

Звуковые волны

Содержание

| | |
|--------------------------------------|----|
| Введение | 3 |
| Историческая справка..... | 5 |
| Основные понятия акустики.. | 9 |
| Звуковые частоты..... | 9 |
| Звуковые явления..... | 9 |
| Свойства звука..... | 11 |
| Скорость распространения звука.. | 14 |
| Музыкальная акустика..... | 15 |
| Резонанс в акустике..... | 17 |
| Анализ и синтез звука..... | 19 |
| Эффект Доплера в акустике..... | 20 |
| Звуковые удары..... | 20 |
| Шумы..... | 22 |
| Ультразвуки и инфразвуки..... | 22 |
| Применение звуковых волн.... | 24 |
| Звукозапись и фонограф Эдисона. | 24 |
| Звуолокация..... | 25 |
| Применение ультра и инфразвуков..... | 26 |
| Ультразвуковая обработка..... | 27 |

Введение

Мир, окружающий нас, можно назвать миром звуков. Звучат вокруг нас голоса людей и музыка, шум ветра и щебет птиц, рокот моторов и шелест листвы. С помощью речи люди общаются, с помощью слуха получают информацию об окружающем мире. Не меньшее значение звук имеет для животных. С точки зрения физики, звук – это механические колебания, которые распространяются в упругой среде: воздухе, воде, твёрдом теле и т.п.

Способность человека воспринимать упругие колебания, слушать их отразились в названии учения о звуке – акустика (от греческого *akustikos* – слуховой, слышимый). Вообще человеческое ухо слышит звук только тогда, когда на слуховой аппарат уха действуют механические колебания с частотой не ниже 16 Гц но не выше 20 000 Гц. Колебания же с более низкими или с более высокими частотами для человеческого уха неслышимы.

Вопросы, которыми занимается акустика, очень разнообразны. Некоторые из них связаны со свойствами и особенностями нашего слуха.

Предметом физиологической акустики и является сам орган слуха, его устройство и действие.

Архитектурная акустика изучает распространение звука в помещениях, влияние на звук размеров и формы помещений, свойств материалов, покрывающих стены и потолки, и т.д. При этом опять имеется в виду слуховое восприятие звука.

Музыкальная акустика исследует музыкальные инструменты и условия их наилучшего звучания.

Физическая акустика занимается изучением самих звуковых колебаний, а за последнее время охватила и колебания, лежащие за пределами слышимости (ультраакустика). Она широко использует разнообразные методы для превращения механических колебаний в электрические и обратно (электроакустика).

Применительно к звуковым колебаниям в число задач физической акустики входит и выяснение физических явлений, обуславливающих те или иные качества звука, различаемые на слух.

Историческая справка

Звуки начали изучать ещё в далёкой древности. Первые наблюдения по акустики были проведены в VI веке до нашей эры. Пифагор установил связь между высотой тона и длиной струны или трубы издающей звук.

В IV в. до н.э. Аристотель первый правильно представил, как распространяется звук в воздухе. Он сказал, что звучащее тело вызывает сжатие и разрежение воздуха и объяснил эхо отражением звука от препятствий.

В XV веке Леонардо да Винчи сформулировал принцип независимости звуковых волн от различных источников.

В 1660 году в опытах Роберта Бойля было доказано, что воздух является проводником звука (в вакууме звук не распространяется).

В 1700 - 1707 гг. вышли мемуары Жозефа Савёра по акустике, опубликованные Парижской Академией наук. В этих мемуарах Савёр рассматривает явление, хорошо известное конструкторам органов: если две трубы органа издадут одновременно два звука, лишь немного отличающиеся по высоте, то слышны периодические усиления звука, подобные барабанной дроби. Савёр объяснил это явление периодическим совпадением колебаний обоих звуков. Если, например, один из двух звуков соответствует 32 колебаниям в секунду, а другой - 40 колебаниям, то конец четвёртого колебания первого звука совпадает с концом пятого колебания второго звука и, таким образом происходит усиление звука. От органных труб Савёр перешёл к экспериментальному исследованию колебаний струны, наблюдая узлы и пучности колебаний (эти названия, существующие и до сих пор в науке, введены им), а также заметил, что при возбуждении струны наряду с основной нотой звучат и другие ноты, длина волны которых составляет $1/2$, $1/3$, $1/4$, ... от основной. Он назвал эти ноты высшими гармоническими тонами, и этому названию суждено было остаться в науке. Наконец, Савёр первый попытался определить границу восприятия колебаний как звуков: для низких звуков он указал границу в 25 колебаний в секунду, а для высоких - 12 800.

За тем, Ньютон, основываясь на этих экспериментальных работах Савёра, дал первый расчет длины волны звука и пришел к выводу, хорошо известному сейчас в физике, что для любой открытой трубы длина волны испускаемого звука равна удвоенной длине трубы. "И в этом состоят главные звуковые явления".

