

щениях (объемом не свыше 350 м^3) оптимальной является реверберация 1,06 сек. При дальнейшем увеличении объема оптимальная реверберация растет пропорционально $\sqrt[3]{V}$, как это представлено на рис. 162. В помещениях с плохими акустическими свойствами (слишком «гулких») реверберация вместо оптимального значения в 1—2 сек. составляет 3—5 сек.

§ 68. Частота и состав звуков

В случае гармонических звуковых колебаний среды наше ощущение *высоты* звука объективно соответствует *частоте* колебаний. Если звуковые колебания среды негармоничны, то, пользуясь теоремой Фурье, такие колебания можно представить как сумму гармонических колебаний с кратными частотами. В этом случае составляющее гармоническое колебание, характеризующее наименьшей частотой ν , называют *основным тоном*, а все другие — *обертонами* (первый обертоном имеет частоту 2ν , второй 3ν и т. д.).

Явление *акустического резонанса* позволяет опытным путем анализировать звуковые негармонические колебания сложной формы, т. е. определять частоту основного тона и относительную силу обертонов. Для такого анализа звуков может служить набор *резонаторов Гельмгольца*, представляющих собой полые шары различных размеров, изготовленные из стекла или латуни (рис. 163) и имеющие по два отверстия: одно широкое, через которое колебания воздуха передаются внутрь шара, и другое узкое, которое экспериментатор вставляет в ухо. Звук любой формы возбуждает в резонаторе Гельмгольца собственные колебания воздуха, частота которых определяется объемом воздуха, заключенного в резонаторе. Но эти собственные колебания воздуха только тогда приобретают большую амплитуду и дают ощущение громкого звука, когда их частота близка к частоте основного тона или к частоте какого-либо сильного обертона возбуждившего их звука. Таким образом, слушая некоторый звук и последовательно прикладывая к уху различные резонаторы Гельмгольца, собственные частоты которых известны, нетрудно определить частоту основного тона исследуемого звука и частоты тех обертонов, которые имеют наибольшую амплитуду.

Для более точного анализа звуков применяют электроакустические приборы, в которых звуковые колебания преобразуются в электрические колебания той же формы и эти электрические колебания разлагаются на гармонические составляющие.

Результаты анализа звука часто выражают графически в виде *акустического спектра*: на оси абсцисс откладывают частоты, на оси ординат — относительные силы гармонических составляющих (основного тона и обертонов), выраженные в процентах от силы наи-

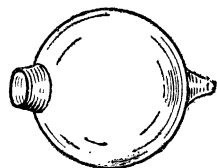


Рис. 163. Резонатор Гельмгольца.

более интенсивной составляющей; обычно для ординат пользуются логарифмическим масштабом. На рис. 164 представлены акустические спектры для некоторых звуков, издаваемых музыкальными инструментами (частота основного тона анализируемого звука указана в скобках на каждом спектре рядом с названием инструмента).

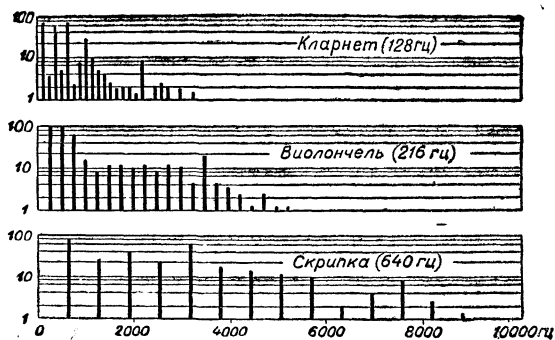


Рис. 164. Акустические спектры.

Положение вертикальных штрихов указывает частоты гармонических составляющих анализируемого звука, а высота этих штрихов определяет относительную силу этих составляющих. Из приведенных спектров видно, сколь сложен каждый звук, издаваемый музыкальным инструментом.

Частоту основного тона такого сложного звука мы воспринимаем как высоту звука; сила и число обертонов и характер нарастания звука определяют *тембр* звука.

