несколько отражений, что служит причиной своеобразной реверберации. Именно такое происхождение имел «лунный звон», который длился долгое время после того, как американские космонавты, улетая с Луны, сбросили на ее поверхность посадочный отсек своего космического корабля.

Отражение, преломление и взаимопревращения сейсмических волн приводят к тому, что сейсмограммы имеют обычно очень сложный характер. Первыми к сейсмической станции приходят (или, как говорят геофизики, вступают) продольные волны (*P*-волны), имеющие наибольшую скорость распространения; за ними — поперечные (*S*-волны) и последними — наиболее медленные, но зато сильные (из-за сравнительно малого ослабления) поверхностные волны (*L*-волны). Если сейсмическая станция расположена близко к очагу землетрясения, то после *S*-волны может прийти и отраженная один раз от поверхности Земли *SS*-волна. На удаленной от эпицентра землетрясения станции можно зарегистрировать даже и дважды отраженные *SSS*- и *PPP*-волны, а также волны, отраженные и преломленные ядром земного шара.

Если «дрожание» Земли длится достаточно долго, то все эти волны могут наложиться друг на друга, и тогда сейсмограмма станет очень сложной. Для ее расшифровки нужен большой опыт сейсмолога. В последние годы для расшифровки сейсмограмм стали широко применять электронные вычислительные машины. Сопоставляя сейсмограммы, снятые на трех или более сейсмографах, находящихся на нескольких сеймостанциях, можно определить местоположение эпицентра (как географическое, так и по глубине под поверхностью Земли), точное время начала землетрясения и его силу. Многолетняя работа сейсмологов позволила установить распределение очагов землетрясений по земному шару (особенно богаты очагами землетрясений зоны, где и в нашу эпоху продолжается горообразовательная деятельность) и на этой основе вести чрезвычайно важную работу по прогнозированию землетрясе-

ний — предсказанию их эпицентров, силы и времени возникновения.

В последние десятилетия геофизики научились устраивать небольшие искусственные землетрясения, взрывая небольшие заряды неглубоко под землей. С помощью устанавливаемых неподалеку сейсмографов регистрируют отраженные взрывные волны от различных крупных неоднородностей, расположенных в земной коре на некоторой глубине под поверхностью, — рудных пород, нефтяных пластов и т. п. Регистрируются также и преломленные в Земле взрывные волны.

Поверхностные волны, возникающие при взрыве, и так называемые микросейсмические волны, образующиеся от мелких подвижек в земной коре, создают своеобразный сейсмический шум, из которого приходится выделять нужные колебания. Это делают в сущности так же, как выделяют музыкальные звуки из хаоса шумов: после приема сейсмических волн сигналы от слабых отраженных или преломленных волн усиливают с помощью электронных схем и одновременно производят их частотный анализ с помощью колебательных контуров — снимают спектрограммы. Эти контуры, или фильтры, выделяют узкие полосы инфразвуковых частот, например от 5 до 10 Гц, от 10 до 15 Гц, от 15 до 25 Гц и т. д.

Зная характер спектрограмм волн, отраженных различными породами, можно по спектрограммам, снятым с помощью многих сейсмографов, установленных на большой площади вокруг места взрыва, достаточно точно определить глубину залегания пород, мощность слоев и другие важные их характеристики. Это и составляет сущность сейсмической разведки полезных ископаемых.

Серьезные исследования ультразвука начались только в 30-х годах нашего столетия; стимулировались они тогда главным образом его возможным военным применением.

История зафиксировала имя первого изобретателя генератора ультразвуков: в 1883 г. англичанин Гальтон сконструировал ультразвуковой свисток. В нем газ, сжатый до высокого давления, выпускался с большой скоростью через узкое сопло и при этом ударялся об острую кромку металлического язычка, возбуждая высокочастотный (около 170 кГц) звук. Мощность свистка Гальтона была невелика, поэтому он не получил широкого применения.

Впоследствии была изобретена ультразвуковая сирена, которая по принципу действия не отличается от обычной сирены. На ее ротор насаживается диск с множеством отверстий по краям, против которых приходится такие же отверстия в статоре. Подаваемый в камеру сжатый воздух вырывается из нее в те короткие мгновения, когда совпадают отверстия в роторе и статоре. Легко сообразить, что частота возникающих при вращении ротора пульсаций давления вырывающегося воздуха (т. е. частота звука) равна просто произведению числа отверстий в роторе (или статоре) на частоту вращения ротора. Если в роторе будет 300 отверстий, а частота его вращения составит 1000 об/с, то частота ультразвука окажется равной 300 кГц.

Свисток и сирена представляют собой механические генераторы ультразвука. Хотя сирена намного мощнее свистка, работать с ней довольно неудобно: это крупная

установка, требующая специальных компрессоров для сжатия воздуха, мощного двигателя для вращения ротора и, наконец, специальных материалов для изготовления диска, способных выдержать большие нагрузки при быстром его вращении. Подлинный переворот в технике получения ультразвука произвели электромеханические генераторы, появившиеся в начале нашего века.

В них используются три физических явления — магнитострикция, пьезоэлектрический эффект и электрострикция. Явление магнитострикции состоит в том, что некоторые вещества, подвергнутые действию магнитного поля, изменяют свои размеры. Таким свойством обладают, например, многие ферромагнетики. Среди них железо, кобальт, никель и ряд сплавов. Пьезоэлектрический эффект состоит в том, что тела из некоторых веществ изменяют свои размеры под действием приложенного к ним электрического поля. К пьезоэлектрикам относятся кварц, турмалин, сегнетова соль и другие. Электрострикция в сущности является разновидностью пьезоэлектрического эффекта и характеризуется тем, что изменения размеров тел зависят не от первой, а от второй степени напряженности приложенного электрического поля; этот эффект обнаруживают кристаллы титаната бария и ряд других кристаллов аналогичного строения.