После экспериментальных исследований Савёра к математическому рассмотрению задачи о колеблющейся струне в 1715 г. приступил английский математик Брук Тейлор, положив этим начало математической физике в собственном смысле слова. Ему удалось рассчитать зависимость числа колебаний струны от её длины, веса, натяжения и местного значения ускорения силы тяжести. Эта задача сразу же стала широко известна и привлекла внимание почти всех математиков XVIII века, вызвав долгую и плодотворную дискуссию. Ею занимались среди прочих Иоганн Бернулли и его сын Даниил Бернулли, Риккати и Даламбер. Последний нашел уравнения в частных производных, определяющие малые колебания однородной струны, и проинтегрировал их методом, применяемым и поныне. Но наиболее существенный вклад внес Эйлер. Ему мы обязаны полной теорией колебаний струны, начало построению которой было положено в 1739 году в его труде "Опыт новой теории музыки" и продолжалось в многочисленных последующих докладах. В частности, из теории Эйлера вытекало, что скорость распространения волны по струне не зависит от длины волны возбуждаемого звука. Эйлер производил также теоретические исследования колебаний стержней, колец, колоколов, но полученные результаты не совпали с результатами экспериментальной проверки, предпринятой немецким физиком Эрнестом Флоресом Фридрихом Хладни, которого считают отцом экспериментальной акустики. Хладни первым точно исследовал колебания камертона и в 1796 году установил законы колебаний стержней.

Фактическое объяснение эха, явления довольно капризного, также принадлежит Хладни, по крайней мере в существенных частях. Ему мы обязаны и новым экспериментальным определением верхней границы слышимости звука, соответствующей 20 000 колебаний в секунду. Эти

измерения, многократно повторяемые физиками до сих пор, весьма субъективны и зависят от интенсивности и характера звука. Но особенно известны опыты Хладни в 1787 году по исследованию колебаний пластин, при которых образуются красивые "акустические фигуры", носящие названия фигур Хладни и получающиеся, если посыпать колеблющуюся пластинку песком. Эти экспериментальные исследования поставили новую задачу математической физики - задачу о колебаниях мембраны.

Хладни начал исследования продольных волн в твердых телах и сопоставил продольные и поперечные колебания стержня при различных способах возбуждения (ударом, трением и др.). Исследование продольных волн были продолжены экспериментально Саваром, а теоретически - Лапласом и Пуассоном.

В XVIII веке было исследовано много других акустических явлений (скорость распространения звука в твердых телах и в газах, резонанс, комбинационные тона и др.). Все они объяснялись движением частей колеблющегося тела и частиц среды, в которой распространяется звук. Иными словами, все акустические явления объяснялись как механические процессы.

В 1787 году Хладни, основоположник экспериментальной акустики открыл продольные колебания струн, пластин, камертонов и колоколов. Он первый достаточно точно измерил скорость распространения звуковых волн в различных газах. Доказал, что в твердых телах звук распространяется не мгновенно, а с конечной скоростью, и в 1796 году определил скорость звуковых волн в твердых телах по отношению звука в воздухе. Он изобрел ряд музыкальных инструментов. В 1802 году вышел труд Эрнеста Хладни "Акустика", где он дал систематическое изложение акустики.

После Хладни французский ученый Жан Батист Био в 1809 году измерял скорость звука в твердых телах.

В 1800 году английский ученый Томас Юнг открыл явление интерференции звука и установил принцип суперпозиции волн.

В 1816 году французский физик Пьер Симон Лаплас вывел формулу для скорости звука в газах.

В 1827 году Ж. Колладон и Я. Штурм провели опыт на Женевском озере по определению скорости звука в воде, получив значение 1435 м/с.

В 1842 году австрийский физик Христиан Доплер предположил влияние относительного движения на высоту тона (эффект Доплера). А в 1845 году Х. Бейс-Баллот экспериментально обнаружил эффект Доплера для акустических волн.

В 1877 году американский ученый Томас Алва Эдисон изобрел устройство для записи и воспроизведения звука, который потом сам же в 1889 году усовершенствовал. Изобретенный им способ звукозаписи получил название механического.

В 1880 году французские ученые братья Пьер и Поль Кюри сделали открытие, которое оказалось очень важным для акустики. Они обнаружили, что, если кристалл кварца сжать с двух сторон, то на гранях кристалла появляются электрические заряды. Это свойство - пьезоэлектрический эффект - для обнаружения не слышимого человеком ультразвука. И наоборот, Если к граням кристалла приложить переменное электрическое напряжение, то он начнет колебаться, сжимаясь и разжимаясь.

Основные понятия акустики

Звуковые частоты

Колебания упругой пластинки, зажатой в тисках, имеют тем более высокую частоту, чем короче свободный колеблющийся конец пластинки. Когда частота колебаний делается выше чем 16 Гц, мы начинаем слышать колебания этой пластинки.

Таким образом, звук обуславливается механическими колебаниями в упругих средах и телах (твердых, жидких и газообразных), но не в вакууме.

То, что воздух – проводник звука, было доказано поставленным опытом Роберта Бойля в 1660 году. Если звучащее тело, например электрический звонок, поставить под колокол воздушного насоса, то по мере откачивания из под него воздуха – звук будет делаться слабее, и наконец, когда под колоколом весь воздух кончится, то звук прекратится.

При своих колебаниях тело попеременно то сжимает слой воздуха, прилегающий к его поверхности, то, наоборот, создаёт разрежение в этом слое. Таким образом, распространение звука в воздухе начинается с колебаний плотности воздуха у поверхности колеблющегося тела.

Звуковые явления.

При распространении звуковой волны происходит затухание звука, связанное с различными необратимыми процессами. Часть энергии, которая переносится звуковыми волнами, поглощается средой.

Величина, равная отношению поглощённой звуковой энергии к звуковой энергии, поступающей в среду, называется коэффициентом поглощения. Коэффициент поглощения зависит от внутреннего трения (вязкости) поглощающей среды и от её теплопроводности. Он так же зависит от скорости распространения звука в этой среде, от плотности среды и частоты звуковой волны.