Наиболее «чистый» звук (т. е. звук со слабыми и малочисленными обертонами) можно получить посредством камертона, если осторожно провести смычком скрипки по свободному концу ветвей камертона.

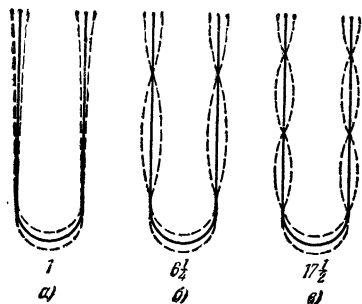


Рис 165. Основной и добавочные тоны камертона.

Чтобы этот звук был явственно слышен, камертон ставят на резонаторный ящик, открытый с одного конца (длина этого ящика должна быть равна четверти длины волны основного тона камертона в воздухе).

Ветви камертона колеблются так, что образуется *стоячая волна*, показанная пунктиром на рис. 165, а. На это колебание, которое соответствует основному тону, накладываются колебания, которые по-

рождают добавочные тоны, причем заметно выражены те гармонические колебания, частоты которых в $6^1/4$ и $17^1/2$ раз превосходят частоту основного тона.

Если провести смычком скрипки несколько ниже середины ветви камертона, то преобладающим колебанием будет то, которое показано на рис. 165, б. В этом случае камертон издает весьма чистый первый добавочный тон, частота которого в $6^1/4$ раз больше частоты основного тона.

Частота основного тона звука, издаваемого *музыкальной трубой* (например, флейтой, кларнетом, фаготом и др.), зависит от длины столба воздуха, резонансные колебания которого усиливают возбужденный в трубе звук. В этом столбе воздуха возникают стоячие звуковые волны, причем если труба открыта с обоих концов, то на концах трубы будут находиться пучности стоячей волны; если же труба открыта только с одного конца; то у открытого конца будет

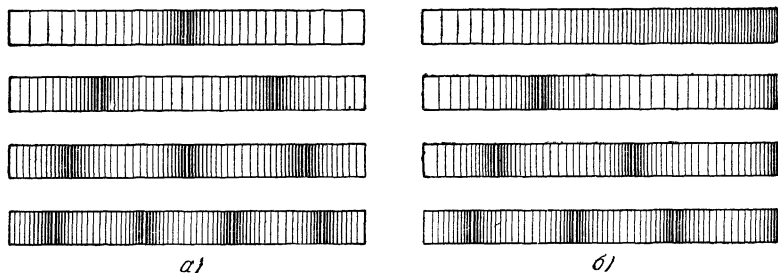


Рис. 166. Колебания воздуха в трубе, открытой с обоих концов (а) и с одного конца (б).

находиться пучность, а у закрытого — узел. В любой стоячей волне расстояние между пучностями всегда равно половине длины волны, поэтому основной тон звука, резонансно усиливаемого открытой с обоих концов трубой, имеет длину волны, равную удвоенной длине трубы. Одновременно с этим основным колебанием в трубе, открытой с обоих концов, могут происходить колебания со всеми кратными частотами (рис. 166).

Если труба закрыта с одного конца, то основной тон звука, резонансно усиливаемого этой трубой, будет иметь длину волны, равную учетверенной длине трубы (в этом случае, как было упомянуто, у открытого конца трубы будет находиться пучность, а у закрытого — узел; расстояние же между пучностью и узлом равно четверти длины волны).

Сопоставляя рис. 166, а и б, нетрудно сообразить, что для трубы, закрытой с одного конца, числа колебаний основного тона и обертонов будут относиться, как $1 : 3 : 5 : 7$ и т. д., т. е. *четные*

обертоны отсутствуют (действительно, если мы разрежем вертикально по середине рис. 166, *а* и отбросим фигуры, где в середине трубы имеется пучность, а не узел, то получим изображение всех возможных стоячих волн в трубе, закрытой с одного конца, т. е. получим рис. 166, *б*).