Для получения ультразвука с помощью магнитострикционного генератора стержень из соответствующего материала вставляют в катушку, через которую пропускают переменный электрический ток. Ток создает в катушке переменное магнитное поле, которое вызывает попеременные сжатия и растяжения стержня, передаваемые затем в воду или другую жидкую среду. Аналогично ведет себя и кварцевая пластинка, на которую действует переменное электрическое поле: ее размеры колеблются. Характер деформации кварцевой пластинки зависит от того, каким способом эта пластинка вырезана из кристалла. Кварцевый монокристалл имеет вид шестигульной призмы. Пластинки, вырезанные так, что их плоскость перпендикулярна оси, соединяющей противоположные вершины призмы, называются пластинками Х-среза. Если же их плоскость перпендикулярна оси, соединяющей середины противоположащих граней призмы, то это пластинки Y-среза. Первые из них при подаче напряжения на электроды испытывают деформации растяжения и сжатия, колеблются

по толщине и возбуждают продольные волны. Вторые при тех же условиях испытывают деформацию сдвига и возбуждают поперечные волны.

Очень важна обратимость этих эффектов. Например, проходящая ультразвуковая волна может привести в колебания магнитострикционный стержень или кварцевую пластинку. Это вызовет возникновение соответственно магнитного или электрического поля, которое можно регистрировать приборами. Этим пользуются для приема ультразвука. Излучатели и приемники, основанные на указанных эффектах, имеют сравнительно малые размеры. С помощью концентраторов звуковой мощности (например, акустических линз) можно достигать таких плотностей мощности, как, скажем, 10 кВт/см^2 (напомним, что самые громкие звуки, которые еще переносит человеческое ухо, соответствуют плотности мощности около 1 Вт/см^2).

Кварцевые излучатели имеют еще то важное преимущество, что они излучают «музыкальный» ультразвук, т. е. колебания с очень узкой полосой частот. Для того чтобы амплитуда колебаний пластинки была максимальной, необходимо, чтобы частота поля совпадала с собственной частотой пластин (тогда пластинка будет работать в режиме резонанса). А собственная частота тем выше, чем тоньше пластинка; при толщине пластинки X-среза 1 мм ее резонансная частота составляет около 3 МГц. Для получения еще более высоких частот можно было бы использовать еще более тонкие пластинки. Но очень тонкие пластинки становятся слишком хрупкими и не выдерживают механических нагрузок, возникающих при их колебаниях. Поэтому для получения очень высокочастотных ультразвуков пластинки заставляют работать на гармониках основной частоты. Пластинки удается заставить «звучать» даже на 1000-й гармонике!

Первое техническое применение ультразвука относится еще ко времени первой мировой войны, когда выдающийся французский физик П. Ланжевэн использовал ультразвуковые волны для обнаружения вражеских подводных лодок. И сегодня это остается важнейшим военным применением ультразвука. Работа Ланжевэна положила начало целой области техники — подводной звуколокации (или гидролокации), в которой воедино слились передовые достижения акустики и электроники. Подводная зву-

колокация имеет и обширные мирные применения — такие, как исследование рельефа морского дна, обнаружение косяков рыбы, — особенно важные в наши дни, когда человечество вплотную приступило к освоению морских богатств.

Принцип звуколокации не отличается от принципа радиолокации: посылают короткий звуковой импульс, затем принимают отраженный импульс, и по времени запаздывания приема отраженного импульса определяют расстояние до объекта, от которого отразился импульс. Принцип действительно прост, но реализация его на практике потребовала немалых усилий. Прежде всего, отраженный сигнал всегда приходит вместе с сигналами различных помех. Такими помехами для подводной звуколокации являются сигналы, отраженные от морского дна, и шумы моря. Это шумы от судовых двигателей, морских волн, звуки, издаваемые морскими животными и рыбой (выражение «пем как рыба» не совсем точно: рыбы в действительности испускают ультразвуки). Эти шумы являются основной помехой на частотах до 100 кГц. На более высоких частотах главной помехой становится тепловой шум, вызываемый хаотическими колебаниями давления в неравномерно нагретых и постоянно перемешивающихся небольших объемах воды. Источником сильных шумов является также отражение ультразвукового импульса поверхностями раздела вода-воздух и вода-дно, участками воды с разной плотностью и т. п.

Далее, звуколокация по сравнению с радиолокацией сложнее еще в том отношении, что скорость звука сильно зависит от температуры воды, ее давления и солености. Поэтому звук в воде распространяется в общем случае вовсе не прямолинейно; происходит плавное искривление звуковых лучей — *рефракция*. В океане можно выделить три характерных слоя: верхний слой, в котором в результате интенсивного перемешивания воды температура практически одинакова на разной глубине; термоклинный слой, в котором температура резко падает почти до 0°C; еще глубже расположен слой, в котором температура постоянна. Поскольку с ростом давления скорость звука растет (примерно на 2 м/с на каждые 100 м глубины), а с понижением температуры она уменьшается (примерно на 3 м/с на 1°C), то возле термоклинного слоя ход скорости звука оказывается обратным тому, какой наблюдается в

верхнем слое. И лишь в нижележащем слое он снова восстанавливается. Из рисунка 9 видно, что в результате загигания звуковых лучей образуются «зоны молчания», в которых нельзя принимать посланные с корабля сигналы. Подводные лодки могут прятаться в эту тень и избежать обнаружения. В ясную погоду летом при слабом ветре термоклинный слой может находиться всего лишь на глубине 1 м от поверхности моря, так что «зона молчания» может оказаться на совсем небольшой глубине.

Чтобы заглянуть в зону акустической тени, надо поместить излучатель ультразвука в термоклинный слой и направить звук вдоль него. Так как скорость звуковых волн окажется наименьшей на «дне» этого слоя, а выше и ниже она будет более высокой, то из-за явления рефракции волны будут все время возвращаться на ту глубину, на которой они были излучены (в Атлантическом океане на глубину около 1300 м). Иными словами, в море существует как бы звуковой канал, по которому звук, почти не подвергаясь рассеянию, может распространяться на очень большие расстояния — до 20 000 км, т. е. звук огибает половину земного шара!