Звуковая волна, распространяясь в некоторой среде, когда-нибудь доходит до границы этой среды, за которой начинается другая среда, состоящая из других частиц, в которой и скорость звука другая. На такой границе происходит явление отражения звуковой волны. При этом сгущение частиц превращается в разрежение, а разрежение – в сгущение.

Происходит это потому, что колебания, принесённые волной к границе, передаются частицами второй среды и они сами становятся источником новой звуковой волны. Эта вторичная волна распространяется не только во второй среде, но и в первой, откуда пришла первичная волна. Это и есть отражённая волна.

На границе двух сред происходит частичное поглощение и прохождение звука в другую среду. Доля отражённой энергии звуковой волны зависит в основном от соотношения плотностей этих сред и состояния поверхности раздела. Отражение звука, распространяющегося в воздухе, от твёрдого тела или жидкой поверхности происходит практически полностью. Звук, распространяющийся в плотной среде, также практически полностью отражается на границе раздела с воздухом.

Если преграда представляет собой более плотную среду, то при отражении происходит потеря полуволны. В большом помещении после каждого звука возникает гул, который является результатом наложения звуковых волн, отражённых от различных преград в этом помещении. Например от стен, потолка, колонны и т.п.. Это явление называется реверберацией. Если в помещении много отражающих поверхностей, особенно мягких, сильно поглощающих звук, то реверберация отсутствует. Явление реверберации учитывают в архитектуре, при проектировании больших залов, добиваясь определённой окраски звука, который приобретает мягкость и объёмность.

С явлением отражения звука связано такое известное явление, как эхо. Оно состоит в том, что звук от источника доходит до какого-то препятствия, которое и является границей двух сред, отражается от него, и возвращается к месту, где эта звуковая волна возникла. И если первичный звук и звук отражённый доходят до слушателя не одновременно, то он слышит звук дважды. Звук может испытать и несколько отражений. Тогда можно услышать звук много раз. Например раскаты грома.

При отражении звуковой волны от менее плотной среды, например лёгкие газы, звуковая волна, распространяющаяся в воздухе, проходит через неё, вовлекая частицы этой среды в волновое движение и частично отражаясь.

Величина, равная отношению отражённого потока звуковой энергии к падающему потоку звуковой энергии, называется коэффициентом отражения. Величина, равная отношению проходящего потока звуковой энергии к падающему потоку звуковой энергии, называется коэффициентом пропускания.

Для звуковых волн выполняются законы отражения и преломления, аналогичные законам отражения и преломления света.

Свойства звука.

Ощущение звука вызывается звуковыми волнами, достигающими органа слуха - уха. Важнейшая часть этого органа - барабанная перепонка. Пришедшая к ней звуковая волна вызывает вынужденные колебания барабанной перепонки с частотой колебаний в волне. Они воспринимаются мозгом как звук.

Звуки бывают разные. Мы легко различаем свист и дробь барабана, мужской голос (бас) от женского (сопрано).

Об одних звуках говорят, что они низкого тона, другие мы называем звуками высокого тона. Ухо их легко различает. Звук, создаваемый большим барабаном, это звук низкого тона, свист - звук высокого тона. Простые измерения (развертка колебаний) показывают, что звуки низких тонов - это колебания малой частоты в звуковой волне. Звуку высокого тона соответствует большая частота колебаний. Частота колебаний в звуковой волне определяет тон звука.

Существуют особые источники звука, испускающие единственную частоту, так называемый чистый тон. Это камертоны различных размеров - простые устройства, представляющие собой изогнутые металлические стержни на ножках. Чем больше размеры камертона, тем ниже звук, который он испускает при ударе по нему.

Если взять несколько камертонов разного размера, то не представит труда расположить их на слух в порядке возрастания высоты звука. Тем самым они окажутся расположенными и по размеру: самый большой камертон даёт низкий звук, а маленький - наиболее высокий.

Звуки даже одного тона могут быть разной громкости. Громкость звука связана с энергией колебаний в источнике и в волне. Энергия же колебаний определяется амплитудой колебаний. Громкость, следовательно, зависит от амплитуды колебаний. Но связь между громкостью звука и амплитудой колебаний не простая.

Самый слабый ещё слышимый звук, дошедший до барабанной перепонки, приносит в 1 секунду энергию, равную примерно 10-16 Дж, а самый громкий звук (звук реактивного ракетного двигателя в нескольких метрах от него) - около 10⁴ Дж. Следовательно, по мощности самый громкий звук примерно в тысячу миллиардов раз превосходит самый слабый.

Интенсивности звука при слуховом восприятии соответствует ощущение громкости звука. При определенной минимальной интенсивности человеческое ухо не воспринимает звука. Эта минимальная интенсивность называется порогом слышимости. Порог слышимости имеет различные значения для различных частот. При больших интенсивностях ухо испытывает болевое ощущение. Наибольшая интенсивность при болевом восприятии звука называется порогом болевого ощущения.

Уровень интенсивности звука определяется в децибелах (дБ). Например, громкость звука, шороха листьев оценивается в 10 дБ, шёпота - 20 дБ, уличного шума - 70 дБ. Шум громкостью 130 дБ ощущается кожей и вызывает ощущение боли.

Количество децибел равно десятичному логарифму отношения интенсивностей, умноженному на 10, т.е. $10 \lg(I/I_0)$.

Обычно в акустике за I_0 принимается интенсивность равная 1 пДж(м² с), приблизительно равная интенсивности на пороге слышимости при 1000 Гц.