Частотный состав звука, издаваемого струной, зависит от длины, массы и натяжения струны, а также и от способа возбуждения колебаний струны. Основной тон и обертоны звука, издаваемого струной, соответствуют стоячим волнам поперечных колебаний струны.

Стоячие волны в струнах были исследованы Мельде (1860), схема опытов которого представлена на рис. 167. Мельде для возбуждения колебаний струны пользовался камертоном, к одной из ветвей которого был прикреплен один конец струны, тогда как другой конец струны был переброшен через блок и нагружен гирей. Указанный способ возбуждения колебаний интересен в том отношении, что в данном случае продольные импульсы, сообщаемые камертоном струне, порождают поперечные колебания струны. Это — случай так называемого *параметрического возбуждения колебаний* (от слова «параметр» — величина; воздействие колеблющегося камертона на струну заключается в периодиче-

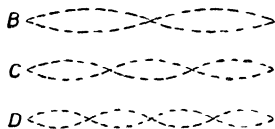
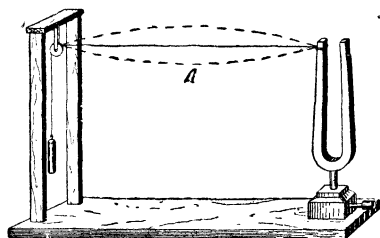


Рис. 167. Опыт Мельде.

ском изменении величины натяжения струны).

В опыте Мельде стоячие волны колебаний струны образуются и являются резко выраженными при определенном соотношении между числом колебаний камертона и собственной частотой поперечных колебаний струны. Этот случай резонанса называют *параметрическим резонансом*; он наблюдается, когда частота внешнего воздействия (частота камертона) в целое число раз превышает собственную частоту колебаний системы (струны). Собственная частота поперечных колебаний струны пропорциональна корню квадратному из натяжения струны. Воспроизводя опыт Мельде, нетрудно подобрать такую гирю, натягивающую струну, чтобы собственная частота колебаний струны была в два раза меньше частоты колебаний камертона; тогда образуется стоячая волна, показанная на рис. 167, *А*. При гире в четыре раза меньшего веса возникает узел по середине струны (рис. 167, *В*); если уменьшить вес гири в 9, 16, 25 и т. д. раз, то число узлов каждый раз возрастает на единицу.

Законы колебания струн открыл Мерсен (1636). Эти законы были обобщены Тейлором (1713) в формуле, выведенной теоретически:

$$\nu_i = \frac{1 + n_i}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}}; \quad (8)$$

здесь при $n_i = 0$ ν_0 означает частоту основного тона, издаваемого струной; при $n_i = 1, 2, 3, 4$ и т. д. ν_i означает частоту соответствующего обертона; L — длина струны; T — натяжение струны; m — масса единицы длины струны.

Относительная сила обертонов зависит от способа возбуждения колебаний струны. Например, если осторожно провести смычком по середине струны, где находится узел стоячей волны первого обертона, то возбуждается звук, почти не содержащий первого обертона.

Звуки речи излучаются голосовыми связками, колебания которых имеют очень сложный характер. Благодаря резонансным свойствам полости глотки и главным образом полости рта характер звука, излучаемого связками, претерпевает резкое изменение: отдельные компоненты, частоты которых приближаются к собственным частотам резонансных полостей, усиливаются, и именно на них и сосредоточивается максимальная энергия излучаемого звука. Так как собственная частота полости определяется ее размерами и формой, то очевидно, что положение максимально усиливаемых компонентов определяется формой, придаваемой полости рта при произнесении того или иного речевого звука.

Мы знаем по ежедневному опыту, что каждому звуку речи соответствует известная форма полости рта, определяемая положением языка и губ; следовательно, каждому звуку речи соответствует одна или несколько характеристических областей частот, лежащих вблизи собственных частот резонирующих полостей. Именно эта концентрация звуковой энергии в определенных (для гласных звуков очень узких) областях частот и дает нам возможность отличать звуки речи один от другого. Эти характерные для каждого речевого звука области частот называют *формантами*. Положение формант отдельных гласных звуков показано на рис. 168: двумя крестами обозначены основные (главные) форманты, одним крестом обозначены второстепенные форманты, характеризующие главным образом индивидуальные особенности тембра.

