

УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ЛУГАНСКОЙ ОБЛАСТНОЙ
ГОСУДАРСТВЕННОЙ АДМИНИСТРАЦИИ
КОММУНАЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ЛУГАНСКАЯ ОБЛАСТНАЯ МАЛАЯ
АКАДЕМИЯ НАУК УЧАЩЕЙСЯ МОЛОДЕЖИ»

Алексей Сергеевич Воронкин

**ЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ
ВВЕДЕНИЕ В АКУСТИКУ
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

ЛУГАНСК – 2012

УДК 534.2+534.5

ББК 22.3я73

В753

Автор:

Воронкин А.С. — старший преподаватель кафедры музыкального искусства эстрады Луганской государственной академии культуры и искусств; член Украинского физического общества; руководитель секции «Экспериментальная физика» коммунального учреждения «Луганская областная малая академия наук учащейся молодежи».

Рецензенты:

П.И. Голубничий — Заслуженный деятель науки и техники Украины, заведующий кафедрой физики Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля, доктор физико-математических наук, профессор;

В.Н. Кравченко — доцент кафедры экспериментальной физики физического факультета Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, исполнительный секретарь бюро координационного совета украинского физического общества, кандидат физико-математических наук, доцент.

Рекомендовано

**научно-методическим советом Национального центра
«Малая академия наук Украины»
(протокол №2 от 26.11.2011 г.)**

В753

Воронкин А.С. Линейные колебания и волны: Введение в акустику: уч. пособ. / А.С. Воронкин; коммунальное учреждение «Луганская областная малая академия наук учащейся молодежи» — Луганськ: СПД Резніков В.С., 2012. — 224 с. : ил. 136, табл. 6, библиогр. 93 назв.

ISBN 978-617-509-244-6

Учебное пособие «Линейные колебания и волны. Введение в акустику» написано в соответствии с действующей программой секции «Экспериментальная физика» коммунального учреждения «Луганская областная малая академия наук учащейся молодежи». В пособии рассматриваются фундаментальные вопросы, расширяющие и углубляющие тему базовой программы средней школы по изучению колебательных и волновых процессов.

Будет полезным для учащихся старших классов общеобразовательных школ всех типов, занимающихся научно-исследовательской работой, абитуриентов, а также слушателей подготовительных отделений ВУЗов.

УДК 534.2+534.5

ББК 22.3я73

© Воронкин А.С., 2012

© ЛОМАНУМ, 2012

© СПД Резніков В.С., 2012

ISBN 978-617-509-244-6

ПРЕДИСЛОВИЕ

Существует деление физики на механику, акустику, оптику, молекулярную физику, электронику и т.п. Такое деление сложилось исторически — каждый раздел изучает качественно разные (в определенной степени) формы движения материи. Значительную роль в этом сыграло то, что эти формы движения воспринимаются разными органами чувств. Поэтому они воспринимаются как разные явления.

Колебательные процессы широко распространены в природе и находят применение во многих практических приложениях. Колеблются маятники часов, грузы на пружинах, ветки деревьев, наше сердце и т.п. Широко распространены электромагнитные колебания. Наконец, возможно, реализуется грандиозный колебательный процесс: периодически расширяется и сжимается наша Вселенная. В физике под колебаниями понимают движения или состояния, обладающие той или иной степенью повторяемости. Колебания свойственны всем явлениям природы. Колебания могут распространяться в пространстве, в этом случае мы имеем дело с волнами.

Волны — это изменение состояния среды (возмущения), распространяющиеся в этой среде и несущие с собой энергию. Наиболее часто встречающиеся виды волн — упругие, поверхностные, электромагнитные. Частным случаем упругих волн является звук и сейсмические волны. Разновидностью электромагнитных волн служат радиоволны, свет, рентгеновские лучи.

Физическая сущность колебаний — механических, электрических, магнитных, оптических, акустических, химических, биологических и др. — различна, но законы, которым они подчиняются, в главном совпадают. Например, колебания тока в электрической цепи и колебания математического маятника могут описываться одинаковыми уравнениями. Отсюда следует целесообразность применения единого подхода к изучению колебаний различной физической природы. Общими оказываются и уравнения, описывающие развитие коле-

бательных процессов в пространстве с течением времени, т.е. процесс распространения волн. Теорией акустических волн занимается линейная и нелинейная акустика. Прикладные области науки и техники акустических волн разнообразны: акустоэлектроника, электроакустика, гидроакустика, кристаллоакустика, атмосферная акустика, физиологическая акустика, музыкальная акустика, архитектурная акустика, акустика в медицине, на производстве и т.д.

В пособие включен базовый материал по линейным колебаниям и волнам. Изучение колебаний начинается с изучения механических колебаний в различных механических колебательных системах. Использование аналогий позволяет изучать акустические колебания с точки зрения общих признаков колебаний. Для целостного уяснения физических понятий и законов на первый план поставлено детальное описание экспериментов и демонстраций — это обеспечивает не только формирование необходимых практических умений и исследовательских навыков, но и способствует развитию личного желания повторить эксперимент, что эффективно реализует деятельностный подход в изучении физики. В приложениях приведены справочные данные по физике, акустике и математике.

При написании пособия в его основу положены:

- конспекты лекций, прочитанные автором слушателям Луганской областной малой академии наук в 2008/2009 уч.г. и 2011/2012 уч.г.;
- конспекты лекций, прочитанные автором слушателям подготовительного отделения Луганской государственной академии культуры и искусств в 2009–2012 гг.;
- материалы учебного пособия для абитуриентов и слушателей подготовительных отделений ВУЗов «Введение в физику звука», изданного в 2012 г. по результатам авторского открытого дистанционного курса «Введение в физику звука» (2011 г.);
- отдельные литературные источники, приведенные в библиографическом списке в конце книги. Большинство задач для самостоятельного решения включено в переработанном виде из различных сборников по физике.

Учебное пособие рассчитано на весьма широкий круг читателей, интересующихся физическими основами колебаний: учащихся старших классов средних школ, средних специальных учебных заведений и слушателей подготовительных отделений ВУЗов. Математические знания, необходимые для пользования книгой, не превышают курса математики средних учебных заведений. Соответствует интересам секции экспериментальной физики ЛОМАНУМ.

Для облегчения изучения книги в оформлении использованы следующие пиктограммы:

	акцентирование внимания на ключевых определениях, которые необходимо знать (запомнить);
	дополнительный материал и интересные факты, которые при первом чтении можно пропустить;
	дополнительные вопросы, иллюстрирующие неожиданную и не всегда однозначную связь физики с некоторыми проблемами жизни.

К учебному пособию прилагается компакт-диск с электронной версией изданного материала.

І. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ АКУСТИКИ

История развития акустики с античных времен до нашего времени

Акустика как учение о звуке (от греч. *acustikos* — слуховой) — одна из самых древних областей знания, зародившаяся из потребности дать объяснение явлениям слуха и речи и в особенности музыкальным звукам и инструментам. Трудно отдельно анализировать историю развития акустики, т.к. ее становление происходило в тесном взаимодействии со многими другими научными направлениями. Поэтому, не претендуя на полноту изложения, остановимся на значимых этапах становления физической акустики в рамках развития теории колебаний и волн — выделим в развитии акустики 3 периода.

1.1. I-й период истории развития акустики

I-й период — начиная с древней истории и до конца XVII в., характеризуется исследованиями системы музыкальных тонов и их источников (струны, трубы).

Еще в глубокой древности было замечено, что при ударе двух тел возникает звук. Древнегреческий философ и математик Пифагор (VI в. до н.э.) отмечал, что существует связь между высотой тона и длиной струны. В своих опытах он использовал монохорд — струну, закрепленную на одном конце и перекинутую через острие ножа резонансного ящика, так что к ней можно было подвешивать гири, создавая различные натяжения (рис. 1.1). Вдоль струны двигалась подвижная кобылка, дававшая возможность делить струну на определенные отрезки. Для удобства под струной чертили шкалу.

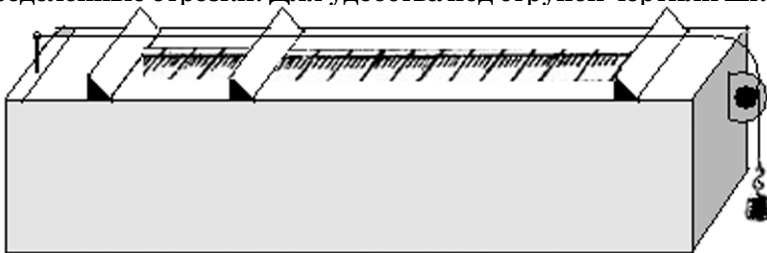


Рис. 1.1. Изображение монохорда

В те времена было уже известно об ощущениях, вызываемых различными комбинациями тонов: одни из таких комбинаций были приятными, другие — нестройными (диссолирующими). Пифагор доказал, что особенно гармоничные комбинации тонов создают струны с одинаковым диаметром и натяжением, длины которых находятся в отношении 2:1 (говорят, что два таких тона отличаются на интервал в одну октаву). В случае духовых инструментов отличие тонов на такой же интервал получается при отношении длин столба воздуха 2:1. Интервал, известный под названием квинты, получается при отношении 3:2, а интервал, известный под названием кварты, получается при отношении 4:3. Деление струны на пять частей не рассматривалось, а все остальные звуковые отношения выводились из выше найденных числовых определений. Пифагор ввел математическое объяснение основ гармонии и создал первый музыкальный строй, в основе которого лежала квинта.

Существует легенда, согласно которой Пифагор, проходя мимо кузницы, услышал гармоничное звучание металлических болванок, которое возникало при ударе кузнечных молотов. Впоследствии Пифагор, якобы, открыл связь звучания с массой молотов. Однако подробно это экспериментальное исследование было проведено и описано учеником Пифагора, Гиппасом. Изготовив четыре медных диска различной толщины, но одного диаметра, он установил соотношения между массой дисков и музыкальными тонами. Таким образом, опыт Гиппаса следует трактовать как еще один метод установления музыкальных отношений.

Знаменитый древнегреческий врач Гиппократ (около 400 лет до н.э.) дал описание анатомии слухового органа и пришел к выводу, что звук проникает в мозг через барабанную перепонку.

Древнегреческий философ Аристотель (IV в. до н.э.) объяснял эхо отражением от препятствий, полагая, что звучащее тело создает попеременное сжатие и разрежение воздуха. Последователи Аристотеля высказывали предположения, что слух «зависит от проникновения звуков в мозг через движение воздуха» (древнегреческий естествоиспытатель, теоретик музыки Теоф-

раст). Ученик Аристотеля Аристоксен (IV в. до н.э.), исследуя природу пения и речи, установил между ними типологическое различие в колебаниях высоты тона и определил минимальный для слуха интервал высоты звука величиной в диесу (четверть тона).

Древнегреческий математик Эвклид (III в. до н.э.) сформулировал понятия созвучия и диссонанса. Консонанс двух тонов, говорил он, состоит в смешении их, диссонанс же, наоборот, есть неспособность этих звуков смешиваться — почему они и становятся для уха неприятными.

Попытка создания волновой теории звука по аналогии с закономерностями распространения волн на поверхности воды была предпринята в I в. до н.э. инженером из Рима М. Витрувиусом.

В то же время римский поэт и философ Тит Лукреций Кар уже постулировал модель слуха, согласно которой различные тоны воспринимаются небольшими крупницами «песка» во внутреннем ухе. Можно считать, что модель Лукреция как бы заложила основы «корпускулярной теории звука», весьма забавно предугадав открытие фононов современной квантовой акустики. В своей книге «О природе вещей» Лукреций так рассуждал о речи и слухе:

«Слышится, прежде всего, всякий звук или голос, как только,
В уши проникнув, своим они телом нам чувство затронут,
Ибо и голос, и звук непременно должны быть телесны,
Если способны они приводить наши чувства в движенье.
Голос, к тому же, гортань нам часто скребёт, и наружу
Крик исходя, все пути горловые шершавит немало.
Ибо, лишь в узкую щель, накопляясь большою толпою,
Первоначала начнут голосов вырываться наружу,
Выход, конечно, в уста, заполняемый ими, скребётся.
...Также ты знаешь, какой причиняет телу убыток,
Сколько и нервов берёт, сколько сил у людей отнимает
Беспрерывная речь, от сиянья зари восходящей
Произносимая вплоть до глубокого сумрака ночи,
Если, к тому же, она произносится голосом громким.
Значит, признать мы должны непременно, что голос телесен,
Если от долгих речей убывает часть нашего тела.

...Дальше, когда из глубин вытесняются нашего тела
Звуки, которые мы через рот выпускаем наружу,
Гибкий, искусный язык на слова разделяет их быстро,
С помощью также и губ, принимающих должную форму.
...Часто бывает и так, что в народном собрании до слуха
Всех долетает одно глашатая громкое слово:
Голос единственный здесь дробится на много отдельных
Вдруг, потому что идёт, по отдельным ушам разбегаясь,
Звучную форму словам, направляемым в них, придавая,
Та же часть голосов, что до самых ушей не доходит,
Попусту мимо идёт и, рассеявшись в воздухе, гибнет;
Часть же другая, в пути отскочивши от твёрдых предметов,
Звук отдаёт и порой морочит подобием слова.
...Видеть пришлось мне места, где раз шесть или семь отдаётся
Изданный звук, где холмы от холмов отражают немедля
Слово за словом, на них отвечая и вторя друг другу.
Эти места, по словам в соседстве живущего люда,
Служат пристанищем Нимф, козлоногих Сатиров и Фавнов,
Это они, говорят, затевают веселье и ночью
Шумно играют везде, тишину и покой нарушая...
...Я продолжаю. Тебе удивляться нимало не надо,
Что сквозь преграды, глазам ничего не дающие видеть,
Звуки доходят до нас и касаются нашего слуха.
Часто мы видим, идёт разговор за затворенной дверью,
Ибо, действительно, там по извилистым голос отверствиям
Может свободно идти, где для образов нет прохода:
Ведь расщепятся они, если эти отверствия не прямы,
Как у стекла, где проплыть может призрак любой без препятствий.
Кроме того, разлетается голос по всем направлениям,
Ибо одни из других голоса возникают: лишь только
Голос раздался один, как дробится сейчас же на много
Так же, как искры огня рассыпаются в новые искры.
Так в потаённых местах голоса постоянно роятся,
И раздаётся их звук, пробуждая окрестности всюду...».

Как отметил доктор физико-математических наук, профессор М. Р. Шрёдер в статье «Модели слуха»: «Хотя некоторые идеи Лукреция представляются сейчас фантастическими, в

его произведении можно распознать те, которые сегодня формируют основы нашего понимания звука: энергия, реверберация, дифракция и даже принцип Гюйгенса».

Заметим, что до X века музыка была гомофонной (т.е. одногласной). Пение было только в октаву, как естественное следствие совместного исполнения одной и той же мелодии мужчинами, женщинами и детьми.

В эпоху Возрождения итальянский ученый, изобретатель и художник Леонардо да Винчи формулирует принцип независимости распространения звуковых волн от различных источников.

Итальянский анатом и врач Б. Евстахий в своей работе «Письма об органе слуха», изданной в 1563 г., дал подробное описание органа слуха человека. Евстахий открыл соединительный канал между внутренним ухом и носоглоточным пространством (так называемая евстахиева труба).

В 1582 г. итальянский физик Г. Галилей открывает закон изохронности колебаний маятника (независимость периода колебаний маятника от амплитуды колебаний и массы груза). В 1602 г. Галилей показал, что колебания маятника могут нарастать под действием даже малой силы, вроде дуновения воздуха, если это действие регулярно повторяется в момент, когда груз маятника проходит нижнейшее положение в каком-нибудь одном направлении. Другими словами, груз маятника резонирует на действие периодической силы, частота которой совпадает с частотой собственных колебаний маятника. Руководствуясь этими представлениями, ученый прикрепил ряд тонких щетинок различной длины к боковой стенке клавикордов и увидел, что при звучании разных тонов колебались разные щетинки. Галилей, таким образом, заключил, что музыкальные тоны имеют свои собственные частоты колебаний. Взяв бокал и погрузив его почти по самый край в большой резервуар с водой, Галилей заставил бокал издавать звук прикосновением пальца к его кромке, при этом вокруг бокала появлялась радиальная рябь. В зависимости от тона, издаваемого бокалом, рябь была более или менее мелкой.

В 1614–1618 гг. голландский ученый И. Бекман, изучая колебания струны, пришел к выводу об их изохронности, моти-

вируя его тем, что затухание звука, связанное с уменьшением амплитуды колебаний струны, не сопровождается изменением тона ее звука. Он также установил, что частота тона обратно пропорциональна длине струны. Исследования И. Бекмана не были опубликованы и стали известны только благодаря французскому ученому М. Мерсенну. В 1625 г. ученый обнаружил зависимость между частотой основного тона, натяжением, площадью поперечного сечения и длиной струны, а также открыл, что струна в большинстве случаев одновременно с основным тоном издает гармонические обертоны. В 1636 г. М. Мерсенн опубликовал работу «Книга о созвучиях».

В 1638 г. Г. Галилей устанавливает частоту как физический коррелят ощущения высоты тона, характеризует относительную высоту двух звуков посредством отношения их частот. В 1641 г. для количественного измерения промежутков времени Галилей предлагает использовать маятники в часах. К сожалению, в 1642 г. ученый умер так и не реализовав своей идеи, но успев передать чертежи своим последователям с наказом изготовить часы, который, однако, выполнен не был.

В 1643–1644 гг. итальянский математик и физик Э. Торричелли открывает атмосферное давление, нанеся тем самым удар по господствующему аристотелевскому утверждению о том, что «природа боится пустоты». По его поручению итальянский физик Вивиани наполнил ртутью длинную стеклянную трубку, закрытую с одного конца, и опустил ее свободным концом в чашку с ртутью. Обнаружилось, что при достаточной длине трубки уровень ртути в ней понижался, а над поверхностью ртути образовывалась пустота. Торричелли объяснил это явление тем, что давление атмосферы, действующее на поверхность ртути в чашке, уравнивается весом столба ртути.

В 1650–1651 гг. немецкий физик О. Герике изобрёл вакуумную откачку (насос). Поместив колокол в сосуд, из которого можно было откачивать воздух, и приспособив часовой механизм так, чтобы колокол звонил автоматически, он отчетливо наблюдал ослабление звука по мере уменьшения давления воздуха в сосуде. Для ответа на вопрос может ли звук распространяться в других средах, Герике провел еще один познавательный эксперимент. Он заставлял колокол звучать каждый

раз, когда рыбе в озере бросали хлеб. Затем он звонил в колокол, когда хлеб не бросали, и заметил, что рыба при этом все равно появлялась. Несмотря на эксперимент, проводимость звука жидкостями еще долгое время оспаривалась из-за мнимой их несжимаемости.

Вслед за Герике опыты с разреженным воздухом начали проводить и другие ученые. Так, в 1660 г. английский физик Р. Бойль разрабатывает оригинальную конструкцию насоса и своим экспериментом подтверждает закон уменьшения интенсивности звука при разрежении воздуха, тем самым демонстрируя важную связь между источником звука и упругостью среды. Пустое пространство Бойль решает назвать вакуумом, что по-латыни означает «пустой».

В 1657 г. Х. Гюйгенс получил патент на конструкцию маятниковых часов — тех самых, которые в последние годы жизни пытался создать Галилей. В историю маятниковые часы так и вошли под двойным именем: Галилея–Гюйгенса.

В 1660 г. английский ученый Р. Гук устанавливает на опыте пропорциональность между деформацией тела и связанным с ней напряжением — основной закон теории упругости.

1.2. II-й период истории развития акустики

II-й период охватывает два столетия — от создания основ механики И. Ньютоном (конец XVII в.) и до начала XX в. В этот период акустика развивается как раздел механики. Создаётся общая теория механических колебаний, излучения и распространения упругих волн в средах, разрабатываются методы измерения характеристик звука (звукового давления, импульса, энергии и потока энергии звуковых волн, скорости распространения звука).

В 1678–1690 гг. Х. Гюйгенс открывает важнейший принцип волнового движения (названный впоследствии его именем). Волновая модель Гюйгенса была подтверждена различными опытами, проведенными в начале XIX века.

В 1683 г. французский ученый Ж. Дюверней в труде «Трактат об органе слуха» точно описывает строение костного лабиринта и среднего уха. Его рисунки строения улитки были признаны классическими и использовались во многих странах

для подготовки врачей. Совместно с французским физиком Э. Мариоттом Ж. Дюверней делает попытку объяснить функциональное назначение различных анатомических структур уха и создать теорию слуха.

В 1700 г. итальянский физик А. Вольта прохождением электрического тока через внутреннее ухо вызывает у себя шумы в ушах. «Я ощутил звук или скорее шум в обоих ушах, характер которого я не мог более точно определить», — сообщал Вольта в одном из своих писем. Аналогичные опыты были проведены в 30-х годах XX века группой Санкт-Петербургских ученых под руководством Г.В. Гершуни. Благодаря чему в 1957 г. была сделана первая попытка непосредственного вживления электрода в слуховой нерв.

Английский физик И. Ньютон в своем труде «Математические начала натуральной философии» рассматривает звук как процесс распространения импульсов давления в среде и рассчитывает исходя из теоретических соображений значение скорости звука в воздухе. Полагая, что скорость звука должна быть равна корню квадратному из значения атмосферного давления, деленного на плотность воздуха ($v = \sqrt{P/\rho}$), Ньютон для нормальных условий получает 279 м/с. Результат не оправдал ожиданий — расхождение между теоретическим и экспериментальными значениями превышает допустимую погрешность, что указывает на некорректность формулы. Скорость звука в воздухе, измеренная членами Парижской Академии наук позже — в 1738 г., составила 332 м/с при 0°C. Ошибку в ньютоновских расчетах удалось найти французскому физiku, математику и астроному П.С. Лапласу в 1816 г. Используя закон Бойля–Марриотта (о неизменности произведения объема на давление при постоянной температуре), Ньютон полагал, что колебания частиц в атмосфере происходят без изменения температуры, т.е. в изотермических условиях. Однако при движении звуковой волны в воздухе возникают области сжатия и разрежения, где воздух соответственно нагревается (а значит, скорость молекул возрастает) и охлаждается (т.е. скорость молекул уменьшается). Лаплас показал, что в формулу Ньютона необходимо ввести удельную теплоемкость газа γ , таким образом, правильная формула для скорости рас-

пространения звука в газе должна иметь вид $v = \sqrt{\gamma p / \rho}$. Поскольку γ для воздуха близко к 1,40 — расхождение, мучавшее Ньютона, почти исчезает.

В 1711 г. Дж. Шор разработал первый камертон и предложил его использовать для исследования слуха.

Целый ряд выдающихся открытий в области акустики сделал французский математик Ж. Совер. Он первым предложил точный способ определения числа колебаний звука при помощи биений. Впервые, основываясь на исследованиях М. Мерсенна, научно объяснил феномен обертонов, в связи с чем ввел понятие «основной тон». В 1701 г. Ж. Совер, рассматривая колебания струны, ввел понятие о стационарных состояниях или стоячих волнах, как мы их теперь называем. На своих лекциях в Сорбоне он впервые использовал термин «акустика» для обозначения физики звука как науки. Ж. Совер первым попытался определить частотные границы человеческого слуха — по его данным, опубликованным в Трудах Парижской академии наук в 1707 г., человек способен слышать звуки частотой от 25 до 12 800 Гц. Спустя почти 100 лет, в 1802 году, немецкий физик Э. Хладни привел более точные данные и указал, что верхняя граница слышимых звуков соответствует ~ 20 000 Гц.

Работы крупнейших ученых-швейцарцев Л. Эйлера и Д. Бернулли, француза Ж. Даламбера и итальянца Ж. Лагранжа позволили разработать теорию колебаний струн, стержней и пластинок, объяснить происхождение обертонов. В 1747–1748 гг. между ними возник спор при решении задачи о колебании струны. Даламбер, первым решивший уравнение струны, считал, что начальное положение должно описываться функцией с единым аналитическим выражением (еще не было ясно, что это значит). Эйлер же настаивал, что эта функция может быть совершенно произвольной (как бы мы сказали, непрерывной), и это был первый случай, когда в анализе появились функции общего вида, задаваемые графиками, а не аналитическими выражениями. Наконец, Бернулли рассматривал гармонические колебания с разными частотами и утверждал, что произвольное колебание раскладывается в бесконечную суперпозицию (сумму) гармонических колеба-

ний, во что не верили ни Даламбер, ни Эйлер. Лагранж придумывает остроумный прием, рассматривая струну постоянной плотности как предел невесомых струн с равномерно распределенными одинаковыми грузами в конечном числе. Вопрос о колебаниях такой струны с грузами рассматривается элементарно. Делая предельный переход, Лагранж подтверждает мнение Эйлера. Вскоре Лагранж имел еще одну возможность убедиться в том, насколько прав был Эйлер, настаивая на необходимости пользоваться в анализе общими (неаналитическими) функциями: при изучении движения воздуха в трубах постоянного сечения возникали кривые, которые в некоторой точке превращаются в прямые. Те же рассуждения с предельным переходом убедили Лагранжа в правоте Бернулли — он был близок к доказательству возможности разложить произвольную функцию по гармоникам (в ряд Фурье), но точного доказательства нужно было ждать почти сорок лет. В конце XVIII в. Лагранж в своем замечательном труде «Аналитическая механика» создает мощный математический аппарат в виде хорошо известных теперь уравнений движения в обобщенных координатах. Рассмотрев с его помощью некоторые задачи теории колебаний, приводящие к интегрированию линейных дифференциальных уравнений, он тем самым заложил основы линейной теории колебаний.

Немецкий органист и музыкальный теоретик Г.А. Зорге в Гамбурге (1744 г.), итальянский скрипач и композитор Дж. Тартини в Падуе (1754 г.) и Ромье в Монпелье (1753 г.) впервые обнаружили существование комбинационных тонов, которые вырабатывает само ухо из одновременно воспроизводимых двух тонов.

Немецкий учёный Э. Хладни впервые экспериментально исследует формы звуковых колебаний, совершаемых различными звучащими телами-мембранами, пластинами, стержнями, камертонами и колоколами. Хладни открывает существование продольных и крутильных колебаний струн и стержней, а также изобретает оригинальные музыкальные инструменты, названные им эуфоном (1790–1791 гг.) и клавицилиндром (1800 г.). Эуфон представлял собой набор небольших прямых стеклянных трубочек, соединенных с кривыми стержнями

ми. Звучание вызывалось вибрацией от продольного трения увлажненными пальцами по трубочкам. Усовершенствованный инструмент со временем был дополнен клавиатурой и назван клавицилиндром. В феврале 1809 г. во дворце Тюильри, официальной резиденции императора Наполеона Бонапарта, в присутствии императора с супругой и его матери, ученых Лапласа и Бертоле и других зрителей Хладни демонстрирует свои знаменитые песочные фигуры (так называемые фигуры Хладни). Уже тогда насчитывалось более 130 фигур на квадратных и круглых пластинках (со временем это число возросло). Наполеон был настолько восхищен увиденным, что на следующее утро распорядился выдать Хладни 6000 франков для перевода на французский язык и публикации его книги «Акустика», изданной ранее (в 1802 г.) на немецком. Это издание Хладни посвящает императору (рис. 1.2).

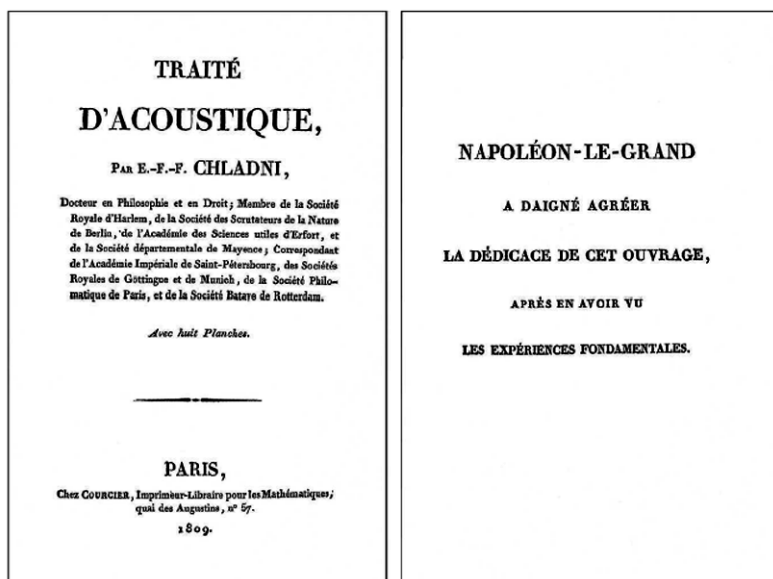


Рис. 1.2. Французский перевод немецкой книги Хладни «Акустика»: титульный лист (а), посвящение (б)

За разработку математической теории колебаний пластин и теоретическое описание фигур Хладни Наполеон устанавливает приз в 3000 франков. В 1816 г. Парижской академией наук

был присужден приз С. Жермен за существенный прогресс в решении этой проблемы, хотя предложенное ей уравнение для изгибных колебаний пластин было не совсем точным (Лагранж указал, как исправить ошибку).

В 1809 г. французский учёный Ж.Б. Био проводит измерения скорости звука в твёрдых телах.

В 1810 г. С. Пуассон вводит характеристику упругости — отношение продольного растяжения к поперечному сжатию (коэффициент Пуассона).

Английский ученый Т. Юнг исследует явления дифракции и интерференции, а французский физик О. Френель, объяснив эти явления, в 1815–1816 гг. дополняет принцип Гюйгенса представлением о когерентности элементарных волн и их интерференции (принцип Гюйгенса — Френеля).

В 1827 г. Ж.Д. Колладон и Я.Ф. Штурм дали убедительное доказательство распространения звука в воде, измерив скорость распространения звука в Женевском озере (1435 м/с).

Французский учёный Ж. Фурье разрабатывает математический метод разложения сложных колебательных процессов на простые гармонические составляющие.

В 1829 г. французским математиком и физиком С.Д. Пуассоном впервые была рассмотрена теория колебаний гибкой мембраны.

Русский ученый М.В. Остроградский решает некоторые задачи о колебаниях, приводящих к нелинейным дифференциальным уравнениям (общей нелинейной теории колебаний в то время так и не было создано).

В 1842 г. австрийский физик Х. Доплер устанавливает закон изменения частоты волны при движении источника относительно наблюдателя.

В том же 1842 г. немецкий физик В. Вертгейм, проводя опыты по исследованию скорости звука, формулирует идею записи звука на поверхность диска. Правда, в своей идее, он полагает круговые, а не спиральные дорожки, которые использовались позже в граммофонных пластинках.

В 1843 г. немецкий физик Г.С. Ом (автор знаменитого в электротехнике «закона Ома») выдвинул оригинальную теорию восприятия звука (акустический «закон Ома»), согласно которой воспринимаемый тембр звука зависит исключительно

от амплитудного спектра звука и не зависит от фазовых углов его частотных составляющих.

В 1845 г. голландский ученый Х. Бейс-Баллот решил проверить гипотезу Доплера. Он нанял паровоз с грузовой платформой, посадил на платформу двух трубачей и попросил их держать ноту соль (два трубача были нужны для того, чтобы один из них мог набирать воздух, пока другой тянет ноту, таким образом, чтоб звук не прерывался). На перроне одного полустанка между Утрехтом и Амстердамом Бейс-Баллот разместил нескольких музыкантов без инструментов, но с абсолютным музыкальным слухом. После чего паровоз стал с разной скоростью таскать платформу с трубачами мимо перрона со слушателями, а те отмечали, какую ноту они слышат. Затем наблюдателей заставили ездить, а трубачи играли, стоя на перроне. В результате этих опытов был экспериментально подтвержден эффект Доплера для акустических волн.

Французский ученый Г. Вертгейм в 1848 г. определяет частоты стоячих волн в столбах жидкости и экспериментально изучает колебания пластин и стержней.

В 1851 г. итальянский анатом А. Корти обнаружил большое число микроскопических волокон (чувствительный эпителий) в стенке улитки внутреннего уха (эта часть органа слуха была названа в его честь кортиевым органом).

В 1855 г. французский физик Ж. А. Лиссажу разработал оптический метод сложения колебаний в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В 1857 г. ученый представил широкой публике аппарат для демонстрации «фигур Лиссажу»: отклонение светового луча колебаниями двух независимых источников создавало на экране сложные и завораживающие картинки (рис. 1.3).

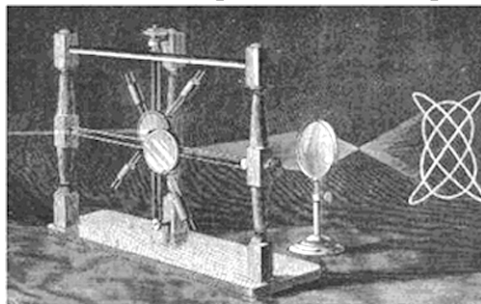


Рис. 1.3. Оптический метод сложения колебаний Лиссажу

В 1857 г. Л. Скотт изобретает устройство, позволяющее записывать звук — фоноавтограф. Принцип действия его был очень прост: игла, которой передавались колебания звуковой диафрагмы, вычерчивала кривую на поверхности вращавшегося вручную стеклянного цилиндра, покрытого слоем сажи (рис. 1.4). Устройство позволяло визуализировать звуковые колебания, однако не предлагало способа их воспроизведения. В дальнейшем конструкция фоноавтографа была взята за основу для создания фонографа.

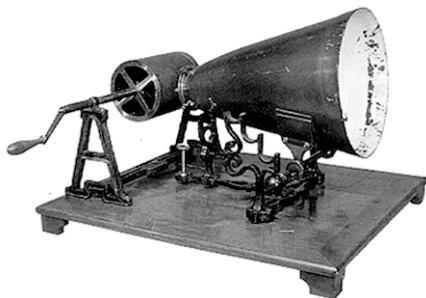


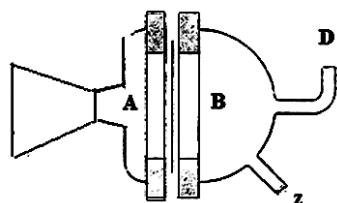
Рис. 1.4. Фоноавтограф

В 1858 г. С. Алисон на основе экспериментальных измерений предположил, что локализация источников звука производится человеком по разности интенсивностей звуковых сигналов в ушах.

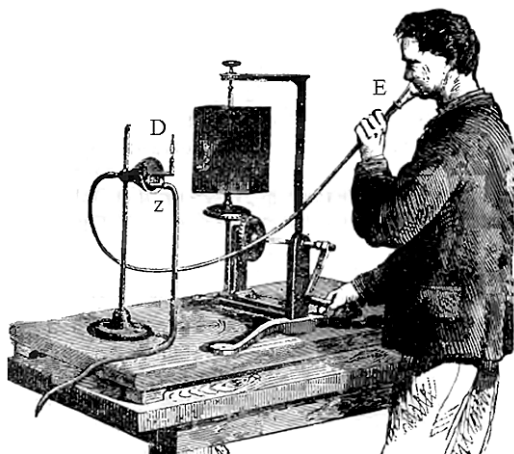
В 1859 г. П. Рийке продемонстрировал звучание вертикально расположенной трубы с двумя открытыми концами («поющая» труба Рийке). Нагретый раскаленной сеткой воздух в основании трубы поднимался вверх, благодаря чему происходило самовозбуждение звуковых колебаний на частоте основного тона трубы. При закрывании верхнего конца звучание прекращалось.

В 1862 г. немецкий физик Р. Кениг разработал устройство, предназначенное для наблюдения формы звуковых колебаний (манометрические огоньки Кенига). Главной частью устройства была «манометрическая капсула», представляющая собой полую коробочку, разделенную по середине тонкой каучуковой перегородкой (рис. 1.5, а). С одной стороны от перегородки находилась камера А с трубочкой, к которой прикреплен раструб Е для принятия звука, а с другой стороны

камера *B* с маленькой газовой горелкой *D* и трубкой *z* для подвода газа (рис. 1.5, б).



a



б

Рис. 1.5. Манометрическая горелка Кенига

Газ, выходящий с горелки *D*, поджигался. Перед горелкой размещалась система оптико-механической развертки — четырехплоскостное зеркало, приводившееся вручную во вращательное движение вокруг своей вертикальной оси (рис. 1.6). При отсутствии звуковых колебаний — язычок пламени горелки спокойно — во вращающемся зеркале можно было наблюдать изображение ровно светящейся полосы. При воздействии звуковых колебаний на упругую перепонку в горящем газе вызывались соответствующие колебания давления, что влияло на форму (ширину и высоту) язычка пламени.