Простейшие наблюдения показывают, что громкость тона какой-либо данной высоты определяется амплитудой колебаний. Звук камертона после удара по нему постепенно затихает. Это происходит вместе с затуханием колебаний, т.е. с уменьшением их амплитуды. Ударив камертон сильнее, т.е. сообщив колебаниям большую амплитуду, мы услышим более громкий звук, чем при слабом ударе. То же можно наблюдать и со струной, и вообще со всяким другим источником звука.

К таким же заключениям можно прийти, пользуясь не камертонами, а упрощённой сиреной - вращающимся диском с отверстиями, через которые продувается струя воздуха. Повышая напор струи воздуха, мы усиливаем колебания плотности воздуха позади отверстий. При этом звук, сохраняя одну и ту же высоту, делается громче. Ускоряя вращение диска, мы уменьшаем период прерываний воздушной струи. Вместе с тем звук, не

меняясь по громкости, повышается. Можно также сделать в диске два или более рядов отверстий с разным количеством отверстий в каждом ряду. Продувание воздуха через каждый из рядов даёт тем более высокий звук, чем больше отверстий в этом ряду, т.е. чем короче период прерываний.

Но, взяв в качестве источника звука сирену, можно получить хотя и периодическое, но уже негармоническое колебание: плотность воздуха в прерывистой струе меняется резкими толчками. На ряду с этим и звук сирены, хотя и является музыкальным, но совсем не похож на тон камертона. Можно подобрать высоту звука сирены такой же, как и у какого-либо из камертонов. При этом и громкость звука можно сделать одинаковой. Тем не менее легко можно отличить звук камертона от звука сирены.

Таким образом, если колебание не является гармоническим, то на слух оно имеет ещё одно качество, кроме высоты и громкости, а именно – специфический оттенок, называемый тембром. По различному тембру мы легко распознаём звук голоса, свист, звучание струны рояля, скрипичной струны, звук флейты, гармони и т.д., хотя все эти звуки имели бы одну и ту же высоту и громкость. По тембру мы можем узнать голоса разных людей.

Исследование вопроса, с чем связан тембр звука, показало, что для нашего уха существенны только частоты и амплитуды тонов, входящих в состав звука, т.е. тембр звука определяется его гармоническим спектром. Сдвиги отдельных тонов по времени, другими словами, изменения фаз тонов, никак не воспринимаются на слух, хотя могут очень сильно менять форму результирующего колебания. Таким образом, один и тот же звук может восприниматься при очень различных формах колебания. Важно только, чтобы сохранялся спектр, т.е. частоты и амплитуды составляющих тонов.

Скорость распространения звука.

В том, что распространение звуковых волн происходит не мгновенно, можно увидеть из простейших наблюдений. Если в дали происходит гроза, выстрел, взрыв, свисток паровоза, удар топором и т.п., то сначала все эти явления видно, а только потом, спустя некоторое время, слышен звук.

Как и всякая волна, звуковая волна характеризуется скоростью распространения колебаний в ней. Скорость распространения фазы волны в упругой среде жидкости или газа зависит от сжимаемости и плотности этой среды. В жидкостях и газах звук распространяется с постоянным давлением и его скорость пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры газа T . В сухом воздухе, содержащем 0,03% углерода, при температуре 0 °C скорость звука равна 331,5 м/с, а с повышением температуры увеличивается:

$$v = 331,1 \sqrt{T} \text{ ,}$$

где $\alpha = 1/273$ – коэффициент расширения газа. В воде звук распространяется примерно в 4,25 раза быстрее, чем в воздухе, а в твёрдых телах – ещё быстрее (около $5 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^3$ м/с).

С длиной волны λ и частотой колебаний ν скорость звуковой волны v связана формулой:

$$v = \lambda \nu \text{ .}$$

Скорость звука различна в разных средах. Например в водороде скорость распространения звуковых волн любой длины равна 1284 м/с, в резине – 1800 м/с, а в железе – 5850 м/с.

Музыкальная акустика.

Реальный звук является наложением гармонических колебаний с набором частот, который определяет акустический спектр звуковой волны. Различают три вида звуковых колебаний: музыкальные звуки, звуковые удары и шумы. Периодические колебания определённой частоты вызывают простой музыкальный тон. Сложные музыкальные звуки – это сочетания отдельных тонов. Тон, соответствующий наименьшей частоте сложного музыкального звука, называют основным тоном, а остальные тоны –

обертонами. Если частота обертона кратна частоте основного тона, то обертон называют гармоническим. При этом основной тон с минимальной частотой f_0 называют первой гармоникой, обертон, с частотой $2f_0$ - второй гармоникой и т.д.

Относительная интенсивность, звуковой волны а так же характер нарастания и спада их амплитуд во время затухания, определяют окраску (или тембр) звука. Различные музыкальные инструменты (рояль, скрипка флейта и т.п.) отличаются тембром издаваемых этими инструментами звуков. Совокупность звуков разной высоты которыми пользуются в музыке, составляет музыкальный строй. Относительный музыкальный строй состоит из звуков, находящихся в определённых соотношениях. Если звуки музыкального строя заданы высотой исходного тона, с которого начинается настройка инструментов, то такой строй называют абсолютным. Исходный (стандартный) тон в европейском абсолютном музыкальном строе равен 440 Гц (звук "ля" первой октавы). Относительное различие в высоте двух тонов, обусловленное соотношением между частотами этих тонов, называют интервалом. Соотношение частот $2 : 1$ определяет октаву, $5 : 4$ - большую терцию, $4 : 3$ - кварту, $3 : 2$ - квинту.