Волны каких частот наиболее пригодны для звукокации? Какую следует применить длительность импульсов? Какими пучками звуковых лучей — широкими или узкими — предпочтительнее пользоваться? Очевидно, целесообразно создавать достаточно короткие импульсы, чтобы отраженный импульс при его приеме и записи не наложился на отметку посланного импульса. Так как скорость звука в воде порядка 1500 м/с, то отметка принятого сигнала, отраженного, например, рыбой на глубине 10 м, не наложится на отметку посланного сигнала, если про-



Рис. 9

должительность импульса будет меньше примерно 0,01 с. Но в пределах самого импульса при этом не удастся ничего различить; если, скажем, на глубине от 10 до 20 м находятся 100 рыб, то все они «солятся» в одну.

Если рыба имеет размер, например, 10 см, то импульс придется укоротить еще в 100 раз. Вместе с тем при этом потребуются существенно уменьшить и угловую расходимость звукового пучка. Например, если мы хотим получить угловую расходимость в 1° , то для этого понадобится излучатель, поперечник которого в 60 раз больше длины волны излучаемого звука. При частоте 30 кГц размеры излучателя, как легко подсчитать, составят около 1,5 м, т. е. окажутся чрезмерно большими. Оба эти затруднения легко преодолеть, существенно увеличив частоту ультразвука. Но поглощение звука возрастает пропорционально квадрату его частоты, и если повысить частоту, например, в 10 раз, то поглощение увеличится в 100 раз и во столько же уменьшится «дальнобойность» звуколокатора! Ясно, что режим, в котором в действительности работает звуколокатор (называемый сокращенно сонаром по аналогии с радаром), должен быть компромиссным.

Кроме того, в каждом конкретном случае учитывается назначение гидролокатора, т. е. что именно подлежит обнаружению — отдельные рыбы или целые их косяки, подводные лодки или затонувшие корабли. Некоторые типы гидролокаторов служат для записи рельефа морского дна и определения его строения. Успехи в этом деле огромны: современные сонары позволяют обнаруживать отдельных рыб на больших глубинах и даже определять их вид, позволяют получать на телевизионных экранах изображения сразу больших участков морского дна.

Разновидностью звуколокации является ультразвуковая *интроскопия* («внутривидение»). В то время как с помощью подводной звуколокации обнаруживают посторонние объекты в прозрачной воде, звукоинтроскопия позволяет «видеть» посторонние объекты в непрозрачных твердых телах (например, дефекты в металлических отливках или опухоли в человеческом организме). Ультразвуковая интроскопия часто оказывается эффективной там, где рентгеновские лучи беспомощны (когда основной материал и дефекты поглощают рентгеновские лучи примерно одинаково).

Сегодня известны многочисленные конструкции ульт-

тразвуковых интроскопов самого разнообразного назначения. С помощью одних приборов определяется лишь наличие дефектов; с помощью других — их точное расположение и форма; третьи выступают в роли толщиномеров и позволяют определять не только толщину различных листов или покрытий, но и, например, упитанность животных (толщину подкожного жирового слоя); четвертые служат в качестве расходомеров — по изменению частоты звука судят о скорости движения жидкостей в трубопроводах и даже крови в крупных сосудах организма.

Для обнаружения дефектов методом интроскопии можно использовать непрерывно генерируемые звуковые волны. Однако при этом в образце в результате отражений от его стенок и от различных неоднородностей возникают сильные стоячие волны. Эти волны могут полностью заглушить ценные сигналы, несущие информацию о дефектах в образце.

Чтобы избежать этого, можно, собирая с помощью небольшой звуковой линзы ультразвук в топкий пучок, обегать, сканировать этим пучком образец. Приемником отраженного сигнала при этом может служить кварцевая пластина. На «освещенной» ультразвуком ее стороне в результате пьезоэлектрического эффекта возникают электрические заряды, образующие потенциальный рельеф, который в сущности ничем не отличается от того, что возникает на пластине фотоэлемента в передающей телевизионной трубке. Дальнейший процесс «считывания» этого потенциального рельефа электронным пучком и передачи этой информации на экран приемной телевизионной трубки практически совпадает с тем, что используется в телевидении. В результате мы приходим к телевизионному ультразвуковому микроскопу, позволяющему получить увеличенные изображения дефектов. Впервые такой микроскоп был разработан советским инженером С. Я. Соколовым еще в конце 20-х годов.

В обычном варианте звуколокации и звукоинтроскопии получаются, конечно, двумерные изображения предметов (вернее, изображения только тех участков объектов, отраженные волны от которых могут попасть в приемник звука). Для того чтобы получить трехмерные изображения, следовало бы поворачивать предмет относительно звукового пучка либо «обходить» пучком предмет с нескольких сторон. Но это можно сделать не всегда; напри-

мер, если объект находится на большом расстоянии, «обойти» вокруг него вообще невозможно.

Между тем, трехмерное изображение всегда лучше двумерного, поскольку содержит намного больше информации о предмете.

Некоторую помощь в этом оказывает стереофонический эффект, возникающий благодаря тому, что в два рассеянных приемника приходят от одного и того же источника звука волны разной интенсивности и разной фазы. Это и создает эффект объемности восприятия.

Преодолеть барьер двумерности удалось с помощью *голографии*, открытой английским ученым Д. Габором в 1947 г. Практическое ее осуществление началось в 60-х годах благодаря созданию лазеров. А спустя еще несколько лет возникла и акустическая голография.