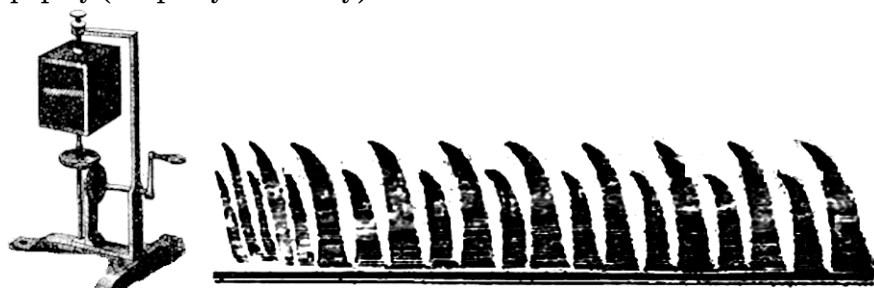


Рис. 1.6. Система оптико-механической развертки изображения

В 1862 г. немецкий физик, врач, физиолог и психолог Г. Гельмгольц выдвинул идею, согласно которой характер звучания музыкального инструмента обусловлен различными пропорциями гармоник в общем звуке. По этой причине, например, тон, издаваемый флейтой, звучит иначе, чем тот же самый тон, взятый на скрипке. Гельмгольц удачно осуществляет синтез сложного звука из простых составляющих: подбором камертонов с резонаторами он искусственно воспроизводит различные гласные разговорной речи. Гельмгольц впервые объяснил возникновение разностных тонов как следствие нелинейной обработки сигналов в слуховой системе. На основе физиологических исследований по анатомии уха и акустического закона Ома Гельмгольц выдвинул резонансную теорию функционирования внутреннего уха, основные положения которой изложены в труде «Учение о слуховых ощущениях как физиологическая основа теории музыки». Ученый для наглядности представил основную (базиллярную) мембрану в виде ряда микроскопических струн (как в пианино), резонирующих на различных частотах за счет того, что у основания улитки струны короткие, а ближе к верхушке — более длинные. Предложенная теория позволила уловить самую суть — частотную избирательность волокон базиллярной мембраны (каждый тон приводит в сильные колебания те волокна, которые находятся с ним в резонансе).

Дальнейшее изучение механических свойств базиллярной мембраны показало, что ей несвойственна, тем не менее, высокая избирательность. Под влиянием звуков в лимфе улитки происходят сложные гидродинамические процессы. Эти наблюдения позволили венгерскому ученому Д. Бекеши в XX веке сформулировать гидродинамическую теорию слуха, называемую также «теорией бегущей волны». Бекеши описал эффект бегущей волны на базиллярной мембране и показал, что расположение нервных рецепторов и степень их активности играют принципиальную роль при определении высоты и громкости звука. «За открытие физических механизмов восприятия раздражения улиткой» в 1961 г. Г. Бекеши был удостоен Нобелевской премии по физиологии и медицине. В своей приветственной речи исследователь из Каролинского

института К. Г. Бернхард сказал: «Бекеши вооружил нас знанием физических процессов, происходящих на всех ключевых участках передачи звука в ухе». Кроме того, добавил он, «открытия Бекеши внесли важнейший вклад в анализ взаимоотношений между механическими и электрическими явлениями в рецепторах, отвечающих за преобразование звука в нервные импульсы».

В 1866 г. немецкий физик А. Кундт предложил способ визуализации стоячих звуковых волн в трубе. В опытах он использовал горизонтально расположенную стеклянную трубку, в которой тонким слоем равномерно были насыпаны мелкие пробковые опилки. В один конец трубки был введён звуковой излучатель, в другой конец трубки свободно входил поршень-отражатель. Изменяя положение отражателя, можно было добиться того, чтобы между излучателем и отражателем устанавливалась стоячая волна. При этом порошок в трубке собирался в кучки, отстоящие друг от друга на одинаковые расстояния, обозначая узлы смещений стоячей волны. Согласно теории интерференции в точках, где разность хода между волнами равна нулю, расположен максимум интенсивности интерференционной картины.

В 1868 г. английский физик Дж. Стокс показал, что струна сама по себе является очень плохим источником излучения. В одной из своих работ Стокс замечает: «Это показывает жизненную важность деки в струнных инструментах. Хотя амплитуда колебаний частиц деки крайне мала сравнительно с амплитудой колебания частиц струны, но поскольку дека представляет собой широкую поверхность, соприкасающуюся с воздухом, она способна возбуждать громкие и звучные колебания, в то время как струна, натянутая абсолютно жестко, возбуждала бы непосредственно в окружающем воздухе колебания настолько малые, что они были бы почти или даже совсем не слышны».

В 1873–1874 гг. русский физик Н.А. Умов опубликовал работы, посвященные развитию важнейшей идеи о движении энергии. Умов вводит понятие плотности потока энергии для упругих волн.

В 1875 г. американский изобретатель А. Белл изготовил первый электрический слуховой аппарат, на основе которого

через год был создан телефон. Появилась возможность более совершенной передачи человеческих голосов и музыкальных звуков посредством электрики.

В 1876 г. А. Мейер описал так называемое явление маскировки одного звука другим, при этом он обратил внимание на различный характер участия в процессах маскировки низко- и высокочастотных звуков.

В 1877 г. американский исследователь Т. Эдисон изобрел фонограф, в котором звук записывался на носителе в форме дорожки с глубиной пропорциональной громкости звука. Звуковая дорожка размещалась по цилиндрической спирали на сменном вращающемся барабане. Основными частями фонографа являются: барабан 1, покрытый оловянной фольгой, и мембрана 2, соединенная с иглой из сапфира (рис. 1.7, а). Звуковая волна, действуя через рупор на мембрану, заставляла иглу колебаться — то сильнее, то слабее вдавливаясь в фольгу. При вращении ручки, барабан (ось которого имела резьбу) не только вращался, но и перемещался в горизонтальном направлении, на фольге при этом возникала винтовая канавка переменной глубины. Чтобы услышать записанный звук, иглу устанавливали в начало канавки и валик вращали еще раз. Впоследствии вращающийся валик в фонографе был заменен плоской круглой пластиной и борозду на ней стали наносить в виде спирали. Так в 1887 г. появился граммофон (рис. 1.7, б).

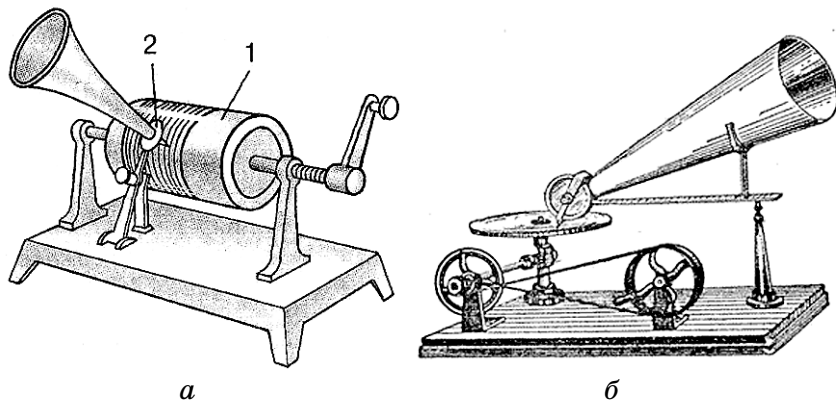


Рис. 1.7. Устройство первого фонографа (а) и первого граммофона (б)

В 1877–1878 гг. английский физик лорд Рэлей (Дж.У. Стретт) издает фундаментальную 2-х томную монографию «Теория звука». Первый том издания посвящен систематическому изложению линейной теории колебаний, а также некоторым нелинейным задачам. Во втором томе даны приложения этой теории непосредственно к вопросам акустики (распространение звуковых волн, музыкальные инструменты). Ученый обобщил не только научные результаты, накопленные в XVIII–XIX вв., но и собственные работы по анализу колебаний струн, мембран, пластин, столбов воздуха и теории распространения колебаний в упругих средах. В своих работах Рэлей провел аналогию между маятником и электрическим томсоновским контуром, разрядником, резонатором, органной трубой, музыкальным инструментом, разгадал секрет поющего пламени и опыта Рийке. Он обнаружил во всем этом многообразии великую колебательную общность.

В 1880 г. французские учёные братья П. Кюри и Ж. Кюри сделали открытие, которое оказалось очень важным для акустики. Они обнаружили, что при оказании давления на кристаллы турмалина, кварца, сахара или сегнетовой соли генерируется электрический заряд. Этот заряд был прямо пропорционален прикладываемой к кристаллу силе. И наоборот, если к граням кристалла приложить переменное электрическое напряжение, то он начнёт колебаться, сжимаясь и разжимаясь. Это явление было названо пьезоэлектричеством (от греческого «пъезо» — «давлю»), а материалы, обладающие такими свойствами, — пьезоэлектриками.

В том же 1880 г. в журнале *Scientific American* вышла статья о новом звукоприемнике — топофоне профессора Майера. Прибор состоял из коромысла, опирающегося на плечи носителя, на котором были установлены конусные концентраторы звукового давления. Акустические сигналы по полым трубкам поступали прямо в уши профессора (рис. 1.8). Как утверждается в статье, с помощью топофона можно было на больших расстояниях обнаруживать объекты, излучающие звук, например, пароход в плохую погоду. Топофоны получили широкое применение во время Первой мировой войны. Назначение было простым — в ночи или тумане выявить источник звука, чтобы определить местоположение противника.



PROFESSOR MAYER'S TOPOPHONE.

Рис. 1.8. Топофон Майера

В 1885 г. Рэлей предсказал и создал теорию поверхностных акустических волн на границе твердых тел, называемых в его честь рэлеевскими волнами. Эти волны составляют сейчас обширную область акустики и сейсмологии.

Благодаря трудам А. Пуанкаре и А.М. Ляпунова, в 1880–1896 гг. была разработана качественная теория обыкновенных дифференциальных уравнений. А. Пуанкаре широко пользовался геометрическими методами, рассматривая решения систем дифференциальных уравнений как кривые в соответствующем пространстве. На основе этого рассмотрения он создал общую теорию поведения решений дифференциальных уравнений 2-го порядка. Геометрическое направление Пуанкаре было развито в 20-х годах XX в. Дж. Биркгофом. А.М. Ляпунов, изучая поведение решений в окрестности состояния равновесия, создал современную теорию устойчивости движения.

В тех же годах немецкий психолог и музыкальный теоретик К. Штумпф изучает психологические проблемы восприятия звуковых тонов и связанные с этими проблемами вопросы теории музыки. В 1883–1890 гг. он издает двухтомный труд «Психология тонов», в котором предлагает ввести для многомерного описания тембра различные субъективные оценки (полнота, яркость, острота и др.).

В 1898 г. в Лейпциге с печати вышла работа швейцарского ученого-акустика А. Жанкьера «Основы музыкальной акустики». Принято считать, что благодаря ей и был введен в науку термин «Музыкальная акустика».

В 1891 г. немецкий музыковед и создатель функциональной теории лада Г. Риман опубликовал труд «Акустика с точки зрения музыкальной науки».

В 1894 г. английский ученый Р. Фруд впервые обнаружил явление кавитации — образование в жидкости полостей (кавитационных пузырьков или каверн), заполненных паром.

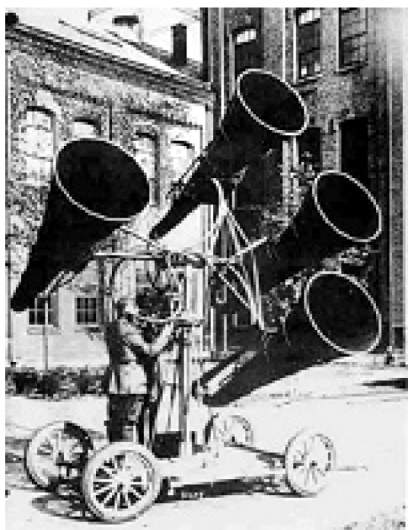
Начало современной науки об архитектурной акустике было положено американским ученым У. Сэбином в 1895 г., когда ректор Гарвардского университета предложил ему выявить акустические помехи в лекционном зале недавно построенного Гарвардского Музея искусств. В результате экспериментов Сэбин уточнил понятие реверберации и количественно выявил связи между геометрическими параметрами помещений и их акустическими характеристиками. Он предположил, что степень ослабления реверберации должна быть пропорциональна степени поглощения звука (в честь его единица поглощения была названа Сэбин). Продолжая исследования двоюродного брата, П. Сэбин в 1929 г. заметил, что влажность воздуха также влияет на время реверберации (более точное исследование этого явления было сделано в 1931 г. В. Кнудсенom), а в 1932 г. издал книгу «Акустика и архитектура».

В развитии линейной теории колебаний большую роль сыграло появление быстроходных машин и средств транспорта. Следует отметить работы А.Н. Крылова по теории качки корабля, вибрациям стволов орудий и другим вопросам прикладной теории колебаний, Б.Б. Голицина по сейсмологии, швейцарского ученого А. Стодолы по колебаниям элементов турбин и т.д.

В 1901 г. немецкий изобретатель Э. Румер запатентовал аппарат, предназначенный для фотографической записи звука. А тремя годами раньше, в 1898 г., датский физик В. Паульсен впервые осуществил магнитную запись звука на стальную проволоку. Принцип Паульсена практически без изменений

был положен в основу звукозаписывающей техники XX-го века. Даже сегодня магнитные носители в виде проволоки могут применяться в случае повышенных эксплуатационных требований к механической и термической нагрузке, например, в «черных ящиках» летательных аппаратов.

Применение авиации в период Первой мировой войны стимулировало создание акустических устройств по обнаружению воздушного вторжения — разрабатывались пассивные локаторы, расцвет которых пришёлся на послевоенные 20–30-е годы (рис. 1.9). В Великобритании были разработаны и построены самые большие пеленгаторы в мире — параболические бетонные зеркала (рис. 1.10). Идея усиления звука при помощи бетонного зеркала принадлежала доктору Такеру, работавшему в экспериментальном отделе противовоздушной обороны ВВС Великобритании.

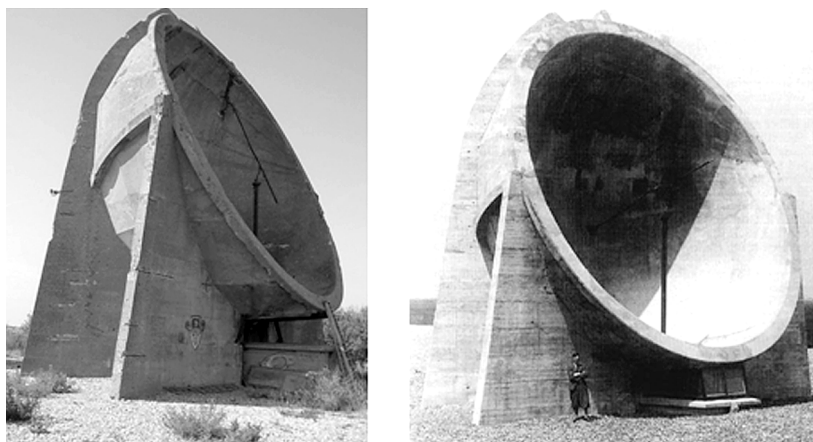


а



б

Рис. 1.9. Акустические локаторы времен Первой мировой войны: четырёхтрубный локатор, Великобритания (а), переносной акустический локатор (б)



*Рис. 1.10. Параболические бетонные локаторы,
Великобритания*

В 1918 г. советский физик и биофизик П.П. Лазарев опубликовал книгу «Ионная теория возбуждения», в которой развивался ряд новых концепций относительно работы слуха, в частности, теоретически выводились законы адаптации слуха и законы восприятия прерывистых звуков, делался ряд важных заключений из теории.

1.3. III-й период истории развития акустики

III-й период в истории акустики начинается с 20-х годов XX в.

К этому времени полностью сформировалась механика и акустика сплошной среды. Создана математическая теория волнового движения, основанная на дифференциальных уравнениях в частных производных. Было решено множество прикладных задач, таких как резонансные колебания пластин, задачи распространения, отражения, интерференции и дифракции волн. Дальнейший прогресс в области акустики теснейшим образом был связан с успехами радиофизики, следовавшими после изобретения электронной лампы, благодаря чему в течение следующих лет все методы экспериментальной акустики были полностью обновлены. Генерация, прием и запись звука, а также все акустические измерения стали проводиться исключительно электрическими методами. Возникло новое направление физики — учение об электроакустических

преобразователях. В акустике развиваются прикладные исследования.

Появляется огромное число работ по теории автоколебаний (большой вклад в разработку этой теории внесла школа физиков, возглавлявшаяся Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси). Ряд ученых изучают автоколебательные процессы в духовых инструментах.

В 1919–1920 гг. русский изобретатель Л.С. Термен разрабатывает совершенно новый музыкальный (электромузыкальный) инструмент, названный впоследствии «Терменвокс» (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Некоторые разновидности терменвокса

Терменвокс представлял собой генератор звуковых колебаний, состоящий из двух высокочастотных генераторов электромагнитных колебаний. Внешне он выглядел как коробка с двумя антеннами. Проводя рукой в электромагнитном поле, рядом с вертикальной антенной, музыкант изменял емкость колебательного контура, благодаря чему в широких пределах изменялась частота звуковых колебаний. При манипуляциях рядом с подковообразной горизонтальной антенной изменялась громкость звука.

В 20-х годах к этим исследованиям добавилась работа голландского ученого Ван-дер-Поля, посвященная электрическим колебаниям в контуре, содержащем электронную лампу, и давшая толчок к развитию ряда методов, составивших основу современной нелинейной теории колебаний.

Также развивались исследования по физиологии слуха, что было обусловлено потребностями развивающейся аудиотехники. Так, Г. Флетчер и его группа в лаборатории Bell Labs (США) впервые определили пороги чувствительности слуха в зависимости от частоты тона, определили болевой порог слуха и установили дифференциальные пороги по частоте и интенсивности. В этот же период была установлена количественная связь изменений физических параметров и вызываемых ими ощущений (закон Вебера-Фехнера). Группа под руководством Флетчера успешно продемонстрировала в 1934 г. стереофонический звук. Были начаты эксперименты по изучению эффектов локализации в стереофонии. В 1936 г. советский физик С. Н. Ржевкин издает монографию «Слух и речь», в которой впервые в отечественной литературе достаточно полно излагались сведения по акустике певческого голоса и вопросам теории его образования.

В 40-х годах английские ученые Т. Адереен, Б. Винтере и Ш. Богге впервые начали исследовать чувствительность бактерий и их фагов к звуку и вибрации. Так было положено начало изучению особенностей действия звука и вибраций на биологические объекты. В начале 50-х годов французский исследователь Гавро, изучавший влияние инфразвука на организм человека, показал, что у добровольцев, участвовавших в опытах, возникало ощущение усталости, тревожности и беспокойства.

В связи с потребностями военной техники развитие физической акустики получает мощнейший импульс. Задача определения положения и скорости самолёта (звуковая локация в воздухе), подводной лодки (гидролокация), определение места, времени и характера взрыва, глушение шумов самолёта — все эти проблемы потребовали более глубокого изучения механизмов образования и поглощения звука, распространения звуковых (в том числе инфразвуковых и ультразвуковых) волн в сложных условиях. Особый интерес вызвал вопрос о распространении звуковых волн большой интенсивности, например, взрывных волн (работы русских физиков А.А. Эйхенвальда и Н.Н. Андреева в этой области внесли значительный вклад в нелинейную акустику). Н.Н. Андреев, И.Г. Русаков (1934–1939 гг.) и Д.И. Блохинцев (1946 г.) разработали основы акустики движущихся сред. В изданной монографии «Аку-

стика неоднородной движущейся среды» Блохинцеву удалось точно сформулировать обобщенные уравнения акустики. Ученый разрешил некоторые важные задачи, имеющие практическое значение, в частности, задачи о распространении звука в турбулизированном потоке, о звуковом поле источника (движущегося с большой скоростью), о возбуждении звука потоком и о работе приемника, помещенного в движущийся поток. Английский математик М. Лайтхилл в 1952 г. дал общую теорию аэродинамической генерации звука, возникающего в движущейся среде за счёт неустойчивости потока газа. Первые успехи в гидроакустике были достигнуты французским физиком П. Ланжевром еще в 1916 г., применившим ультразвуковые волны для измерения глубины моря и обнаружения подводных лодок в разработанном эхолоте. Явление сверхдальнего распространения звука взрыва в море было открыто учёными М. Ивингом, Дж. Ворцелем (в 1946 г. это явление обнаружили также Л.М. Бреховских и Л.Д. Розенберг).

Проблемам звукопоглощения, которые приобрели особую актуальность в связи с развитием архитектурной и строительной акустики, были посвящены исследования С.Н. Ржевкина, Г.Д. Малюжинца и В.В. Фурдуева. Большое внимание было уделено изучению акустических шумов и методам их устранения.

Изучение влияния структуры среды на распространение звука создало возможность применения звуковых волн для зондирования среды, в частности атмосферы, что привело к развитию атмосферной акустики.

В 1934 г. физиками Г. Френцелем и Г. Шультесом из Кёльна было открыто слабое свечение жидкости, возникающее под действием акустических колебаний. Открытое явление названо сонолюминисценцией.

Чрезвычайно большое значение приобрели исследования ультразвука при больших интенсивностях. В Германии Х.О. Кнезер (1933 г.) обнаружил явление сильного поглощения и дисперсии ультразвука в многоатомных газах. Позднее дисперсия и аномальное поглощение ультразвука были обнаружены также и в жидкостях. Общая теория этих явлений была дана Л.И. Мандельштамом и М.А. Леонтовичем в 1937 г. На стыке акустики и оптики Л.И. Мандельштам (1918 г., 1926 г.) и Л. Бриллюэн (1922 г.) создали теорию рассеяния света на ультра-

тразвуковых волнах в жидкостях и твёрдых телах. Это явление было подтверждено опытом Дебая и Сирса (Германия, 1932 г.) и оказалось важным для изучения молекулярной структуры вещества.

В 1927 г. советский физик С.Я. Соколов сделал фундаментальное открытие: установил способность ультразвуковых волн распространяться в металлах на большие расстояния. На этой основе ученый первым в мире предложил новый метод контроля качества изделий без их разрушения — метод ультразвуковой дефектоскопии. Уже в 1928 г. Соколов создал первый промышленный образец аппарата для обнаружения дефектов в металлических изделиях и заготовках. Метод ультразвуковой дефектоскопии был доведен Соколовым к 1937 г. до технически совершенной формы, позволив обнаруживать мельчайшие раковины и трещины в металлических деталях, имеющих толщину в десятки сантиметров.

В 70-х гг., в особенности после работы Хадсона, Мак-Фи и Уайта (США, 1961 г.), обнаруживших явление усиления и генерации ультразвука в пьезополупроводниках, начала развиваться акустоэлектроника.

Важное значение приобрели исследования гиперзвуковых колебаний (частоты от 10^9 до 10^{12} – 10^{13} Гц), источником которых является тепловое колебание атомов или ионов, составляющих кристаллическую решетку твердого тела (пленочные пьезоэлектрические преобразователи, кристаллы, помещенные в объемный резонатор с электромагнитным колебанием сверхвысоких частот). Были проведены работы по исследованию взаимодействия гиперзвуковых волн с электронами в металлах и полупроводниках.

Бурное развитие средств вычислительной техники, мобильных устройств и появление аудиопроцессоров привело к разработке алгоритмов сжатия аудиосигналов, основанных на различных моделях слухового восприятия. Эти вопросы акустики вошли в круг проблем общей теории информации и связи.

Современная акустика охватывает широкий круг вопросов и смыкается с рядом областей человеческого знания. В ней можно выделить ряд разделов. Общие закономерности излучения, распространения и приёма упругих колебаний и волн изучает *теория звука*, где широко используются общие методы колебаний и волн

теории. Специальными вопросами теории звука занимаются статистическая акустика, акустика движущихся сред, кристаллоакустика, нелинейная акустика. *Физическая акустика* изучает особенности распространения акустических волн в жидких, твёрдых и газообразных веществах, взаимодействие их с веществом, и в частности с электронами, фононами и др. квазичастицами. Подразделами физической акустики можно считать молекулярную акустику, квантовую акустику, тесно связанные с молекулярной физикой и физикой твёрдого тела. Распространение акустических волн в естественных средах — атмосфере, водной среде, земной коре — изучается в *атмосферной акустике*, *геоакустике* и *гидроакустике*; к последней примыкает важная прикладная область — *гидролокация*. На базе *электроакустики* возникла прикладная область — звуко-техника, связанная с разработкой аппаратуры для передачи, записи, воспроизведения речи и музыки. С электроакустикой тесно связана и область акустических измерений. К прикладным областям акустики можно отнести *архитектурную* и *строительную* акустику, а также весьма большой раздел, связанный с изучением шумов и вибраций и борьбой с ними. Особый раздел — *биологическая акустика* занимается изучением звукоизлучающих и звукопринимающих органов человека и животных, проблемами речеобразования, передачи и восприятия речи, воздействия акустических волн на биологические объекты. К её подразделам относятся *психологическая* и *физиологическая акустика*. Результаты биологической акустики используются в электроакустике, архитектурной акустике, системах передачи речи, теории информации и связи, в музыке, медицине, биофизике и т.д.

1.4. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки

- 1.1. Дайте определение физической акустике.
- 1.2. Назовите древнегреческие научные школы, их представителей. Какой вклад они внесли в становление науки?
- 1.3. Расскажите, как развивалась акустика с конца XVII в. и до начала XX в. Кто из ученых внес вклад в эту науку?
- 1.4. Охарактеризуйте основные этапы развития акустики в XX–XXI вв.
- 1.5. Исследуйте связь акустики с другими областями знаний и человеческой деятельности.
- 1.6. Сформулируйте перспективы развития акустики.

II. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Предмет теории колебаний. Механические колебания и волны. Колебательное движение. Свободные колебания. Амплитуда, период и частота. Гармонические колебания и осцилляторы. Математический и пружинный маятники. Вынужденные колебания и резонанс. Автоколебательные системы. Классификация колебаний по разным признакам

Колебания широко распространены в природе и технике. Многие отрасли техники полностью основаны на исследованиях колебательных процессов. В физике колебания встречаются повсюду: в оптике, акустике, механике, электричестве, теории атома. Хотя колебания в различных системах могут иметь совершенно разную физическую природу, основные законы колебаний во всех случаях одинаковы.

Изучение колебаний с единой точки зрения значительно облегчает исследование тех колебательных процессов, в которых существует связь колебаний разных величин, например, электрических, механических, акустических.

2.1. Колебания

Колебаниями называют процессы, характеризующиеся той или иной степенью повторяемости во времени.

Одни из создателей нелинейной теории колебаний, академик Л.И. Мандельштам на одной из своих лекций заметил: «Резко разграничить, что такое колебания, а что не колебания также трудно, как определить, что такое лысый человек или, что такое куча...». Поэтому приведенное нами определение является широким и подразумевает дальнейшую конкретизацию и детализацию. Вообще говорят о колебаниях затухающих и незатухающих, гармонических и негармонических (ангармонических), релаксационных, периодических, квазипериодических, хаотических и так далее.

С учением о колебаниях тесно связаны понятия устойчивости и неустойчивости (рис. 2.1). Мы можем легко дать оценку устойчивости шарика, находящегося на поверхности.

Так в случае рис. 2.1, а положение его устойчиво, в случае рис. 2.1, б — неустойчиво и в случае рис. 2.1, в — находится в безразличном равновесии. Устойчивость определяется как стремление системы возвратиться в исходное состояние после того, как она из него была выведена, или как свойство оставаться вблизи этого исходного состояния.

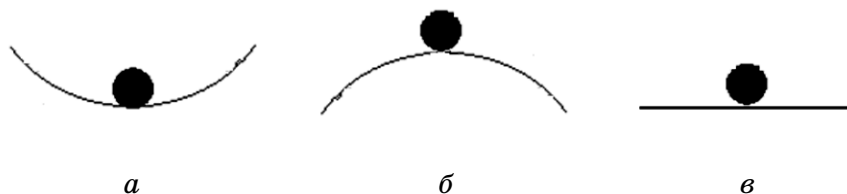


Рис. 2.1. К понятию устойчивости



Колебание — это одномерное движение какого-либо тела около положения устойчивого равновесия (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Шарик, совершающий колебания
(точка 0 — положение равновесия)

Если возврат к положению равновесия совершается через равные промежутки времени, то такие колебания называются периодическими. Например, движение маятника есть движение периодическое колебательное.



Движения «туда-обратно» и периодичность — это лишь некоторые признаки колебаний.

Однако не всякое колебательное движение периодично и не каждое периодическое движение является колебанием. К примеру, любое равномерное вращение тела является периодическим движением, так как при каждом обороте всякая

точка равномерно вращающегося тела проходит те же положения, что и при предыдущем обороте, причем в такой же последовательности и с теми же скоростями. Период такого равномерного вращения равен продолжительности одного оборота. Представим, что на крышке стола по окружности радиуса A равномерно против часовой стрелки движется точка массой m . Человек, который посмотрит «в торец» стола и увидит проекцию кругового движения на ось x , может подумать, что наблюдает периодическое колебательное движение туда-обратно (рис. 2.3).

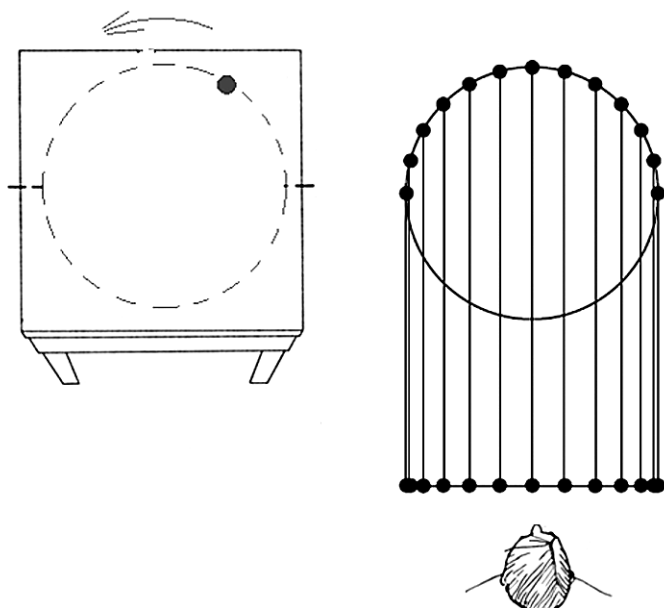


Рис. 2.3. Равномерное движение точки (шарика) по окружности (а), теневая проекция движения (б)

Непериодические колебания гораздо разнообразнее периодических. На рис. 2.4, а представлен график простейшего колебательного периодического движения, а на рис. 2.4, б — график движения колебательного, но непериодического (т.к. период нельзя указать). К непериодическим колебаниям относятся затухающие (или нарастающие) колебания, а также шум.

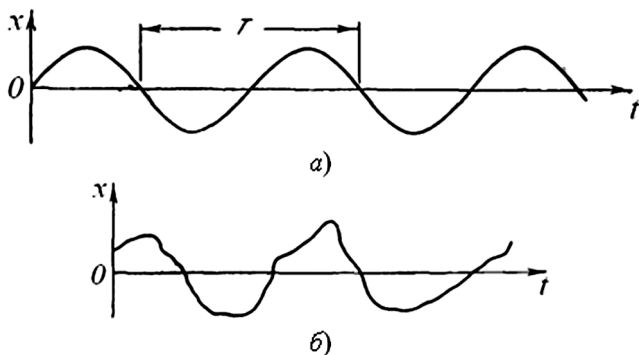


Рис. 2.4. Графики движения колебательного: периодического (а), непериодического (б)

2.2. Свободные колебания

Колеблющееся тело всегда связано с другими телами и вместе с ними образует **колебательную систему** (осциллятор).

Если колебательная система не подвергается переменным внешним воздействиям, то колебания, возникающие вследствие какого-либо отклонения этой системы от состояния устойчивого равновесия, называют **свободными** (собственными).



Свободными колебаниями называются такие колебания, которые происходят в системе, предоставленной самой себе после того, как ей был сообщен толчок, либо она была выведена из положения равновесия. Примером могут служить колебания шарика, подвешенного на нити. Для того, чтобы вызвать колебания, надо либо толкнуть шарик, либо, отведя в сторону, отпустить его.

Свободные колебания в идеальных колебательных системах называются **гармоническими**. Гармоническое колебание является специальным, частным видом периодического колебания.

Для того, чтобы свободные колебания совершались по гармоническому закону, необходимо, чтобы сила, стремящаяся вернуть тело (возвращающая сила) в положение равновесия, была пропорциональна смещению тела из положения равновесия.

Этому условию для случая пружины удовлетворяет сила Гука для малых упругих деформаций:

$F = -k \cdot \Delta x,$	(2.1)
--------------------------	-------

где k — жесткость пружины [Н/м], Δx — абсолютное удлинение или сжатие пружины [м], F — сила упругости [Н].

Закон утверждает, что для большого числа материалов при достаточно малых удлинениях сила пропорциональна удлинению $F \approx \Delta x$. Знак минус показывает, что сила всегда направлена в сторону положения равновесия.

Отодвинем грузик вниз, при этом пружина растягивается на некоторую длину Δx . Пружина действует на груз с силой, которая стремится вернуть его в положение равновесия (рис. 2.5).

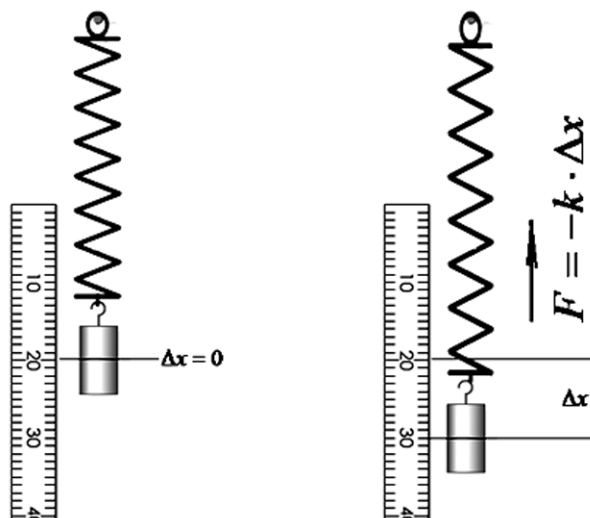


Рис. 2.5. Для того, чтобы растянуть пружину на длину Δx , к ней необходимо приложить внешнюю силу, равную по меньшей мере $F = +k \cdot \Delta x$



Пропорциональность между упругими силами, пока они достаточно малы, и абсолютным удлинением тела наблюдается не только у пружин, но и у многих материалов, находящихся в состоянии устойчивого равновесия.

Свободные механические колебания могут совершать, например, математический и пружинный маятники (груз на пружине). В этом случае частота свободных колебаний полностью определяется свойствами самой колебательной системы и носит название **собственной частоты системы**.

Свободные колебания с течением времени всегда **затухают** и по этой причине очень редко используются в технике.

2.3. Гармоническое колебание. Гармонические осцилляторы

Гармоническое колебание — это колебательный процесс, при котором периодические изменения физических величин, характеризующих состояние системы в зависимости от времени, происходят по закону синуса или косинуса.

Уравнение гармонических колебаний имеет вид:

$x(t) = x_m \sin \varphi = x_m \sin(\omega t + \varphi_0)$ ИЛИ $x(t) = x_m \cos \varphi = x_m \cos(\omega t + \varphi_0),$	(2.2)
--	--------------

где аргумент $\varphi = (\omega t + \varphi_0)$ — это текущая фаза колебаний, φ_0 — начальная фаза колебаний (т.е. фаза колебаний в начальный момент времени $t=0$), x_m — амплитуда колебаний, т.е. максимальное отклонение колеблющейся величины от положения равновесия, ω — циклическая частота.

Так как синус и косинус изменяются в пределах от +1 до -1, то может принимать значения от $+x_m$ до $-x_m$.

Циклическую (круговую, угловую) частоту следует различать с линейной частотой f .



Линейная частота определяет количество совершенных колебаний тела за единицу времени. Если за время t совершено n колебаний, то $f=n/t$.

Измеряется частота в герцах [Гц] — единицах, названных именем великого немецкого ученого Генриха Рудольфа Герца (1857–1894), 1 герц — это 1 полное колебание в секунду [$1\text{Гц} = \frac{1}{1\text{с}}$].

Единица измерения Герц как мера количества повторяющихся событий в единицу времени была принята Международным бюро мер и весов в 1964 году как единица частоты системы СИ.



Время T , за которое происходит одно полное колебание, называется **периодом колебания**.

$T = \frac{t}{n} = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}, \quad [\text{с}]$	(2.3)
---	-------

где ω — циклическая частота.



