

Штумфа (1926) и других исследователей было установлено, что если исключить начальную стадию установления звука (начинать слушание, когда звучание какого-либо звука делается стационарным), то тембр звука кажется иным, причем в этом случае звуки, издаваемые различными музыкальными инструментами, оказываются настолько сходными в отношении тембра, что даже опытные музыканты часто ошибаются, определяя инструмент по тембру звука.

В смычковых инструментах нарастание каждого извлекаемого звука продолжается примерно $\frac{1}{10}$ сек. В течение этой начальной стадии звучания звук является нестационарным не только в отношении амплитуды, но происходит также характерное изменение частотного состава звука. В первый момент нарастания звука преобладают высокие обертоны (с частотами от 3000 до 5000 *гц*), и только к концу указанной стадии нарастания звука обертоны уступают по относительной силе основному тону. Мы воспринимаем процесс нарастания звука слитно с последующим стационарным звучанием и впечатление, вызванное начальной стадией, сохраняем как некоторый оттенок звука. У хороших инструментов стадия нарастания звука дает ощущение приятного тембра; строго стационарный звук, прослушанный без начальной стадии нарастания, производит монотонное впечатление и менее приятен. Тембр звуков, издаваемых роялем, заметно изменяется в зависимости от скорости, с которой опускают клавишу (что в известной мере зависит от силы удара).

У большинства духовых инструментов стадия нарастания звука меньше влияет на тембр звука, чем у струнных инструментов. Это отчасти объясняется тем, что у многих духовых инструментов стадия нарастания звука является весьма короткой: у гобоя $\frac{1}{100}$ сек., у кларнета $\frac{1}{20}$ сек. Однако у флейты процесс нарастания звука является относительно продолжительным ($\frac{2}{10} \div \frac{3}{10}$ сек.), и это заметно обогащает тембр звуков флейты.

Для оценки музыкальных качеств голоса хороший тембр голоса, несомненно, является не менее важным, чем сила голоса. Звук хорошего певческого голоса нестационарен: в быстро следующие друг за другом моменты времени (около шести раз в секунду) акустический спектр изменяется так, что сначала подчеркиваются одни обертоны, потом другие. У хороших певцов эта вибрация, обогащающая тембр (вibrato), мало сказывается на громкости, которая остается равномерной.

§ 72. Ультразвуки

Звуковые колебания и волны, характеризующиеся очень большими частотами (не воспринимаемые ухом) порядка нескольких десятков и сотен тысяч герц, вплоть до сотен миллионов герц, называют *ультразвуковыми*.

Ультразвуки относительно небольшой частоты можно получить с помощью *свистка Гальтона*, представляющего собой миниатюрную трубу, возбуждаемую продуванием воздушной струи. Уменьшая с помощью поршенька длину звучащего столба воздуха, можно добиться того, что звук свистка, постепенно повышаясь, наконец, перестанет быть слышен; излучаемая свистком волна переходит в область ультразвуковых частот. С помощью свистка Гальтона и других подобных ему устройств не удается, однако, получить сколь угодно интенсивных ультразвуков; помимо малой мощности таких излучателей, очень существенную роль играет здесь еще и то обстоятельство, что в воздухе колебания высокой частоты очень быстро затухают.

С открытием пьезоэлектрических явлений и с разработкой мощных генераторов электрических колебаний высокой частоты оказалось возможным получить ультразвуковые колебания очень большой интенсивности.

Если из кристалла кварца (SiO_2) в некотором определенном направлении к граням кристалла вырезать пластинку, то, прилагая к широким сторонам пластинки через посредство металлических обкладок переменное электрическое напряжение, можно заставить пластинку колебаться. Это происходит благодаря тому, что при сообщении противоположным сторонам пластинки кварца электрических зарядов противоположного знака пластинка испытывает сжатие или расширение (*пьезоэлектрический эффект*). Колебания кварцевой пластинки, зажатой между металлическими обкладками, становятся особенно интенсивными в том случае, когда частота приложенного переменного напряжения совпадает с собственной частотой колебаний пластинки (резонансные колебания). Кварцевую пластинку с металлическими обкладками погружают в масло, затем, подводя к обкладкам переменное электрическое напряжение, заставляют ее колебаться. При этом в масле распространяются мощные ультразвуковые волны.