Если длина струны гитары равна L , то возникшая волна должна пройти путь $2L$, чтобы вернуться в исходное положение, имея исходное направление движения и исходную форму после двух отражений от обоих концов. Если v - скорость волны, то расстояние $2L$ волна будет пробегать f раз в секунду, причём

$$f = \frac{v}{2L}$$

Частота f - это высота тона струны. Если прижать пальцем струну к грифу гитары, положив палец на лад, который ускорит свободную часть струны в 2 раза, то и высота тона удвоится. Нота повысится на октаву, что соответствует удвоению частоты.

Отношение высот полутонов равно корню двенадцатой степени из двух. Этим и определяется расположение ладов на грифе гитары. Отношение расстояний L_1 и L_2 от подставки на деке до любых двух соседних тонов на грифе гитары равно

$$\frac{L_2}{L_1} = \sqrt[12]{2} = 1,05946$$

В принятой европейской музыкальной практике октава делится на 12 равных интервалов, которые составляют равномерно темперированный строй. Отношение частот последовательных полутонов

$$f_n : f_{n+1} = \sqrt[12]{2} : 1$$

Кроме темперированного строя различают два точных строя - пифагорейский и чистый, в основе которых лежат интервалы, частотные коэффициенты которых представляют собой отношения первых соседних чисел натурального ряда. Пифагорейский строй основан на октаве и чистой квинте с частотным коэффициентом $3 : 2$, а чистый строй - на октаве, квинте и большой терции с частотным коэффициентом $5 : 4$. Пифагорейский строй более выразительно передаёт мелодию, а чистый лучше соответствует аккордовой музыке. Для исполнения сложной музыки используют компромиссно темперированные строи и равномерно-темперированный 12-ступенчатый музыкальный строй.

Музыка других, неевропейских народов отличается другими интервальными соотношениями и другим числом звуков в октаве.

Резонанс в акустике.

Звуковые колебания, приносимые звуковой волной, могут служить вынуждающей, периодически изменяющейся силой для колебательных систем и вызывать в этих системах явление резонанса, т.е. заставить их звучать. Такой резонанс называется акустическим резонансом. Резонансные явления можно наблюдать на механических колебаниях любой частоты. Т.к. камертон сам по себе даёт очень слабый звук, потому, что площадь

поверхности колеблющихся ветвей камертона, соприкасающихся с воздухом, очень мала и в колебательное движение приходит слишком мало частиц воздуха, то камертон обычно укрепляют на деревянном ящике, подобранном так чтобы частота его собственных колебаний была равна частоте звука, создаваемого камертоном. Ящики усиливают звук, вследствие резонанса между камертоном и столбом воздуха, заключённого в ящике. Этот ящик с камертоном называется резонатором или резонансным ящиком.

Пример акустического резонанса можно наблюдать в следующем опыте. Роль ящиков в этом опыте чисто вспомогательная.

Поставим рядом два одинаковых камертона, обратив отверстия ящиков, на которых они укреплены, друг к другу. Ударим один из камертонов и затем приглушим его пальцами. Мы услышим, как звучит второй камертон.

Возьмём два разных камертона, т.е. с различной высотой тона, и повторим опыт. Теперь каждый из камертонов не будет откликаться на звук другого камертона.

Этот результат объясняется тем, что колебания одного камертона действуют через воздух с некоторой силой на второй камертон, заставляя его совершать вынужденные колебания. Так как первый камертон совершает гармоническое колебание, то и сила, действующая на второй камертон, будет меняться по закону гармонического колебания с частотой первого камертона. Если частота силы та же, что и собственная сила второго камертона, то второй камертон начинает сильно раскачиваться. Это явление называется акустическим резонансом. Если же частота силы другая, то вынужденные колебания второго камертона будут настолько слабыми, что их будет невозможно услышать.

Так как камертоны обладают очень небольшим затуханием, то у них резонанс будет очень сильно выражен (острый резонанс). Поэтому уже небольшая разность между частотами камертонов приводит к тому, что один камертон перестаёт откликаться на колебания другого. Достаточно, например, приклеить к ветвям одного из двух камертонов кусочки пластилина или воска, и камертоны уже будут расстроены, резонанса не будет.

Если звук представляет собой ноту, т.е. периодическое колебание, но не является тоном (гармоническим колебанием), то это означает, что он состоит из суммы двух тонов: основного, наиболее низкого и обертонов. На такой звук камертон должен резонировать всякий раз, когда частота камертона совпадает с частотой какой-либо одной из собственных частот колебательной системы. Опыт можно произвести с упрощенной сиреной и камертоном, при этом поставив отверстие резонатора камертона против прерывистой воздушной струи сирены. Если частота камертона равна 300 Гц, то, можно легко убедиться, что он будет откликаться на звук сирены не только при 300 прерываниях в секунду (резонанс на основной тон сирены), но и при 150 прерываниях – резонанс на первый обертон сирены, и при 100 прерываниях – резонанс на второй обертон сирены, и т.д..

Если у пианино нажать на педаль и сильно крикнуть на него, то от него можно будет услышать отзвук, который будет слышится некоторое время, с тоном (частотой) очень похожим на первоначальный звук.

Анализ и синтез звука.