Циклическая частота колебаний равна числу полных колебаний за 2π секунд, т.е. $\omega = 2\pi f$.

Единица циклической частоты — [рад/с].

Рассмотрим два гармонических колебания с одинаковой начальной фазой, которую для наглядности примем равной нулю ($\varphi_0 = 0$). Графики соответствующих колебаний приведены на рис. 2.6: $x_1(t) = x_{1m} \sin(2\pi f_1 t)$ и $x_2(t) = x_{2m} \sin(2\pi f_2 t)$. Из рисунка видно, что амплитуда первого колебания составляет $|x_{1m}| = 2$ единицы, второго — $|x_{2m}| = 1$ единицу. Период первого колебания $T_1 = 0,2$ с (соответственно частота колебаний $f_1 = \frac{1}{T_1} = 5$ Гц), период второго колебания в два раза больше $T_2 = 0,4$ с, что соответствует частоте колебаний $f_2 = \frac{1}{T_2} = 2,5$ Гц.

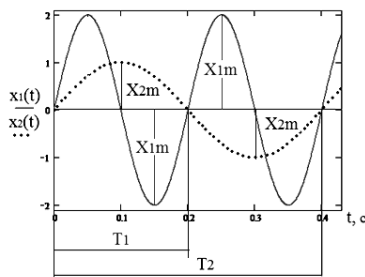


Рис. 2.6. К изучению гармонического колебания

Опишем гармонический колебательный процесс синусом: $x(t) = x_m \sin(2\pi f t + \varphi_0)$. Для упрощения зададим следующие параметры: $|x_m| = 1$ ед. и $f = 1$, тогда $x(t) = \sin(2\pi t + \varphi_0)$. График колебаний для случая, когда начальная фаза отсутствует ($\varphi_0 = 0$) приведен на рис. 2.7.

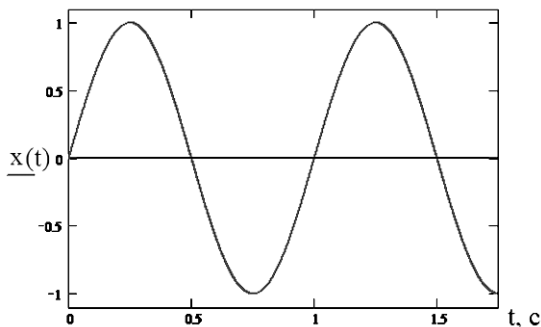


Рис. 2.7. График колебательного процесса $x(t) = \sin(2\pi t)$

Представим, что начальная фаза получила приращение $\frac{\pi}{2}$: $\varphi_0 = 0 + \frac{\pi}{2}$. График для этого случая приведен на рис. 2.8. Видно, что синусоидальное колебание с начальной фазой 90° перешло в косинусоидальное.

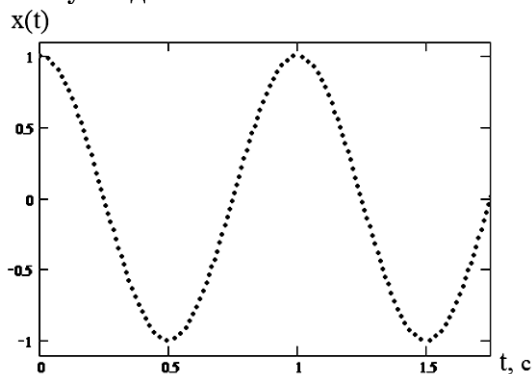


Рис. 2.8. График колебательного процесса

$$x(t) = \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right) = \cos(2\pi t)$$

Для синуса суммы двух углов действительно $\sin(\alpha+\beta)=\sin\alpha \cdot \cos\beta+\sin\beta \cdot \cos\alpha$. В нашем случае имеем

$$\sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right) = \sin(2\pi t) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos(2\pi t).$$

Итак, первое слагаемое обращается в нуль $\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$, а второе равно $\cos(2\pi t)$, т.к. $\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1$, тогда

$$x(t) = \sin\left(2\pi t + \frac{\pi}{2}\right) = \cos(2\pi t).$$

Таким образом, колебания описываемые синусом и косинусом, представляют собой колебания со сдвигом фаз $\pi/2$.



Оказывается, что равномерное движение вращающейся по окружности точки, также происходит по синусоидальному закону (рис. 2.9). Здесь по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат — значения проекции радиуса-вектора движущейся точки в соответствующий момент времени.

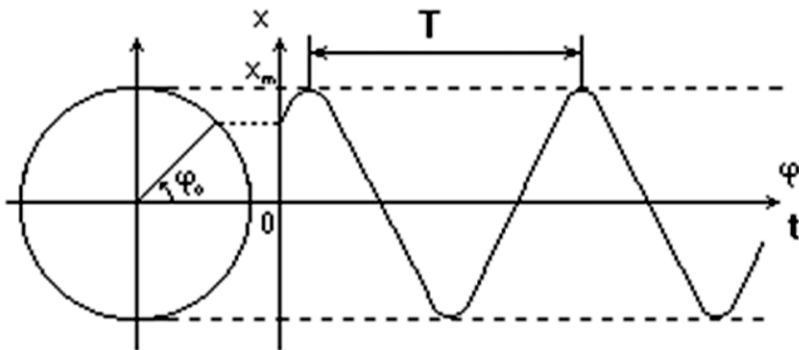


Рис. 2.9. График закона движения точки

2.4. Графическое представление гармонического колебания

Графически гармонические колебания можно изображать используя метод вращающегося вектора амплитуды. Идея метода следующая. Из произвольной точки O на оси x под углом φ_0 (начальная фаза колебания) откладывается вектор x_m , модуль которого равен амплитуде рассматриваемого колебания (рис. 2.10).

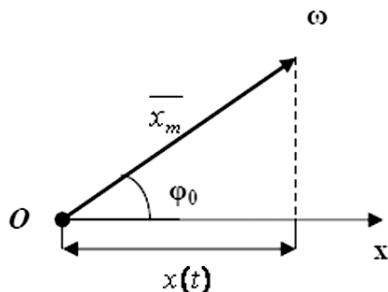


Рис. 2.10. К методу вращающегося вектора амплитуды

Приводя вектор $\vec{x}_m$, во вращение с угловой скоростью Ω , равной циклической частоте колебания, получаем, что проекция конца вектора будет перемещаться по оси x и принимать значения от $-x_m$ до $+x_m$ а колеблющаяся величина изменяться со временем по закону $x(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi_0)$.

2.5. Математический маятник

Маятником является всякое тело, подвешенное так, что его центр тяжести находится ниже точки подвеса.



Математическим маятником называют колеблющуюся в гравитационном поле Земли материальную точку, подвешенную на невесомой и нерастяжимой нити длиной l .

Закон, по которому происходят колебания математического маятника, установил Галилео Галилей, наблюдая за качающимся подсвечником на длинной цепи в соборе в Пизе. Оказалось, что период колебаний не зависит от амплитуды колебаний. Такое свойство маятников получило название **изохронности** (от греч. «изос» — равный, «хронос» — время), т.е. постоянства периода колебаний маятника вне зависимости от амплитуды колебаний. Это открытие привело к созданию маятниковых часов.

Г. Галилей нашел соотношение между периодами маятников различной длины, используя грузики из свинца и пробки,

и показал, что этот период не зависит от массы, хотя колебания маятника с грузиком из пробки затухали быстрее. В качестве указателя времени Галилей пользовался собственным пульсом.

Для примера рассмотрим грузик малого размера, подвешенный на длинной тонкой нити (рис. 2.11).

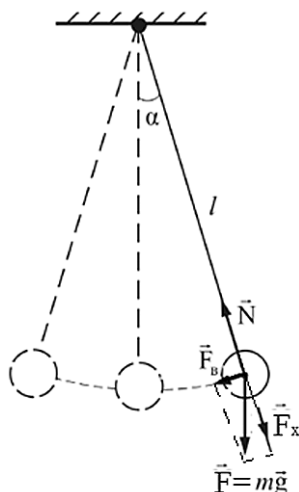


Рис. 2.11. Возвращающая сила $\vec{F}_b$ при отклонении математического маятника от положения равновесия

Когда маятник покоится (т.е. находится в положении равновесия), сила тяжести, действующая на его грузик и направленная вертикально вниз, уравнивается силой натяжения нити. В отклоненном положении сила тяжести mg действует под углом к силе натяжения $\vec{N}$, направленной вдоль нити. Разложим силу тяжести на две составляющие — $\vec{F}_x$ и $\vec{F}_b$, причем $\vec{F}_b$ стремится восстановить первоначальное положение, поэтому всегда направлена в сторону положения равновесия. Ее называют возвращающей силой $F_b = -mg \sin \alpha$. Учитывая, что при малых углах α значение синуса почти не отличается от величины угла в радианах, то $F_b = -mg\alpha$ (при малых отклонениях от вертикали движение математического маятника является гармоническим).

Выведем из состояния равновесия маятник, представляющий собой конический сосуд, подвешенный на гибкой нити (рис. 2.12).

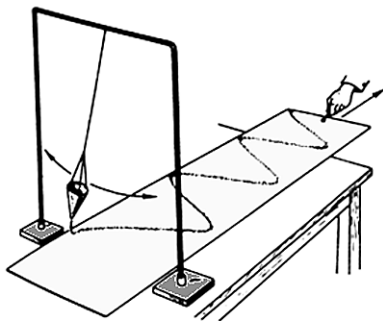


Рис. 2.12. Самопишущий маятник

Сосуд наполнен песком и имеет внизу небольшое отверстие, благодаря чему песок высыпается тонкой струйкой. Равномерно перемещая по столу длинную полосу картона в направлении, перпендикулярном к плоскости, в которой движется маятник, получим отображение гармонического закона.

Период колебаний математического маятника при малых углах отклонения определяется формулой (2.4).

$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$	(2.4)
------------------------------	-------

Проведем демонстрацию, для чего в поперечном направлении выведем из положения равновесия четыре маятника с различной длиной l (рис. 2.13). Каждый из них будет совершать свободные колебания со своей собственной частотой $\omega_{0x} = \sqrt{\frac{g}{l_x}}$. Видно, что с увеличением длины маятника, период колебаний увеличивается, а частота собственных колебаний соответственно уменьшается.

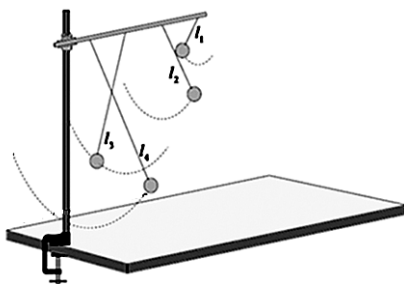


Рис. 2.13. Колебания математических маятников



Итак, период колебаний математического маятника зависит только от ускорения свободного падения g и от длины маятника l и не зависит от массы груза и от амплитуды (при условии, что она достаточно мала).

Задача 2.1. Математический маятник совершает 30 колебаний за одну минуту. Определить период и частоту колебаний.

Решение

Зная, что частота — это количество совершенных колебаний тела за единицу времени $f=n/t$, где $n=30$, $t=60$ с.

$$\text{Тогда } f = \frac{30}{60} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ Гц. } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1/2} = 2 \text{ с.}$$

Задача 2.2. Один математический маятник совершил 25 колебаний ($n_1=25$), а второй — 15 колебаний ($n_2=15$) за одно и то же время. Необходимо определить отношение длин маятников l_1/l_2 .

Решение

$$\text{Период одного колебания } T = \frac{t}{n}, \text{ соответственно } \begin{cases} T_1 = \frac{t}{n_1}; \\ T_2 = \frac{t}{n_2}. \end{cases}$$

Для периода колебаний математического маятника запишем

$$\begin{cases} T_1 = 2\pi\sqrt{l_1/g} \\ T_2 = 2\pi\sqrt{l_2/g} \end{cases}, \text{ отсюда: } \frac{l_1}{l_2} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = \frac{9}{25}.$$

2.6. Пружинный маятник



Пружинный маятник — это груз массой m , подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий под действием упругой силы $F = -k \cdot \Delta x$, гармонические колебания.

Для того, чтобы маятник совершал вертикальные колебания, достаточно оттянуть грузик строго вниз на небольшую величину. Прикрепив карандаш к колеблющемуся грузу и равномерно передвигая лист бумаги вдоль оси t (рис. 2.14), карандаш вычертит гармоническое колебание (будет это синус или косинус — зависит от положения грузика в момент времени $t=0$).

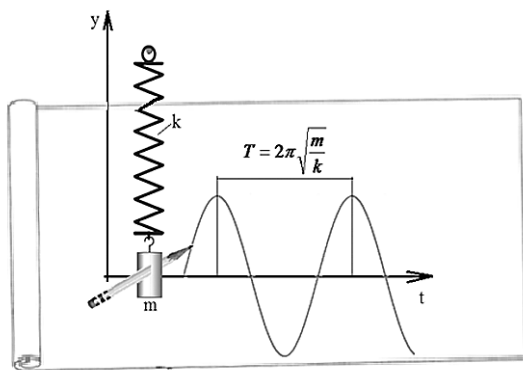


Рис. 2.14. Свободные вертикальные колебания грузика на пружине

Период колебаний пружинного маятника определяется формулой (2.5), которая справедлива для упругих колебаний, при условии, что масса пружины мала по сравнению с массой груза:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

(2.5)



Собственная циклическая частота пружинного маятника $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ будет тем выше, чем больше его упругость и меньше масса груза. И наоборот, чем тяжелее грузик и менее упругая пружина, тем ниже частота его собственных колебаний.

Задача 2.3. Необходимо вычислить массу груза, который на пружине жесткостью 300 Н/м совершает 30 колебаний за 10 с.

Решение

Период колебаний тела на пружине:

$$\begin{cases} T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}, \\ T = \frac{t}{N} \end{cases} \Rightarrow 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{t}{N}.$$

Отсюда вычислим массу кг.

$$m = \frac{t^2 k}{4\pi^2 N^2} = \left(\frac{t}{2\pi N}\right)^2 \cdot k = \left(\frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 30}\right)^2 \cdot 300 \approx 0,85 \text{ кг}$$

2.7. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний

Рассмотрим движение горизонтального пружинного маятника. Брусок массой m расположен на гладкой горизонтальной поверхности и прикреплен к неподвижному упору с помощью пружины жесткости k (рис. 2.15). Положение бруска будем описывать с помощью декартовой координаты x , начало отсчета которой совместим с положением, в котором пружина не деформирована. При отклонении бруска от положения равновесия на него будет действовать сила упругости пружины $\vec{F}$, направленная к положению равновесия, ее модуль определяется законом Гука $|F| = k \cdot x$. На основании II-го закона Ньютона и, пренебрегая силой трения, запишем уравнение, описывающее движение бруска:

$$ma = -kx$$

(2.6)

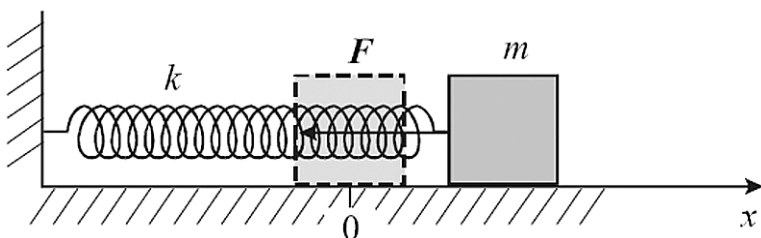


Рис. 2.15. Горизонтальный пружинный маятник

Строгое описание поведения колебательной системы может быть дано, если принять во внимание математическую связь между ускорением тела a и координатой x ускорение является второй производной координаты тела x по времени t : $a(t) = \ddot{x}(t)$, здесь $\ddot{x} = x''(t)$ обозначает вторую производную по времени t от функции $x(t)$.

Поэтому второй закон Ньютона для груза на пружине может быть записан в виде:

$m \ddot{x} = -kx$	(2.7)
--------------------	---------

Из (2.7) $\ddot{x} = -\frac{k}{m}x$. Как мы знаем, отношение $\frac{k}{m}$ называют собственной частотой пружинного маятника (колебательной системы) и обозначают ω_0^2 , т.е. $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$.

Окончательно получим:

$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$	(2.8)
-------------------------------	---------

Уравнение (2.8) называется дифференциальным уравнением гармонических колебаний второго порядка.

Решениями дифференциального уравнения (2.8) являются такие гармонические функции $x(t)$, первая и вторая производная которых, при подстановке в дифференциальное уравнение разрешает его. Эти гармонические функции имеют вид: $x(t) = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ и $x(t) = x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, а также их линейные комбинации.

Покажем это, для чего дважды вычислим производную функции (2.9) по времени и найдем уравнение скорости и ускорения материальной точки:

$x(t) = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$	(2.9)
---	-------

$v = \dot{x} = -x_m \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$	(2.10)
--	--------

Произведение $\omega_0 x_m$ называют амплитудой колебательной скорости частиц вещества в волне.

$a = \dot{v} = \ddot{x} = -x_m \omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$	(2.11)
---	--------

Подставим $x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ и $\ddot{x} = -x_m \omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ в (2.8):
 $-x_m \omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + x_m \omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = 0$.

Для колебаний математического маятника уравнение (2.8) имеет вид:

$\ddot{x} + \frac{g}{l} \sin x = 0$	(2.12)
-------------------------------------	--------

Для колебаний груза на пружине:

$\ddot{x} + \frac{k}{m} x = 0$	(2.13)
--------------------------------	--------

В случае электрического колебательного контура без потерь:

$\ddot{q} + \frac{1}{LC} q = 0$	(2.14)
---------------------------------	--------

Задача 2.4. Когда к пружине подвешивают груз массой 0,30 кг, она удлиняется на 0,15 м. Пружину затем растягивают еще на 0,10 м от положения равновесия и отпускают. Необходимо вычислить: а) жесткость пружины k , б) амплитуду колебания, в) его максимальную скорость, г) его максимальное ускорение, д) его период и частоту.

Решение

- а) Поскольку пружина растягивается на 0,15 м, когда к ней подвешивают груз массой 0,30 кг, из формулы (2.1)

$$|F| = k \cdot \Delta x : k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{mg}{\Delta x} = \frac{0,30 \cdot 9,81}{0,15} = 19,60 \text{ Н/м};$$

- б) Поскольку пружину растягивают на 0,10 м и отпускают, не давая ей начального толчка, амплитуда $x_m = 0,10$ м;

- в) В соответствии с выражением (2.10) имеем $|v_{MAX}| = x_m \omega_0$,

$$\text{где } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ то } |v_{MAX}| = x_m \sqrt{\frac{k}{m}} = 0,10 \cdot \sqrt{\frac{19,60}{0,30}} = 0,81 \text{ м/с};$$

- г) В соответствии с выражением (2.11) имеем

$$|a_{MAX}| = x_m \omega_0^2 = x_m \frac{k}{m} = 0,10 \cdot \frac{19,60}{0,30} = 6,53 \text{ м/с}^2;$$

- д) По формулам (2.5) и (2.3) вычисляем

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 6,28 \sqrt{\frac{0,30}{19,60}} = 0,78 \text{ с}, \quad f = \frac{1}{T} = 1,29 \text{ Гц}.$$

2.8. Энергия гармонического колебания

Полная энергия гармонического колебания E определяется суммой кинетической E_K и потенциальной E_{II} энергии:

$E = E_K + E_{II} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$	(2.12)
--	---------------

Подставляя в формулу (2.12) выражение для скорости из (2.10), а для смещения — из (2.9) и учитывая, что $k = \omega_0^2 m$, получим:

$E = \frac{1}{2} m x_m^2 \omega_0^2 [\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)] = \frac{1}{2} m x_m^2 \omega_0^2$	(2.13)
---	---------------

Следовательно, полная энергия гармонического колебания не зависит от времени и прямо пропорциональна массе тела, квадрату амплитуды и квадрату частоты колебания. Кинетическая и потенциальная энергии колеблющегося тела непрерывно изменяются во времени, но их сумма всегда остается неизменной.

2.9. Вынужденные колебания и резонанс

Для изучения вынужденных колебаний можно использовать установку, изображенную на рис. 2.16. На кривошипе с ручкой закреплен пружинный маятник. При равномерном вращении ручки на груз через пружину будет передаваться действие периодически изменяющейся силы. Изменяясь с частотой, равной частоте вращения ручки, эта сила заставит груз совершать вынужденные колебания.

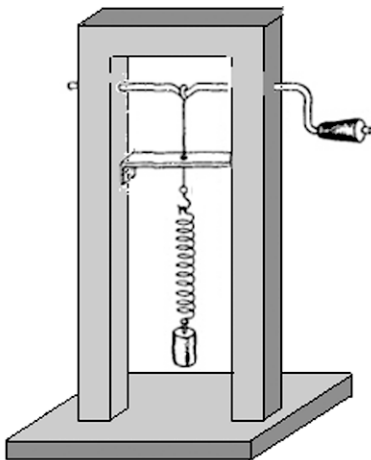


Рис. 2.16. Вынужденные колебания пружинного маятника



Колебания, происходящие под действием внешней периодической силы, называют **вынужденными колебаниями**.

Внешняя периодическая сила, называемая вынуждающей, сообщает колебательной системе *дополнительную энергию*, которая идет на восполнение энергетических потерь, например, происходящих из-за трения. В отличие от свободных колебаний, когда система получает энергию лишь один раз (при выведении из состояния равновесия), в случае вынужденных колебаний система поглощает эту энергию от источника внешней периодической силы *непрерывно*. И эта энергия восполняет потери, расходуемые на преодоление трения, а потому полная энергия колебательной системы по-прежнему остается неизменной.

Свойства вынужденных колебаний:

- вынужденные колебания происходят с частотой внешней силы;
- амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна амплитуде внешней силы;
- амплитуда колебаний является функцией частоты внешней силы;
- если вынуждающая сила изменяется во времени по закону синуса или косинуса, то вынужденные колебания будут гармоническими и незатухающими.

В случае, когда частота вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебательной системы, происходит резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний. Это явление называется **резонансом** (рис. 2.17). Рассмотрим физические причины резонанса. Между внешней силой и скоростью вынужденных колебаний в общем случае существует сдвиг фаз, т.е. часть периода сила совпадает с направлением вектора скорости и ускоряет тело, передавая ему энергию, а часть периода сила направлена противоположно, т.е. тормозит тело, забирая тем самым энергию. При совпадении частот сдвиг фаз между силой и скоростью вынужденных колебаний равен нулю, т.е. сила все время передает энергию системе, и амплитуда колебаний увеличивается до тех пор, пока вся работа силы не будет идти на преодоление силы трения.

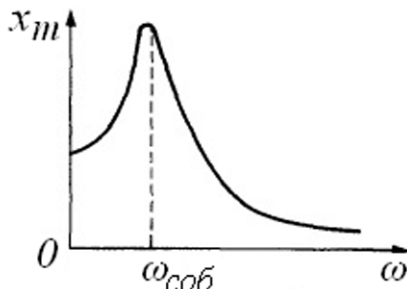


Рис. 2.17. Резонансная кривая (график зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты изменения внешней силы)

Явление резонанса играет большую роль в ряде природных, научных и производственных процессов. Простой иллюстрацией резонанса является раскачивание ребенка на качелях. Качели, так же как и маятник, имеют свою собственную частоту колебаний. Если бы мы подталкивали качели со случайной частотой, то качели болтались бы туда-сюда, но раскачать их сильно нам бы так и не удалось. Поэтому мы подталкиваем качели, согласуясь с их собственной частотой, а амплитуда колебаний при этом нарастает.

Резонанс в электрическом LC -контуре радиоприемника служит для для настройки приемника на определенную частоту радиостанции.

В механических устройствах резонанс часто вреден, он вызывает большие вибрации, быстрый износ и даже разрушение конструкции. Поэтому явление резонанса необходимо учитывать при проектировании мостов, зданий и других сооружений, испытывающих вибрацию под нагрузкой, в противном случае при определенных условиях эти сооружения могут быть разрушены. Так, причиной знаменитой катастрофы Такомского моста (штат Вашингтон, США) 7 ноября 1940 г. были отчасти механические резонансные явления: частота колебаний воздушных вихрей, вызванных сильным порывистым ураганным ветром, совпала с собственной частотой колебаний моста, возник резонанс. Хотя мост был правильно рассчитан на действие статических нагрузок, в том числе и ветровой, но аэродинамическое действие нагрузки не было учтено. Возникли крутильные колебания, которые усиливались вертикальными колебаниями тросов. Опускание троса с одной стороны моста и поднятие его с другой вызвали наклон проезжей части и продолжили крутильные колебания. Амплитуда колебаний Такомского моста нарастала до тех пор, пока многотонная конструкция не рухнула.

Известен случай разрушения моста, по которому маршрутировал роту солдат. В 1906 г. в Петербурге обрушился так называемый Египетский мост через реку Фонтанку. Это произошло при переходе через мост кавалерийского эскадрона, причем шаг лошадей попал в резонанс с периодом моста. Для предотвращения таких случаев войсковым частям при переходе через мосты приказывают идти не «в ногу», а вольным шагом.

2.10. Автоколебания

Автоколебаниями называют незатухающие колебания в системе, поддерживаемые внутренними источниками энергии при отсутствии воздействия внешней переменной силы.

В отличие от вынужденных колебаний, частота и амплитуда автоколебаний определяются свойствами самой колебательной системы. От свободных (затухающих) колебаний автоколебания отличаются *независимостью* амплитуды от времени.

Во многих случаях автоколебательные системы можно представить тремя основными элементами: 1) собственно колебательная система, 2) источник энергии, 3) регулятор поступления энергии в собственно колебательную систему (рис. 2.18). Колебательная система через канал обратной связи воздействует на регулятор, информируя регулятор о состоянии этой системы. Обратная связь позволяет управлять работой регулятора за счет процессов в самой колебательной системе.

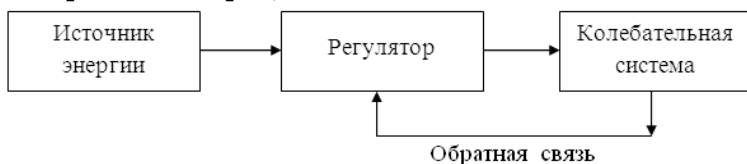


Рис. 2.18. Автоколебания: структурная схема

Автоколебания могут иметь различную природу: механическую, тепловую, электромагнитную и химическую.

Классическим примером механической автоколебательной системы являются часы, в которых маятник или баланс являются колебательной системой, пружина или поднятая гиря — источником энергии, а анкер — регулятором поступления энергии от источника в колебательную систему. На рис. 2.19 изображен так называемый анкерный ход.



Рис. 2.19. Часовой механизм с маятником

Ходовое колесо с косыми зубьями жестко скреплено с зубчатым барабаном, через который перекинута цепь с гирей. К маятнику прикреплен анкер (перекладина), на концах которого укреплены палетты — пластинки, изогнутые по окружности с центром на оси маятника. Анкер не позволяет ходовому колесу свободно вращаться, а дает ему возможность повернуться только на один зуб за каждые полпериода маятника. Но и ходовое колесо действует при этом на маятник, а именно, пока зубец ходового колеса соприкасается с изогнутой поверхностью левой или правой палетты, маятник не получает толчка и только слегка тормозится из-за трения. Но в те моменты, когда зубец ходового колеса проходит по торцу палетты, маятник получает толчок в направлении своего движения.

Таким образом, маятник совершает незатухающие колебания, потому что он сам в определенных положениях дает возможность ходовому колесу подтолкнуть себя в нужном направлении. Эти толчки и восполняют расход энергии на трение. Период колебаний и в этом случае почти совпадает с периодом собственных колебаний маятника, т.е. зависит от его длины.

Автоколебания совершают паровые поршневые машины и двигатели внутреннего сгорания, генераторы электрических и электромагнитных колебаний, свистки, языки в баянах и аккордионах, органные трубы, духовые и струнно-смычковые инструменты (в отличие от свободных колебаний струны у рояля, арфы, гитары и других несмычковых струнных инструментов, возбуждаемых однократным толчком или рывком), голосовые связки при разговоре (или пении) и др.



В духовых инструментах продувание струи воздуха поддерживает автоколебания столба воздуха в трубе инструмента, а в струнных смычковых инструментах автоколебания поддерживаются силой трения, действующей между смычком и струной.

Чтобы колебания были незатухающими, поступающая из источника в систему энергия должна компенсировать потери энергии в самой системе.

2.11. Классификация колебаний

Классификация разных видов колебаний зависит от интересующих приоритетных качеств колебательных систем (осцилляторов).

По физической природе основной движущей энергии:

- *механические* — смещение тела или точек сплошной упругой среды вблизи положения равновесия (маятники, звуковые колебания в газе и жидкости, вибрация);
- *электромагнитные* — колебания электрических и магнитных характеристик;
- *электромеханические* (колебания мембраны телефона и т.д.);
- *биологические* — колебания показателей жизнедеятельности живых систем на всех уровнях их организации;
- *смешанного типа* — комбинации использования разных типов энергии, как перечисленных выше, так и с привлечением других видов энергии.

По характеру взаимодействия с окружающей средой:

- *вынужденные* — колебания, которые совершаются под действием внешней силы. Например, электромагнитные колебания в антенне телевизора, колебание листьев на деревьях под действием ветра, раскачивание родителями ребенка на качелях. При вынужденных колебаниях может наблюдаться явление резонанса;
- *свободные* (или *собственные*) — это колебания в системе под действием внутренних сил, возникающих как результат передачи системе энергии извне. Система находится в колебаниях до тех пор, пока полностью не израсходует возмущившую ее энергию. Потому свободные колебания всегда затухающие, а происходят всегда на резонансной частоте. Простейшими примерами свободных колебания являются колебания груза, прикрепленного к пружине, или груза, подвешенного на нити;
- *автоколебания* — колебания, при которых система имеет некоторый собственный запас потенциальной энергии (механической в сжатой пружине, электрохимической в батарейках или аккумуляторах, химической в предназначенном к сжиганию топливе), расходуемой по мере необходимости на совершение

колебаний (пример такой системы — механические или электрические часы);

- *параметрические* — колебания, которые возникают в результате изменения какого-либо параметра колебательной системы в результате внешнего воздействия, а может быть и внутрисистемных процессов. Например, раскачивание качелей: приседая в крайних положениях и выпрямляясь в среднем положении, человек, находящийся на качелях, изменяет момент инерции качелей.

По способу описания:

- *детерминированные* — описываются функцией времени в форме аналитического выражения или графика;
- *случайные* — колебания, один или несколько параметров которых случайно зависят от времени и потому относятся к классу случайных процессов;
- *хаотические* — колебания, которые занимают как бы промежуточное положение между детерминированными и случайными, природа их достаточно сложна.

По сложности:

- *простые* (гармонические) — колебания, в процессе совершения которых значения физических величин изменяются с течением времени по закону синуса или косинуса;
- *сложные* — колебания, в состав которых входят два и более неравных по частоте гармонических колебания. При рассмотрении негармонических колебаний, строго говоря, уже нельзя употреблять термин «амплитуда», он имеет определенный смысл только для гармонических колебаний. Однако этот термин применяют и к негармоническим колебаниям, понимая под амплитудой наибольшее значение, которого достигает смещение в течение одного периода колебаний.

По зависимости амплитуды колебаний от времени:

- *затухающие* — колебания, амплитуда которых затухает с течением времени (рис. 2.20). Все колебания, существующие в природе, являются затухающими, поскольку всегда существуют силы трения (энергия расходуется на работу против сил трения и превращается в тепло);

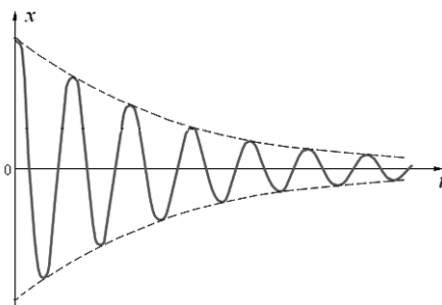


Рис. 2.20. График зависимости от времени смещения x тела, совершающего затухающие колебания

- *незатухающие* — колебания, амплитуда которых не уменьшается.

По направлению колебаний частиц различают:

- *продольные* — колебания растяжения-сжатия (рис. 2.21);
- *поперечные* — изгибные колебания (рис. 2.22);
- *крутильные* колебания (сопровождаются переменной деформацией кручения). На рис. 2.23, а изображен диск, подвешенный на пружине, если его повернуть вокруг вертикальной оси на некоторый угол, а затем отпустить, то он будет совершать крутильные колебания вокруг вертикальной оси. На рис. 2.23, б изображен крутильный маятник часов.

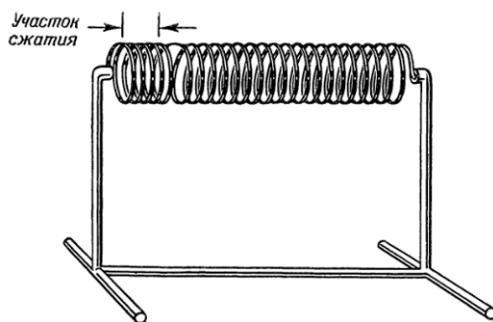


Рис. 2.21. Если несколько витков длинной витой пружины сжать и потом резко отпустить, получившийся таким образом импульс распространяется вдоль пружины в виде продольной волны

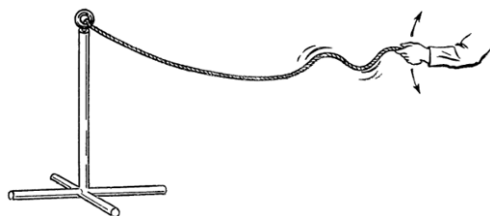
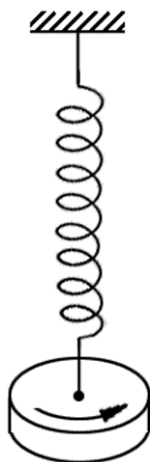
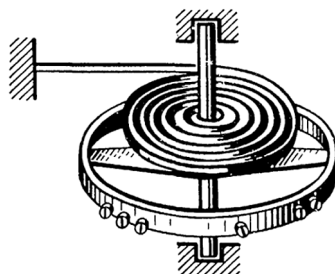


Рис. 2.22. Поперечные волны, бегущие вдоль натянутой веревки, обусловлены быстрым движением ее конца вверх-вниз



а



б

Рис. 2.23. Крутильные колебания: диска, подвешенного на пружине (а), маятника механических часов (б)

2.12. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки

- 2.1. Почему возможен единый подход при изучении колебаний различной физической природы?
- 2.2. Какое движение называют колебательным? Что понимают под колебанием тела?
- 2.3. Какие колебания называют свободными? Приведите примеры.
- 2.4. Какие колебания называют вынужденными? Приведите примеры.
- 2.5. Что такое автоколебания? В чем их отличие от вынужденных и свободных незатухающих колебаний?

- 2.6. Назовите примеры колебаний, которые вы наблюдаете в окружающей действительности.
- 2.7. При некоторой скорости вращения швейной машины стол, на котором она стоит, иногда сильно раскачивается. Почему?
- 2.8. В чем состоит явление резонанса? Чем объясняется резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при резонансе?
- 2.9. Какие колебания называют гармоническими? Запишите уравнение гармонического колебания.
- 2.10. Что понимают под амплитудой колебаний?
- 2.11. Что понимают под периодом колебаний?
- 2.12. Что понимают под частотой колебаний? Запишите формулы линейной и циклической частоты колебаний. В каких единицах они измеряются?
- 2.13. Что понимают под фазой гармонического колебания?
- 2.14. Выведите формулы для скорости и ускорения гармонически колеблющейся точки как функции времени. Дайте пояснения обозначениям.
- 2.15. Что такое математический маятник?
- 2.16. Запишите формулы периода свободных колебаний математического маятника и циклической частоты.
- 2.17. Если маятниковые часы идут точно на уровне моря, то будут ли они спешить или отставать, если их поднести на гору?
- 2.18. Какой маятник называют пружинным?
- 2.19. Запишите формулы для периода свободных колебаний и циклической частоты пружинного маятника.
- 2.20. Какой маятник называется физическим? Дайте определение.
- 2.21. Запишите и проанализируйте дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний.



Можно ли считать колебания дыхательной и сердечной деятельности гармоническими?

2.13. Задачи для самостоятельного решения

- 2.1. Напишите уравнение гармонического колебательного движения с амплитудой $x_m = 10$ см, если за время $t = 60$ с совершается 150 колебаний и начальная фаза колебаний $\varphi_0 = \pi/4$. Постройте графики зависимости смещения, скорости и ускорения от времени.
- 2.2. На рис. 2.24 представлена зависимость координаты центра шара, подвешенного на пружине, от времени. Определите период колебаний.