Акустическое сопротивление (ρv) масла и воды примерно в 3000 раз больше акустического сопротивления воздуха; поэтому если ту же кварцевую пластинку заставить колебаться в воздухе с той же амплитудой смещения и частотой, то излучаемая энергия будет в 3000 раз меньше.

Посредством пьезокварцевых ультразвуковых генераторов получают колебания с частотами от нескольких десятков тысяч герц до нескольких десятков миллионов герц. Применяя вместо кварца пластинки турмалина (турмалин также обладает пьезоэлектрическими свойствами) и возбуждая колебания пластинки не на основной частоте ее собственных колебаний, а на обертонах, можно получить ультразвуки с частотой порядка 300 млн. *гц*.

Энергия ультразвуковых волн, излучаемая мощными пьезокварцевыми генераторами, весьма велика; интенсивность потока энергии ультразвука в масле или в воде может достигать 10 вт/см^2 , что в 10 000 раз больше силы звука в воздухе от большого оркестра при его максимальном звучании (10^{-3} вт/см^2).

Следует отметить, что при указанной чрезвычайно большой интенсивности ультразвука порядка 10 вт/см^2 амплитуды смещения частиц и амплитуды их скоростей относительно невелики, но чрезвычайно велика амплитуда ускорений. Амплитуда ускорений может в десятки тысяч и в сотни тысяч раз превосходить ускорение силы тяжести. Амплитуда давлений может иметь величину нескольких атмосфер.

Ультразвуковые волны характеризуются интересными физическими и физиологическими явлениями. Так, например, смеси

несмешивающихся жидкостей, подвергнутые в течение нескольких минут воздействию ультразвука высокой частоты, превращаются в эмульсии. Этот метод эмульгирования жидкостей был разработан С. Н. Ржевкиным (в 1935 г.) и др. Погружая в масло с распространяющимися в нем ультразвуковыми волнами пробирку с водой и ртутью, можно наблюдать, как вода постепенно темнеет благодаря раздроблению ртути на мельчайшие капельки, взвешенные в воде. К погруженному в масло термометру нельзя прикоснуться рукой: вследствие ультразвуковых колебаний стекла испытывает ожог, несмотря на то, что термометр показывает небольшую температуру. Живые существа (рыбы, лягушки), подвергнутые интенсивному облучению ультразвуком, погибают в течение нескольких минут. Само масло, в котором возбуждаются ультразвуки, как бы вскипает, разбрызгиваясь над пластинкой кварца фонтаном.

Любопытно отметить, что ультразвуки используются летучими мышами для ориентации при полете в темноте. Способность летучих мышей ориентироваться в темноте всегда вызывала изумление естествоиспытателей. В 1945 г. было обнаружено, что летучие мыши для ориентации в темноте применяют способ, который аналогичен радиолокации и который можно назвать *ультразвуковой локацией*, а именно: летучие мыши в полете издают короткие, в одну сотую секунды, импульсы ультразвука частотой 35—70 кГц. Уши летучей мыши воспринимают («слышат») ультразвуки частотой до 100 кГц. По времени, которое пройдет от изданного летучей мышью ультразвукового «крика» до восприятия его отражения от препятствия, т. е. его эха, летучая мышь безошибочно определяет расстояние до препятствия.

Ультразвуки имеют в настоящее время многообразные применения.

Еще в 1918 г. П. Ланжевен воспользовался ультразвуком для акустического измерения глубины моря (*эхолот*). Это положило начало конструированию многочисленных точных приборов подводной *акустической сигнализации* и *ультразвуковой гидролокации*. Выгодность применения для этих целей ультразвуков связана с тем, что при очень малых длинах волн можно излучать энергию узким направленным пучком. Использование с той же целью коротких и ультракоротких электромагнитных волн, позже примененных в радиолокации, практически является невозможным из-за их интенсивного поглощения в морской воде.

Ультразвуки, применяемые для подводной сигнализации, поглощаются воздухом в 1000 раз сильнее, чем водой.

Установлено, что «прозрачность» газа для ультразвуков различных частот весьма неодинакова: поглощение данным газом ультразвуков определенной области частот иногда в сотни раз превышает поглощение тем же газом ультразвуков других частот. Здесь сказывается совпадение периода ультразвука со временем (весьма

малым) осуществления некоторых межмолекулярных процессов, изучение которых привело к созданию особого отдела акустики — *квантовой акустики*.