При помощи наборов акустических резонаторов можно установить, какие тоны входят в состав данного звука и с какими амплитудами они присутствуют в данном звуке. Такое установление гармонического спектра сложного звука называется его гармоническим анализом. Раньше такой анализ действительно производился с помощью наборов резонаторов, в частности резонаторов Гельмгольца, представляющих собой полые шары разного размера, снабженные отростком, вставляющимся в ухо, и имеющие отверстие с противоположной стороны.

Для анализа звука существенно то, что всякий раз, когда в анализируемом звуке содержится тон с частотой резонатора, резонатор начинает громко звучать в этом тоне.

Такие способы анализа очень неточны и кропотливы. В настоящее время они вытеснены значительно более совершенными, точными и быстрыми

электроакустическими способами. Суть их сводится к тому, что акустическое колебание сначала преобразуется в электрическое колебание с сохранением той же формы, а следовательно, имеющее такой же спектр; затем уже электрическое колебание анализируется электрическими методами.

Можно указать один существенный результат гармонического анализа, касающийся звуков нашей речи. По тембру мы можем узнать голос человека. Но чем различаются звуковые колебания, когда один и тот же человек поёт на одной и той же ноте различные гласные: а, и, о, у, э? Другими словами, чем различаются в этих случаях периодические колебания воздуха вызываемые голосовым аппаратом при разных положениях губ и языка и изменениях формы полостей рта и горла? Очевидно, в спектрах гласных должны быть какие-то особенности, характерные для каждого гласного звука, сверх тех особенностей, которые создают тембр голоса данного человека. Гармонический анализ гласных подтверждает это предположение, а именно, гласные звуки характеризуются наличием в их спектрах областей обертонов с большой амплитудой, причём эти области лежат для каждой гласной всегда на одних и тех же частотах, независимо от высоты пропетого гласного звука. Эти области сильных обертонов называют формантами. Каждая гласная имеет две характерные для неё форманты.

Очевидно, если искусственным путём воспроизвести спектр того или иного звука, в частности спектр гласной, то наше ухо получит впечатление этого звука, хотя его естественный источник отсутствовал бы. Особенно легко удаётся осуществлять такой синтез звуков (и синтез гласных) с помощью электроакустических устройств. Электрические музыкальные инструменты позволяют очень просто изменять спектр звука, т.е. менять его тембр. Простое переключение делает звук похожим на звуки то флейты, то скрипки, то человеческого голоса или же совсем своеобразным, непохожим на звук ни одного из обычных инструментов.

Эффект Доплера в акустике.

Частота звуковых колебаний, которые слышит неподвижный наблюдатель в случае, если источник звука приближается или удаляется от него, отлична от частоты звука, воспринимаемой наблюдателем, который движется вместе с этим источником звука, или и наблюдатель и источник звука стоят на месте. Изменение частоты звуковых колебаний (высоты звука), связанное с относительным движением источника и наблюдателя называется акустическим эффектом Доплера. Когда источник и приемник звука сближаются, то высота звука повышается, а если они удаляются, то высота звука понижается. Это связано с тем, что при движении источника звука относительно среды, в которой распространяются звуковые волны, скорость такого движения векторно складывается со скоростью распространения звука.

Например, если машина с включенной сиреной приближается, а затем, проехав мимо, удаляется, то сначала слышен звук высокого тона, а затем низкого.

Звуковые удары

Ударные волны возникают при выстреле, взрыве, электрическом разряде и т.п. Основной особенностью ударной волны является резкий скачок давления на фронте волны. В момент прохождения ударной волны максимум давления в данной точке возникает практически мгновенно за время порядка 10⁻¹⁰ с. При этом одновременно скачком изменяются плотность и температура среды. Затем давление медленно падает. Мощность ударной волны зависит от силы взрыва. Скорость распространения ударных волн может быть больше скорости звука в данной среде. Если, например, ударная волна увеличивает давление в полтора раза, то при этом температура повышается на 35 °С и скорость распространения фронта такой волны примерно равна 400 м/с. Стены средней толщины, которые встречаются на пути такой ударной волны будут разрушены.

Мощные взрывы будут сопровождаться ударными волнами, которые создают в максимальной фазе фронта волны давление, в 10 раз превышающее атмосферное. При этом плотность среды увеличивается в 4 раза,

температура повышается на 500 °С, и скорость распространения такой волны близка к 1 км/с. Толщина фронта ударной волны имеет порядок длины свободного пробега молекул (10⁻⁷ - 10⁻⁸ м), поэтому при теоретическом рассмотрении можно считать, что фронт ударной волны представляет собой поверхность взрыва, при переходе через которую параметры газа изменяются скачком.

Ударные волны так же возникают, когда твёрдое тело движется со скоростью, превышающей скорость звука. Перед самолётом, который летит со сверхзвуковой скоростью, образуется ударная волна, которая является основным фактором, определяющим сопротивление движению самолёта. Чтобы это сопротивление ослабить, сверхзвуковым самолётам придают стреловидную форму.

Быстрое сжатие воздуха перед движущимся с большой скоростью предметом приводит к повышению температуры, которая с нарастанием скорости предмета - увеличивается. Когда скорость самолёта достигает скорости звука, температура воздуха достигает 60 °С. При скорости движения вдвое выше скорости звука, температура повышается на 240 °С, а при скорости, близкой к тройной скорости звука - становится 800 °С. Скорости близкие к 10 км/с приводят к плавлению и превращению движущегося тела в газообразное состояние. Падение метеоритов со скоростью в несколько десятков километров в секунду приводит к тому, что уже на высоте 150 - 200 километров, даже в разрежённой атмосфере метеоритные тела заметно нагреваются и светятся. Большинство из них на высотах 100 - 60 километров полностью распадаются.