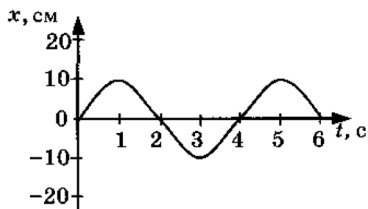


Рис. 2.24. Зависимость координаты центра шара, подвешенного на пружине, от времени

- 2.3. Как изменится частота колебаний груза, подвешенного на пружине, если взять пружину, у которой жесткость будет в 4 раза меньше?
- 2.4. Пружина под действием груза удлинилась на 1 см. Определите, с каким периодом начнет совершать колебания этот груз на пружине, если его вывести из положения равновесия.
- 2.5. Как изменится период колебаний груза, весящего на двух одинаковых пружинах жесткостью k каждая, если последовательное соединение пружины заменить параллельным (рис. 2.25)?

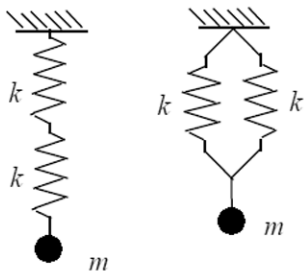


Рис. 2.25. Колебания груза, весящего на двух одинаковых пружинах

- 2.6. Груз массой $m=100$ г закреплен на пружине жесткостью $k=100$ Н/м. Его смещают на 3 см от положения равновесия и сообщают скорость $v=10$ см/с. Чему равна потенциальная и кинетическая энергии груза в начальный момент? Какова полная энергия груза? Напишите уравнение его движения.
- 2.7. Груз массой $m=1$ кг, подвешенный на пружине жесткостью $k=200$ Н/м, находится на подставке. В начальный момент пружина не деформирована. Подставку быстро убирают. Запишите закон движения грузика и определите его максимальную скорость.
- 2.8. Длина математического маятника 1 метр. Чему равен период и частота его колебаний на Земле?
- 2.9. Как нужно изменить длину математического маятника, чтобы его период увеличился в 3 раза?
- 2.10. Как изменится период колебаний маятника, если его перенести с Земли на Луну? Ускорение свободного падения на Луне $1,6$ м/с².
- 2.11. Как изменится период колебаний математического маятника, если он находится в лифте, движущемся вверх с ускорением $0,4g$?
- 2.12. Найти отношение длин двух математических маятников, если отношение периодов их колебаний равно 1,5.
- 2.13. Период колебаний математического маятника при больших углах отклонения можно определить по формуле $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right)}$. Докажите справедливость этой формулы.
- 2.14. Маятник с длиной подвеса 1 м отклонили на угол 60° от положения равновесия и отпустили. Найдите, на какой высоте скорость маятника будет равна 1 м/с.
- 2.15. Материальная точка массой $m=10$ г совершает гармонические колебания. Полная энергия ее равна $3,1 \cdot 10^{-5}$ Дж. Определите циклическую частоту колебаний, если амплитуда колебаний 5 см.
- 2.16. В СИ записано дифференциальное уравнение гармонических колебаний пружинного маятника $0,1 \ddot{x} + 10x = 0$. Найдите период колебания маятника.

III. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Возникновение волны. Точечный источник волн. Волновой процесс. Поперечные и продольные волны. Поверхностные волны. Связь между длиной волны, скоростью ее распространения и периодом. Волновая поверхность и фронт волны. Уравнение плоской волны

3.1. Волновой процесс

Колебания, возникающие в некоторой точке пространства, за счет того или иного взаимодействия могут передаваться в разных направлениях.



Процесс распространения колебания в пространстве называется **волновым процессом** или **волной**.

Примером распространения волны могут служить хорошо известные нам волны на поверхности жидкости. Бросим камень, скажем, в озеро со спокойной поверхностью воды (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Волны на поверхности воды

От места падения камня начнет распространяться волна, а вернее целая «*группа волн*». Наблюдается сумма колебаний различных частот и обнаруживается изменение амплитуды во времени.

Итак, при распространении некоторого волнового импульса мы наблюдаем распространение нескольких волн (некоторой их группы). Скорость распространения импульса потому и называется групповой.



Количество синусоидальных волн, образующих импульс (волновой пакет, группу волн, цуг), может быть как конечным (минимум — две), так и бесконечным.

Чтобы получить круговые волны на поверхности воды, нам необходимо создать некоторое возмущение в точке, которая будет центром окружностей, образованных фронтами.

Чтобы эта волна имела определенную (единственную) частоту, необходимо непрерывное (периодическое) возмущение. Его можно осуществить с помощью колеблющегося в вертикальном направлении закрепленного на стержне шарика (рис. 3.2). Хотя и такая волна все-таки не будет синусоидальной, так как ее амплитуда будет обратно пропорциональной корню квадратному от расстояния до начала координат.

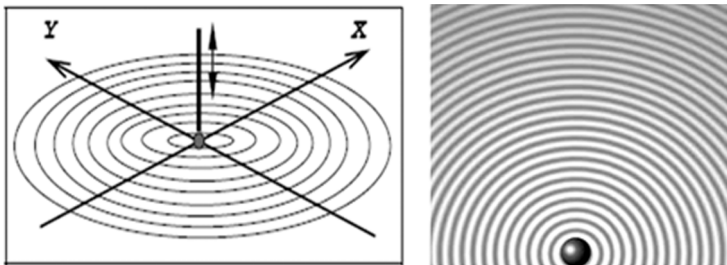


Рис.3.2. Круговые волны на поверхности воды



Причиной возникновения волны является не само движение шарика, а периодическое возмущение поверхности воды в точке возникновения волны.

3.2. Демонстрация волнового движения: связанные маятники и волновые машины

В природе и технике нередко встречаются колебательные системы, которые состоят из нескольких тел, взаимодейству-

ющих между собой посредством упругих сил. Такие системы можно рассматривать как несколько *связанных* между собой простых *колебательных систем*.

В качестве примера рассмотрим систему, состоящую из двух одинаковых математических маятников, расположенных симметрично друг относительно друга (с одинаковыми грузиками и нитями одной длины) на поперечном гибком подвесе, концы которого жестко закреплены в штативах (рис. 3.3).

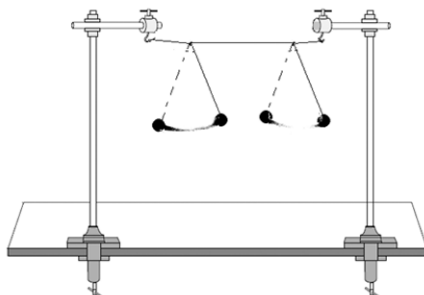


Рис. 3.3. Собственные колебания связанных маятников

Удерживая один из маятников в положении равновесия, другой отклоним на небольшой угол в поперечном направлении. Будем наблюдать за поведением маятников. Амплитуда колебаний первоначально отклоненного маятника будет постепенно уменьшаться, одновременно с этим второй маятник будет раскачиваться сильнее и сильнее. В какой-то момент времени маятники будут колебаться с одинаковыми амплитудами. А спустя некоторое время первый маятник приостановится (т.е. войдет в первоначальное состояние равновесия), а второй раскачается настолько, что его амплитуда будет примерно такой же, как в начальный момент у первого маятника. Продолжим наблюдать. Теперь все процессы будут происходить в обратной последовательности — амплитуда второго маятника будет уменьшаться, а первого — увеличиваться (до тех пор, пока не достигнет прежней амплитуды). Затем все повторится сначала. Передатчиком колебаний в этом опыте является гибкий подвес. Процесс перекачки энергии между одинаковыми маятниками будет продолжаться до тех пор, пока колебания не затухнут. Результат, полученный на конкретном примере, имеет общий характер: **в связанных ко-**

лебательных системах колебательное возбуждение распространяется.

Для демонстрации механизма образования продольных и поперечных волн с возможностью изменения частоты и амплитуды колебаний в середине XIX века начали появляться так называемые волновые машины. Одна из таких модификаций, созданная Эбенизером Стронгом Снеллом, представлена на рис. 3.4.

Конструктивно машина состоит из деревянной рамы, на которой при помощи тонких стальных спиц размещены шары. Движение от вращаемой вручную рукояти передается на спицы при помощи эксцентриков.

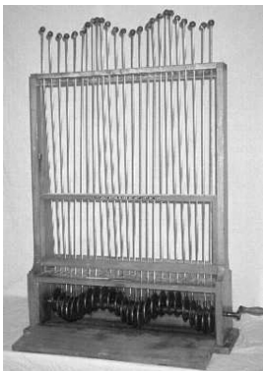
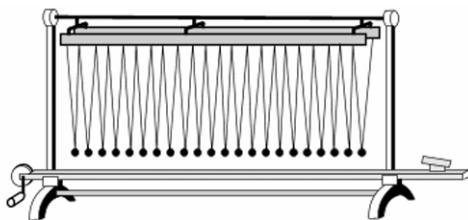


Рис. 3.4. Демонстрационная машина Снелла

Следующая модификация волновой машины показана на рис. 3.5. Тут ряд бифилярно подвешенных маятников также могут колебаться перпендикулярно к оси ряда. Если последовательно выводить маятники из положения равновесия (что достигается равномерным движением наклонной пластинки, показанной в правой части рисунка), то создается модель бегущей волны.



*Рис. 3.5. Демонстрация бегущей волны
с помощью волновой машины*

Также можно собрать систему, состоящую из цепи маятников, закрепленных на нитях разной длины. После отклонения всей цепи маятников на одинаковый угол и «запуска», каждый маятник начнет колебаться со своей собственной частотой, вследствие чего можно наблюдать эффект «бегущей волны» (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Демонстрация бегущих волн при помощи математических маятников, закрепленных на нитях разной длины



При распространении волны частицы колеблются около своих положений равновесия, а не перемещаются вслед за волной. Представьте себе, что группа людей (например, на стадионе) встает и присаживается обратно, люди, находящиеся вблизи, видят их и также встают и т.д. Очень скоро такая волна распространится по всему стадиону, при этом люди остаются на своих местах.

Каждая частица (грузик) во всех рассмотренных примерах колеблется около своего положения равновесия *значительно быстрее*, чем распространяется сама волна. Поэтому скорость распространения волны нельзя связывать со скоростью движения материальных частиц среды, в которой распространяется волна. Скорость распространения волны представляет собой скорость распространения в пространстве определенной фазы колебаний. Поэтому скорость волны принято называть фазовой скоростью.

3.3. Поперечные, продольные и поверхностные волны

Внутри твердых, жидких и газообразных сред могут распространяться упругие волны. В зависимости от направления колебаний частиц и направления распространения волны различают *волны поперечные и продольные*.

3.3.1. Поперечные волны



Поперечными называются волны, направление распространения которых перпендикулярно колебаниям частиц среды (рис. 3.7). Поперечные волны возникают в твердых телах.

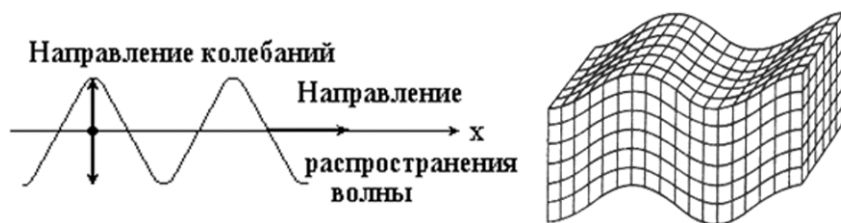


Рис. 3.7. Поперечная волна

Рассмотрим распространение отдельного (уединенного) волнового импульса. Возьмем длинный резиновый шнур, один конец которого закрепим, а другим быстрым движением руки совершим однократное колебание вверх-вниз в вертикальной плоскости (рис. 3.8).

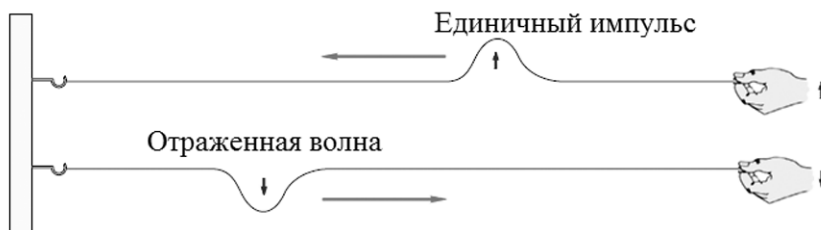


Рис. 3.8. Распространение однократного поперечного волнового импульса по натянутому шнуру

Рука тянет конец шнура вверх, а поскольку концевой участок шнура «связан» с соседними участками, то им также передается сила, действующая вверх. Один за другим последовательные участки шнура поднимаются вверх, и вдоль шнура движется гребень волны. Тем временем рука, держащая конец шнура, опускается в исходное положение — вниз, и участки шнура, уже пришедшие в верхнюю точку движения, в той же последовательности возвращаются в исходное состояние.

Распространение волнового возмущения обусловлено силами взаимодействия между соседними участками шнура. Для лучшего понимания шнур приблизительно можно считать цепочкой материальных точек — шариков массой m , соединенных друг с другом упругими силами — пружинами с жесткостью k (рис. 3.9).

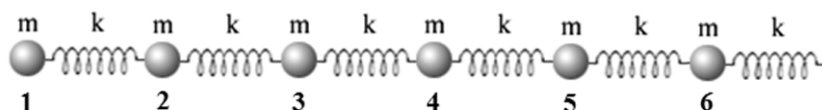


Рис. 3.9. Одномерная модель как аналог гибкого шнура

Видно, что чем дальше частица отстоит от источника колебаний, тем больше она запаздывает в совершении колебаний по сравнению с источником колебаний. Через время импульс дойдет до закрепленного конца, теперь в месте крепления возникнет сила, направленная вверх. Согласно III-му закону Ньютона возникнет еще одна сила, равная по величине и противоположная по направлению. Эта направленная вниз сила и создаст перевернутый отраженный импульс — там, где был гребень, будет впадина. Принято говорить, что отраженный импульс меняет фазу на 180° (что эквивалентно потере полуволны). Таким образом, при закрепленном шнуре, отраженная волна будет отличаться по фазе на 180° от падающей волны.



Волна, гребни и впадины которой перемещаются в среде (происходит перенос энергии), называется *бегущей волной*.

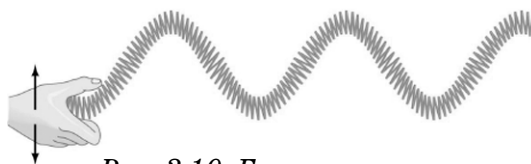


Рис. 3.10. Бегущая волна

3.3.2. Продольные волны

Не всякие волны можно увидеть. После удара молотком по ветви камертона мы слышим звук, хотя никаких волн в воздухе не видим. Поднесем к звучащему камертону маленький шарик, звук будет слышно до тех пор, пока шарик будет отскакивать от камертона (рис. 3.11).

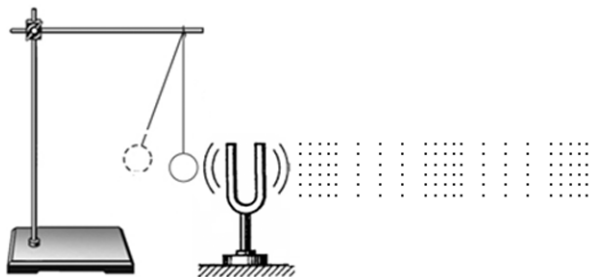


Рис. 3.11. Звучащий камертон

Ощущение звука в наших органах слуха возникает при периодическом изменении давления воздуха. Колебания ветви камертона сопровождаются периодическими сжатиями и разрежениями молекул воздуха вблизи нее. Процессы сжатия и разрежения распространяются в воздухе во все стороны. Они и являются *звуковыми волнами*.

При распространении звуковой волны частицы среды совершают колебания вдоль направления распространения волны.



Волны, в которых колебания происходят вдоль направления распространения волны, называют **продольными волнами** (рис. 3.12).



Рис. 3.12. Продольная волна

Представим, что у нас имеется цепочка шариков массой m , соединенных последовательно пружинками с жесткостью k (рис. 3.9). Причем размеры самих шариков малы по сравнению с расстоянием между ними, а масса пружинок пренебрежимо мала по сравнению с массой шариков. Давайте сообщим крайнему слева шарiku импульс, направленный вдоль цепочки, толкнув его. По цепочке побежит волна упругой деформации, которая через определенное время достигнет правого конца цепочки. Так как последний шарик связан с цепочкой пружинкой, растянутая пружинка вынудит его вернуться назад, а затем, вследствие своей инертности, шарик сожмет пружинку. Теперь уже отраженная волна деформации побежит справа налево. Дойдя до первого шарика, она опять отразится и т.д. (рис. 3.13).

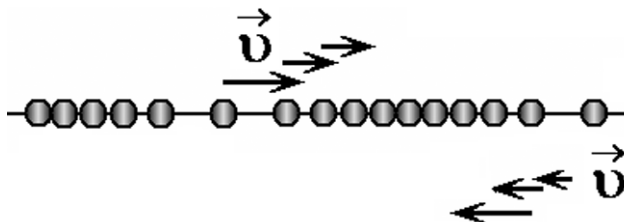


Рис. 3.13. Продольная волна упругой деформации, распространяющаяся вдоль цепочки из шариков

Продольную волну можно наблюдать на длинной мягкой пружине большого диаметра. Ударив по одному из концов пружины, увидим процесс распространения последовательных сгущений и разрежений ее витков, бегущих друг за другом (рис. 3.14).

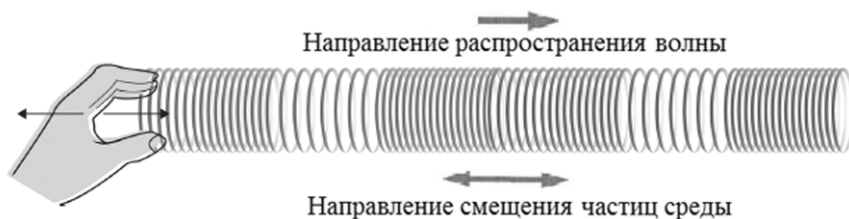


Рис. 3.14. Демонстрация продольных колебаний с помощью пружины

Для еще одной демонстрации рассмотрим модель, приведенную на рис. 3.15. Качая крайний шар вперед и назад (параллельно рейкам АВ и CD), увидим, как образуются и распространяются вдоль по цепочке чередующиеся уплотнения и разрежения.

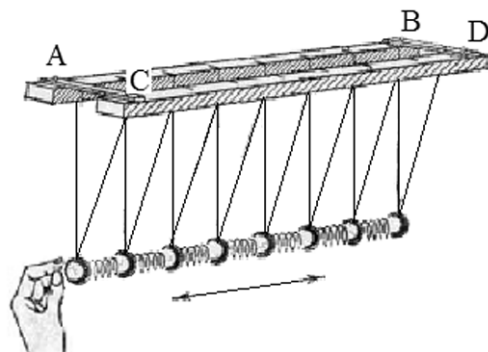


Рис. 3.15. Демонстрация продольных колебаний

Продольные волны можно продемонстрировать и с помощью волновой машины, изображенной на рис. 3.16. Установка представляет собой вертикальную панель, на лицевой стороне которой на спицах закреплены шарики, имитирующие частицы среды. Поворот ручки по часовой стрелке вызывает продольную бегущую волну, распространяющуюся слева направо. Отчетливо видны последовательные стадии образования и распространения продольной волны — чередования областей сжатия и разрежения частиц среды.

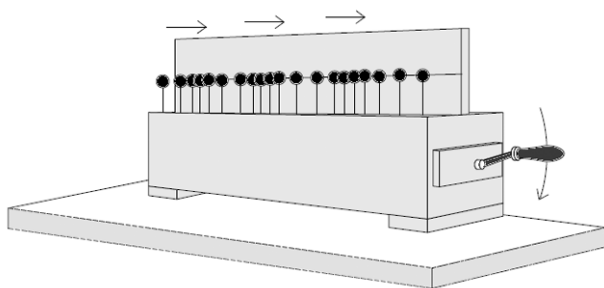


Рис. 3.16. Волновая машина для демонстрации продольных волн

Как в поперечных, так и в продольных волнах процесс распространения колебаний *не сопровождается переносом вещества* в направлении распространения волны, а *сопровождается передачей энергии колебаний* от одной точки среды к другой. В каждой точке пространства частицы лишь совершают колебания относительно своего положения равновесия.



Следует отличать скорость колебания отдельной частицы (колебательная скорость) от скорости распространения волны. Скорость колебания отдельной частицы в процессе ее колебания меняется — когда частица проходит положение равновесия, ее скорость максимальна, когда она отклонилась на расстояние, равное амплитуде, ее скорость становится равной нулю.

Появление поперечных волн в твердых телах объясняется возникновением сил упругости при деформациях сдвига. Электромагнитные волны, в том числе и свет, являются поперечными. Продольные волны могут возникать как в твердых телах, так и в жидкостях, и газах.

3.3.3. Поверхностные волны

Следующий интересный тип волн — *поверхностные волны* — волны, распространяющиеся на границе раздела двух сред.

Волны на поверхности воды — один из примеров поверхностных волн, существующих на границе между водой и воздухом. Такие волны являются более сложными, т.к. имеют как поперечную, так и продольную компоненты. В волне движение жидкости не стационарно. При малых амплитудах с большим приближением волны на поверхности воды могут изображаться простыми синусоидальными волнами. Можно утверждать, что поверхностные частицы движутся по круговым путям — окружностям (рис. 3.17).

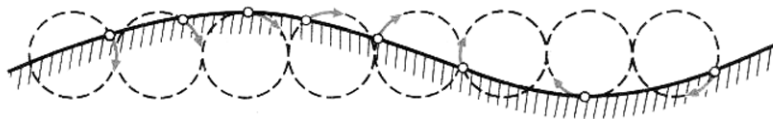


Рис. 3.17. Траектории движения поверхностных частиц воды в синусоидальной волне

Частицы, лежащие глубже, испытывая давление со стороны вышележащих, движутся по круговым путям эллиптического вида (в самой нижней части рис. 3.18 показаны продольные волны). Диаметры круговых путей будут наибольшими только в самых верхних слоях.

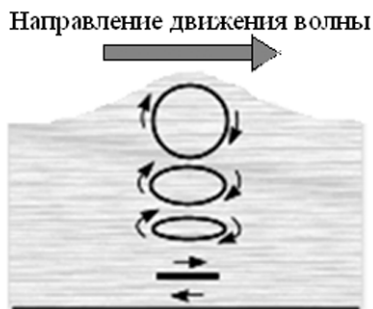


Рис. 3.18. Траектории движения частиц воды

3.4. Связь между длиной волны, скоростью ее распространения и периодом (частотой)

Скорость, с которой распространяется возмущение в упругой среде, называют скоростью волны v .

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебания T , называют длиной волны λ (рис. 3.19):

$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f} = \frac{2\pi v}{\omega}$	(1.5)
---	--------------

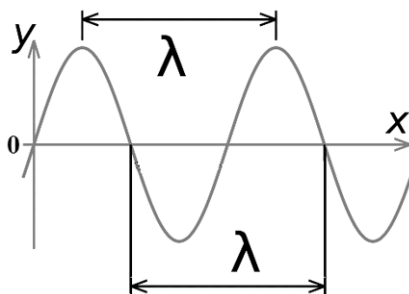


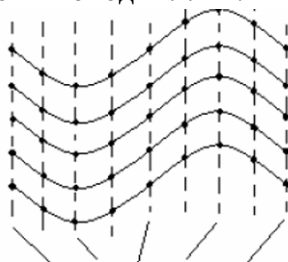
Рис. 3.19. Длина волны λ может быть измерена между любыми двумя точками волны с одинаковой фазой, максимумами, минимумами или узлами волны



Длина волны — это расстояние между ближайшими точками среды, колеблющимися в одинаковых фазах.

3.5. Волновая поверхность

Волновая поверхность — поверхность, проведенная через равновесные положения частиц среды, совершающих колебания в одинаковой фазе (рис. 3.20). Волновых поверхностей бесконечно много и они неподвижны.



Волновые поверхности

Рис. 3.20. Волновые поверхности для плоской гармонической волны

Фронт волны — поверхность, разделяющая частицы среды на вовлеченные и не вовлеченные в колебательное движение. Фронт волны в каждый момент времени один (он движется со скоростью волны).

Можно сказать, что *фронт волны* — это самая дальняя от источника колебаний в данный момент времени волновая поверхность. В каждой точке фронта волны вектор скорости распространения волны направлен перпендикулярно к ней. Волновой фронт также является волновой поверхностью.

Форма волновых поверхностей (фронта волны) зависит от условий возникновения и распространения волны. По виду фронта волны выделяют *плоские, сферические и цилиндрические волны* (рис. 3.21).

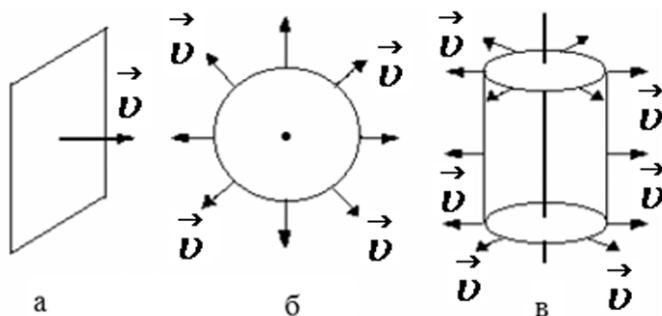


Рис. 3.21. Плоская (а), сферическая (б) и цилиндрическая (в) волны

В идеале для этих волн источником колебаний являются соответственно плоскость, точка и протяженная нить.

3.6. Смещение частиц среды в бегущей волне

Для вывода уравнения бегущей волны рассмотрим плоскую волну, распространяющуюся вдоль оси x , предполагая, что колебания носят гармонический характер (рис. 3.17). Такая идеализация лишь приблизительно реализуется на практике. В плоской волне волновые поверхности будут представлять совокупность плоскостей, параллельных друг другу (рис. 3.20, рис. 3.22).

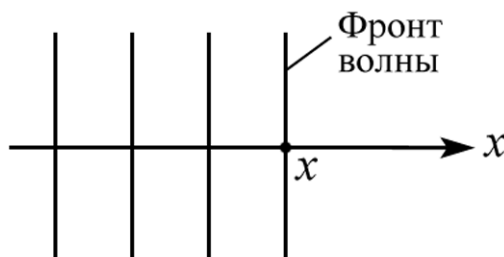


Рис. 3.22. Волновые поверхности в плоской волне

Например, звуковую волну в трубе небольшого сечения по сравнению с длиной волны можно считать приблизительно плоской, как и сферическую волну на большом расстоянии от источника колебаний.



Уравнением волны называется выражение, которое дает смещение колеблющейся точки как функцию ее координат и времени. Эта функция должна быть периодической как относительно времени, так и координат (волна — это распространяющееся колебание, следовательно, периодически повторяющееся движение). Кроме того, точки, отстоящие друг от друга на некотором расстоянии, колеблются одинаковым образом.

Направим оси координат так, чтобы ось x совпадала с направлением распространения волны на примере уже известной нам одномерной модели. Тогда волновая поверхность будет перпендикулярна оси x . Так как все точки волновой поверхности колеблются одинаково, смещение y будет зависеть только от x и t (рис. 3.23). Заставим начальную точку 0 совершать во времени колебания по некоторому закону $y=f(t)$. Выберем вдоль направления распространения волны на расстоянии от источника волн x произвольную точку (например, точку $x=3$).

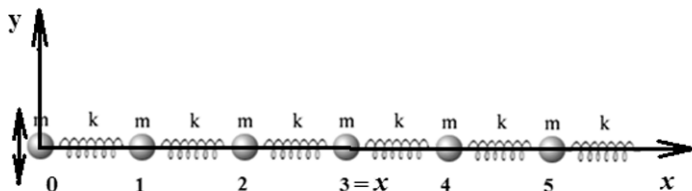


Рис. 3.23. К уравнению плоской волны

Колебания в точке x будут повторять колебания в точке 0, но только с запаздыванием (отставанием) по времени t , т.е. необходимо некоторое время для распространения волны из точки 0 в точку x (чтобы пройти путь x , необходимо время $\tau = \frac{x}{v}$). Тогда в общем виде уравнение незатухающей волны, которая распространяется вдоль положительного направления оси x со скоростью v , можно записать как $y = f(t) = y(x, t) = f\left(t - \frac{x}{v}\right)$.

Если же колебания частиц происходят по гармоническому закону, то $f(t) = x_m \sin(\omega t + \varphi_0)$.

$$\text{Значит, } f\left(t - \frac{x}{v}\right) = x_m \sin\left(\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi_0\right) \Rightarrow y(x, t) = x_m \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{v}x + \varphi_0\right),$$

причем $\frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{T v} = \frac{2\pi}{\lambda} = k$ называется **волновым числом**. Можно говорить, что k — это скорость изменения фазы в пространстве, а ω — скорость изменения фазы во времени.

Таким образом, уравнение плоской волны, которая распространяется вдоль положительного направления оси x со скоростью v в среде, *не поглощающей* энергию (т.е. амплитуда колебаний неизменна $x_m = \text{const}$):

$y(r, t) = \frac{x_{m0}}{r} \sin[\omega t - kr + \varphi_0]$	(3.1)
--	--------------

где x — расстояние от источника волн до рассматриваемой точки среды вдоль направления распространения волны, $y(x, t)$ — координата гармонического колебания данной точки, φ_0 — начальная фаза гармонического колебания источника волн, x_m — амплитуда волны, ω — циклическая частота.

Волна, распространяющаяся в противоположном (отрицательном) направлении вдоль оси x , имеет вид

$$y(x, t) = f\left(t + \frac{x}{v}\right) = x_m \sin[\omega t + kx + \varphi_0].$$

Повторяя ход рассуждений для плоской волны, можно доказать, что **уравнение сферической волны** — волны, волновые поверхности которой имеют вид концентрических сфер, записывается как:

$y(x, t) = x_m \sin[\omega t - kx + \varphi_0]$	(3.2)
---	--------------

где r — расстояние от центра волны до рассматриваемой точки среды, x_{m0} — физическая величина, численно равная амплитуде волны на единичном расстоянии от ее центра (центр волны — это центр сфер), φ_0 — начальная фаза колебаний в центре этой волны, т.е. в точке $r=0$.

В случае сферической волны даже в среде, не поглощающей энергию, амплитуда колебаний не остается постоянной, а убывает с расстоянием по закону $1/r$. Уравнение (3.2) справедливо лишь для r , значительно превышающих размеры источника (тогда источник колебаний можно считать точечным).

3.7. Поток энергии и интенсивность волны. Вектор Умова

Распространение механической волны, представляющее собой последовательную передачу движения от одного участка среды к другому, означает тем самым передачу энергии. Количественной характеристикой перенесенной энергии является поток энергии. Представление о потоке энергии, переносимой волнами, впервые дал в 1874 г. ученый-физик Николай Алексеевич Умов.

Поток энергии волн (Φ) равен отношению энергии, переносимой волнами через некоторую поверхность, ко времени, в течение которого эта энергия перенесена

$\Phi = \frac{\Delta E}{\Delta t}$	(3.3)
------------------------------------	-------

Единицей потока энергии вол является ватт $\left[\frac{Дж}{с} = Вт \right]$.

Интенсивность (или плотность потока энергии) волны (I) — отношение потока энергии Φ к площади S поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения волны:

$I = \frac{\Phi}{S}$	(3.4)
----------------------	-------

Интенсивность измеряется в $[Вт/м^2]$.

Подставим (3.3) в (3.4)

$I = \frac{\langle E \rangle}{S \cdot t}$	(3.5)
---	-------



Итак, интенсивность (I) — величина, определяемая средней по времени энергией ($\langle E \rangle$), переносимой волной в единицу времени сквозь единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.

Представим в виде параллелепипеда длиной l участок среды, в которой распространяется волна. Площадь грани параллелепипеда, перпендикулярной направлению скорости волны v , обозначим через S (рис. 3.24).

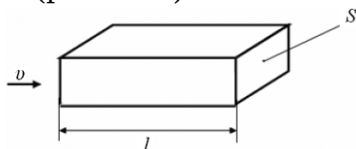


Рис. 3.24. К выводу связи между интенсивностью волны и скоростью ее распространения

Введем **объемную плотность энергии** колебательного движения w , представляющую количество колебательной энергии в единице объема среды: $w_p = E/V$, [Дж/м³]. За время t через площадку S пройдет энергия, равная произведению величины объема $V = l \cdot S = v \cdot t \cdot S$ на объемную плотность энергии w_p :

$E = w_p \cdot v \cdot t \cdot S$	(3.6)
-----------------------------------	--------------

Разделив левую и правую части формулы (3.6) на время и площадь, получим выражение, связывающее интенсивность волны и скорость ее распространения: $I = w_p \cdot v$. Это скалярное выражение зачастую записывают в виде $I = \langle w_p \rangle \cdot v$, где $\langle w_p \rangle$ — средняя объемная плотность энергии волны.

Вектор $\vec{I}$, модуль которого равен интенсивности волны, а направление совпадает с направлением ее распространения, носит название **вектора Умова**

$\vec{I} = w_p \cdot \vec{v}$	(3.7)
-------------------------------	--------------

Формулу (3.7) можно представить в несколько ином виде. Учитывая, что энергия гармонических колебаний (см. 2.13) равна $E = \frac{1}{2} m x_m^2 \omega_0^2$ и масса $m = \rho \cdot V$, где ρ — плотность вещества, а V — его объем, получим выражение для объемной плотности энергии волны:

$w_p = \frac{1}{2} \rho x_m^2 \omega_0^2$	(3.8)
---	--------------

Теперь формула (3.7) принимает вид:

$\vec{I} = \frac{1}{2} \rho x_m^2 \omega_0^2 \vec{v}$	(3.9)
---	-------

Итак, интенсивность механической волны прямо пропорциональна скорости ее распространения v , квадрату амплитуды колебаний частиц среды x_m^2 и квадрату частоты колебаний ω_0^2 .

3.8. Понятие о линейных и нелинейных волнах

Волна называется *линейной*, если свойства среды для этой волны не зависят от интенсивности волны. Линейные волны не влияют на прохождение других волн и распространяются независимо друг от друга без каких-либо искажений. Это можно проиллюстрировать следующим опытом. Если бросить в воду два камешка, то расходящиеся от них круги не влияют друг на друга — одна группа волн без изменений проходит через другую. Аналогично ведут себя линейные электромагнитные волны. Пространство заполнено электромагнитными волнами телевизионных и радиовещательных центров, систем сотовой связи, имеющих различную частоту и разное направление распространения.



Параметры среды и скорость линейной волны не зависят от её интенсивности. К линейным волнам применим единый теоретический подход независимо от их природы.

Нелинейная волна — это волна, под действием которой меняются свойства среды и соответственно меняются свойства самой волны, что обычно происходит при большой интенсивности волны. К нелинейным волнам относят:

- волны в средах с нелинейными параметрами, изменяющимися со степенью возмущения среды, волны в неоднородных средах;
- солитоны (уединенные волны);
- ударные волны.

3.9. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки

- 3.1. Что называется волной?
- 3.2. Какие колебательные системы называются связанными системами?
- 3.3. Какие волны называют поперечными? Продольными? Приведите примеры.
- 3.4. Рассмотрите подробно процесс возникновения продольных волн.
- 3.5. Рассмотрите подробно процесс возникновения поперечных волн.
- 3.6. Могут ли поперечные волны распространяться в жидкости или газе? Почему?
- 3.7. Какого типа волны будут возбуждены в горизонтальном металлическом стержне, если ударить по его концу молоточком: а) сбоку, б) в торец?
- 3.8. Какая волна называется бегущей?
- 3.9. Что понимают под длиной волны? Периодом волны? Частотой?
- 3.10. Как связаны скорость распространения волны, длина волны и частота (период)?
- 3.11. Объясните различие между скоростью поперечной волны, бегущей по веревке, и скоростью частиц на малом участке веревки.
- 3.12. Дайте определение волновой поверхности.
- 3.13. Что называется фронтом волны? Чем отличается фронт волны от волновой поверхности?
- 3.14. Чем отличаются плоские волны от сферических?
- 3.15. Получите уравнение плоской бегущей волны. Объясните физический смысл всех величин, входящих в это уравнение.
- 3.16. Что переносится волной?
- 3.17. Что называется интенсивностью волны?
- 3.18. В чем заключается физический смысл вектора Умова?



При образовании волн частицы воды не перемещаются вдоль направления их распространения, а лишь участвуют в колебательном движении около некоторого среднего положения. Почему же морское волнение часто выбрасывает на берег различные плавающие в море предметы?



Параметры среды и скорость линейной волны не зависят от её интенсивности. К линейным волнам применим единый теоретический подход независимо от их природы.