Голография представляет собой остроумный метод записи на носителе информации (фотопластинке, магнитной ленте или каком-либо ином) одновременно и интенсивности, и фазы рассеянных предметами волн. Запись интенсивностей при этом остается той же, что и в обычной фотографии, а для записи распределения фазы используется явление интерференции. При сложении двух волн с одинаковой фазой происходит их взаимное усиление, а при сложении двух волн с противоположными фазами — взаимное ослабление. Чередование линий одинаковой разности фаз двух волн и есть интерференционная картина. В случае световых волн отпечаток интерференционной картины может быть получен на фотопластинке. Это — голограмма. Каждая точка голограммы содержит сведения об интенсивностях и разностях фаз в том месте, где волны встретились.

В образовании интерференционной картины, регистрируемой на голограмме, принимают участие две волны — предметная и опорная. Предметная волна — это волна, которой облучаются те предметы, информацию о которых мы желаем получить. Эта волна отражается исследуемыми предметами и именно рассеянные предметами волны складываются с другой, специально создаваемой опорной волной.

В случае оптической голографии луч лазера расщепляется на две части: одна освещает предмет и благодаря рассеянию на нем создает отраженную волну, другая, опорная, интерферирует с отраженной волной. На голо-

грамме, конечно, не видно ничего похожего на привычное фотографическое изображение предметов, на ней видны лишь интерференционные полосы. Но если полученную голограмму (проявленный снимок) подставить под луч лазера, использовавшийся для ее получения, то перед глазами возникнет захватывающая объемная картина предмета. Поворачивая голограмму, можно увидеть даже задние части предмета, словно мы зашли за предмет!

Зачем нужен именно луч лазера? Почему для этого не годится обычный свет? Да потому, что на голограмме должны быть зафиксированы постоянные во времени разности фаз, определяемые формой наблюдаемых предметов. Если же будет меняться во времени фаза самой волны, то соотношения смажутся и получится некая усредненная картина. В отличие от обычных источников света, в которых атомы излучают вразнобой, лазер испускает свет на одной длине волны и с постоянной фазой — когерентную волну.

В акустике, в отличие от оптики, вопрос о когерентности волны решается легко. Кварцевая пластинка, возбуждаемая на собственной частоте хорошо стабилизированным источником переменного электрического напряжения, излучает ультразвуковую волну, отличающуюся высокой монохроматичностью и когерентностью. С помощью акустической призмы эта волна расщепляется на два пучка — опорный и посылаемый на объект. Затем происходит интерференция опорной волны и волны, отраженной объектом. Образуется интерференционная картина.

Но на чем она может быть зафиксирована? Фотопластинка к звуковым волнам практически нечувствительна. В первых опытах по акустической голографии оба пучка сводили на поверхности жидкости, на которой возникала интерференционная рябь. Эту рябь освещали лазерным лучом, и отраженный свет регистрировали на фотопластинке (рис. 10). Однако качество изображений при этом получалось плохим. На голограмму «лезли» реверберационные эффекты.

В последующем качество изображений удалось улучшить, используя вместо непрерывного излучения короткие ультразвуковые импульсы и принимая их, например, на кварцевые пластины. При этом луч сканировал в пространстве примерно так, как это делается в ультразвуковом

Источник когерентного
света (лазер)

Восстановленное трехмерное
изображение

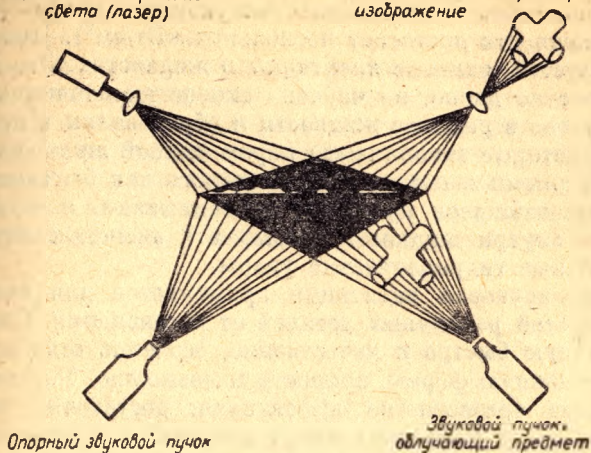


Рис. 10

микроскопе. Но и это изображение еще нужно было делать видимым, что тоже представляло непростую задачу.

Наконец, был предложен еще такой метод: сканирующий приемник ультразвука регистрировал распределение ультразвукового поля. Электрический сигнал с выхода этого приемника поступал в цепь питания маломощного источника света и модулировал интенсивность его свечения. Вместо создания опорной волны снималось напряжение непосредственно с генератора ультразвука. Это напряжение подавалось на тот же источник света. Образовавшийся комбинированный (как бы «интерференционный») сигнал записывался уже на фотопластинку, которая двигалась относительно источника света синхронно со сканирующим приемником ультразвука. На 3-й стр. обложки (рис. III и IV) показаны голограмма и восстановленное изображение. Полученные изображения еще не были достаточно совершенными. Кроме того, будучи обычными фотографиями с действительных трехмерных изображений, они не демонстрируют объемных эффектов. Но в последние годы ультразвуковая голография быстро развивается, и недалеко то время, когда она станет технически совершенной областью интроскопии.

Обширная область технологических процессов связана с применением мощных ультразвуковых пучков (плотность мощности достигает нескольких кВт/см²). При этом используется явление *кавитации* в жидкостях. Это явление известно давно, но изучено еще недостаточно полно. Состоит оно в разрыве жидкости и образовании в ней полостей, которые заполняются паром данной жидкости или растворенными в ней газами; жидкость как бы закипает. Но образовавшиеся пузырьки не всплывают, а «схлопываются» внутри жидкости, вызывая в момент схлопывания сильные гидравлические удары.

Ультразвуковая кавитация применяется для очистки поверхностей различных деталей от загрязнений. Сделать это вручную быстро и качественно, особенно если детали имеют сложную форму, попросту невозможно. Ультразвук же чистит чрезвычайно эффективно: достаточно поместить деталь на несколько минут в жидкость, включить генератор, и кавитационные ударные волны быстро отобьют частички загрязнений от поверхности детали, не повредив саму ее (если правильно подобрать режим).