Шумы.

Наложение большого количества колебаний беспорядочно смешанных одно относительно другого и произвольно изменяющих интенсивность во времени, приводят к сложной форме колебаний. Такие сложные колебания, состоящие из большого числа простых звуков различной тональности, называют шумами. Примерами могут служить шелест листьев в лесу, грохот водопада, шум на улице города. К шумам также можно отнести звуки, выражаемые согласными. Шумы могут отличаться распределением по силе звука, по частоте и продолжительности звучания во времени. Длительное время звучат шумы, создаваемые ветром, падающей воды, морским прибоем. Относительно кратковременны раскаты грома, рокот волн - это низкочастотные шумы. Механические шумы могут вызываться вибрацией твёрдых тел. Возникающие при лопании пузырьков и полостей в жидкости звуки, которые сопровождают процессы кавитации, приводят к кавитационным шумам.

В прикладной акустике изучение шумов проводится в связи с проблемой борьбы с их вредностью, для усовершенствования шумопеленгаторов в гидроакустике, а также для повышения точности измерений в аналоговых и цифровых устройствах обработки информации. Продолжительные сильные шумы (порядка 90 дБ и более) оказывают вредное действие на нервную систему человека, шум морского прибоя или леса - успокаивающее.

Ультразвуки и инфразвуки.

Сейчас акустика, как область физики рассматривает более широкий спектр упругих колебаний - от самых низких до предельно высоких, вплоть до 10¹² - 10¹³ Гц. Не слышимые человеком звуковые волны с частотами ниже 16 Гц называют инфразвуком, звуковые волны с частотами от 20 000 Гц до 10⁹ Гц - ультразвуком, а колебания с частотами выше чем 10⁹ Гц называют гиперзвуком.

Этим неслышимым звукам нашли много применения.

Ультразвуки и инфразвуки имеют очень важную роль и в живом мире. Так, например, рыбы и другие морские животные чутко улавливают инфразвуковые волны, создаваемые штормовыми волнениями. Таким образом, они заранее чувствуют приближение шторма или циклона, и уплывают в более безопасное место. Инфразвук - это составляющая звуков леса, моря, атмосферы.

При движении рыб, создаются упругие инфразвуковые колебания, распространяющиеся в воде. Эти колебания хорошо чувствуют акулы за много километров и плывут на встречу добыче.

Ультразвуки могут издавать и воспринимать такие животные, как собаки, кошки, дельфины, муравьи, летучие мыши и др. Летучие мыши во время полёта издают короткие звуки высокого тона. В своём полёте они руководствуются отражениями этих звуков от предметов, встречающихся на пути; они могут даже ловить насекомых, руководствуясь только эхом от своей мелкой добычи. Кошки и собаки могут слышать очень высокие свистящие звуки (ультразвуки).

Проведённые наблюдения показали, что муравьи так же издают ультразвуковые сигналы с разными частотами в разных ситуациях. Все записанные эти муравьиные звуковые сигналы можно разделить на три группы: "сигнал бедствия", "сигнал агрессии" (во время борьбы) и "пищевые сигналы". Эти сигналы представляют собой кратковременные импульсы, длительностью от 10 до 100 микросекунд. Муравьи издают звуки в сравнительно широком диапазоне частот – от 0,3 до 5 кГц.

Применение звуковых волн

Звукозапись и фонограф Эдисона

Вряд ли сегодня можно встретить человека, который ни разу бы не слышал радио, магнитофон или проигрыватель. Без звукозаписи наша жизнь кажется немыслимой. А ведь всего немного более века прошло с того времени, когда американский изобретатель Эдисон в 1877 году впервые продемонстрировал изобретённый им фонограф – прибор для записи звука. В фонографе лёгкая мембрана воспринимала звук и передавала колебания на иглу, движущуюся вдоль вращающегося валика, покрытого воском. Колебания иглы оставляли на валике звуковую дорожку. Профиль дна этой дорожки в сущности есть развёртка или осциллограмма колебаний конца иглы. Когда игла вновь проходила по ней, из мембраны доносился записанный звук.

Изобретённый Эдисоном способ звукозаписи получил название механического. Используют его и сейчас, но, конечно, в новом качестве: мембрану, с её низкой чувствительностью заменили высокочувствительные микрофоны с электронными усилителями, а сигнал, преобразованный в механические колебания, записывают на металлической матрице, с которой затем печатают грампластинки. Запись ведут уже не иглой, а специальным резцом. Запись звука в виде борозды переменной глубины была заменена поперечной записью, то есть в виде борозды с поперечными извилинами. На современных пластинках звуковая дорожка имеет форму спирали, по которой при вращении пластинки движется игла, обычно от края пластинки к её центру. Извилины этой дорожки легко рассмотреть в сильное увеличительное стекло.

Звуколокация.