Согласные звуки, по своей природе скорее приближающиеся к шумам, также характеризуются формантами. Однако формантные области здесь шире, чем у гласных, охватывая значительно более широкий диапазон частот. Нужно заметить, что в процессе возбуждения отдельных согласных звуков участвуют не только голосовые связки, но и сами резонансные полости, например при произнесении согласной «с» струя воздуха продувается между языком и зубами; этим и определяется ее свистящий характер. Для некоторых согласных форманты лежат в области очень высоких частот (например, спектр согласной «с» простирается до 13 000 гц).

В отличие от музыкальных звуков, в которых всегда можно обнаружить совокупность гармонических колебаний, *шумы* представляют собой звуки,

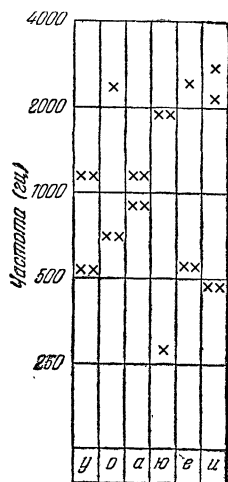


Рис. 168. Область частот, характерных для гласных звуков (форманты гласных звуков).

обусловленные процессами, частота и амплитуда которых изменяются со временем. Как было пояснено выше, для музыкальных звуков является характерным линейчатый акустический спектр. В шуме, если попытаться разложить его на гармонические колебания, обнаруживаются колебания всех частот, вплоть до очень высоких частот порядка 13 000—14 000 *гц*. На рис. 169 представлен в качестве примера спектр шума бунзеновской горелки.

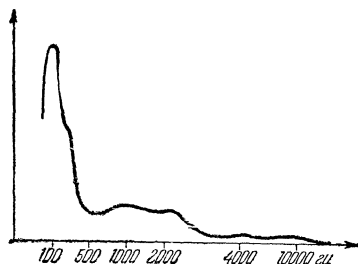


Рис. 169. Спектр шума бунзеновской газовой горелки.

§ 69. Явление Доплера

Когда мы находимся на платформе железнодорожной станции, мимо которой проносится поезд, легко заметить резкое понижение высоты звука гудка паровоза, что свидетельствует об уменьшении частоты звука. Изменение тона наблюдают в тот момент, когда паровоз, поравнявшись с

наблюдателем, начинает удаляться. Причина описанного явления, называемого явлением Доплера, заключается в том, что при приближении источника каких-нибудь волн к наблюдателю приходит большее число волн в секунду, чем когда источник колебаний удаляется. Это приводит к тому, что наблюдатель воспринимает большее число колебаний в секунду, когда источник приближается к нему, и меньшее, когда удаляется.

Пусть источник звука *S* движется (рис. 170) к наблюдателю со скоростью *v* м/сек. Источник звука посылает звуковые колебания с частотой ν . Следовательно, за $\frac{1}{\nu}$ сек. источник *S* посылает одну волну, распростра-

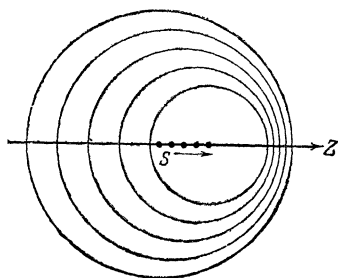


Рис. 170. Волны движущегося источника звука.

няющуюся с некоторой скоростью *c*. За время $\frac{1}{\nu}$ источник *S* приближается к наблюдателю на величину $v \cdot \frac{1}{\nu}$ м. Следовательно, конец следующей волны, исходящий от источника через $\frac{1}{\nu}$ секунд, будет отделен в пространстве от конца предыдущей волны на расстоянием $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (длина волны), как это было бы в случае неподвижного источника, а меньшим:

$$\lambda' = \frac{c}{\nu} - \frac{v}{\nu} = \frac{c-v}{\nu}.$$