Столь же широко ультразвук используется для приготовления эмульсий из несмешивающихся жидкостей. Эмульсии при этом получаются чрезвычайно мелкозернистыми и однородными. Сегодня таким методом изготавливают эмульсионные краски, фотоэмульсии, различные пищевые продукты, косметические средства и многое другое.

Хорошо обезжиривая поверхности, ультразвук часто используется вместо канифоли при пайке металлов. Известно, что алюминий и некоторые другие металлы трудно паять из-за того, что на их поверхности очень быстро образуется довольно прочная окисная пленка. Ультразвук очень эффективно разрушает эту пленку и сегодня широко используется в радиотехнической промышленности для пайки алюминия. Пайка получается прочной и чистой.

Повысив мощность ультразвукового пучка, можно его использовать и для холодной сварки материалов (особенно в тех случаях, когда они свариваются при высокой температуре). Механизм действия ультразвука в этом случае еще не вполне ясен. Вероятно, «раскачивая» структуру материала, он способствует более легкому взаимному проникновению атомов свариваемых тел, а также заставляет «течь» контактную поверхность. Это последнее очень существенно, поскольку при обычной сварке на поверхно-

сти часто образуются хрупкие переходные зоны, делающие сварной контакт непрочным.

Ультразвук способствует более быстрому протеканию различных химических реакций. Это можно объяснить так. Прежде всего ультразвук разбивает реагирующие жидкости на мельчайшие пузырьки, из-за чего площадь поверхностей, на которых идет реакция, во много раз возрастает. Кроме того, ультразвук способен расщеплять отдельные молекулы на химически активные радикалы, которые, естественно, очень быстро вступают в реакцию.

ЗВУК И ЭЛЕКТРОНЫ

До сих пор мы рассказывали о возникновении и распространении звука и о вызываемых им явлениях главным образом в воздухе и в воде. Но существует еще один обширный класс сред, в которых возбуждается и распространяется звук, — это твердые тела. Звук в твердых телах вызывает очень интересные явления, изучение которых привело к рождению новой и в какой-то мере неожиданной области науки — квантовой акустики. Впрочем, если говорить точнее, акустика и кванты оказались связанными еще в начале нашего века, т. е. вскоре после открытия квантов.

Это обусловлено особым характером звуковых волн в твердых телах. В отличие от газов, в которых атомы или молекулы лишь очень слабо связаны и движутся практически независимо друг от друга, в кристаллах атомы образуют единый связанный коллектив. Атомы в кристаллической решетке при ее нагревании колеблются около своих положений равновесия, но эти колебания нельзя считать независимыми друг от друга. Атомы взаимосвязаны в решетке кристалла действующими между ними электрическими силами. При этом они напоминают шарики, соединенные пружинками. Если собрать из таких шариков сеть, то достаточно толкнуть хотя бы один шарик, как постепенно затрясется вся конструкция. Иначе говоря, в решетке из шариков, связанных пружинками, возникнут упругие волны.

Какие длины волн возможны в кристалле? Самая большая длина волны, очевидно, определяется размерами всего кристалла. Как на зажатой с двух концов струне обра-

зуется полуволна с двумя узлами на ее концах и пучностью посередине, так и в кристалле возникает полуволна с двумя узлами на противоположных его гранях. Другими словами,

$$\lambda_{\text{макс}} = 2D,$$

где D — наибольший из размеров кристалла. Соответственно, наименьшая длина волны в кристалле определяется кратчайшим расстоянием между атомами в нем (будем для простоты считать, что кристалл построен из атомов одного сорта):

$$\lambda_{\text{мин}} = 2d,$$

где d — период кристаллической решетки.

Скорость распространения звуковых волн в твердых телах составляет величину порядка 10^5 см/с. Если кристалл имеет размеры порядка сантиметров, то по формуле, связывающей длину волны λ и частоты ν , мы найдем наименьшую частоту $\nu_{\text{мин}}$, которая по порядку величины составляет 10^5 Гц, т. е. находится в области ультразвука. Расстояния между ближайшими атомами в решетке кристалла $\sim 10^{-8}$ см. Следовательно, наибольшая частота звуковых волн будет порядка 10^{13} Гц. Это область высокочастотных гиперзвуков.

Рассматривая колебания решетки из шариков с пружинками, легко убедиться в том, что общая картина колебаний очень сложна: шарики колеблются по всевозможным направлениям с самыми различными частотами. В настоящей кристаллической решетке, построенной из многих триллионов атомов и к тому же трехмерной, картина колебаний оказывается еще намного сложнее. Спектр частот акустических волн охватывает всю область от наименьшей до наибольшей частоты. В нем присутствуют волны практически со всеми частотами в этой области.

Используя аналогию между звуковыми и световыми волнами и то важнейшее обстоятельство, что со световыми волнами связаны кванты электромагнитной энергии, советский физик Я. И. Френкель предложил ввести кванты и для акустической энергии. Он назвал их *фононами* по аналогии с фотонами (от греческого слова «фоне» — звук, от которого произошли термины фонема, фонограф и другие). Но следует помнить, что дальше чисто внешней аналогии между фононами и фотонами дело не идет. Фотон — настоящая, самостоятельная частица, тогда как фо-

нон — это удобное представление для упругих волн, в которых участвуют другие настоящие частицы — атомы или молекулы, из которых состоит кристалл. Поэтому фонон называют квазичастицей («как бы частицей»), а возбуждение и прекращение колебаний атомов рассматривают как испускание и поглощение фононов.

Таким образом, можно себе представить, что при температуре, отличной от абсолютного нуля, когда атомы совершают колебания, в кристалле существует фононный газ. При достаточно высокой температуре этот газ довольно плотен. Пользуясь представлением о фононах, можно объяснить и электрическое сопротивление твердых тел: движущийся в кристалле поток электронов испытывает рассеивание вследствие столкновений электронов с фононами.