На явлении эхо основан метод определения расстояний до различных предметов и обнаружения их месторасположений. Допустим, что каким-нибудь источником звука испущен звуковой сигнал и зафиксирован момент его испускания. Звук встретил какое-то препятствие, отразился от него, вернулся и был принят приёмником звука. Если при этом был измерен промежуток времени между моментами испускания и приёма, то легко найти и расстояние до препятствия. За измеренное время t звук прошёл расстояние $2s$, где s – это расстояние до препятствия, а $2s$ – расстояние от источника звука до препятствия и от препятствия до приёмника звука. Если скорость звука v известна, то можно написать:

$$t = \frac{2s}{v}, \text{ или } s = \frac{vt}{2}.$$

По этой формуле можно найти расстояние до отражателя сигнала. Но ведь надо ещё знать, где он находится, в каком направлении от источника сигнал встретил его. Между тем звук распространяется по всем направлениям, и отражённый сигнал мог прийти с разных сторон. Чтобы

избежать этой трудности используют не обычный звук, а ультразвук.

Ультразвуковые волны по своей природе такие же, как обычные звуковые волны, но не воспринимаются человеком как звук. Это объясняется тем, что частота колебаний в них больше, чем 20 000 Гц. Такие волны наблюдаются в природе. Есть даже такие живые существа, способные их испускать и принимать. Ультразвуковые волны и притом большой мощности можно создавать с помощью электрических и магнитных методов.

Главная особенность ультразвуковых волн состоит в том, что их можно сделать направленными, распространяющимися по определённому направлению от источника. Благодаря этому по отражению ультразвука можно не только найти расстояние, но и узнать, где находится тот предмет, который их отразил. Так можно, например, измерять глубину моря под кораблем.

Звуколокаторы позволяют обнаруживать и определять местоположение различных повреждений в изделиях, например пустоты, трещины, постороннего включения и др. В медицине ультразвук используют для обнаружения различных аномалий в теле больного – опухолей, искажений формы органов или их частей и т.д. Чем короче длина ультразвуковой волны, тем меньше размеры обнаруживаемых деталей. Ультразвук используется также для лечения некоторых болезней.

Применение ультразвуков и инфразвуков.

Ещё полстолетия назад неслышимый звук был мало кому известен; первые научные изыскания носили чисто академический характер. Однако практика поставила некоторые неотложные задачи и новые открытия наметили пути к их разрешению. Неслышимый звук получил многочисленные применения.

Ещё сравнительно недавно никто не мог предположить, что звуком станут не только измерять глубину моря, но и сваривать металл, сверлить стекло и дубить кожи.

В.В. Шулейкин в 1932 году обнаружил явление, которое он назвал "голосом моря".

Взаимодействие сильного ветра и морских волн создаёт сильные инфразвуковые волны, которые распространяются со скоростью звука, т.е. значительно быстрее циклона. Они бегут по морским волнам, усиливаясь. Этот инфразвук может служить ранним предвестником бури, шторма или циклона.

Ультразвуковым волнам было найдено больше применения во многих областях человеческой деятельности: в промышленности, в медицине, в быту, ультразвук использовали для бурения нефтяных скважин и т.д. От искусственных источников можно получить ультразвук интенсивностью в несколько сотен Вт/см².

Ультразвуковая обработка.

Ультразвуковые волны так же используют в станках для обработки хрупких и твёрдых материалов.

Основа станка – преобразователь энергии высокочастотных колебаний электрического тока. Ток поступает на обмотку преобразователя от электронного генератора и превращается в энергию механических (ультразвуковых) колебаний той же частоты. К преобразователю присоединён специальный волновод, который, увеличивая амплитуду колебаний, передаёт их к инструменту такой формы, какой нужно получить отверстие. Инструмент прижимают к материалу, в котором надо получить отверстие, а к месту обработки подводят зёрна абразива размером меньше 100 мкм, смешанные с водой. Эти зёрна попадают между инструментом и материалом, и инструмент, как отбойный молоток, вбивает их в материал. Если материал хрупкий, то зёрна абразива откалывают от него микрочастицы размером 1 – 5 мкм. Но это не так мало! Частиц абразива под инструментом сотни и инструмент наносит более 20 000 ударов в одну секунду, поэтому процесс обработки проходит достаточно быстро, и отверстие диаметром 20 – 30 мм в стекле толщиной 10 – 15 мм можно сделать примерно за одну минуту.

Библиография

1. Брюханов А.В., Пустовалов Г.Е., Рыдник В. И.
Толковый физический словарь. Основные термины: около 3600 терминов. -
М.: Рус. яз., 1987.
2. Вилли К.
Биология.-
М.: Мир, 1968.
3. Дубровский И. М., Егоров Б. В., Рябошапка К.П.
Справочник по физике. -
Киев: Наукова думка, 1986.
4. Кикоин И.К., Кикоин А.К.
Физика: Учеб. для 9 кл. сред. шк. -
3-е изд. - М.: Просвещение, 1994.
5. Кошкин Н. И., Ширкевич М.Г.
Справочник по элементарной физике
10-е изд., М.: Наука, 1988.
6. Льюис М.
История физики. -
М.: Мир, 1970.
8. Мясников Л.Л.
Неслышимый звук.
9. Пирс Дж.
Почти всё о волнах.-
М.: Мир, 1976.
10. Разговор муравьев.
"Наука и жизнь", 1978, No.1, стр. 141
11. Храмов Ю. А.
Физики: Биографический справочник. -
2-е изд. - М.: Наука, 1983.
12. Элементарный учебник физики:
Учеб. пособие. В 3 т. / Под ред. Г.С.
Ландсберга:
Т. III. Колебания и волны. Оптика. Атомная и
ядерная
физика.
11-е изд.--М.: Наука. Физматлит, 1995.
13. Энциклопедический словарь юного
техника
/ Сост. Б. В. Зубков С. В. Чумаков. -
2-е изд., М.: Педагогика, 1987.