3.10. Задачи для самостоятельного решения

- 3.1. За 10 секунд материальная точка совершает 20 гармонических колебаний. Чему равна частота и период колебаний?
- 3.2. Камертон излучает звуковую волну длиной 0,5 м. Скорость звука 340 м/с. Какова частота колебаний камертона?
- 3.3. Найдите скорость распространения волны, если длина волны 6 м, а частота 0,25 Гц.
- 3.4. Какой частоте камертона соответствует звуковая волна в воздухе длиной 34 м? Скорость звука в воздухе равна 340 м/с.
- 3.5. Дельфины испускают ультразвуковые волны с частотой 250 000 Гц. Определите длину волны такого звука а) в воде; б) в воздухе. Скорость звука в воздухе принять равной 340 м/с, в воде — 1480 м/с.
- 3.6. Ухо человека имеет наибольшую чувствительность в диапазоне 1,5–3 кГц. Определите длины волн для этого диапазона, если скорость звука 340 м/с.
- 3.7. Звуковая волна частотой $f=2$ кГц распространяется в воздухе со скоростью $v_1=340$ м/с. Какова длина волны в воздухе? Какой станет длина волны при переходе звука из воздуха в воду? Скорость звука в воде принять равной $v_2=1480$ м/с.
- 3.8. Найти длину волны в воздухе на частоте 500 Гц, если атмосферное давление 10^5 Па и плотность воздуха $\rho=1,26$ кг/м³.
- 3.9. На земле услышан гром через 6 с после наблюдения молнии. На каком расстоянии от наблюдателя возникла молния, если скорость звука в воздухе 340 м/с?
- 3.10. В шахту упал камень. Человек услышал звук его падения через 6,0 с после начала падения. Найти глубину шахты. Скорость звука в воздухе принять равной 330 м/с.
- 3.11. Найдите расстояние до объекта, если отраженный радиосигнал возвратился обратно через 10^{-4} с.
- 3.12. Интенсивность звука $I=10$ Вт/м². Определите среднюю объемную плотность $\langle w\rho \rangle$ энергии звуковой волны, если звук распространяется в сухом воздухе при температуре 0°C.

IV. ЗВУК И АКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ: РЕЗОНАНС, ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН

Звуковые волны в воздухе. Скорость распространения звука. Акустический резонанс. Эксперимент с гибкой однородной нитью. Эксперимент с резонаторами Г. Гельмгольца. Отражение и преломление волн. Эхо и реверберация

4.1. Распространение звука в газах

Звук — это колебательный процесс, возникающий в любой упругой среде под действием какого-либо колеблющегося тела (источника).

Звуковые волны — это распространяющиеся в среде упругие волны.

Звук в газах передается движением молекул среды. В газах положение атомов и молекул не фиксировано, движение молекул имеет хаотический характер. Вследствие столкновения молекул между собой их скорости все время меняются как по направлению, так и по величине. Поэтому для газов широко используются понятия *средней скорости* и *средней длины свободного пробега* молекул или атомов.

Средней длиной свободного пробега называется среднее расстояние, пролетаемое молекулами между двумя последовательными столкновениями (соударениями). Она зависит от плотности вещества. С уменьшением плотности газа средняя длина свободного пробега увеличивается. При атмосферном давлении и температуре $t=0^{\circ}\text{C}$ средняя длина свободного пробега молекул воздуха приблизительно составляет 10^{-8} – 10^{-7} м.

Как происходит процесс распространения звуковых волн в газах? Рассмотрим длинную трубу, наполненную воздухом.



Воздух состоит из кислорода на 21%, азота — 78%, водяных паров и инертных газов — 1%.

С левого конца в нее вставлен плотно прилегающий к стенкам поршень. Если поршень резко двинуть вправо и остановить, то воздух, находящийся в непосредственной близости от него, на мгновение сожмется (рис. 4.1).

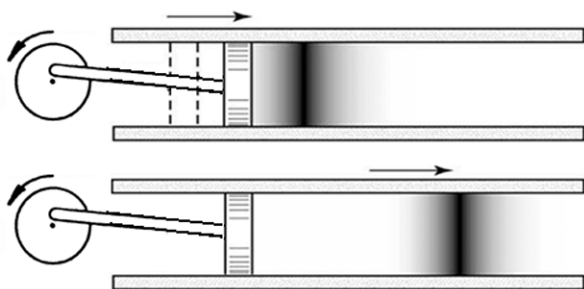


Рис. 4.1. Действие движения поршня на молекулы воздуха в трубе

В процессе сжатия газа возникает избыточное давление в этом слое относительно соседнего элемента объема газа. Молекулы сжатого слоя, вылетая из области с повышенными плотностью и давлением, передают импульс силы другим молекулам, находящимся в соседнем разреженном слое. Этот элемент объема воздуха, в свою очередь, сжимается, в нем возникает избыточное давление и т.д. Так область сжатия, первоначально возникшая вблизи поршня, будет перемещаться по трубе с некоторой скоростью. Эта волна сжатия и есть звуковая волна в газе.



Для получения звуковой волны нужно, чтобы молекулы, вылетая из области с большей плотностью и давлением, передавали импульс другим молекулам, находящимся в области разрежения. Звук возникнет только в том случае, если размеры области изменения плотности и давления (длина волны) намного больше длины свободного пробега молекул.

Итак, звуковая волна в газе характеризуется *избыточным давлением, избыточной плотностью, смещением частиц и их скоростью*. Для звуковых волн эти отклонения от равновесных значений всегда малы. Избыточное давление, связанное с волной, намного меньше статического давления газа. В противном случае мы имеем дело с другим явлением — *ударной волной*.

Источником звука может быть всякое тело, колеблющееся в упругой среде со звуковой частотой (например, в струнных инструментах источником звука является струна, соединенная с корпусом инструмента; в духовых инструментах — некоторый объем воздуха в трубах).



Частотный диапазон человеческого слуха, как известно, лежит в пределах от 20 Гц до 16–20 кГц. Нижняя граница одинакова почти для всех людей, тогда как верхняя очень индивидуальна и зависит, в том числе, от возраста. С возрастом верхняя граница слышимых частот значительно понижается. Колебания с частотами менее 20 Гц называются *инфразвуковыми*, а колебания с частотами более 20000 Гц — *ультразвуковыми*. У животных границы восприятия звуков по частоте также отличаются. Например, собаки улавливают звуковые колебания до 40–44 кГц, крысы — до 72 кГц, летучие мыши — до 115 кГц, а слон ощущает звуковые колебания только до 12 кГц. Частота звуковых колебаний, соответствующих человеческому голосу, составляет от 80 до 1400 Гц.

Предположим, что наш источник — плоская металлическая мембрана, колеблющаяся с определённой частотой в воздухе (рис. 4.2). Колебаться мембрану заставляет вынуждающая сила, в данном случае — переменное (синусоидальное) магнитное поле. Мембрана, в свою очередь, заставляет колебаться частицы воздуха — за мембраной распространяется плоская продольная упругая волна.

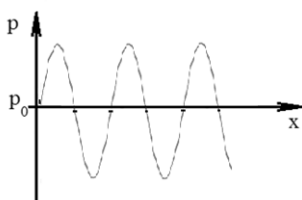
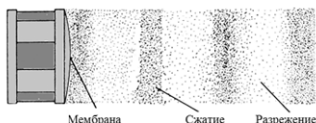


Рис. 4.2. Смещение молекул воздуха при гармоническом изменении звукового давления (относительно атмосферного давления p_0)

Размах колебательных смещений молекул зависит от **звукового давления**. Как видно из рис. 4.2, в области гребня волны молекулы находятся ближе друг к другу (фаза сжатия) — там давление выше атмосферного, а в области впадины волны (фаза разрежения) — давление ниже атмосферного. При этом **принято считать**, что в фазе сжатия звуковое давление положительное, а в фазе разрежения — отрицательное.



Звуковое давление — это избыток давления в звуковой волне над атмосферным. В звуковой волне, соответствующей обычной речи, избыточное давление составляет лишь около одной миллионной атмосферного давления.

Мы уже выяснили, что распространение звука в воздухе начинается с колебаний плотности воздуха у поверхности колеблющегося тела (источника), которые последовательно передаются все к более удаленным частицам среды. Однако колебания плотности воздуха можно создать и без колеблющегося тела. Давайте приведем во вращение диск, имеющий ряды в z , $1,5z$ и $2z$ маленьких отверстий, которые расположены по окружности и на одинаковых расстояниях (так называемая сирена Л. Зеебека). Будем продувать через них тонкую струю воздуха по порядку — в каждый ряд отверстий: от внутреннего ряда к внешнему (рис. 4.3, а). За диском струя будет прерывистой, т.к. *возникнут сгущения и разрежения воздуха*, а мы услышим звук. Причем частота звука с каждым следующим рядом будет выше. Изменяя скорость вращения диска при продувании воздуха через один и тот же ряд, увидим, что увеличение скорости повышает частоту, а уменьшение — понижает.

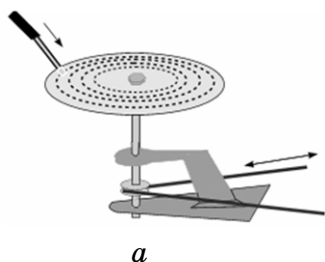


Рис. 4.3. Получение звука прерыванием струи воздуха (а), один из вариантов устройства сирены (б)



Очевидно, что число прерываний воздушной струи в секунду равно произведению числа отверстий z на число оборотов n диска в 1 с. То есть, *увеличивая скорость вращения диска или пользуясь рядом с большим количеством отверстий, мы увеличиваем число колебаний в секунду.*

На прерывании воздушной струи основано устройство сирены. В этом источнике звука вращающийся диск располагается обычно над неподвижным диском с таким же числом отверстий, причем отверстия прорезаны наклонно (рис. 4.3, б). Этим достигается, во-первых, то, что подвижный диск приводится во вращение самой воздушной струей подобно колесу турбины, а во-вторых, одновременно прерывается столько струй, сколько отверстий в диске, благодаря чему звук значительно усиливается.

Звук не может распространяться в отсутствие вещества. Для демонстрации этого на стеклянном колпаке при помощи резинового подвеса закрепим громкоговоритель (будем избегать прикосновения громкоговорителя к стеклянному колпаку, т.к. в этом случае звук будет передаваться непосредственно корпусу). Колоколом накроем тарелку, а громкоговоритель подключим к звуковому тон-генератору. После этого начнем откачивать воздух из-под колокола насосом, заметим при этом, что громкость звука постепенно уменьшается. После того, как достигнуто максимальное для насоса разрежение, звук едва слышен (рис. 4.4).

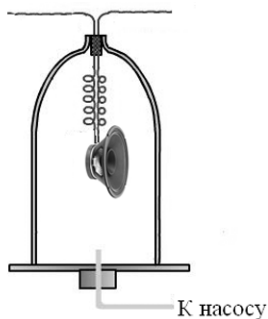


Рис. 4.4. В вакууме звук не распространяется

4.2. Скорость распространения звука

4.2.1. Скорость распространения звука в газах

4.2.1.1. Теплоемкость газа

Теплоемкостью тела называется отношение бесконечно малого количества тепла, полученного телом, к соответствующему приращению его температуры. Если эта величина отнесена к единице массы вещества, то говорят об удельной теплоемкости.

Теплоемкость газа существенно зависит от того, в каких условиях к исследуемому газу подводится теплота. Если теплота подводится к газу в условиях, когда его объём не может изменяться, то она расходуется только на его нагревание (т.е. на увеличение кинетической энергии частиц). Если же энергия в форме теплоты подводится к газу в условиях, когда он может расширяться, поддерживая свое давление постоянным, то теплота идет не только на нагрев газа, но и на работу, которую совершает газ при расширении. Следовательно, в этом случае для нагревания газа на 1°C требуется больше теплоты.

Поэтому говорят о теплоемкости при постоянном объёме C_v (**изохорическая** теплоемкость) и о теплоемкости при постоянном давлении C_p (**изобарическая** теплоемкость). Ясно, что C_p всегда больше, чем C_v , так что отношение C_p/C_v больше единицы.

Отношение C_p/C_v определяет скорость распространения звука в газе.

4.2.1.2. Скорость распространения звуковых волн в идеальных газах

Скорость распространения звуковых волн в газах вычисляется по формуле:

$v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} = \sqrt{\frac{\gamma R (273,15 + t^{\circ}\text{C})}{M}}$	(4.1)
--	--------------

где R — газовая постоянная, $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$, M — молярная масса, $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ — отношение молярных теплоемкостей газа при постоянных давлении и объеме, T — абсолютная температура (К), t — температура в градусах Цельсия.



Представьте себе, что мы нагреваем газ. Мы можем нагреть его при постоянном давлении, давая объему увеличиться, или при постоянном объеме, давая увеличиться давлению. В первом случае требуется больше энергии, поскольку давление совершает работу, расходуемую на увеличение объема. Отношение удельных теплоемкостей, измеренных этими двумя способами, и обозначают через γ . Для многих газов, например, кислорода, водорода, азота, воздуха можно принять $\gamma=1,4$.

Из формулы (4.1) следует, что скорость звука в газе зависит от температуры и величин γ и M . Значения молярной массы и коэффициента адиабаты γ для некоторых газов сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1.

Сравнение молярной массы и коэффициента гамма
для некоторых газов

Газ	γ	$M \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
Водород (H_2)	1,41	2
Гелий (He)	1,66	4
Угарный газ (CO)	1,40	28
Воздух	1,40	29
Кислород (O_2)	1,40	32
Углекислый газ (CO_2)	1,33	44
Ксенон (Xe)	1,67	131

На первый взгляд может показаться, что скорость звука в газе зависит от давления. Однако это не так, потому что при изменении давления изменяется также и плотность. Экспериментально установлено, что в широком диапазоне изменения давлений скорость звука не зависит от давления. Только при очень высоких давлениях (~ 100 атм) скорость звука увеличивается.

Скорость звука в газах увеличивается с повышением температуры. Так как процесс распространения сжатия или разре-

жения в газе происходит в результате столкновений молекул газа, то **скорость распространения звука в газах** примерно **равна скорости теплового движения молекул**. Средняя скорость теплового движения молекул увеличивается с повышением температуры и уменьшается с понижением температуры газа, поэтому скорость распространения звука в газе также увеличивается и уменьшается соответственно с повышением и понижением температуры. Например, в водороде при понижении температуры от 300 до 17 К скорость звука уменьшается от 1300 до 320 м/с.

4.2.1.3. Скорость звука в воздухе

Важным событием в развитии акустики было экспериментальное определение скорости распространения звука. Первые опыты по измерению скорости звука в воздухе были поставлены А. Гумбольдтом и А. Араго в 1822 г. В этих опытах измерялось время t между моментом наблюдения световой вспышки и моментом прихода звука при выстреле из пушки. Скорость распространения света в этих опытах принималась бесконечно большой, поэтому скорость звука определялась по известному расстоянию S до пушки и времени t распространения звука ($v = \frac{S}{t}$).

При атмосферном давлении скорость звука в воздухе описывается уравнением (4.2).

$v_{зв} \approx 331,5 + 0,6 \cdot t^0 C. \quad [м/с]$	(4.2)
---	-------

Так, при $t=0^0C$ скорость звука в воздухе $v_{зв} = 331,5$ м/с, а при $t=20^0C$ — $v_{зв} = 343,5$ м/с.

4.2.2. Скорость звука в жидкостях и твердых телах

В связи с тем, что связь между атомами и молекулами в жидкостях и твердых телах значительно более жесткая, чем в газах, скорость распространения звуковых волн в жидкостях и твердых телах значительно больше скорости распространения звука в газах.

Выражение для скорости звука в жидкостях:

$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\beta\rho}}$	(4.3)
--	-------

где K — объемный модуль упругости, β — адиабатическая сжимаемость вещества, ρ — плотность жидкости.

Скорость звука в воде впервые была измерена в 1826 г. Ж. Колладоном и Я. Штурмом. Опыт проводили на Женевском озере в Швейцарии. На одной лодке поджигали порох и одновременно ударяли в колокол, опущенный в воду. Звук этого колокола с помощью специального рупора, также опущенного в воду, регистрировался на другой лодке, которая находилась на расстоянии 14 км от первой. По интервалу времени между вспышкой света и приходом звукового сигнала определили скорость звука в воде. При температуре 8°C она оказалась равной 1440 м/с.

Скорость звука увеличивается в более соленой и более теплой воде. При большем давлении скорость также возрастает (чем больше глубина, тем скорость звука выше).

В твердых телах могут распространяться и продольные, и поперечные волны, их скорость определяется (4.4).

$v_{\text{прод}} = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma) \cdot (1-2\sigma)}}, \quad v_{\text{поп}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$	(4.4)
---	-------

где E — модуль упругости (или модуль Юнга), G — модуль сдвига, σ — коэффициент Пуассона, ρ — плотность среды.

Скорость распространения продольной волны в тонком стержне можно рассчитать как $v_{\text{прод}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. Модуль сдвига

примерно в 2–4 раза меньше модуля упругости, следовательно скорость распространения продольных волн всегда выше, чем скорость поперечных. Так, в стали поперечные волны распространяются со скоростью 3300 м/с, а продольные — 6100 м/с.

На этой разнице скоростей основаны сейсмические методы разведки полезных ископаемых. В скважине, вырытой под почвой, подрывается заряд взрывчатки (момент начала взрыва регистрируется датчиком). Волны, отраженные от разных участков почвы, регистрируются набором сейсмографов, ко-

лебания от которых передаются на сейсмическую станцию. Здесь они усиливаются и вместе с метками времени записываются в виде сейсмограмм, анализ которых позволяет судить о распределении горных пород. Сейсмические методы широко применяются при поисках нефти, газа, руд и т.п.

4.3. Акустический резонанс

Звуковые волны, встречаясь с любым телом, вызывают вынужденные колебания. Если частота собственных свободных колебаний тела совпадает с частотой звуковой волны, то условия для передачи энергии от звуковой волны телу оказываются наилучшими — тело является акустическим резонатором. Амплитуда вынужденных колебаний при этом достигает максимального значения — наблюдается *акустический резонанс*.



Резонанс следует отличать от вынужденных колебаний, возникающих при несовпадении частот.

4.3.1. Демонстрация акустического резонанса при помощи камертона

Проведем демонстрацию акустического резонанса при помощи камертона.



Камертон — небольшой изогнутый U-образный металлический стержень с двумя совершенно одинаковыми ветвями, предназначенный для получения музыкального тона *строго определенной частоты* (рис. 4.5, а).

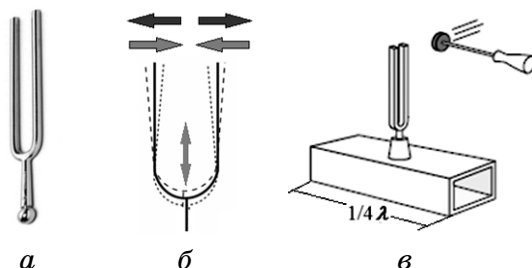


Рис. 4.5. При колебаниях камертона на конце его ветвей возникает пучность движения

Если ударить по камертону молоточком, его ветви начнут свободно колебаться и раздастся звук, который используют как эталон высоты при настройке музыкальных инструментов и пении.

Однако сам по себе U-образный стержень издает слабый звук. Это объясняется тем, что:

- площадь поверхности колеблющихся ветвей камертона, соприкасающихся с воздухом, очень мала и в колебательное движение приходит слишком мало частиц воздуха;
- обе ветви, расстояние между которыми гораздо меньше длины волны, колеблются навстречу друг другу (рис. 4.5, б) — в противофазе, т.е. ослабляют друг друга (в ножке камертона поперечные колебания гасятся полностью — ножка совершает колебания в продольном направлении).

Для усиления звука камертон устанавливают на верхней стенке деревянного ящика, который закрыт с одного конца. При колебаниях ножки вдоль собственного направления, стенка прогибается вверх-вниз, вследствие чего воздух то выталкивается из ящика, то втягивается в него (стенки ящика тоже начинают колебаться с частотой камертона). Длина этого ящика рассчитывается так, чтобы собственная частота основного собственного колебания находящегося в нем воздуха совпадала с частотой колебания камертона. Этому условию соответствует четверть длины волны $\left(\frac{1}{4}\lambda\right)$ основного тона, излучаемого камертоном в воздухе (рис. 4.5, в). Такой ящик можно назвать резонатором.

Почему же в практике неудобно применять камертоны с одной ветвью, ведь одна ветвь — это, по сути, пластинка (рис. 4.6, а)?

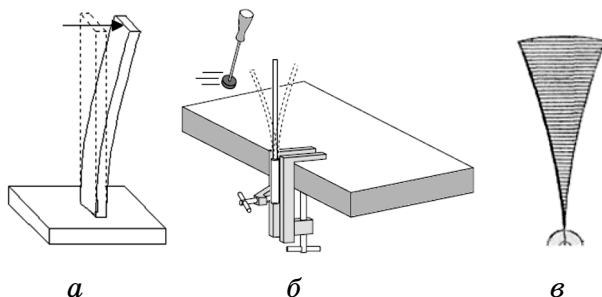


Рис. 4.6. Свободные колебания пластинки в тисках на частоте основного тона

Будем держать один конец любой упругой пластинки в руках, а по второму ударим молоточком. Звукa нет — поперечные колебания очень быстро затухают. Теперь заждем один конец в тисках (рис. 4.6, б), а по второму снова ударим. На этот раз звук стал слышим. Причём колебания имеют тем более высокую частоту, чем короче свободный колеблющийся конец пластинки. На рис. 4.6, в схематически показаны колебания пластинки, зажатой в тисках, при основном колебании. Т.к. один конец стержня закреплён, то на нём будет узел смещений, а на свободном конце — пучность. Отсюда видно, что на стержне уложится $1/4$ волны (в общем случае нечётное число четвертей волны).

Пример акустического резонанса продемонстрируем в следующем опыте. Установим рядом два одинаковых камертона, обратив отверстия резонаторных ящичков, на которых они укреплены, друг к другу (рис. 4.7).

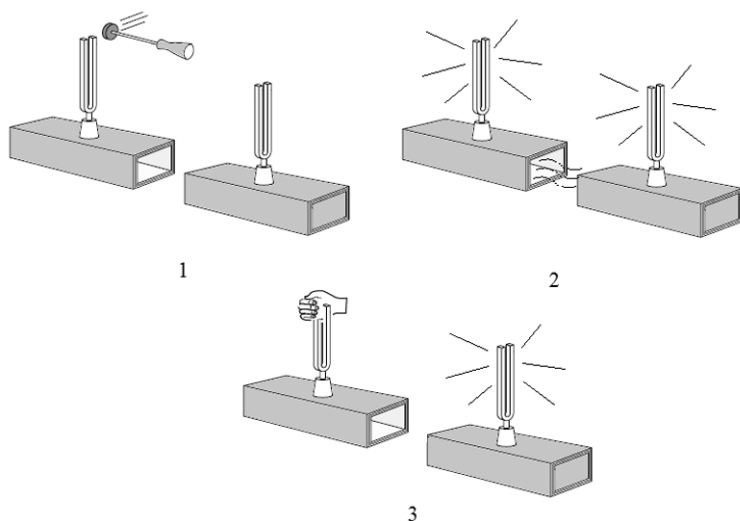


Рис. 4.7. Пример акустического резонанса

Возбудим колебания одного из камертонов, при этом колебания ветвей этого камертона передадутся резонаторному ящичку и внутри него начнет совершать колебания воздух. Воздушная волна, идущая от первого камертона ко второму, возбуждает колебания второго камертона. Приглушим первый ка-

мертон пальцами, при этом второй камертон звучит. Не имеет значения, какой из камертонов выступает в роли источника колебаний, а какой в роли резонатора.

Теперь возьмём два камертона 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 возникает *акустический резонанс*. 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 сильно выражен. Поэтому даже небольшая разность между частотами камертонов приводит к тому, что один камертон перестает откликаться на колебания другого. Достаточно, например, приклеить к ветви одного из двух камертонов кусочек пластилина или воска и камертоны уже будут расстроены — резонанса не будет (рис. 4.8).

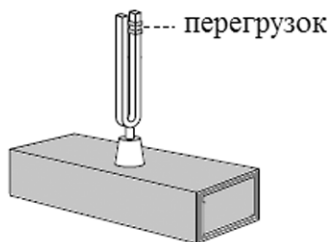


Рис. 4.8. Дополнительная масса перегрузка ветви уменьшает частоту собственных колебаний камертона

Корпусы скрипок и гитар, трубы духовых инструментов и органа являются также резонаторами, а полость рта является резонатором для голосовых связок. Почему же резонатор камертона представляет собой обычный ящик, тогда как корпуса балалайки, виолончели, скрипки и рояли имеют сложные формы?

Дело в том, что резонатор камертона должен усиливать только один — основной тон, а корпуса музыкальных инструментов — множество тонов и гармоник. Вид резонатора определяет, какие из обертонов будут усилены, а какие — ослаблены или вовсе подавлены.

4.3.2. Поющий бокал. Гармоника Франклина

Возьмем бокал с тонкими стенками, вымоем его и руки горячей водой с мылом для обезжиривания. Если мокрым пальцем с легким нажимом скользить по верхней кромке бокала, совершая вращательные движения рукой, получим чистый, красивый звук (рис. 4.9). Хотя это и незаметно, палец движется прерывисто и передает стеклу энергию короткими порциями, заставляя бокал звучать на собственной частоте колебаний. Налив в бокал воды, продолжим круговые движения, теперь частота звука стала ниже той, которая была у пустого бокала.



Рис. 4.9. Необычный музыкальный инструмент



В 1746 г. композитор К.В. Глюк дал концерт в Лондоне, играя на 26 стеклянных бокалах.



При воздействии на бокал звуковой волной с достаточно большой амплитудой и частотой, равной его собственной, наступит резонанс, в результате чего бокал разрушится (рис. 4.10). По причине резонанса при пении Ф.И. Шаляпина дрожали (резонировали) хрустальные подвески люстр.



Рис. 4.10. Разрушение бокала в результате резонанса

В 1761 г. Бенжамин Франклин усовершенствовал музыкальный инструмент на бокалах. Теперь инструмент состоял из стеклянных полусфер, постепенно увеличивающихся в размере и вдвинутых друг в друга. Полусферы закреплялись на металлическом стержне, а сам стержень был укреплен в ящике-резонаторе с водой так, что сферы были погружены в него до середины. Стержень с прикрепленными к нему полусферами приводился во вращательное движение с помощью ножной педали (рис. 4.11). Прикасаясь пальцами к той или иной полусфере, извлекался желаемый звук.

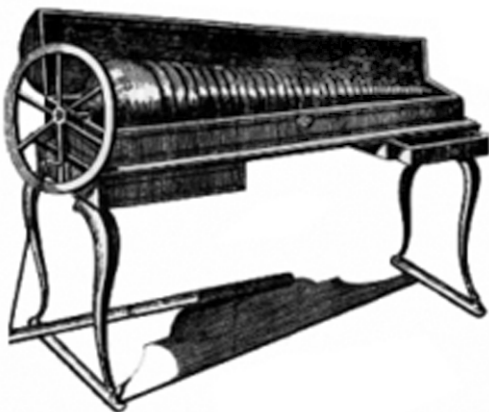


Рис. 4.11. Стеклянная гармоника Франклина



В XVIII–XIX вв. музыкальный инструмент был достаточно популярен. В. Моцарт, Л. Бетховен и М. Глинка вводили его в партитуру своих произведений.

4.3.3. Резонанс столба воздуха на звук камертона

Возьмем высокий цилиндрический сосуд и заставим звучать над его отверстием камертон с высокой частотой. Будем постепенно приливать в сосуд воду, тем самым укорачивая столб воздуха (рис. 4.12). При определенных уровнях воды звук значительно усиливается, при других уровнях — звук значительно ослабляется. Очевидно, что наиболее громкое звучание воздушного столба наступает, когда собственная частота его колебаний совпадает с частотой колебаний камертона. Это и есть условие резонанса.

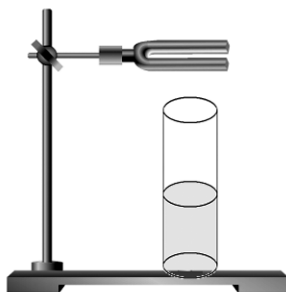


Рис. 4.12. Демонстрация акустического резонанса столба воздуха



Со II в. до н.э. для диагностики заболеваний применяется звуковой метод — аускультация (выслушивание). Аускультация осуществляется посредством стетоскопа — трубки с небольшими расширениями на обоих концах. Более совершенный акустический прибор — фонендоскоп состоит из полой капсулы с передающей звук мембраной, прикладываемой к телу больного, от нее идут полые резиновые трубки к ушам врача. В полой капсуле возникает резонанс столба воздуха, вследствие чего усиливается звучание, что значительно облегчает выслушивание.

4.3.4. Демонстрация звукопроводности твердых тел и жидкостей

Перед резонаторным ящиком без камертона установлен микрофон, подключенный к динамику.

Камертон разместим вдали от резонаторного ящика. Ударим по нему молоточком. Звуковая волна, распространяющаяся в воздухе, усиливается резонатором и попадает в микрофон. В динамике слышен звук.

Затем на резонаторном ящике установим деревянный стержень, на него поставим звучащий камертон. Теперь звуковая волна через дерево попадает в резонатор. Громкость звука возросла — это означает, что звукопроводимость дерева как твердого тела больше, чем звукопроводность воздуха (газа).

Вместо деревянного стержня на резонатор поставим сосуд с водой.

Ножку звучащего камертона погрузим в жидкость. Теперь звуковая волна через воду попадет в резонаторный ящик. И в этом случае слышится более громкое звучание, чем при распространении звука в воздухе.

Из демонстрации следует, **что твердые тела и жидкости меньше поглощают энергии звуковой волны и тем самым обладают лучшей звукопроводностью, чем газ** (в данном случае — воздух).

4.3.5. Эксперимент с гибкой однородной нитью

Кратко рассмотрим колебания, производимые вибрирующей гибкой нитью (струной). Представим, что струна начинает колебания вниз, при этом она, грубо говоря, «вытесняет воздух» снизу, и там волна начинается с гребня. Но в то же время она оставляет сверху «пустое пространство», и там волна начинается с впадины. Обе волны имеют в любом направлении разность фаз, практически равную 180° , и почти полностью уничтожаются *при наложении друг на друга*. Это говорит о том, что **сама по себе струна — очень плохой источник излучения**. Поэтому для практического применения колебания струн также как и в случае с камертоном должны быть переданы хорошим излучателям.

Приведем следующий пример. На рис. 4.13, а видна нить, удерживаемая справа рукой. По ее левому концу скользят с

трением два пальца. При этом нить колеблется как струна, но практически ничего не излучает. Привяжем правый конец нити к хорошему излучателю, например, к жестяной коробочке (рис. 4.13, б) — теперь колебания излучаются и слышны на более далеком расстоянии.



Рис. 4.13. Связь плохо излучающей струны (а) с хорошо излучающей мембраной (б)

4.3.6. Эксперимент с резонаторами Германа Гельмгольца



Резонаторы Гельмгольца представляют собой сосуды сферической формы с двумя открытыми отверстиями: широким, которое направляется в сторону к источнику звука, и узким, которое находится на горловине (рис. 4.14).

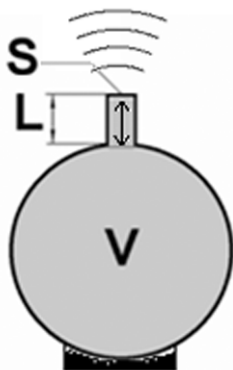


Рис. 4.14. Резонатор Гельмгольца

Поскольку диаметр горла резонатора мал, то при колебаниях скорость воздуха в нем значительно больше, чем в сосуде. Если применить аналогию с механической системой (пружинный маятник), то аналогом колеблющейся массы является воздух в горле, а объём в сосуде играет роль упругого элемен-

та. Разумеется, такое разделение справедливо лишь приближенно, так как некоторая часть воздуха в полости обладает инерционным сопротивлением. Однако при достаточно большой величине отношения площади отверстия к площади сечения полости точность такого приближения вполне удовлетворительна.

Собственная частота резонатора Гельмгольца определяется из формулы (4.5).

$f_0 = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot L}}$	(4.5)
---	-------

где v — скорость звука в среде (воздухе), S — площадь поперечного сечения отверстия горловины, L — длина горловины, V — объем резонатора.

В негармоническом звуковом поле такой прибор реагирует только на колебания с частотой f_0 . Прикладывая к уху последовательно ряд резонаторов с различными собственными частотами, можно определить все составные части исследуемого звука, произведя, таким образом, его анализ. Из-за трения в горле резонатора на частоте f_0 возникает сильное поглощение звука, что используется для создания *резонансных звукопоглотителей* в архитектурной акустике. Воздушные резонаторы можно изготавливать и другой формы, но шаровидные резонаторы обладают особенно резким резонансом.

Проведем демонстрацию. Установим напротив узких отверстий трех резонаторов Гельмгольца акустические вертушки (индикатор звуковых волн), так как это показано на рис. 4.15. Направив громкоговоритель к широким отверстиям резонаторов, будем плавно менять частоту звукового генератора от низких частот к более высоким. При резонансе из горловины возникнет поток воздуха, выводящий крыльчатку вертушки из положения равновесия. Чем выше интенсивность, тем выше частота вращения вертушки. На низкой резонансной частоте поток воздуха будет идти только из резонатора 1, на средней частоте — из резонатора 2, на высокой резонансной частоте — из резонатора 3, на что укажет вращение той или иной крыльчатки.

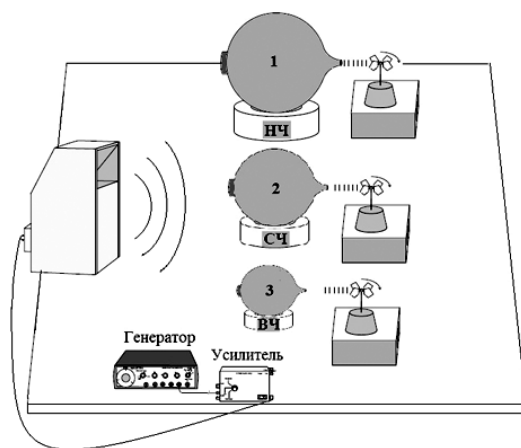


Рис. 4.15. Демонстрация резонанса с помощью резонаторов Гельмгольца

4.4. Отражение и преломление волн

4.4.1. Законы отражения и преломления

В однородной среде волны распространяются одинаково во все стороны от источника колебаний. Однако на границе раздела сред с различными физическими свойствами картина распространения волн существенно меняется. Волна может частично перейти из одной среды в другую, частично отразиться от границы раздела и распространяться в первой среде.

Если звуковая волна, распространяющаяся в некоторой среде 1, достигает границы раздела этой среды с другой средой 2, то возникают отраженная и преломленная волны (рис. 4.16).

Отраженная волна распространяется от границы раздела в этой же среде 1, что и первичная (падающая) волна. Преломленная волна распространяется в среде 2. Звуковые волны подчиняются законам отражения и преломления.

По закону отражения, отраженный луч OL' лежит в одной плоскости с падающим лучом OL и нормалью к поверхности раздела сред, проведенной в точке падения O , при этом угол отражения α' равен углу падения α .

По закону преломления, преломленный луч (OL'') лежит в одной плоскости с падающим лучом OL и нормалью к поверхности раздела сред, проведенной в точке падения O .

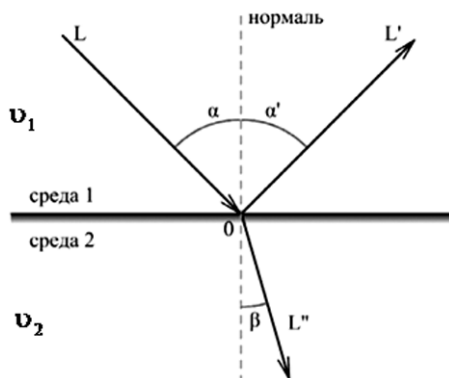
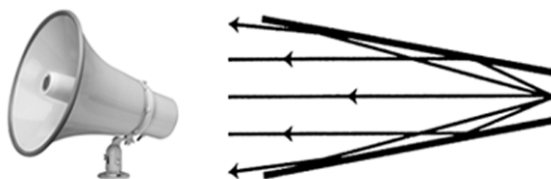


Рис. 4.16. Отражение и преломление плоской волны на границе двух сред

Отражение звуковых волн используется в простейших устройствах для усиления звука — рупорах. **Рупор** — это расширяющаяся труба круглого или прямоугольного сечения (рис. 4.17, а). При использовании рупора *звуковые волны не рассеиваются во все стороны, а образуют узконаправленный пучок*, за счет чего мощность звука увеличивается и он распространяется на большее расстояние (рис. 4.17, б).