Но электроны, движущиеся в кристалле, взаимодействуют с фононами не так, как с атомами или молекулами. Электроны взаимодействуют с фононами по особым, квантовым законам. Эти законы наиболее отчетливо проявляются лишь при достаточно низких температурах, когда фононный газ становится достаточно разреженным и в спектре фононов присутствуют уже немногие частоты, т. е. остаются немногочисленные кванты с различной звуковой энергией.

Одно из таких явлений, обнаруживающееся при очень низких температурах, сегодня хорошо известно — это *сверхпроводимость*. Понятно, что по мере понижения температуры плотность фононного газа уменьшается, пока, наконец, при абсолютном нуле фононы вовсе не исчезают. С ними исчезает и рассеяние электронов на фононах и тепловая часть электрического сопротивления обращается в нуль. (Остается лишь нетепловая часть, связанная с рассеянием электронов на нарушениях правильного расположения атомов в кристалле — дефектах решетки. Эти дефекты ведут себя по отношению к электронам так же, как шероховатости и царапины на прозрачном стекле ведут себя по отношению к свету.)

Но у некоторых металлов электрическое сопротивление внезапно обращается в нуль при температурах, которые на несколько кельвинов выше абсолютного нуля, т. е. когда в кристаллах еще заведомо есть фононы. Это явление и получило название сверхпроводимости. Оно оставалось загадкой для ученых целых полвека, и решение ее

пришло лишь тогда, когда было выяснено, как рассчитывать взаимодействие фононов и электронов в кристаллах.

При этом обнаружилось замечательное обстоятельство. Мы привыкли считать, что электроны как одноименно заряженные частицы всегда только отталкиваются друг от друга. Однако в квантовой механике известен особый вид взаимодействия частиц, называемый обменным взаимодействием. Например, обмениваясь мезонами, протоны и нейтроны в ядрах атомов взаимно притягиваются. Два атома водорода, обмениваясь своими электронами, образуют довольно прочную молекулу водорода (точно таким же путем образуются из атомов молекулы азота, кислорода и вообще все молекулы, состоящие из одинаковых атомов). Оказалось, что подобное взаимодействие осуществляется между электронами в кристалле: обмениваясь фононами, электроны, являющиеся носителями электрического тока, в кристаллах объединяются в электронные пары (куперовские пары, по имени открывшего их американского физика Л. Купера).

Электронные пары возникают далеко не в любых кристаллических решетках, иначе сверхпроводимость была бы не редким, а, напротив, всеобщим явлением. Для возможности образования электронных пар решетка кристалла должна иметь особое строение и состоять из определенных атомов. Электронные пары чрезвычайно непрочны: уже при температуре в несколько кельвинов они распадаются. Но самое главное состоит в том, что эти пары, двигаясь по кристаллу под действием электрического поля как одно целое, совершенно «не замечают» фононного газа, словно фононов и вовсе нет. Разумеется, электрическое сопротивление при этом обращается в нуль. Но стоит лишь немного повысить температуру, как из-за увеличения энергии фононного газа электронные пары разрушаются, и электрическое сопротивление металла мгновенно восстанавливается.

В явлении сверхпроводимости фононы до определенной температуры как бы помогают электронам. Известно и явление, в котором электроны как бы помогают фононам. Это явление, называемое *акустоэлектрическим эффектом*, состоит в усилении звука при его распространении в твердом теле. Сущность акустоэлектрического эффекта сложна, и о нем (как и о сверхпроводимости) мы можем рассказать только в самых общих словах,

Вспомним пьезоэлектрический эффект. Приложение к кристаллам кварца электрического напряжения вызывает в них упругую звуковую волну, и, наоборот, приход к ним звуковой волны вызывает появление на гранях кристалла электрического напряжения. Но обычные пьезоэлектрические вещества, как правило, являются диэлектриками, т. е. электроны в решетке таких кристаллов не движутся поступательно, не переносят электрического тока.

Недавно были найдены особые вещества, которые наряду с пьезоэлектрическими свойствами обладают еще и электропроводностью. Если подать на такие кристаллы электрическое напряжение и одновременно направить в кристалл звуковую волну, то электроны, отбирая энергию у электрического поля и двигаясь в кристалле вместе со звуковой волной, будут передавать ей эту энергию. В результате звуковая волна усилится. Усиление это можно сделать весьма значительным — до сотни децибел на сантиметр пробега волны! Особенно сильным этот эффект оказывается на очень высоких частотах, порядка 10^9 Гц и более, т. е. уже в области гиперзвуковых волн.

Акустоэлектрический эффект можно использовать не только для получения мощных гиперзвуковых волн, изучение которых интересно само по себе. Его можно «обратить». Если подать на маленький кристалл (микротелефон) слабый высокочастотный электрический сигнал, можно получить усиленный гиперзвук, который затем с помощью «микромикрофона» можно снова превратить в электрический сигнал, но уже намного более сильный.

На основе этого эффекта сегодня с помощью маленьких кристаллов создают очень важные электронные приборы — так называемые *гиперзвуковые линии задержки*. В электронике часто очень важно задержать электромагнитный сигнал в приемнике, чтобы затем сложить его с пришедшими позже сигналами. Но долго задерживать электромагнитный сигнал в приемнике трудно, так как он распространяется со скоростью света. А если заставить его двигаться со скоростью звука, в сотню тысяч раз меньшей? Это и можно осуществить, преобразуя вышеописанным способом радиосигнал в звуковую волну, а затем обратно звуковую волну в радиосигнал; при этом сигнал еще в усиливается.

БОРЬБА С ШУМОМ

В последние годы загрязнение окружающей среды начинает принимать угрожающие масштабы. Загрязняют среду и шумы.