Измерения скоростей распространения и коэффициентов поглощения ультразвука служат для изучения важнейших молекулярных свойств жидкостей, паров и газов.

Обнаружено, что ультразвуки большой интенсивности оказывают заметное влияние на характер кристаллизации тел и вызывают ускорение некоторых химических реакций.

Среди биологических явлений, вызываемых ультразвуками, привлекает внимание увеличение урожайности некоторых растений, семена которых были подвергнуты облучению ультразвуком.

В интенсивном потоке ультразвуков многие одноклеточные организмы, стафилококки, красные кровяные шарики погибают, по-видимому, от механических разрывов. На этом свойстве основана *ультразвуковая стерилизация* пищевых продуктов и воды.

В настоящее время широко применяют на практике *ультразвуковое эмульгирование* некоторых лекарственных веществ типа сульфидина. Камфара, которая играет большую роль при лечении сердечных болезней, нерастворима в воде, и поэтому ее нельзя было вводить непосредственно в кровеносные сосуды больного; это, однако, стало возможным благодаря разработанному советскими учеными способу ультразвукового тончайшего эмульгирования камфары. В виде тончайшей эмульсии камфару можно вводить не подкожно, а непосредственно в кровь больного, в результате чего она быстрее достигает сердца, что в некоторых случаях может спасти жизнь больного.

В текстильной промышленности ультразвук применяют для повышения прочности и глубины окраски тканей (с 1927 г.).

Проф. С. Я. Соколов разработал методы применения ультразвуков для обнаружения дефектов в металлических изделиях (раковин и неоднородностей строения). Если покрыть металлическое изделие слоем масла и поставить его на пути распространения ультразвуковых волн, то наличие повреждений и трещин в толще металла вызовет частичное отражение и рассеяние ультразвуковых волн, что может быть замечено по степени колебания слоя масла, покрывающего поверхность металла. Это использовано в простейших приборах *ультразвуковой дефектоскопии*.

В более удобных импульсных дефектоскопах С. Я. Соколова исследуемое изделие «просвечивается» ультразвуком (с частотой от одного до нескольких мегагерц), причем отраженные (от трещин, раковин) ультразвуковые импульсы воспринимаются приемной пластинкой и после усиления регистрируются катодным осциллографом (рис. 174).

В одном из сконструированных С. Я. Соколовым приборов (в *ультразвуковом микроскопе*) ультразвуковые лучи, отраженные

небольшим предметом, помещенным в «просвечиваемую» жидкость, собираются акустической линзой из плексигласа на пьезокварцевую пластинку, что создает на ней скрытое изображение предмета в виде некоторого распределения зарядов. Чтобы сделать это скрытое изображение видимым, использованы способы, аналогичные принципам телевидения (упомянутую кварцевую пластинку последовательно облучают электронным пучком, выбивающим из нее вторичные электроны, число которых различно в зависимости от заряда

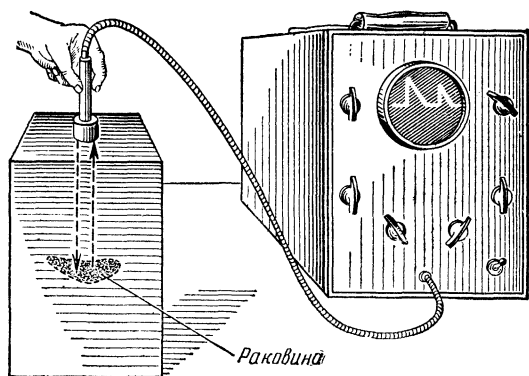


Рис. 174. Ультразвуковой дефектоскоп С. Я. Соколова.

пластинки в данном месте; изменения импульсов тока, вызываемые вторичными электронами, усиливаются и подводятся к электронно-лучевой трубке телевизора).

При распространении достаточно мощного ультразвука в жидкости изменения плотности жидкости вдоль волны столь значительны, что сказываются на оптических свойствах жидкости, которая для пучка света, пронизывающего жидкость перпендикулярно к распространению ультразвуковых волн, делается неоднородной. Это явление, открытое Дебаем и Сирсом в 30-х годах нашего столетия, Г. С. Ландсберг и Л. И. Мандельштам применили для устройства весьма интересных и полезных приборов: *ультразвуковых модуляторов света* — световых реле. (Подробнее об этом рассказано в третьем томе.)