*Рис. 4.17. Рупор (а),
отражение звука от стенок рупора (б)*



Отражение звуковых волн обязательно принимается в расчёт при постройке общественных зданий. Так, например, в зрительных залах театров стены и потолки не делают сплошными и гладкими — их обивают звукопоглощающим материалом, развешивают шторы, занавесы, устанавливают мягкую мебель, устраивают всевозможные ниши и балконы.



Закон Снеллиуса: отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления β равно отношению скоростей звуковых волн в первой и второй средах v_1 и v_2 .

$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$	(4.6)
--	-------

Из закона Снеллиуса следует, что чем выше скорость звука в той или иной среде, тем больше угол преломления.



Частота колебаний в волне совпадает с частотой колебаний источника и не зависит от свойств среды. При переходе акустических колебаний из одной среды в другую частота колебаний сохраняется, но изменяется длина волны, так как скорость звука зависит от упругих свойств среды.

4.4.2. Коэффициент отражения акустических волн

Коэффициент отражения R определяется отношением интенсивности отраженной акустической волны $I_{отр}$ к интенсивности волны, падающей на границу раздела $I_{пад}$: $R = I_{отр} / I_{пад}$. Его величина зависит от соотношения плотностей сред (ρ_1 и ρ_2) и скоростей распространения акустических волн в этих средах (v_1 и v_2). Произведение плотности среды на скорость распространения в ней акустических волн называют *удельным акустическим импедансом* или **волновым сопротивлением**:

$Z = \rho v$	(4.7)
--------------	-------

Так, при нормальном атмосферном давлении и температуре $t = 20^\circ\text{C}$ акустическое сопротивление воздуха $Z = 420 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$.

Коэффициент отражения звука на границе раздела двух сред вычисляется по формуле Рэлея:

$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = \left(\frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \right)^2$	(4.8)
---	-------

Из формулы (4.8) видно, что чем больше отличаются акустические импедансы сред, тем выше коэффициент отражения. Так, например, на границе раздела воздух-вода отражается свыше 99% энергии акустической волны и лишь весьма малая часть ее проникает в воду при падении из воздуха.



Волновое сопротивление биологических сред в 3000 раз больше воздуха. Если при ультразвуковом исследовании (УЗИ) ультразвуковой излучатель приложить к телу человека, то ультразвук не проникает и будет отражаться. Для того, чтобы исключить воздушный слой, поверхность ультразвуковых излучателей покрывают слоем масла.

4.5. Звуковое эхо

Свойство отражения звуковой волны можно использовать на практике, например, для получения эффекта эха.



Эхо — физическое явление, заключающееся в принятии наблюдателем отраженной от препятствий волны.

Звуковое эхо — отраженный звук (отзвук). Для его возникновения принципиально, чтобы длительность звукового сигнала была меньше времени, которое требуется звуку, чтоб пройти расстояние от источника до отражающей поверхности и обратно. В противном случае звуковой отклик будет накладываться на исходный звуковой сигнал, сливаясь с ним.

Если источник звука (наблюдатель) O находится на расстоянии d от отражающей поверхности (рис. 4.18), то наблюдатель услышит отчетливое эхо, не накладывающееся на первоначальный сигнал, если будет выполняться неравенство:

$\tau < \frac{2d}{v}$	(4.9)
-----------------------	-------

где τ — длительность звукового сигнала, посылаемого наблюдателем, v — скорость звука.

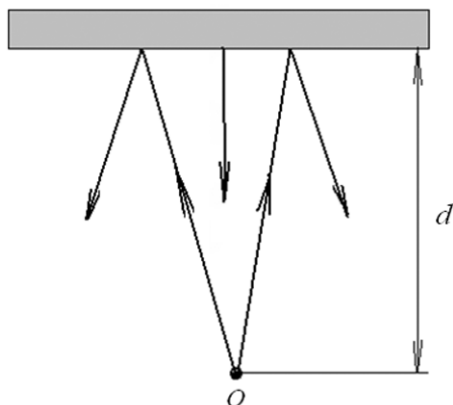


Рис. 4.18. К возникновению звукового эха

Человеческое ухо воспринимает отдельно следующие один за другим звуки, если промежуток между ними составляет не менее $1/15$ с. Значит, эхо мы можем слышать, если расстояние до преграды (d) не менее того, которое звук проходит туда и обратно (т.е. расстояние $2d$) за $1/15$ с.



Иногда эхо можно услышать в закрытых помещениях. Например, в залах с куполами или другими архитектурными деталями, фокусирующими отраженный звук. Тогда отражение происходит несколько раз, и эхо **становится многократным**.

4.6. Искривление звукового луча в акустически неоднородной среде

Если свойства среды, влияющие на скорость распространения волны, меняются, то может наблюдаться такое явление как **рефракция** — искривление траектории распространения волны в неоднородной среде. С изменением параметров (атмосферное давление, плотность, например, с ростом высоты) происходит изгиб звуковой волны.

Как мы знаем, скорость звука зависит от температуры среды, поэтому среда, температура которой различна в разных точках, также может рассматриваться как акустически неоднородная. Известно, что звуковой луч в воздухе изгибается так, чтобы его траектория была обращена выпуклостью в

сторону более нагретых слоев. Так, летним жарким днем у поверхности земли температура воздуха заметно выше, чем на высоте, равной нескольким метрам.

4.7. Затухание звука

Распространяясь в какой либо среде, звук испытывает затухание, то есть амплитуда звуковой волны уменьшается.

Затухание может быть обусловлено несколькими причинами:

- 1) **расхождением волны**, связанным с тем, что на больших расстояниях от источника поток излучаемой звуковой энергии по мере распространения распределяется на все увеличивающуюся площадь волновой поверхности и, соответственно, уменьшается поток энергии, приходящийся на единицу поверхности;
- 2) **рассеянием звука** на препятствиях в среде и ее неоднородностях;
- 3) **поглощением звука**, которое происходит в результате необратимого перехода энергии волны в другие виды энергии (преимущественно в теплоту). Большую роль играют процессы теплообмена и межмолекулярного взаимодействия в среде, а точнее — вязкость (внутреннее трение) и теплопроводность.



В городе после снегопада устанавливается глубокая тишина — звуки тихие и от проезжающего транспорта. Эта тишина объясняется тем, что свежевыпавший снег еще не успел слежаться — в его поверхностном слое между снежинками много воздуха. Такие структуры хорошо поглощают звук и практически его не отражают.

4.8. Волновое движение в замкнутом объеме. Реверберация

С отражением и поглощением звука тесно связано явление волнового движения в замкнутом объеме, когда волны отражаются от ограничивающих поверхностей помещения (потолок, пола). Воздушный объем помещения представляет собой колебательную систему с очень большим числом собственных частот. Каждое из собственных колебаний характеризуется своим коэффициентом затухания, зависящим от поглощения

звука при его отражении от ограничивающих поверхностей и при его распространении (рис. 4.19).



Рис. 4.19. Волновое движение в замкнутом объеме

Поэтому такие колебания затухают неодновременно, при этом изменяется окраска (тембр) и насыщенность звука, звук воспринимается слушателем затрудненно из-за специфического гула. Появление гула связано с тем, что звуковая волна, исходящая от источника звука, на пути к слушателю накладывается на многократно отраженные от стен и потому сдвинутые во времени копии самой себя.



Реверберация (от лат. «reverbero» — «отбрасываю») — постепенное затухание свободных колебаний в замкнутом объеме.

Основной характеристикой помещения является **время реверберации** — время затухания звука в закрытых помещениях после прекращения действия источника звука при многократных отражениях.

Временем стандартной реверберации называется время, в течение которого интенсивность звука уменьшается в 10^6 раз, то есть на 60 децибел (дБ) относительно ее первоначального значения (звуковое давление уменьшается в 10^3 раз).



Несмотря на то, что по определению реверберация имеет место в закрытых помещениях, в особых условиях некоторые ее виды могут иметь место и на открытом пространстве (например, узкое горное ущелье, стадион, городская площадь, лес и пр.).

4.9. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки

- 4.1. Как можно возбудить волну в упругой среде?
- 4.2. Приведите доказательство того, что звук распространяется в виде волны.
- 4.3. Что называют ультразвуком? Рассмотрите использование пьезоэлектрического эффекта и эффекта магнитострикции для получения ультразвука.
- 4.4. Что называют инфразвуком? Приведите примеры природных колебательных систем, которые излучают инфразвуки.
- 4.5. Какие особенности являются характерными при распространении инфразвука по сравнению с ультразвуком?
- 4.6. Что является источником звуковых волн? Предложите классификацию источников звуковых волн по способу возбуждения.
- 4.7. При полете большинство насекомых издает звук. Чем он вызывается?
- 4.8. Ученые установили, что пчела, которая летит в улей, взмахивает своими крыльями примерно 300 раз в секунду, а не нагруженная — 440 раз в секунду. Объясните, как по звуку можно догадаться, летят пчелы с добычей или, наоборот, возвращаются домой.
- 4.9. Что является свидетельством того, что звук является формой энергии?
- 4.10. Звуковые волны в воздухе продольные или поперечные? Опишите движение молекул воздуха при распространении в нем звука.
- 4.11. Какой диапазон частот звуковых волн воспринимает человек?
- 4.12. Может ли звук распространяться в вакууме? Объясните ответ.
- 4.13. Как зависит скорость звука в газах от температуры?
- 4.14. Какие доказательства вы можете привести в пользу того, что скорость распространения звука в воздухе в основном не зависит от частоты?
- 4.15. Где скорость распространения волн больше: в воздухе или в воде? Ответ обоснуйте.

- 4.16. В поле звук распространяется на значительно большее расстояние, чем в лесу. Почему?
- 4.17. Почему прикладывают ухо к рельсам, когда хотят узнать, приближается ли поезд?
- 4.18. Скорость звука в твердых телах обычно в несколько раз выше, чем в воздухе, плотность же твердых тел в 10^3 – 10^4 раз больше. Объясните.
- 4.19. Как вы думаете, меняется ли частота или длина волны звука, когда он проходит из воздуха в воду?
- 4.20. Если поставить ножку колеблющегося камертона на стол, то звук становится заметно громче. Почему?
- 4.21. Дайте определение акустическому резонансу.
- 4.22. Приведите примеры использования явления резонанса в акустике.
- 4.23. Рассмотрите принцип работы резонатора Гельмгольца. Приведите примеры других резонаторов.
- 4.24. Как используется акустический резонанс при гармоническом анализе сложного звука, основанного на применении теоремы Фурье, при помощи резонаторов Гельмгольца?
- 4.25. Почему электрическая гитара, в отличие от акустической, может иметь любую, даже весьма причудливую форму корпуса?
- 4.26. Сформулируйте законы отражения и преломления волн.
- 4.27. Как происходит отражение звука от преград? Сравните соотношения между размерами преграды и длиной звуковой волны.
- 4.28. Чем должны различаться две среды, чтобы на их границе происходило отражение звука?
- 4.29. Как определяется коэффициент отражения акустических волн?
- 4.30. Как «работает» фонендоскоп?
- 4.31. Что такое эхо?
- 4.32. На любом ли расстоянии от преграды можно слышать эхо?
- 4.33. Какие вы знаете практические применения явления эхо?

- 4.34. Что такое рефракция звуковых лучей? Почему изменяется траектория звуковой волны с высотой?
- 4.35. Если приложить к уху раструб раковины морского желудка или любой другой большой раковины, можно услышать рокот, который напоминает отдаленный шум моря. Объясните происхождение этого звука.
- 4.36. Как влияет реверберация на акустические качества помещения?
- 4.37. В чем заключается различие между эхом и реверберацией?
- 4.38. Звучащий камертон один раз просто держат в руке, а другой — прислоняют ножкой к столу. В каком случае звук прекратится быстрее и почему?
- 4.39. Почему при проникновении звуков музыки из соседних квартир в нашу звучание воспринимается в виде ритмических ударов, а не мелодии? Почему речь (текст песни) оказывается неразборчивой?



Почему, когда человек прислушивается к отдаленному звуку, то невольно приоткрывает рот?



При глубоководных погружениях водолазов и аквалангистов для предотвращения физиологических нарушений, обусловленных повышением давления (увеличивается количество азота, растворенного в крови), **в скафандры вместо обычного воздуха вводят гелиево-кислородную смесь**. При этом голос человека напоминает кряканье утки, поэтому такую речь называют «утиной» (или «гелиевой»).



Как объяснить то, что при вдыхании гелия (или смеси гелия с кислородом) голос человека воспринимается более высоким, а при вдыхании, например, ксенона — более низким (аналогично ксенону действует и гексафторид серы)? Почему это происходит?

4.10. Задачи для самостоятельного решения

- 4.1. Найдите скорость распространения продольных звуковых волн в тонком стержне из стали.
- 4.2. Найдите скорость распространения продольных звуковых волн в тонком стержне из алюминия.
- 4.3. Найдите скорость распространения звука в воздухе при температурах: а) -10°C ; б) 0°C ; в) $+10^{\circ}\text{C}$.
- 4.4. Во сколько раз скорость распространения звука в воздухе летом (температура $+30^{\circ}\text{C}$) больше скорости распространения звука зимой (температура -30°C)?
- 4.5. Частота колебаний камертона $1,38$ кГц. Чему равна длина колеблющегося стержня камертона? Скорость звука принять равной 330 м/с.
- 4.6. Путешественник определяет длину озера, прислушиваясь к звуку эха своего голоса, отраженного от скалы на противоположном берегу озера. Он слышит эхо через $1,20$ с после крика. Какова длина озера?
- 4.7. Рассчитайте резонансную частоту сосуда объемом $V=1$ л с длиной горловины $L=1$ см и площадью поперечного сечения отверстия горловины $S=1$ см² при температуре воздуха 0°C .

У. ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ И ДИФРАКЦИИ

Принцип суперпозиции. Явление взаимного наложения когерентных волн. Биения. Дифракция.

Принцип Гюйгенса-Френеля

Нередки случаи, когда система одновременно участвует в двух или нескольких независимых друг от друга колебаниях. В этих случаях образуется сложное колебательное движение, которое создается путем наложения (сложения) колебаний друг на друга.

Если среда, в которой распространяется одновременно несколько волн, линейна, то к этим волнам применим принцип суперпозиции (наложения) волн.

5.1. Явление интерференции

5.1.1. Принцип суперпозиции

Наблюдения за распространением волн на поверхности воды от двух или большего числа источников показывают, что волны проходят одна через другую, совершенно не влияя друг на друга. Точно так же не влияют друг на друга и звуковые волны: распространение звука от любого источника не испытывает никакого влияния со стороны других звуковых волн, как угодно распространяющихся в это время через те же области среды.

Это объясняется тем, что *в пределах упругой деформации сжатие или растяжение тел вдоль одного направления не влияет на их упругие свойства при деформации по любым другим направлениям.* Поэтому в каждой точке, которой достигают волны от разных источников, результат действия нескольких волн в любой момент времени равен *сумме результатов действия каждой волны в отдельности.*



Принцип суперпозиции: при распространении в линейной среде нескольких волн каждая из них распространяется так, как будто другие волны отсутствуют, а результирующее смещение частиц среды в любой момент времени равно геометрической сумме смещений, которые получают частицы, участвующие в каждом из слагающих волновых процессов.

Принцип суперпозиции иллюстрирует рис. 5.1. Допустим, мы имеем три синусоидальных волны $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ с различными амплитудами и частотами в струне с заданным натяжением. В любой момент времени результирующая амплитуда волны представляет собой алгебраическую сумму амплитуд отдельных волн в этой точке в данный момент времени. Колебания уже не являются простыми синусоидальными, а волна называется сложной волной, т.е. $x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t)$.

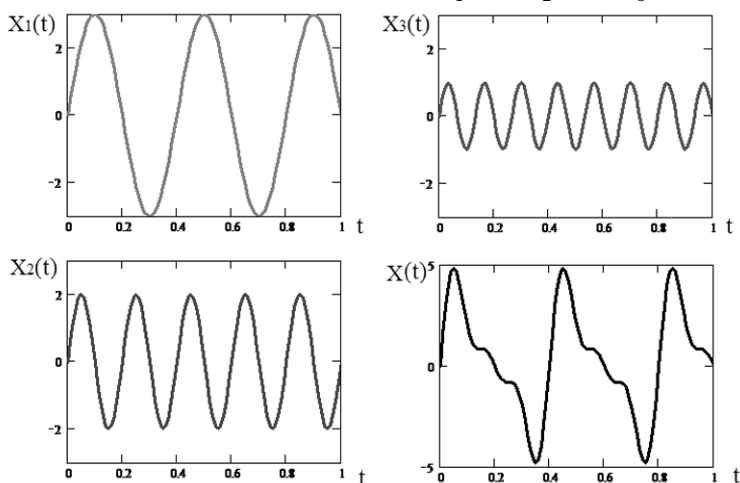


Рис. 5.1. Результирующая волна $x(t)$ образуется из трех синусоидальных волн с различными амплитудами и частотами f_0 , $2f_0$ и $3f_0$

5.1.2. Интерференция от двух монохроматических источников одинаковой частоты

Интерференция — это одно из основных свойств волн любой природы: упругих, электромагнитных (в том числе и световых).

Интерференция (от лат. «*inter*» — «взаимно», «*ferio*» — «ударяю») — взаимное усиление или ослабление двух (или большего числа) волн при их наложении друг на друга при одновременном распространении в пространстве. Интерференция волн возможна только при выполнении условия *когерентности*.



Волны называются **когерентными**, если разность их фаз остается постоянной во времени. Этому условию удовлетворяют монохроматические волны — неограниченные в пространстве волны одной определенной и строго постоянной частоты.

В 1802 г. английский физик, один из создателей волновой оптики Томас Юнг открыл интерференцию.

Рассмотрим опыт с поверхностными волнами в ванне: в волновой ванне (рис. 5.2, а) при помощи вибратора с двумя механически жестко связанными стержнями создадим два точечных источника волн (рис. 5.2, б). Вибратор с определенной частотой будет осуществлять возвратно-поступательное движение (в вертикальной плоскости) при помощи электродвигателя. Причем глубина воды в волновой ванне должна превышать создаваемую длину волны λ . Наблюдения показывают, что в этом случае в волновой ванне возникает особая (устойчивая) картина распространения волн — на водной поверхности выделяются полосы, где колебания отсутствуют (рис. 5.3). Другими словами, волновое поле разделяется интерференционными полосами.



Рис. 5.2. Ванна для наблюдения поверхностных волновых полей (а), распространение волн от двух точечных источников (б)

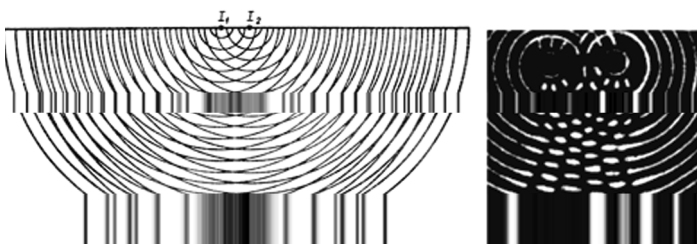


Рис. 5.3. Интерференционная картина сложения волн двух источников

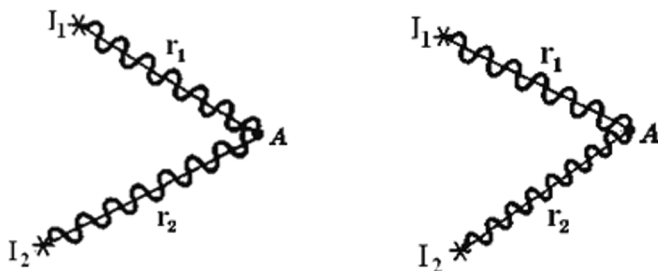


Рис. 5.4. Две волны встречаются в точке А гребнями — возмущение поверхности воды усиливается (а), гребень одной волны встречается с впадиной другой — в точке А поверхность воды не возмущена

Явление интерференции можно обнаружить в опытах и со звуковыми волнами. Установим два динамических громкоговорителя и подключим их к выходу одного звукового тон-генератора (рис. 5.5). Перемещаясь на небольшие расстояния в комнате, на слух можно обнаружить, что в одних точках пространства звучание более громкое, а в других — более тихое. Звуковые волны от двух источников в одних точках пространства усиливают, а в других ослабляют друг друга.

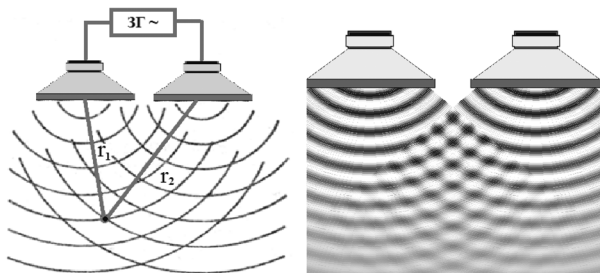


Рис. 5.5. Интерференция звуковых волн

Таким образом, при наложении в пространстве двух (или нескольких) когерентных волн в разных его точках получается усиление или ослабление результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами этих волн. Это явление называется *интерференцией волн*.



Точки пространства, в которых наблюдается максимальное усиление колебаний, называются интерференционными максимумами.

Точки пространства, в которых наблюдается максимальное ослабление колебаний, называются интерференционными минимумами.

Еще один прибор для демонстрации интерференции звука представлен на рис. 5.6. В самом начале прибор имеет два одинаковых — верхний и нижний звукопровода. Затем нижний звукопровод удлиняют. При $l=v/4f$ (v — скорость звука в воздухе, f — частота звука, поступающего из динамика А) звучание из рупора В максимально ослабится.

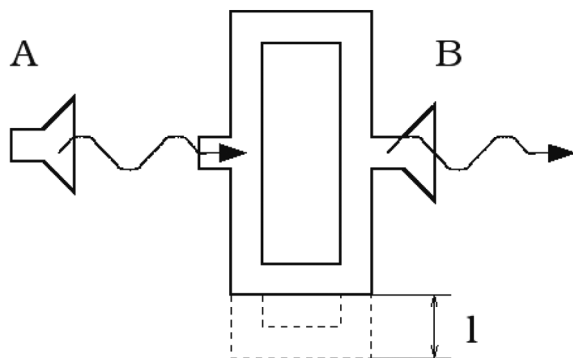


Рис. 5.6. К демонстрации интерференции звука



Оптическое проявление интерференции можно наблюдать в естественных условиях. Так, окраска мыльных пузырей или тонких пленок бензина на поверхности воды объясняется интерференцией волн, отраженных от наружной и внутренней поверхности пленки.

5.1.3. Условия образования максимумов и минимумов интерференции

Рассмотрим условия получения интерференционных картин, для чего на рис. 5.7 изобразим два точечных источника I_1 и I_2 , излучающих монохроматические волны одинаковой частоты ω . Идеальный точечный источник излучает расходящуюся сферически симметричную волну. Если он расположен на расстоянии, много превышающем размеры области наблюдения, то волну можно считать практически плоской.

В некоторой точке пространства А происходит усиление или ослабление света в зависимости от величины разности хода двух интерферирующих волн — разности расстояний от точки А до источников I_1 и I_2 : $\Delta r = |r_2 - r_1|$.

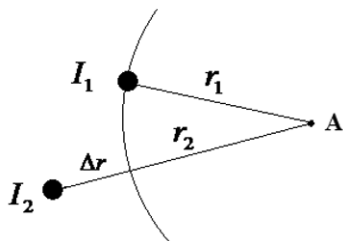


Рис. 5.7. К расчету картины интерференции от двух монохроматических точечных источников: I_1 и I_2 — когерентные источники волн, А — точка наблюдения, r_1 и r_2 — расстояния, проходимые волнами от источников до точки наблюдения, Δr — геометрическая разность хода

Если на разности хода двух когерентных волн до некоторой точки укладывается целое число длин волн, то в этой точке наблюдается интерференционный максимум:

$\Delta r = k\lambda$, где $k=0,1,2,3\dots$	(5.1)
--	-------

Если на разности хода укладывается нечетное число полуволн, то наблюдается интерференционный минимум:

$\Delta r = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$, где $k=0,1,2,3\dots$	(5.2)
--	-------

Указанные точки образуют два семейства гипербол, причем между каждой парой гипербол, соответствующих точкам с максимальной амплитудой колебаний, находится гипербола из другого семейства, во всех точках которой колебания отсутствуют (рис. 5.8).

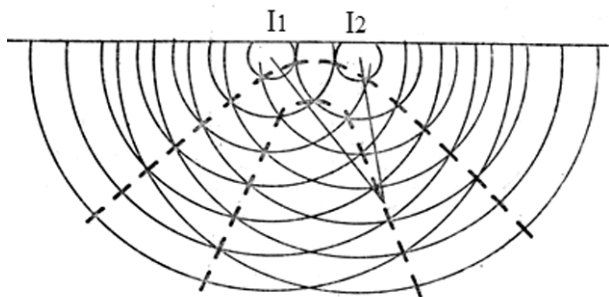


Рис. 5.8. Семейство гипербол при интерференции

5.1.4. Интерференция и закон сохранения энергии

Явление интерференции волн не противоречит принципу суперпозиции. В точках с нулевой амплитудой колебаний две встречающиеся волны не «гасят» друг друга, обе они без изменений распространяются далее.

Куда исчезает энергия двух волн в местах интерференционных минимумов? Если рассматривать только одно место встречи двух волн, то на такой вопрос нельзя дать правильный ответ. Распространение волн не является совокупностью независимых процессов колебаний в отдельных точках пространства. Сущность волнового процесса заключается в передаче энергии колебаний от одной точки пространства к другой и т.д. При интерференции волн в местах интерференционных минимумов энергия результирующих колебаний действительно меньше суммы энергий двух интерферирующих волн. Зато в местах интерференционных максимумов энергия результирующих колебаний превышает сумму энергий интерферирующих волн ровно на столько, на сколько уменьшилась энергия в местах интерференционных минимумов. При интерференции волн энергия колебаний перераспределяется в пространстве, но при этом закон сохранения энергии строго выполняется.



Обнаружение интерференционной картины доказывает, что мы имеем дело с волновым процессом. Волны могут гасить друг друга, а сталкивающиеся частицы никогда не уничтожают друг друга целиком. Интерферируют только когерентные (согласованные) волны.

5.2. Сложение гармонических колебаний одного направления с близкими частотами. Биения

Только что мы рассмотрели явление интерференции, т. е. эффект суперпозиции двух волн от различных источников. Но при этом предполагали, что частоты источников одинаковы. Теперь мы рассмотрим интерференцию двух источников с близкими частотами.



Биения — это колебания с периодически уменьшающейся и увеличивающейся амплитудой, возникающие при сложении двух колебаний одного направления с близкими, но не кратными частотами. При этом частота изменения амплитуды суммарного сигнала равна разности частот двух исходных сигналов.

Получим результат математически. Для этого сложим два гармонических колебания $x_1(t)$ и $x_2(t)$ с равными амплитудами, начальными фазами, равными нулю, и близкими частотами ω и $\omega_2 = \omega + \Delta\omega$ ($\Delta\omega \ll \omega$):

$$\begin{cases} x_1 = x_m \cos \omega t \\ x_2 = x_m \cos \omega_2 t = x_m \cos(\omega + \Delta\omega)t, \end{cases}$$

$$\begin{aligned} x &= x_1 + x_2 = x_m (\cos \omega t + \cos(\omega + \Delta\omega)t) = 2x_m \cos\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}t\right) \cdot \cos \frac{\Delta\omega}{2}t = \\ &= \left(2x_m \cos \frac{\Delta\omega}{2}t\right) \cos\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}t\right). \end{aligned}$$

Поскольку $\Delta\omega \ll \omega$, то множитель $\cos\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}t\right) \approx \cos \omega$, тогда

$x = x_1 + x_2 = \left(2x_m \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right) \cos \omega t$	(5.3)
---	--------------

Найденное выражение является произведением двух колебаний и описывает гармоническое колебание с частотой ω и амплитудой x_ϕ , изменяющейся по периодическому закону

$x_\phi = \left 2x_m \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right $	(5.4)
--	--------------

Характер зависимости x от t при биениях показан на рис. 5.9, где сплошные линии дают график результирующего колебания (5.3), а огибающие их — график медленно меняющейся по уравнению (5.4) амплитуды.

Частота биений равна разности частот складываемых колебаний $\omega_\phi = \Delta\omega$. Период биений $T_\phi = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$.

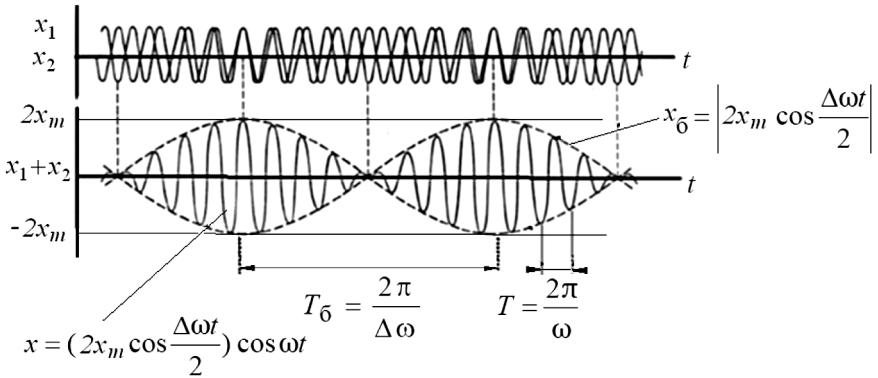


Рис. 5.9. Биения: результат сложения двух волн с одинаковыми амплитудами

Биения возникают потому, что один из двух сигналов постоянно отстаёт от другого по фазе и в те моменты, когда колебания происходят синфазно, суммарный сигнал оказывается усиленным, а в те моменты, когда два сигнала оказываются в противофазе, они взаимно гасят друг друга. Эти моменты периодически сменяют друг друга, по мере того, как нарастает отставание.

В случае одинаковых амплитуд, амплитуда биений изменяется от удвоенного значения амплитуды складываемых волн до нуля, а в случае разных амплитуд, она остается конечной, достигая некоторого минимума. Результат сложения двух волн с разными амплитудами представлен на рис. 5.10.

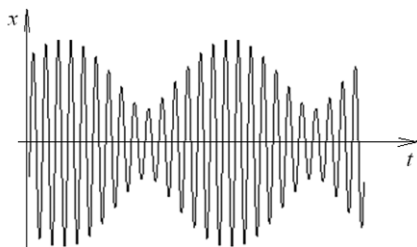


Рис. 5.10. Биения: результат сложения двух волн с разными амплитудами

Задача 5.1. Что будет слышать человек, если на его ухо будут воздействовать две звуковые волны с примерно одинаковой амплитудой и частотами равными: а) 50 и 55 Гц, б) 11 и 12 Гц?

Решение

Человек услышит: а) биения с частотой $f_0 = f_2 - f_1 = 55 - 50 = 5$ Гц, б) ничего, т.к. 11 и 12 Гц — это инфразвуковые колебания.

Наглядно биения можно продемонстрировать следующими демонстрациями.

Возьмем два одинаковых камертона с одинаковыми собственными частотами. Расположим их в непосредственной близости друг от друга. Вызовем колебания первого и второго камертонов одновременно. При наложении гармонических волн получится гармоническая волна с постоянной амплитудой — камертоны звучат в унисон (рис. 5.11).

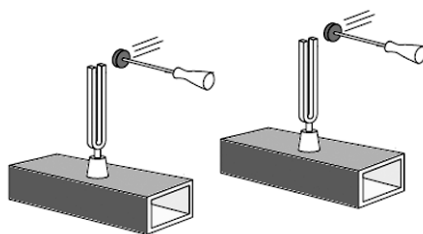


Рис. 5.11. Колебания двух камертонов с одинаковыми собственными частотами

На конце ветви одного из камертонов прикрепим перегрузок, тем самым уменьшим частоту свободных колебаний (теперь частоты камертонов отличаются). Заставим звучать оба камертона одновременно. Звуковые волны, исходящие из двух источников, интерферируют между собой, и уровень громкости звука поочередно то возрастает, то уменьшается (рис. 5.12). Высота же звука не меняется, т.к. она определяется частотой результирующего колебания, которая близка к частотам складываемых колебаний. Это и есть биения. Увеличив массу перегрузка, сильнее уменьшим собственную частоту камертона — частота биений увеличится.

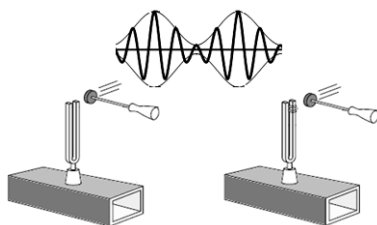


Рис. 5.12. Демонстрация биений на камертонах

Включим звуковой генератор, способный возбуждать два колебания разной частоты, которые человеческое ухо различает как два отдельных звуковых сигнала. Если сближать частоты этих сигналов, то при некоторой разности частот вместо двух сигналов ухо человека будет воспринимать биения (пульсации). При дальнейшем сближении частот период биений будет увеличиваться, и при совпадении частот сигналов будет слышен звук одной частоты, амплитуда которого не будет изменяться.

Биения применяют при обнаружении металлических предметов, мин, оружия и т.д. Для этого используют два одинаковых высокочастотных колебательных контура, имеющих одинаковую частоту. Если вблизи одного из них появится металлический предмет, частота этого контура немного изменится. При сложении сигналов от этих двух контуров в суммарном сигнале возникнет низкочастотная составляющая. Ее можно выделить и подать в наушники, в которых возникнут звуковые колебания, сигнализирующие о наличии металлического предмета.

Наличием биений объясняется и дребезжащий звук расстроенного пианино. Высокие звуки в этом инструменте излучаются не одной струной, а несколькими, одновременно звучащими в унисон (рис. 5.13). Если какая-либо из них струна колеблется с мало отличающейся частотой от остальных, то появляются биения.

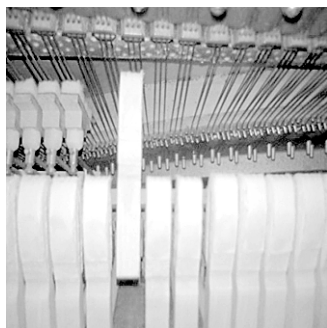


Рис. 5.13. Пианино изнутри: видны обитые войлоком молоточки, струны (в показанном диапазоне — по 3 струны на одну ноту)

Биения используют настройщики музыкальных инструментов. Когда колебания струны точно соответствуют эталону, то биения отсутствуют.

5.2. Дифракция звуковых волн

Если на пути распространения волны встречается какое-либо тело, то это приводит к появлению эффекта огибания волнами препятствия. Такое явление в физике называется **дифракцией**. Явление дифракции будет наблюдаться и в случае прохождения волн через отверстия, размеры которых малы по сравнению с длиной волны.

Степень огибания зависит от соотношения между длиной волны и размерами препятствия. Поскольку длина звуковой волны во много раз больше, чем световой, дифракция звуковых волн менее удивляет нас, нежели дифракция света. Так, можно разговаривать с человеком, стоящим за углом здания, хотя он и не виден. Звуковая волна с легкостью огибает угол, тогда как свет из-за малости своей длины волны дает резкие тени.

Пусть на поверхности воды распространяется плоская волна, созданная пластиной, закрепленной на электромагнитном вибраторе (рис. 5.14, а, рис. 5.14, б). На пути этой волны находится преграда с щелью, размер которой сравним с длиной волны, т.е. $a \approx \lambda$. Волна, дошедшая до преграды, отразится от нее, а отверстие в преграде будет служить источником колебаний, которые распространяются по другую сторону преграды. За отверстием независимо от формы исходной волны будут распространяться полукольцевые волны (щель как будто сама является источником колебаний).

Чем больше размеры отверстия в преграде на пути волны, тем меньше отклонения от прямолинейного направления распространения будут испытывать волны (рис. 5.14, в).

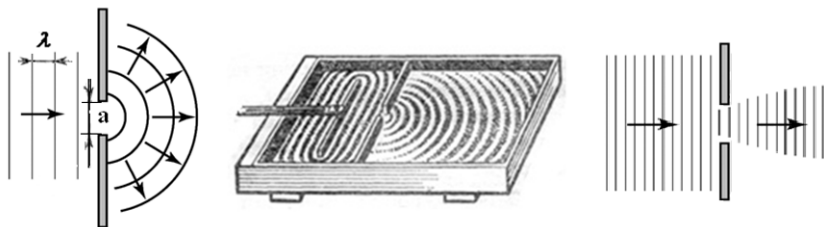


Рис. 5.14. Прохождение плоской волны на поверхности воды через отверстие в экране

Для наблюдения дифракции звуковых волн подключим громкоговорители к выходу звукового генератора и поставим на пути распространения звуковых волн экран из материала, поглощающего звуковые волны. Передвигая за экраном микрофон, можно обнаружить, что звуковые волны регистрируются и за краем экрана. Изменяя частоту звуковых колебаний и тем самым длину звуковых волн, можно установить, что явление дифракции становится более заметным при увеличении длины волны. Если размеры препятствия намного больше длины волны, то звук отражается, а позади препятствия формируется зона акустической тени. Однако при достаточно больших расстояниях между источником волн, преградой и местом наблюдения волн дифракционные явления могут иметь место и при больших размерах отверстия или преграды.