Подавляющее большинство искусственных звуков и практически все естественные звуки являются шумами. За многие века своего существования человек приспособился к естественным шумам, научился извлекать из шумов природы жизненно важную информацию. Свист ветра, дальний гром предупреждали его о непогоде, о необходимости искать убежище, рев зверей сигнализировал об опасности или о том, куда надо направить охоту. Можно жить без музыки, но нельзя жить без шума. Не случайно у человека, помещенного в сурдокамеру, которая имитирует условия космического полета, начинаются слуховые галлюцинации. Мозг не в состоянии долго вынести абсолютную тишину и сам начинает творить шумы!

Но все хорошо в определенных пределах. Негромкий однообразный шум даже навевает покой, вызывает сонливость, таким шумом лечат, например, бессоницу. Слишком же громкий шум, напротив, способен вызывать не только неприятные ощущения, но и психические и даже физические расстройства. Между тем развитию техники сопутствует появление источников все более интенсивного шума. Его создают современные станки, транспортные средства и другие установки, в которых используются высокие скорости вращения, поступательного движения, большие скорости сгорания топлива и истечения продуктов сгорания. Во многих случаях источником шумов является турбулентное движение воздуха и других газов.

Возрастание скорости газовых потоков имеет две неприятные особенности. Во-первых, средняя частота шума пропорциональна скорости потока. С ее увеличением высота шума возрастает. А наше ухо более чувствительно к высокочастотному, нежели к низкочастотному звуку (шум от электрической пилы громкостью, например, 80 дБ воспринимается намного более болезненно, чем звук гудка громкостью 120 дБ).

Во-вторых, интенсивность шума возрастает пропорционально восьмой степени скорости потока (при дозвуковых скоростях течения). Если, например, скорость потока возрастает в 10 раз, то интенсивность звука увеличивается в 100 миллионов раз, а его громкость — на 80 дБ. Сравним тихий, почти неуловимый звук шипения выходящего из баллона газа с оглушительно громким ревом реактивного двигателя или газового фонтана.

Создающие шум технические установки можно несколько условно разделить на два вида: одни создают шум преимущественно в закрытых помещениях (станки, механизмы, двигатели), другие — на открытом воздухе (автомобильный и авиационный транспорт). В закрытых помещениях применяются индивидуальные и групповые средства защиты от шума. К индивидуальным средствам относятся, например, звукопоглощающие ушные вкладыши «беруши» («берегите уши»), а к групповым — заключение источника шумов в звукопоглощающую оболочку.

В последние годы при проектировании заводских цехов начинают все шире использовать принципы архитектурной акустики. Конечно, превращение цеха в заглушенную камеру существенно удорожает его строительство, но все же, если учесть, в какой степени шум влияет на производительность труда, не говоря уже о здоровье, то эта мера в ряде случаев вполне оправдана. Хотя и известно, что человек довольно быстро привыкает к профессиональному шуму и перестает его замечать, все же на этот счет не надо обманываться: спустя годы кажущаяся привычка к шуму оборачивается профессиональной глухотой.

В последние десятилетия все более угрожающий здоровью людей характер приобретает шум от автомобильного и авиационного транспорта. Борьба с этим шумом представляет трудную проблему. Все современные автомобили оборудованы глушителями (исключение составляют только гоночные машины). Глушители работают на принципе

уменьшения скорости потока выхлопных газов. Этим снижается средняя частота и громкость шума. Они довольно эффективны, хотя вместе с тем и снижают полезную мощность двигателя, нередко более чем на 10%. И все же, кроме выхлопных газов, сильными источниками шума являются двигатель (особенно работающий в форсированном режиме, когда автомобиль трогается с места и разгоняется) и трение колес о дорогу. Естественно, эти шумы усиливаются с увеличением скорости или темпа разгона автомобиля.

В большей степени проблему уменьшения этих шумов решит переход к паровым и электрическим автомобилям. Шум троллейбуса намного меньше шума автобуса, а выхлоп парового автомобиля составят не очень горячие пары воды с небольшой скоростью истечения. Пока такие автомобили еще серийно не выпускаются, в настоящее время пытаются хотя бы частично уменьшить шумы, переходя, например, на газотурбинные, или роторные, двигатели. Той же цели служит и создание более гладких дорожных покрытий.

Авиационные двигатели ставят другие проблемы. Прежде всего надо заметить, что самолет в крейсерском полете идет на такой высоте, что его шум является помехой, в сущности, только для его экипажа и пассажиров. Поэтому здесь можно многого добиться, применяя эффективные звукопоглощающие материалы. Главный же источник шума на самолете — выхлопные газы. Но этот шум команде и пассажирам почти не слышен, а для сверхзвуковых самолетов он вообще не составляет проблемы.

Современный турбореактивный самолет очень сильно шумит именно на взлете и при посадке. Двигатель его состоит из трех основных частей — компрессора, камеры сгорания и турбины. (Компрессор сжимает набегающий на самолет поток воздуха и направляет его в камеру сгорания, где он смешивается с топливом, после чего образовавшиеся при сгорании топлива газы попадают в турбину, а пройдя ее — в сопло, где и создают силу тяги самолета.) Первым по ходу воздушного потока шумит компрессор: именно этот шум мы слышим, находясь перед самолетом, идущим на посадку. Далее, — шум турбины; он значительно сильнее шума компрессора, так как скорость горячих газов в турбине много выше скорости воздуха в компрессоре. Наконец, наиболее сильный шум создают вырываю-

щиеся из сопла раскаленные выхлопные газы. Шумы турбины и газовой струи направлены в основном назад, и они создают высокочастотный шум взлетающего самолета.

Для уменьшения шума реактивных двигателей применяются глушители. Простейший глушитель представляет собой просто гофрированное сопло. Но остается проблема, которая для самолета даже еще более остра, чем для автомобиля: глушитель сильно снижает мощность двигателя. Конструкторы поэтому ищут новых путей уменьшения шума, которые бы «не съедали» мощность двигателей. В эти специальные вопросы мы здесь входить не будем.

Но сверхзвуковые самолеты являются источником еще одного вида шума, о котором мы расскажем немного подробнее. Это — *ударные волны*. Вообще ударные волны очень широко распространены в природе. Когда корабль движется по воде, даже с небольшой скоростью, от его носа расходятся волны, названные несколько смешно *усами Маха* (в честь австрийского физика Э. Маха, первым разработавшего их теорию). Ударные волны возникают и при щелканье пастушеского кнута, и при полете пули и снарядов, и при взрывах бомб.

Ударные волны образуются при движении тел в среде со скоростью, превышающей *фазовую скорость* распространения волн в ней. Напомним, что фазовая скорость — это скорость распространения какого-либо «состояния» волны, например горба волны. В среде, где эта скорость не зависит от частоты волны (как говорят физики, в среде без дисперсии), она совпадает со скоростью переноса энергии в волне, скоростью движения всего «цуга» волн, *групповой скоростью*. В среде же с дисперсией отдельные гармонические составляющие движутся с разными скоростями, и форма волны постепенно меняется.

Усы Маха свидетельствуют о том, что корабль движется со скоростью, большей фазовой скорости поверхностных волн на воде. В точности такие же усы можно наблюдать, если с помощью специального метода сфотографировать летящую пулю (рис. V на 3-й стр. обложки). Но в этом случае ударная волна является объемной, трехмерной. Она имеет форму копуса, острие которого находится на передней кромке пули или самолета (рис. 11). Впрочем, самолет создает не одну, а три ударных волны: от носа крыльев и стабилизатора (последняя из них много слабее первых двух и практически неощутима).

Интенсивность ударных волн, создаваемых самолетом, велика. Даже при большой высоте полета скачки давления воздуха у земли достигают нескольких кг/м^2 . Ослабить ударные волны довольно трудно: они мало зависят от выбора конструктивных форм самолета. Заметное уменьшение интенсивности ударной волны должно наблюдаться в области гиперзвуковых скоростей полета.

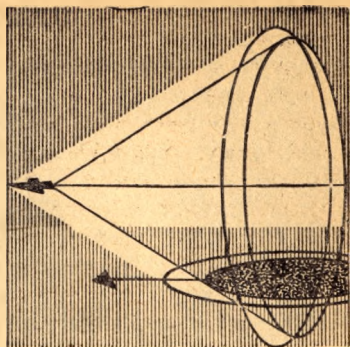


Рис. 11

Но лучшая защита от ударных волн сверхзвуковых самолетов — это достаточно большая высота перехода самолета через звуковой барьер. Именно в таком режиме в настоящее время осуществляется полет над густозаселенными территориями.

Но вернемся к проблеме борьбы с шумом наземного транспорта. Здесь на помощь приходит архитектурная акустика. Только понимается она теперь широко — не только как внутренняя планировка театральных и концертных залов, но и как планировка звукоизолирующих перекрытий в промышленных и жилых зданиях, и как специальное расположение зданий по отношению к транспортным магистралям, и как конструирование самих этих магистралей (их следует прокладывать в земляных выемках, отгороженных от жилых зданий массивами густолиственных деревьев). Оптимальное решение, по мнению многих градостроителей, состоит в том, чтобы загнать весь шумный транспорт под землю. Но важно, чтобы от шума не страдали и пассажиры. Уже существуют многочисленные проекты и даже опытные образцы пневматического транспорта, поездов на магнитной подушке и другие.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ЧТО ТАКОЕ ЗВУК	5
КАК ИЗМЕРЯЮТ ЗВУК	10
КАК МЫ СЛЫШИМ И ГОВОРИМ	15
В КОНЦЕРТНОМ ЗАЛЕ	25
МУЗЫКА И ФИЗИКА	32
СУДЬБА ФОНОГРАФА	44
ГОЛОС БУРИ	52
В МИРЕ УЛЬТРАЗВУКОВ	58
ЗВУК И ЭЛЕКТРОНЫ	70
БОРЬБА С ШУМОМ	76



Рис. III

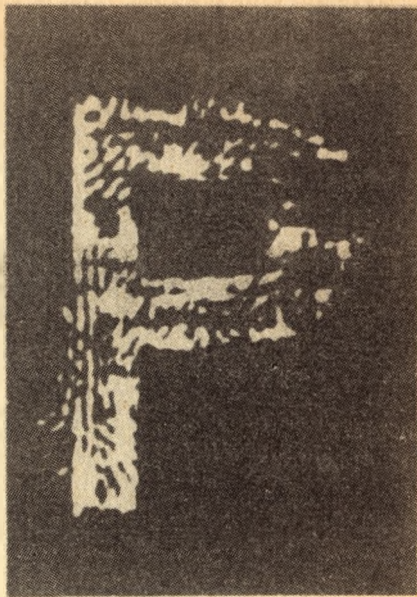


Рис. IV

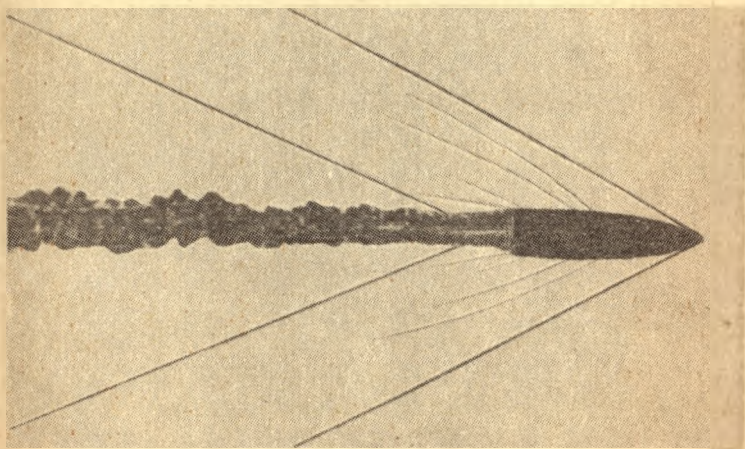


Рис. V

10 коп.