Явление дифракции также характерно для электромагнитных волн. Именно благодаря дифракции радиоволн возможна

устойчивая радиосвязь между удаленными пунктами, разделенными между собой выпуклостью Земли.

Явление дифракции объясняется с помощью *принципа Гюйгенса*, согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн задает положение волнового фронта в следующий момент времени. Для механических волн принцип Гюйгенса имеет наглядное истолкование: частицы среды, до которых доходят колебания, в свою очередь, колеблясь, приводят в движение соседние частицы среды, с которыми они взаимодействуют.

Пусть плоская волна нормально падает на отверстие в экране (рис. 5.15). Каждая точка участка волнового фронта, выделенного отверстием, служит источником вторичных волн. Построив огибающую вторичных волн для некоторого момента времени, видим, что фронт волны заходит в область геометрической тени, т.е. волна огибает края отверстия.

Принцип Гюйгенса решает лишь задачу о направлении распространения волнового фронта, но не затрагивает вопроса об амплитуде, а, следовательно, и об интенсивности волн, распространяющихся по разным направлениям. Французский физик Огюстен Френель вложил в принцип Христиана Гюйгенса физический смысл, дополнив его идеей интерференции вторичных волн. С дополнением Френеля принцип Гюйгенса называют *принципом Гюйгенса–Френеля*.

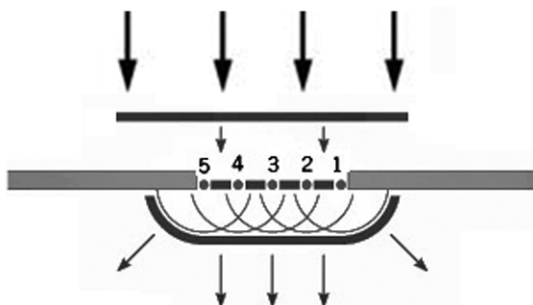


Рис. 5.15. Принцип Гюйгенса

Проведем еще одну демонстрацию. Волновую ванну (рис. 5.16) наполним водой и разделим на две части поперечной стенкой с

двумя узкими отверстиями. При ритмичном колебании пластины, расположенной параллельно стенке, создается плоский волновой фронт. Каждую щель можно рассматривать как отдельный источник когерентных колебаний. Во вторую часть сосуда проходят через отверстия полукольцевые волны (элементарные волны Гюйгенса), интерферирующие от всех источников.

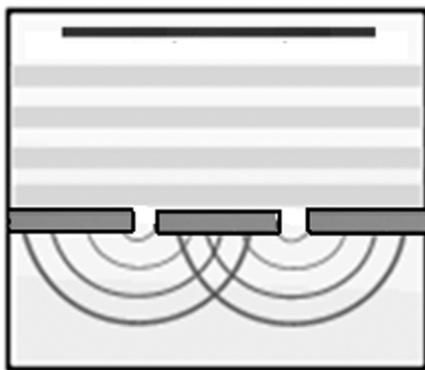


Рис. 5.16. Наблюдение элементарных волн в волновой ванне



Поверхность компакт-диска представляет собой рельефную спиральную дорожку на поверхности полимера, шаг которой соизмерим с длиной волны видимого света. На такой упорядоченной и мелкоструктурной поверхности должны проявляться дифракционные и интерференционные явления. Это и является причиной радужной окраски бликов компакт-диска, наблюдаемых в белом свете.

5.3. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки

- 5.1. В чем заключается суть принципа суперпозиции механических волн?
- 5.2. Какими свойствами обладают когерентные волны?
- 5.3. Как можно получить когерентные источники механических волн?
- 5.4. Что называется интерференцией?
- 5.5. Начертите схему опыта, соответствующую наблюдению интерференции механических волн в волновой ванне.
- 5.6. Опишите опыт Юнга по наблюдению интерференции световых волн.

- 5.7. Сформулируйте выводы об интерференции как свойстве волн и как о физическом явлении и об алгоритме расчёта интерференционной картины для волн различной природы (условия максимумов и минимумов).
- 5.8. Проводя аналогию между световыми и поверхностными водяными волнами, покажите сходство и различие явлений различной природы.
- 5.9. Две волны с одинаковым периодом распространяются в одном направлении. Разность хода равна четному числу полуволн. Что получится в результате интерференции?
- 5.10. Всегда ли сохраняется энергия при интерференции двух волн? Объясните.
- 5.11. Почему мыльные пузыри имеют радужную окраску? Почему окраска одного и того же места поверхности мыльного пузыря непрерывно меняется?
- 5.12. Чем отличается дифракция волн от интерференции?
- 5.13. Приведите примеры дифракции и интерференции.
- 5.14. Что в обыденной жизни легче наблюдать: дифракцию звуковых или световых волн? Почему?
- 5.15. В чем заключается принцип Гюйгенса? Принцип Гюйгенса–Френеля? Почему нельзя объяснить дифракцию волн только при помощи принципа Гюйгенса?
- 5.16. Что представляет собой результат сложения двух гармонических колебаний одинакового направления, одинаковой частоты?
- 5.17. Какой колебательный процесс получается в результате сложения двух гармонических колебаний одинакового направления с близкими частотами? Получите уравнение таких колебаний и изобразите их графически.
- 5.18. Напишите формулы для амплитуды и периода биений.
- 5.19. Как определить частоту биений?
- 5.20. Рассмотрите результат сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний на примере математического маятника.
- 5.21. Что называется фигурами Лиссажу?



Как объяснить тот факт, что звуки, представляющие собой суперпозицию волн разной частоты, резкие вблизи источника излучения, по мере удаления от него становятся более глухими и низкими?

5.4. Задачи для самостоятельного решения

- 5.1. Получите уравнение результирующего колебания, получающегося при сложении двух гармонических колебаний: $x_1 = \sin 4\pi t$, $x_2 = \sin 10\pi t$.
- 5.2. Напишите уравнение движения, получающегося в результате сложения двух одинаково направленных гармонических колебательных движений с одинаковым периодом 4 с и одинаковой амплитудой 0,03 м. Начальная фаза первого и второго колебания равна 0 и $\pi/4$ соответственно.
- 5.3. От двух когерентных источников, колеблющихся в одинаковых фазах с частотой $f = 20$ Гц, со скоростью $v = 2$ м/с распространяются волны с равными амплитудами. Каков результат интерференции в точке, отстоящей от одного источника на 15 см дальше, чем от другого?
- 5.4. Два когерентных источника звука колеблются в одинаковых фазах. В точке, отстоящей от первого источника на 2 м, а от второго на 2,5 м, звук не слышен. Определите частоту колебаний источников.
- 5.5. Чему будет равна частота биений в случае, когда ноты «до» и «до#» (262 Гц и 277 Гц соответственно) звучат одновременно? Будут ли слышны эти биения?
- 5.6. В результате сложения двух колебаний, период одного из которых $T_1 = 0,02$ с, получают биения с периодом $T_2 = 0,2$ с. Определите период T_2 второго складываемого колебания.
- 5.7. Предполагается, что две рояльные струны должны иметь одну и ту же частоту 132 Гц, однако настройщик фортепиано слышит, что при одновременном их звучании через каждые 2 с происходят биения. Если одна струна колеблется с частотой 132 Гц, то какова в этом случае частота колебаний другой? Получим ли мы один ответ на этот вопрос?
- 5.8. Сколько будет слышно биений, если на двух одинаковых флейтах музыканты пытаются исполнить ноту «до» средней октавы (262 Гц), при условии, что одна из флейт находится при температуре 0,0°C, а вторая — при температуре +30,0°C?

VI. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Стоячие волны в струнах и трубах.

Демонстрация звуковой стоячей волны с помощью трубы Рубенса и трубы Кундта. Демонстрация звуковой стоячей волны в трубке Рийке. Собственные колебания плоских фигур. Стоячие волны на поверхности воды. Геометрия звуковых вибраций в контейнере с коллоидной жидкостью (фигуры с двумерной и трехмерной структурой)

6.1. Возникновение стоячих волн — простейший случай интерференции

Важным случаем интерференции является наложение 2-х встречных плоских волн с одинаковой амплитудой. Возникающий в результате колебательный процесс называется *стоячей волной*. Стоячие волны возникают при отражении от преград и неоднородностей. Падающая на преграду волна и бегущая отраженная накладываются друг на друга и образуют стоячую волну. При этом важное значение имеет частота, фаза и коэффициент затухания волны в месте отражения.

Одним из простейших примеров такого рода явлений служит наложение двух волн в струне, бегущих в противоположных направлениях. Если обе волны имеют одинаковые амплитуды и частоты, то результирующее смещение определяется формулой

$y(x, t) = x_m \sin[\omega t - kx] + x_m \sin[\omega t + kx] = 2x_m \sin \omega t \cdot \cos kx$	(6.1)
--	-------

В правой части формулы содержится произведение функции времени t и функции координаты x . При этом выражение $2x_m \cos kx$ можно рассматривать как распределение амплитуд гармонических колебаний частиц. Множитель $\sin \omega t$ одинаков для всех частиц струны, поэтому частоты их колебаний одинаковы, а фазы одинаковы на отрезках оси x , в пределах которых имеет один и тот же знак. При переходе через точки, в которых $\cos kx$, фаза скачком меняется на π . В бегущей вол-

не изменение фазы в зависимости от x (при фиксированном t) можно рассматривать как передачу колебательного движения от одних частиц к другим. В стоячей волне такой передачи движения нет.

Из формулы (6.1) следует, что в стоячей волне имеются точки, где амплитуда колебаний частиц струны достигает наибольшего (равного $2x_m$) значения. В этих точках множитель $\cos kx$ равен единице. Такие точки называются пучностями смещения стоячей волны. В тех точках, где $\cos kx$ равен нулю, частицы струны неподвижны. Эти точки называются узлами стоячей волны.

В стоячей волне все точки среды, в которой они распространяются, расположенные между двумя соседними узлами, колеблются в одной фазе. Точки среды, лежащие по разные стороны от узла, колеблются в противофазе, т.е. их фазы отличаются на π .



Стоячие волны — волны, образующиеся при наложении двух бегущих волн, распространяющихся навстречу друг другу с одинаковыми частотами и амплитудами. Для них характерно расположение чередующихся максимумов (пучностей смещения) и минимумов (узлов) амплитуды.

На рис. 6.1 сплошной синусоидальной кривой показано, как вдоль упругого шнура слева направо бежит прямая волна, а обратная возникает при отражении от преграды, на которой закреплен правый конец шнура. При возникновении стоячей волны точка крепления A является узлом.

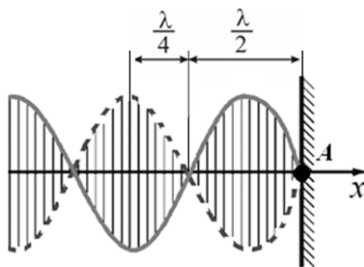


Рис. 6.1. Результат интерференции двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях

В отличие от бегущих волн в стоячей волне отсутствует перенос энергии вследствие того, что образующие эту волну падающая и отраженная волны переносят энергию в равных количествах и в прямом, и в противоположном направлениях (идеальный случай). В том случае, когда волна отражается от среды более плотной, чем та среда, где распространяется волна, в месте отражения возникает узел, фаза изменяется на противоположную (происходит потеря половины волны). Когда волна отражается от среды менее плотной в месте отражения, появляется пучность, и потери половины волны нет.

Таким образом, сформулируем **свойства стоячих волн**:

1. Стоячие волны возникают при интерференции бегущей и отраженной волн, имеющих в точке отражения одинаковую длину волны, но взаимнопротивоположные направления распространения.
2. Все частицы в стоячей волне одновременно проходят через положения равновесия.
3. Каждая частица имеет свою амплитуду колебаний.
4. Определенные участки — *узлы смещения* — находятся постоянно в покое.
5. Посредине между узлами находятся участки наиболее интенсивного движения — *пучности смещения*.
6. Расстояние между двумя соседними узлами (пучностями) равно $\frac{\lambda}{2}$. Пучности и узлы смещены относительно друг друга на четверть длины волны.
7. При отражении от более плотной среды в месте отражения возникает узел смещения.
8. При отражении от менее плотной среды в месте отражения образуется пучность смещения.
9. Стоячая волна, имеющая наименьшую частоту, соответствует единственной пучности и называется *основной частотой*. Стоячие волны с более высокими частотами называются *гармониками*. Как правило, первой гармоникой называют основную частоту, вторая гармоника имеет частоту, равную удвоенной основной и т.д.

Примерами стоячих волн могут служить колебания струны, колебания столба воздуха в духовых инструментах, органной

трубе, барабанах. Стоячие волны возбуждаются в любых телах, способных колебаться. Даже ударив по камню молотком, мы возбуждаем в нем стоячие волны. Образование стоячих волн происходит на собственных, резонансных частотах тела, которые определяются размерами тела.

Стоячие волны могут возникать не только в газообразных, жидких и твердых телах, но и в вакууме при распространении и отражении электромагнитных возмущений.

6.1.1. Демонстрация стоячих волн в струнах

Проведем демонстрацию, для этого будем использовать длинный однородный шнур, один конец которого закрепим, а другой будем непрерывно раскачивать в вертикальной плоскости, т.е. вслед за первым поперечным возмущением, направим второе, третье и т.д. К закрепленному концу побежит непрерывная волна, которая затем отразится. Если продолжить качания, то возникнут волны, распространяющиеся в обоих направлениях, причем падающая волна будет интерферировать с отраженной. При этом может возникнуть полный беспорядок. Однако если раскачивать конец шнура с правильно подобранной частотой, то интерференция падающей и отраженной волн приведет к возникновению стоячей волны, названной так, потому что будет выглядеть неподвижной. Мы обнаружим неподвижные точки — точки гасящей интерференции, называемые узлами, и точки усиливающей интерференции, называемые пучностями. Меняя частоту колебаний, изменим количество узлов.

При самой низкой из частот, возбуждающих стоячую волну, получается картина, изображенная на рис. 6.2, а. Это первая гармоника. Стоячие волны, показанные на рис. 6.2, б и рис. 6.2, в, возникают на частотах, равных удвоенной (вторая гармоника) и утроенной (третья гармоника) низшей частоте, при условии, что натяжение шнура остается постоянным.

Опыт показывает нам, что в шнуре можно возбудить только тогда стоячие волны, когда на длине шнура укладывается целое число половин длины волны.

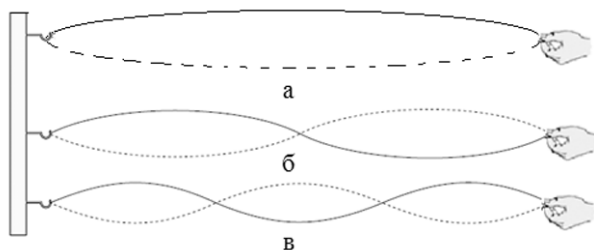


Рис. 6.2. Стоячие волны в струне

Частоты, на которых возникают стоячие волны, называются **собственными** (или резонансными) частотами. Когда в шнуре образуется стоячая волна на частотах, на которых имеет место резонанс, не требуется больших усилий, чтобы поддерживать колебания со значительной амплитудой.

Изучение собственных колебаний натянутой струны продолжим рассматривать с помощью установки, приведенной на рис. 6.3, а. Внешнее периодическое воздействие на струну осуществляется в ее верхней точке, где конец струны прикреплен к языку электромагнитного вибратора 1, электромагнитного вибратора 2. Вибратор представляет собой электромагнит, имеющий две обмотки возбуждения 3 и обмотку подмагничивания 4, в магнитную цепь которого входит якорь 1. Обмотка подмагничивания питается постоянным током, обмотки возбуждения — синусоидальным током звукового генератора 5. Нижний конец струны прикреплен к рычагу 6 совместно с чашкой весов 7. Если нагрузить чашку весов гирьками разновесов (сила натяжения струны равна весу грузика), на обмотку подмагничивания подать постоянное напряжение, а обмотки возбуждения подключить к звуковому генератору, то якорь электромагнитного вибратора начнет совершать вынужденные колебания с частотой звукового генератора и по струне начнут распространяться поперечные волны, которые, отражаясь от нижнего конца струны, образуют обратные — встречные волны. В результате наложения прямой и обратной волны в соответствии в определенных частотах звукового генератора образуется стоячая волна (рис. 6.3,б).

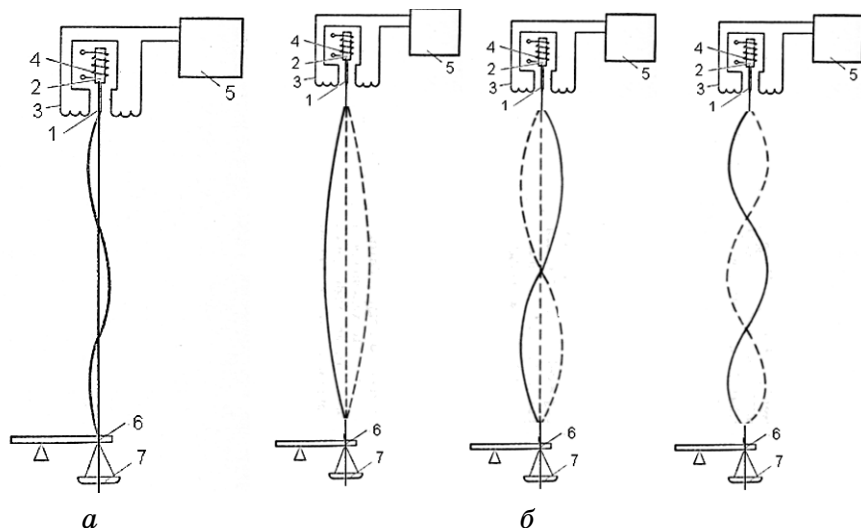


Рис. 6.3. Лабораторная установка для изучения собственных колебаний струны (а) [1 — якорь, 2 — вибратор, 3 — обмотки возбуждения, 4 — обмотка подмагничивания, 5 — звуковой генератор, 6 — рычаг, 7 — чашка весов]; распределение амплитуд отдельных точек струны при собственных колебаниях (условие резонанса) для первой, второй и третьей гармоник (б)

При изменении частоты генератора (при неизменной скорости распространения волны v) частота колебаний f , длина волны λ и число пучностей стоячей волны изменяются. Поскольку стоячая волна возникает в закреплённой с обоих концов натянутой струне, то в местах ее закрепления могут располагаться только узлы смещения стоячей волны. Поэтому в ней возбуждаются только такие колебания, у которых половина длины волны укладывается на длине шнура целое число раз (рис. 6.4). Отсюда вытекает условие:

$l = \frac{n}{2} \lambda, \quad n=1, 2, 3, \dots$	(6.2)
---	--------------

где l — длина струны, n — число пучностей на длине струны.

Из уравнения (6.2) получим формулу для длины волны:

$\lambda = \frac{2 \cdot l}{n}$	(6.3)
---------------------------------	-------

Фазовая скорость волны:

$v = \lambda \cdot f$	(6.4)
-----------------------	-------

где f – частота колебаний.

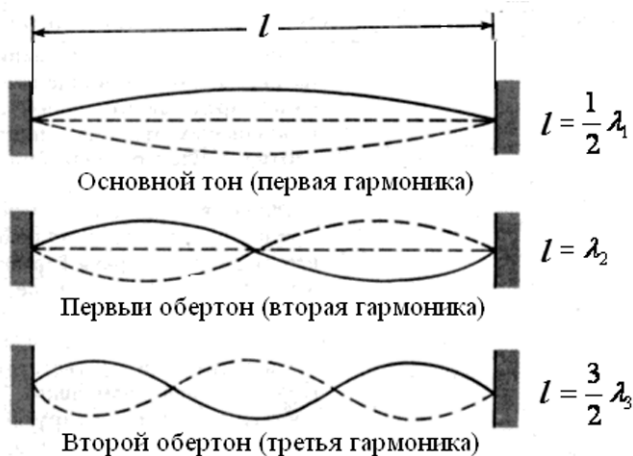


Рис. 6.4. Стоячие волны, соответствующие резонансным частотам

В музыкальных инструментах источник звука приводится в состояние колебаний, когда производят удары, перебирают струны, водят по струнам смычком или вдувают воздух. При этом возникают стоячие волны, и тело колеблется (совершает не одно какое-нибудь из собственных колебаний, а сразу несколько). У барабана колеблется натянутая мембрана. Ксилофоны и металлофоны имеют деревянные или металлические пластинки, которые можно заставить колебаться. В колоколах, цимбалах и гонгах также находят применение колебания металлических частей. Наиболее широко распространенные инструменты используют колеблющиеся струны. К ним от-

носятся скрипка, гитара и фортепиано. Не менее распространены и другие инструменты, в которых возникают колебания столба воздуха, например, флейта, труба и орган.

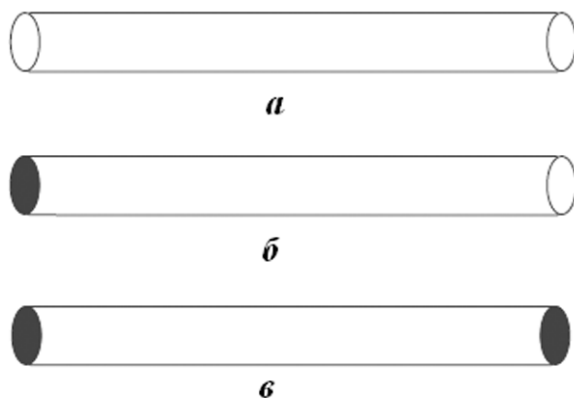
В случае свободных колебаний струн, стержней и столбов газа в них устанавливаются стоячие волны, частоты которых удовлетворяют определенным условиям, т.е. могут принимать только определенные дискретные значения, называемые *собственными частотами колебаний* соответствующей колебательной системы. На жестко закрепленных концах струн или стержней располагаются узлы смещения (пучности деформации), а на свободных концах стержней — пучности смещения (узлы деформации).

Когда музыкант прижимает струну пальцем к грифу, скажем, на гитаре или скрипке, *эффективная длина струны сокращается, поэтому возникает более высокий звук*, поскольку длина волны основного колебания укорачивается. Все струны гитары или скрипки имеют одинаковую длину. Они звучат с разной высотой тона, так как имеют различную массу, приходящуюся на единицу длины, которая влияет на скорость волны (натяжение струн может быть также различным — изменяя натяжение, можно настроить инструмент). Кроме того, скорость распространения волны по более массивной струне меньше, и, следовательно, при той же длине волны соответствующая частота будет меньше. В фортепиано и других клавишных инструментах каждая струна отличается по длине от остальных. Для извлечения более низких нот струны должны быть не только массивнее, но и длиннее.

Высота голоса певца также зависит от длины голосовых связок и их натяжения. У мужчин длина голосовых связок составляет 18–25 мм (бас — 25 мм, тенор — 18 мм), у женщин 15–20 мм.

6.1.2. Стоячие волны в трубах

В духовых музыкальных инструментах используют открытую трубу (т.е. трубу, открытую с обеих сторон) или закрытую — трубу, открытую с одной стороны и закрытую с другой или закрытую с обеих сторон (рис. 6.5).



*Рис. 6.5. Труба, открытая с обеих сторон (а),
труба, открытая с одной стороны и закрытая с другой (б),
труба, закрытая с обеих сторон (в)*

Например, флейта при закрытых отверстиях представляет собой открытую трубу, поскольку она открыта не только с той стороны, с которой в нее дует музыкант, но и с противоположной. За счет изменения длины трубы получают звуки различной высоты (открывая отверстия вдоль флейты, ее длина уменьшается). В трубе, напротив, нажатие на клапаны увеличивает длину столба воздуха. Во всех этих инструментах увеличение длины колеблющегося воздушного столба соответствует понижению частоты звука. В органах применяются как открытые, так и закрытые трубы. Звуки различной высоты извлекаются из органа посредством различных труб, длина которых меняется от нескольких сантиметров до 5 м и более.

Возможные типы колебаний для открытой и закрытой с одного конца трубы изображены графически на рис. 6.6 и на рис. 6.7. Графики показывают амплитуду смещения колеблющихся частиц воздуха внутри труб. Пучности не возникают в точности у открытых концов трубы, их положение зависит от диаметра трубы. Однако, если диаметр трубы мал по сравнению с ее длиной (что обычно имеет место), то пучности возникают очень близко к концу трубы, что и показано на рисунке (на положение пучности влияют также и другие факторы).

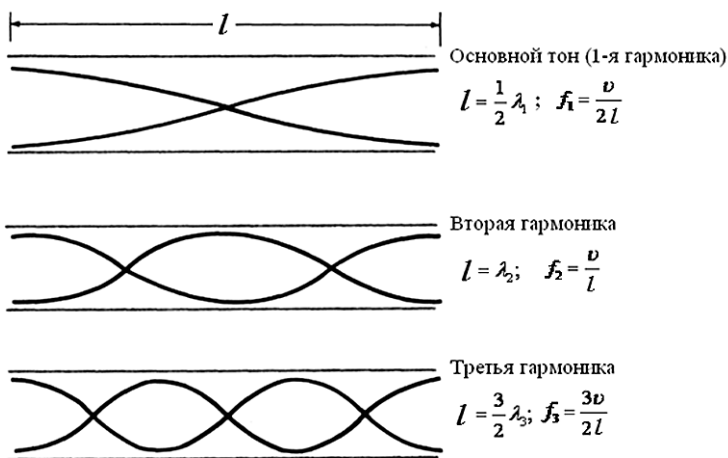


Рис. 6.6. Стоячие волны в трубе, открытой с обоих концов: основное колебание, вторая и третья гармоники

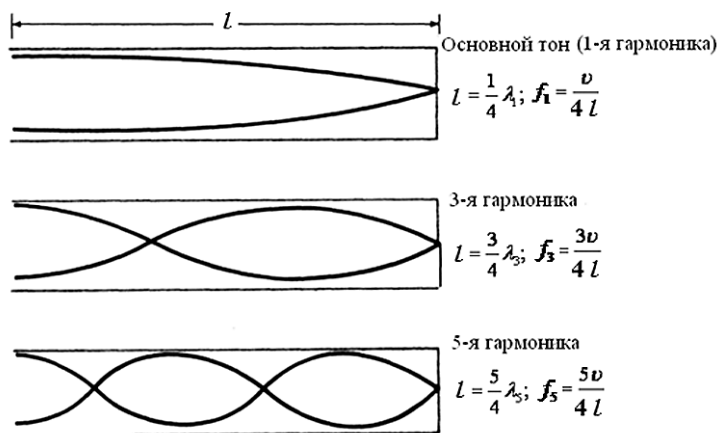


Рис. 6.7. Стоячие волны в трубе, открытой с одной стороны и закрытой с другой

В трубе на рис. 6.7 на ее закрытом конце всегда возникает узел смещений, а на открытом конце — пучность. Поскольку расстояние между узлом и ближайшей пучностью равно $\lambda/4$, на основной частоте колебаний внутри трубы будет уме-

щаться только четверть длины волны $l = \lambda / 4$. Таким образом, основная частота равна половине основной частоты в открытой трубе той же длины. Существует и другое отличие, как видно из рис. 6.7, в закрытой трубе имеются только нечетные гармоники, т.е. частоты обертонов равны основной частоте, умноженной на 3, 5, 7, Звуковая волна, частота которой равна частоте основной волны, умноженной на 2, 4, ..., не может иметь узел на одном конце и пучность на другом, а, значит, стоячие волны такой частоты в закрытой трубе не могут существовать.

$f_m = \frac{v}{4l}(2m - 1) \quad m=1, 2, 3, \dots$	(6.5)
---	-------



Практически всем известно, что если дуть в бутылку, то частота возбужденных акустических волн зависит от количества в ней жидкости, а точнее, от высоты столба воздуха. На дне бутылки или на поверхности жидкости возникает узел смещения, а на срезе горлышка — пучность (рис. 6.8). Чем полнее бутылка, тем выше частота основного тона.

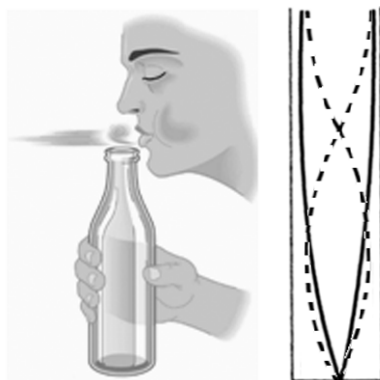


Рис. 6.8. Колебания объёма воздуха в сосуде

Возможные типы колебаний (основное колебание и два первых обертона) для закрытой с обоих концов трубы изображены графически на рис. 6.9. Очевидно, что колебания воздуха у закрытых концов невозможны, а поэтому здесь образуются *узлы*.

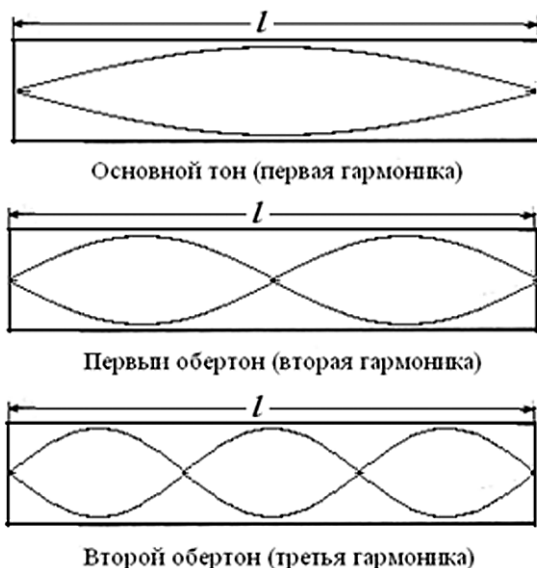


Рис. 6.9. Стоячие волны в закрытой трубе: основное колебание, вторая и третья гармоники

6.1.3. Стоячая волна и акустический резонанс в цилиндрическом сосуде с водой

В п. 4.4.3 мы провели опыт по наблюдению акустического резонанса в сосуде с водой. Камертон, возбуждаемый ударами молоточка по одной из его ветвей, излучает звуковые волны. Эти волны входят в отверстие сосуда ($x=0$), отражаются от поверхности воды ($x=l$) и интерферируют с теми волнами, которые непосредственно бегут от камертона. В результате в сосуде образуется стоячая волна.

Образование пучностей стоячей волны в сечении открытого торца трубы и узла у поверхности воды представляет собой условие резонанса для вынужденных колебаний в сплошной среде, в данном случае в воздухе. Максимальная громкость звука соответствует тем случаям, когда длина остающегося в сосуде воздушного столба равна нечетному числу четвертей длины волны.

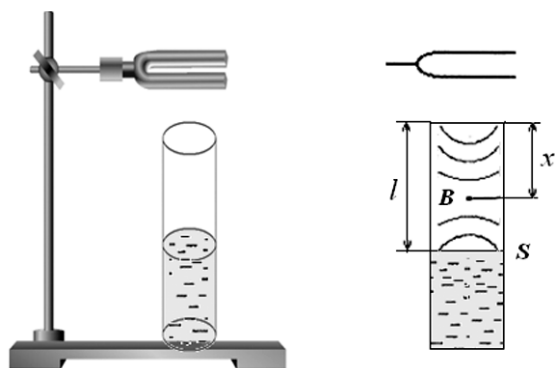


Рис. 6.10. Демонстрация акустического резонанса в трубе, закрытой с одного конца:

*l — расстояние от начала координат до уровня воды S ,
 x — координата произвольной точки B*

6.1.4. Демонстрация звуковой стоячей волны при помощи трубы Кундта

Трубка Кундта, предложенная в 1866 г. немецким физиком Августом Кундтом, является простым приспособлением для демонстрации стоячих звуковых волн.

Рассмотрим процесс установившихся звуковых колебаний в закрытой с обоих концов полый стеклянной трубе. Пусть один из концов круглой *горизонтально расположенной* трубы является излучающей мембраной, а второй закрыт металлическим поршнем-отражателем, как показано на рис. 6.11. На нижней стороне трубы равномерно *насыпан тонкий слой мелкой пробковой пыли*.

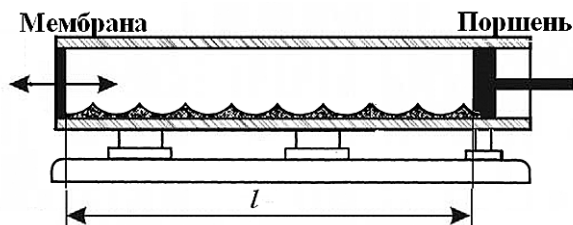


Рис. 6.11. Наблюдение стоячей звуковой волны в трубе Кундта: во время колебаний пробковая пыль образует тонкие, перпендикулярные к оси трубы слои

Пусть мембрана громкоговорителя совершает гармонические колебания под действием звукового генератора. Изменяя длину воздушного столба l за счет перемещения отражателя относительно трубы, можно создать условия, чтобы *между излучателем и отражателем установилась стоячая волна*.

В результате возникновения стоячей волны пробковая пыль, первоначально распределенная равномерно по длине трубы, образует отчетливую периодическую картину (пылевые фигуры Кундта), собираясь в местах, соответствующих узлам смещения. Измеряя расстояния между узлами, можно измерить длину волны.

6.1.5. Демонстрация звуковой стоячей волны при помощи трубы Рубенса

Труба Рубенса представляет собой горизонтально расположенную металлическую трубу длиной в несколько метров. Вдоль всей трубы сверху в качестве горелок используется ряд отверстий. Один конец этой трубки закрыт, а другой затянута гибкой пленочной мембраной, которая приводится в незатухающие колебания. Посредством клапана труба соединяется с газопроводной трубкой, в которую впускается горючий газ, например, пропан (рис. 6.12).

В 1904 году немецкий физик Генрих Рубенс во время эксперимента использовал 4-х метровую трубу диаметром ~ 10 см, в которой насчитывалось 200 отверстий, расположенных с шагом 2 см вдоль прямой линии.

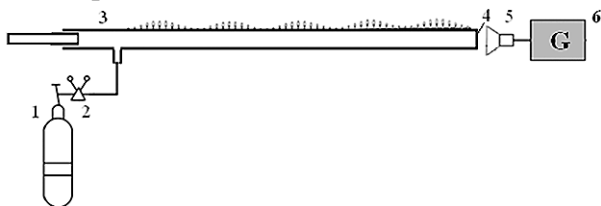


Рис. 6.12. Устройство трубы Рубенса: 1 — баллон с газом, 2 — клапан, 3 — металлическая труба с отверстиями, 4 — мембрана, 5 — громкоговоритель, 6 — тон-генератор

Выходящий из отверстий газ поджигают, так получается ряд язычков пламени одинаковой высоты. Напротив мембраны устанавливают громкоговоритель, подключенный к генератору гар-

монических колебаний. Аналогично трубе Кундта, когда громкоговоритель включен, в трубе Рубенса формируются стоячие волны. Там, где благодаря звуковым волнам находится область повышенного давления, через отверстия просачивается больше газа и высота язычков пламени увеличивается (рис. 6.13).

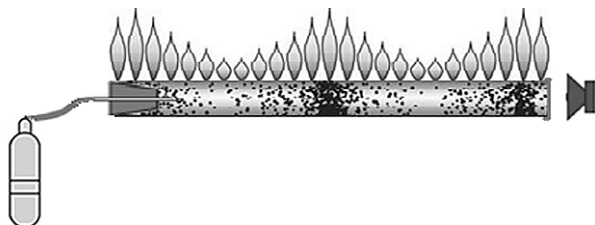


Рис. 6.13. Формирование областей повышенного и пониженного давления в трубе Рубенса

6.1.6. Демонстрация звуковой стоячей волны, возникающей при конвекционном движении воздуха сквозь трубу Рийке

Первые записи о колебаниях, порождаемых теплом, были сделаны Хиггинсом в 1777 г. Он экспериментировал с расположенной вертикально и открытой с обоих концов стеклянной трубкой, в которой акустические колебания возбуждались с помощью водородной горелки. Этот опыт вошёл в историю как «поющее пламя Хиггинса».

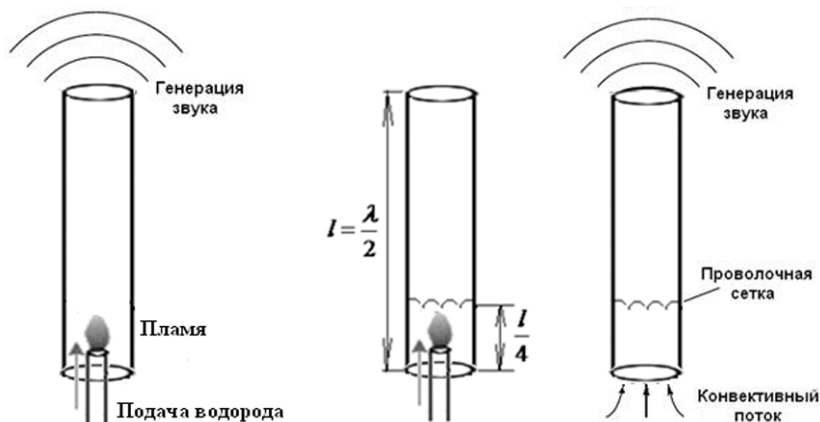


Рис. 6.14. «Поющее пламя Хиггинса» и труба Рийке

Однако, в современной физике более известен другой эксперимент, получивший название «трубка Рийке». В 1859 г. Пауль Рийке заменил водородное пламя Хиггинса на подогреваемую проволочную сетку, помещенную на расстоянии $\frac{1}{4}$ длины трубы от нижнего конца. При этом в трубе происходит самовозбуждение звуковых колебаний на частоте основного тона трубы:

$f_{\text{осн}} = \frac{v}{2l}$	(6.6)
---------------------------------	-------

где l — длина трубы, v — скорость звука в воздухе.

По мере остывания сетки громкость звучания ослабевает. Звучание происходит только в том случае, если в трубе образуется сквозная тяга (для этого труба и размещается вертикально). Если звучащей трубе придать горизонтальное положение — звучание прекратится. Однако после возвращения в вертикальное положение труба вновь начинает звучать. Также звучание прекратится, если верхний конец трубы закрыть.



Вблизи нагретой сетки происходит нестационарный теплообмен между сеткой и воздухом. Когда холодный воздух проходит сквозь сетку снизу, теплопередача больше, чем при движении нагретого воздуха сверху вниз. В результате возникновения встречных потоков воздуха снизу вверх и сверху вниз в трубе устанавливается стоячая волна, в которой на концах трубы образуются узлы колебаний давлений воздуха, а в середине возникает пучность.



Если в середине стенки трубы просверлить небольшое отверстие, то звук исчезнет. Это объясняется тем, что отверстие в стенке уравнивает давление в середине трубы с атмосферным. Изменения давления посередине трубы при колебаниях воздуха в этом случае должны быть равны нулю. При этом становится невозможным существование пучности давления посередине трубы, а значит, в трубе не могут быть возбуждены звуковые колебания на основной частоте.

Если поместить нагретую сетку в верхней половине трубы, то вызвать звучание трубы на частоте основного тона также не удастся. Видоизменение опыта, предложенное Босша и Риссом, открывает эту возможность. Для этого помещенную в верхней части трубы сетку следует не нагревать, а охлаждать. При этом в нижней части трубы должна располагаться горелка, нагревающая воздух и создающая тягу, а сетка теперь отводит тепло.

Колебания могут наблюдаться и при отсутствии потока воздуха. Для этого в горизонтально расположенную трубу, один конец которой закрыт, а другой открыт, или закрытую на обоих концах, необходимо поместить нагреватель и близко расположенный к нему охладитель. При некоторой разнице температур происходит самовозбуждение звука. Этот эффект был обнаружен Зондхауссом.

6.2. Собственные колебания плоских и пространственно протяженных фигур

Стоячие волны могут образовываться в телах любой формы, а не только в таких сильно удлинённых телах, как струны и трубы. Неподвижные места стоячей волны (ее узлы) представляют собой поверхности, рассекающие объем тела на участки, в середине которых колебания наиболее сильны (так называемые пучности).

Строго говоря, в случае струны мы также имеем узловые поверхности — неподвижные поперечные сечения. Но так как протяженность этих сечений невелика по сравнению с длиной струны, то мы говорим об узловых точках, рассматривая сами тела как геометрические линии.

Если тело приближается по своей форме к геометрической поверхности, например, представляет собой пластинку, то в ней узловые поверхности можно считать узловыми линиями (рис. 6.15).

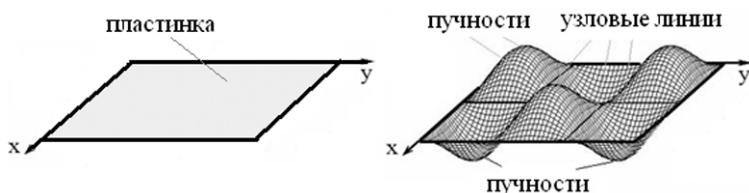


Рис. 6.15. Узловые линии пластинки

Наглядный способ наблюдения стоячих волн в пластинках предложил немецкий физик Эрнст Хладни (1756–1827 гг.). Классическая постановка эксперимента выглядит так. Если закрепить центр стеклянной или металлической квадратной тонкой пластинки (рис. 6.16, а), однородно посыпать ее сверху мелким песком (или другим порошком), коснуться пальцем в средней точке одной из свободных сторон и провести смычком по противоположному краю ближе к одному из углов, то песок соскакивает с большей части поверхности и собирается по длине двух узловых линий, которые разделят большой квадрат на четыре меньшие (рис. 6.16, б).

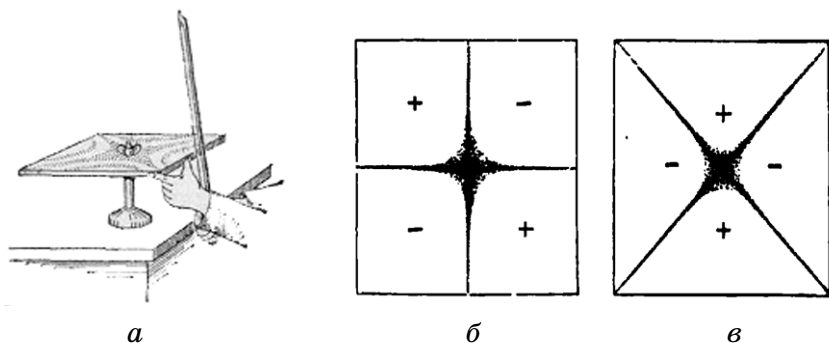


Рис. 6.16. Фигуры в классическом эксперименте Хладни. Знаком плюс отмечены те пучности, где пластинка выгнута в данный момент кверху, а знаком минус — книзу. Через четверть периода пластинка станет плоской, а еще через четверть периода плюсы прогнутся вниз, а минусы — вверх

Знаками «+» и «-» обозначены противоположные направления движения частиц внутри соответствующих им квадратов, а покоящиеся узловые линии обозначают границы этих противоположных движений. Посыпав еще раз песок поверхность пластинки, коснувшись одного из ее углов и проведя смычком по середине стороны, можно получить две резко обозначенные полосы, проходящие по диагоналям (см. рис. 6.16, а и рис. 6.16, в).



Фигуры, образуемые скоплением сыпучих мелких частиц (например, песка и т.д.) вблизи неподвижных (узловых) линий на поверхности упругой колеблющейся пластинки, называют *фигурами Хладни* (рис. 6.17). Вид фигур зависит от формы пластинки и положения закрепленной точки, а также от того, в каком месте проводить смычком и где придерживать при этом пластинку пальцами.

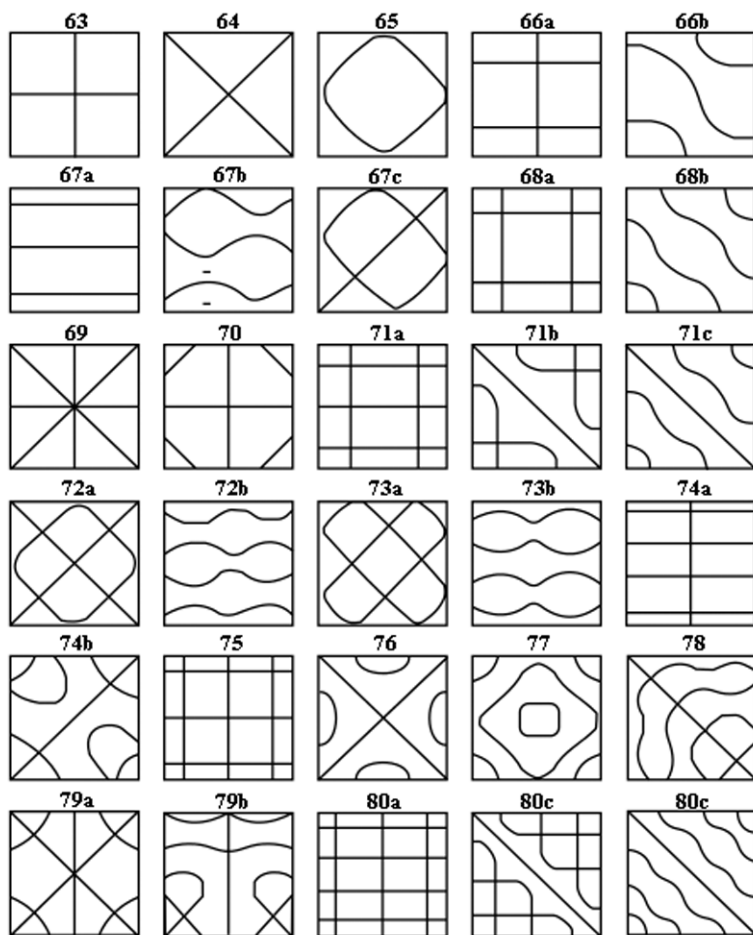


Рис. 6.17. Примеры песочных фигур Хладни из книги Э. Хладни «Акустика»



Известно, что очень легкий порошок, как, например, ликоподий (или пыль), ведёт себя отлично от песка. Вместо того, чтобы собираться в узлах, он накапливается в местах максимального движения — в пучностях. Это явление можно объяснить влиянием потоков воздуха, возникающих в результате колебания, т.к. потоки направлены вдоль пластины от узлов к пучностям (откуда они уходят вверх), ликоподий попадает в пучности, где и оседает. В вакууме любой порошок всегда перемещается по направлению к узлам колеблющейся поверхности.

В наше время для демонстрации фигур Хладни вместо смычка используют механический вибратор (громкоговоритель), закрепленный под пластиной и подключенный к звуковому генератору (рис. 6.18).



*Рис. 6.18. Демонстрация фигур Хладни при помощи механического вибратора и звукового генератора.
Современный лабораторный опыт*



Фигуры Хладни продолжают использовать для изучения колебаний подвижных поверхностей электроакустических преобразователей (мембран), плоскостных колебаний дек музыкальных инструментов (рис. 6.19).

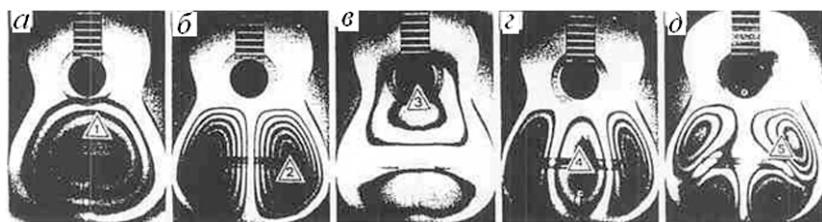
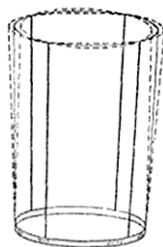
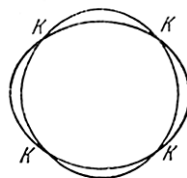


Рис. 6.19. Пример образования стоячих волн на верхней деке классической гитары (Дженссон, 1971 г.)

Изгибание пластинок подводит нас к колебанию стакана или колокола. Колебания этих тел уже весьма сложны. На рис. 6.20, а показано, как колеблется стакан, если ударить его по краю. Узловые линии изображены непрерывно, а штриховыми в увеличенном виде показано, как изгибаются стенки стакана при основном колебании. На рис. 6.20, б показан вид сверху: в «К» мы имеем точки выхода четырех узловых линий, идущих по «меридианам» поверхности.



а



б

Рис. 6.20. Простые колебания стакана (а), вид сверху (б)

Приблизительно так же мы можем представить себе простейшие колебания колокола (рис. 6.21).

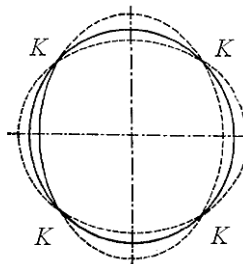
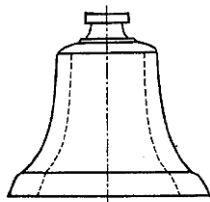


Рис. 6.21. Простые колебания колокола

Из собственных колебаний наполненных газом полостей следует упомянуть о сосудах в форме шара или бутылках с короткой открытой горловиной. С ними мы уже знакомы — это резонаторы Гельмгольца.

6.3. Наблюдение стоячей волны на поверхности жидкости

Пусть в волновой ванне на поверхности воды распространяется плоская волна, созданная пластиной-излучателем, закрепленной на электромагнитном вибраторе (рис. 6.22). На пути этой волны находится преграда — пластина-отражатель, параллельная пластине-излучателю, т.е. перпендикулярная к направлению распространения волны. Опыт показывает следующее. Когда волна, бегущая от пластины-излучателя, отражается и идет обратно, между колеблющейся пластиной-излучателем и отражающей пластиной получается ряд параллельных им и не перемещающихся полос, удаленных друг от друга на полволны. Эти полосы представляют собой чередование максимумов и минимумов, причем в минимумах поверхность воды практически неподвижна. Так выглядит стоячая волна на поверхности воды.

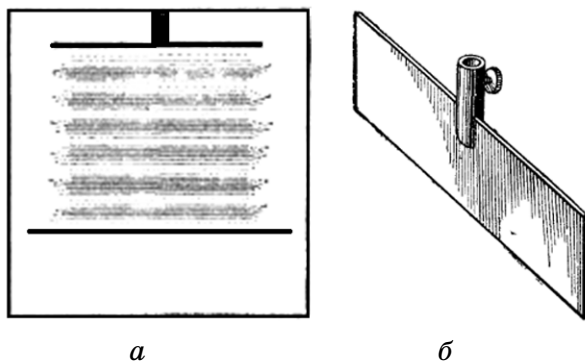


Рис. 6.22. Стоячая волна на поверхности воды (а),
пластина-излучатель (б)

Если ритмично прижимать стенки бокала, мы увидим, что поверхность воды покрывается рябью. Рябь рождается в четырех точках у стенок бокала. Колебания передаются по воде от одной стенки к другой. Дойдя до противоположной стенки,

они отражаются от нее и идут обратно, навстречу колебаниям от другой стенки. В результате прямые и обратные волны складываются. Появляются стоячие волны.

6.4. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки

- 6.1. Какая волна называется стоячей волной?
- 6.2. Объясните причины возникновения стоячих волн.
- 6.3. Изобразите графически стоячую волну.
- 6.4. Перечислите свойства, которые отличают стоячую волну от бегущей.
- 6.5. Стоячая волна не переносит энергии. Почему?
- 6.6. Что называют узлами и пучностями смещений в стоячей волне?
- 6.7. Чему равно расстояние между соседними узлами? Чему равно расстояние между соседними пучностями стоячей волны?
- 6.8. Как изменяется фаза стоячей волны при отражении от среды, плотность которой больше по сравнению со средой, в которой она распространялась до отражения? При обратном соотношении плотностей?
- 6.9. Как расположены узлы и пучности стоячей волны в воздушном столбе, закрытом с одного конца? Открытом с двух сторон?
- 6.10. Можно сказать, что стоячие волны вызваны «интерференцией в пространстве», тогда как про биения можно сказать, что они обусловлены «интерференцией во времени». Объясните.
- 6.11. Наверняка вы носили воду в ведре и замечали, что иногда она может сильно расплескиваться. Однако, если поменять темп ходьбы, расплескивание прекращается. Почему так происходит?
- 6.12. Что называется дисперсией волн?

6.5. Задачи для самостоятельного решения

- 6.1. Струна длиной l туго натянута между двумя опорами. Скорость распространения волны в струне 405 м/с. Найти длину струны, если известно, что частота основного тона — 256 Гц.

- 6.2. На какие частоты будет резонировать труба длиной 1,6 м, заполненная воздухом при температуре $t = 0^{\circ}\text{C}$, если труба закрыта с одного конца?
- 6.3. Закрытая с одного конца труба издает основной тон «до», соответствующий частоте 130,5 Гц. Трубу открыли. Какой основной тон она издает теперь? Какова длина трубы? Скорость звука в воздухе принять равной 340 м/с.
- 6.4. Найти собственные частоты колебаний воздушного столба в закрытой с обоих концов трубе, имеющей длину 3,4 м.
- 6.5. Над цилиндрическим сосудом высотой 1 м звучит камертон, имеющий собственную частоту колебаний 340 Гц. В сосуд медленно наливают воду. При каких положениях уровня воды в сосуде звучание камертона значительно усиливается?
- 6.6. Определить длину волны колебаний, если расстояние между первой и четвертой пучностями стоячей волны равно 15 см.

VII. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКА

Субъективные и объективные характеристики звука.

Интервалы в музыке.

Логарифмический закон Вебера-Фехнера.

Уровень громкости звука. Орган слуха человека

Важнейшими характеристиками звука являются громкость, высота тона и тембр. Эти субъективные характеристики связаны с объективными физическими величинами: с амплитудой (интенсивностью звука), частотой колебаний и спектром соответственно (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Объективные и субъективные характеристики звука

Объективные параметры звука	Субъективные характеристики звука
1. Интенсивность (сила)	1. Громкость звука
2. Частота	2. Высота тона
3. Спектр (состав)	3. Тембр («качество»)

7.1. Субъективные характеристики



Субъективные характеристики — это параметры звукового ощущения, которое возникает у человека при воздействии звуковых волн (высота тона, громкость звука, тембр).

7.1.1. Громкость

Громкостью называют субъективное качество, определяющее силу слухового ощущения, вызываемого звуком у слушателя. Чем больше амплитуда колебаний, тем звук громче (чем меньше амплитуда колебаний, тем звук тише). Так, когда колебания звучащего камертона затухают, вместе с амплитудой

уменьшается и громкость звука. И наоборот, ударив по камертону сильнее и тем самым увеличив амплитуду его колебаний, мы вызовем и более громкий звук.

Однако громкость не определяется только амплитудой силы звука (рис. 7.1), так как она зависит от частотного состава звукового сигнала, от условий его восприятия и длительности воздействия. Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает к звуковым волнам с частотой 1–5 кГц.



Звук будет тем громче, чем больше упругость среды распространения. Например, на высоких горах, где воздух более разрежен, громкость звука от одного и того же источника будет меньше, чем у подножья горы.

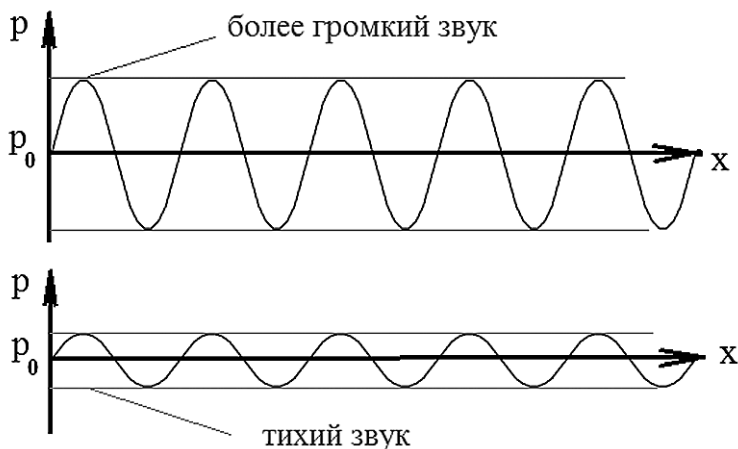


Рис. 7.1. Представление звуковой волны: чем больше амплитуда звукового давления, тем громче ощущается звук

В акустике для количественной оценки громкости применяют метод субъективного сравнения измеряемого звука с эталонным, в качестве которого применяется синусоидальный тон частотой 1 кГц. В процессе сравнения уровень эталонного тона изменяют до тех пор, пока эталонный и измеряемый звуки станут восприниматься человеком равногромкими.

7.1.2. Высота звука

Звуковые колебания, происходящие по гармоническому закону, воспринимаются человеком как определенный **музыкальный тон**. Колебания высокой частоты воспринимаются как звуки **высокого тона**, звуки низкой частоты — как звуки **низкого тона** (рис. 7.2).

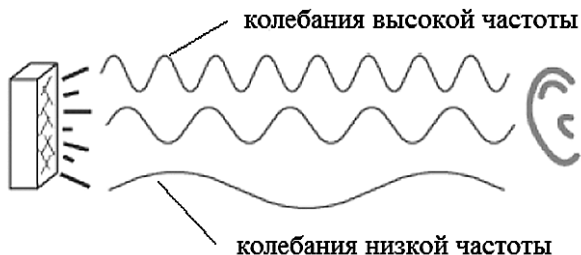


Рис. 7.2. Колебания высокой и более низкой частоты



Субъективную меру частоты колебаний звука называют **высотой звука**.

7.1.3. Тембр звука

Звуковые колебания, не подчиняющиеся гармоническому закону, воспринимаются человеком как **сложный звук**, обладающий **тембром**.

Звуки, с которыми мы сталкиваемся в жизни, практически никогда не бывают «чистыми» синусоидальными тонами, а являются созвучиями. Последнее означает, что источник вместе с основным колебанием излучает волны с частотами в 2, 3, 4, 5 и т.д. раз большими основной частоты. По принятой в музыкальной акустике терминологии эти колебания называются, соответственно, основным тоном и обертонами: 1-м, 2-м, 3-м, 4-м и т.д. В физике, как уже упоминалось, используется иная терминология: основной тон называют 1-й гармоникой, а обертоны называют высшими гармониками 2-й, 3-й, 4-й и т.д. по порядку. Основной тон определяет высоту звука, обертоны, накладываясь в определенных соотношениях, придают звуку специфическую окраску — тембр.



Тембр — это звук, в котором присутствуют колебания разных наборов частот и амплитуд.

Можно сказать, что тембр определяется величиной амплитуд отдельных гармоник (т.е. *зависит от числа высших гармоник и отношения их амплитуд к амплитуде основной гармоники и не зависит от фаз высших гармоник*). Благодаря наличию гармоник, частотный спектр человеческого голоса и музыкальных инструментов значительно шире, чем их основной диапазон.

Если на фортепиано, а затем на гобое взять ноту одинаковой громкости и одной высоты (предположим «до» первой октавы), получившиеся звуки будут различаться. Отличать звук одного инструмента от другого нам помогает *тембр (тональная окраска звука)*. У различных музыкальных инструментов относительные амплитуды разных обертонов оказываются различными.

Объяснение причин многообразия тембров различных инструментов не было бы исчерпывающим, если не затронуть процессы возникновения и нарастания звуков при их извлечении и их затухания. Дело в том, что любой звук возникает и устанавливается на каком-то определённом «стационарном» уровне не мгновенно и затухает он так же постепенно, за определённый промежуток времени. Процесс нарастания звука и процесс его затухания называют **нестационарными процессами**. От продолжительности нарастания и затухания звука, а также от формы огибающей нестационарных процессов существенно зависит его тембр. А это, в свою очередь, определяется конструкцией инструмента, а также способом звукоизвлечения (скольжения смычка, щипка или удара молоточка по струнам, возбуждения колебаний столба воздуха, вдуваемого в корпус духового инструмента и т.п.). Акустические свойства помещения также существенно влияют на характер звучания исполняемой в нем музыки и речи.

Непосредственный анализ сложного звука может быть осуществлен с помощью набора акустических резонаторов Гельмгольца. Широкое отверстие направляется в сторону источни-

ка звука, а горловину с узким отверстием помещают у входа в ушной слуховой проход, ведущий к барабанной перепонке. В зависимости от объема резонатора, заключенный в нем воздух резонирует тону определенной высоты. Если в сложном звуке этот тон имеется, то ухо слышит звучание в резонаторе, которое продолжается некоторое время и после прекращения излучения звука его источником. Имея набор резонаторов, можно установить, какие гармоники сопутствуют основному тону.

7.2. Объективные характеристики



Объективные характеристики — это параметры звуковой волны, которые задает источник звука (интенсивность, частота и акустический спектр).

7.2.1. Интенсивность (сила) звука

Интенсивность — энергетическая характеристика звука.

Чистые тоны субъективно воспринимаются громкими или тихими, в зависимости от силы — интенсивности звука. Сила звука зависит от свойств звучащего тела, от среды, в которой звук распространяется, от местонахождения слушающего по отношению к источнику звука. Чем больше частиц звучащего тела придут в колебания, тем больше будет изменение плотности, и тем сильнее будет воздействие на орган слуха.

Интенсивность звука связана со звуковым давлением (P), квадратичной зависимостью (для плоской волны $I = \frac{P^2}{2\rho v}$, где произведение ρv носит название удельного акустического сопротивления среды). Так рост звукового давления в 2 раза влечет увеличение силы звука в 4 раза, при росте звукового давления в 3 раза сила звука возрастает в 9 раз и т.д.

С увеличением расстояния от источника звука до слушателя сила звука ослабляется. Степень поглощения звуковой энергии при распространении звуковой волны в жидкостях и газах зависит, с одной стороны, от свойств среды (в частности, в воздухе главным образом сказывается вязкость и в значительно меньшей мере — внутренняя теплопроводность, что приводит к превращению организованного колебательного

движения молекул в их хаотическое тепловое движение), а с другой — от частоты звуковых колебаний. Чем выше частота звуковых колебаний, тем больше хаотическая молекулярная скорость молекул в элементе сжимаемого объема, тем большее молекулярное рассеяние претерпевает на своем пути звуковая волна и тем на меньшее расстояние передаются звуковые колебания.

Реальные источники всегда имеют конечные размеры, но их можно считать точечными, а волны, возбуждаемые ими в однородной изотропной среде — сферическими, если расстояние от источника до рассматриваемых точек среды значительно больше размеров источника. Известно, что интенсивность сферической волны обратно пропорциональна квадрату расстояния:

$I(r) = \frac{i_0}{R^2},$	(7.1)
---------------------------	-------

где i_0 — интенсивность волны на расстоянии $r_0 = 1$ м от центра волны.

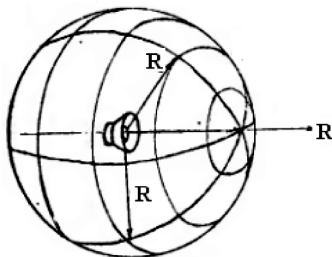


Рис. 6.3. Сферическая волна (площадь фронта $S = 4\pi R^2$)

Кроме того, человеческий слух по восприятию звуков разной силы ограничен. Человек начинает слышать при силе звука равной некоторой величине, называемой **порогом слышимости** (или слуховым порогом). Более слабые звуки слухового ощущения не вызывают. При увеличении силы звука достигается нормальная слышимость, а затем при еще больших амплитудах звуковых колебаний к воспринимаемому звуку добавляется осязаемое ощущение давления, и, нако-

нец, при дальнейшем росте силы звука раздражение органа слуха становится болезненным. Так называемый болевой порог ограничивает область слышимости при больших уровнях интенсивности. Так как чувствительность человеческого уха еще зависит от частоты колебаний, поэтому уровень порога слышимости для разных частот различный.

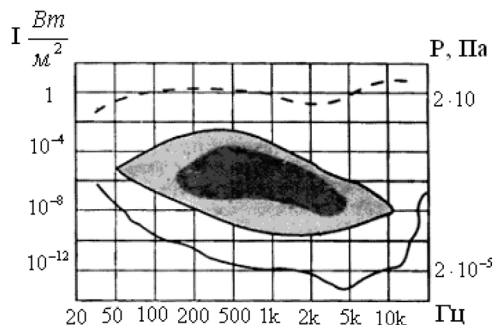


Рис. 7.4. Области слышимости: сплошная линия — порог слышимости, штриховая — болевой порог, светло-серая — область музыкальных звуков, темно-серая — речевых

На рис. 7.4 изображены значения силы звука и соответствующие им звуковые давления, при которых звуковые сигналы с различными частотами становятся едва слышимыми.

Порог слышимости для частоты 1 кГц соответствует силе звука 10^{-12} Вт/м² (это эквивалентно звуковому давлению $2 \cdot 10^{-5}$ Па). При таком слабом звуке молекулы воздуха колеблются в звуковой волне с амплитудой всего лишь 10^{-7} см.

При смещении из области оптимальной слышимости в сторону низких и высоких звуковых частот чувствительность человеческого уха резко падает. Это видно по поведению кривой порога слышимости вблизи краев диапазона слышимости.

На рис. 7.4 также обозначен и болевой порог. Звуковое давление, вызывающее у человека болевое ощущение на частоте 1 кГц, соответствует 20 Па.

7.2.2. Частота звуковых колебаний. Интервалы в музыке

Напомним, что количество колебаний воздуха в секунду называется *частотой* звука.

Например, диапазон частот органа — от 16,4 до 8372 Гц, фортепиано — от 27,5 до 3520 Гц, клавиесина — от 87 до 1400 Гц, акустической гитары — от 81 до 1300 Гц, арфы — от 34,6 до 3320 Гц.

Высота тона и тембр звуковых колебаний зависят от пола и возраста. Высшее положение голоса у женщин называется сопрано, среднее положение — меццо-сопрано и низшее — контральто. Высшее положение мужского голоса называется тенор, среднее положение — баритон и низшее — бас (табл. 7.2).

Таблица 7.2.

Диапазоны частот, соответствующие
голосам певцов и певиц

Женские голоса		Мужские голоса	
Контральто	170–780 Гц	Бас	80–350 Гц
Меццо-сопрано	200–900 Гц	Баритон	100–400 Гц
Сопрано	250–1000 Гц	Тенор	130–500 Гц

В музыке целочисленное соотношение двух частот называется *интервалом*. Простейшие интервалы: октава — 1:2 (рис. 7.5), квинта 2:3, кварта 3:4, большая терция 4:5, малая терция 5:6.

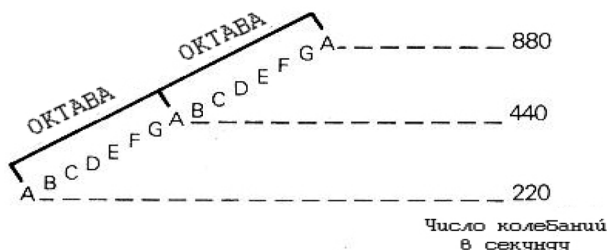


Рис. 7.5. Октава (удвоение частоты)

Современный музыкальный строй делит каждую октаву на 12 частей, называемых *полутонами* (рис. 7.6). Каждый полутон соответствует изменению частоты в $\sqrt[12]{2} \approx 1,06$ раза.

Расстояние в два полутона называется *целым тоном*. Если бы каждая октава делилась большим числом частей, чем 12, то звучание соседних нот с близкими частотами вызвало б уже известные нам биения.

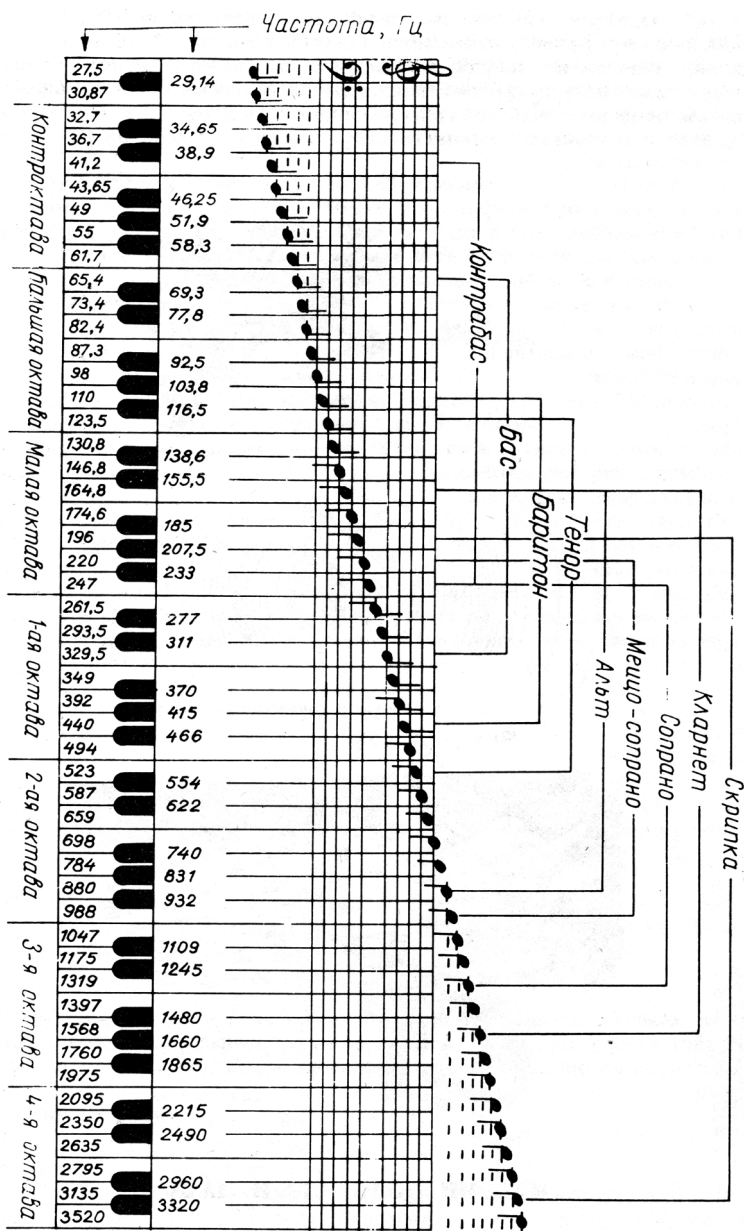


Рис. 7.6. Диапазон частот некоторых музыкальных инструментов

7.2.3. Гармонический спектр сложного колебания

Благодаря суперпозиции сложение колебаний приводит к более сложным формам колебаний. Для практических целей бывает необходимой противоположная операция: разложение сложного колебания на простые, обычно гармонические, колебания.

Фурье показал, что периодическая функция любой сложности может быть представлена в виде суммы гармонических функций, частоты которых кратны частоте сложной периодической функции.

Такое разложение различных периодических процессов на гармонические колебания называется **гармоническим анализом**.

Совокупность гармонических колебаний, на которые разложено сложное колебание, называется гармоническим спектром сложного колебания. Гармонический спектр удобно представлять как набор частот отдельных гармоник совместно с соответствующими им амплитудами (амплитудно-частотный спектр). Наиболее наглядно такое представление выполняется графически.

На диаграмме амплитудно-частотного спектра по оси ординат откладывают значения амплитуд основной и высших гармоник, а по оси абсцисс — значения частот. В качестве примера на рис. 7.7, а изображен график сложного колебания (кривая 4) и составляющих его гармонических колебаний (кривые 1, 2 и 3), на рис. 7.7, б изображен гармонический спектр, соответствующий данному примеру.

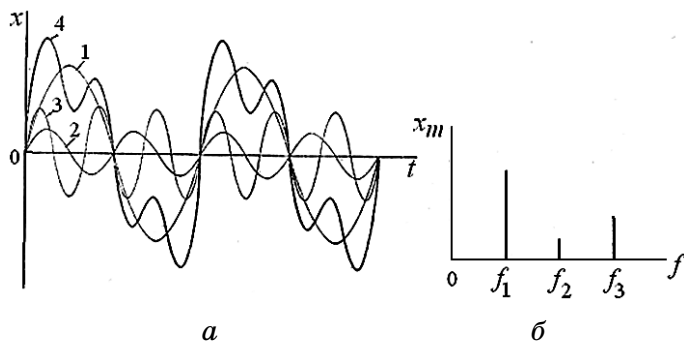


Рис. 7.7. График сложного колебания (кривая 4) и его гармонический спектр



Спектральный состав звуковых колебаний определяется числом гармонических составляющих и соотношением их амплитуд и характеризует тембр звука.

К примеру, нота «ля» кларнета имеет гармоники той же частоты, что и нота «ля» пианино, но с другими амплитудами, поэтому и воспринимаемый человеком тембр звуков неодинаков (рис. 7.8).

Более сложным оказывается спектр сочетания музыкальных звуков, называемый аккордом. В таком спектре присутствуют несколько основных частот вместе с соответствующими обертонами.

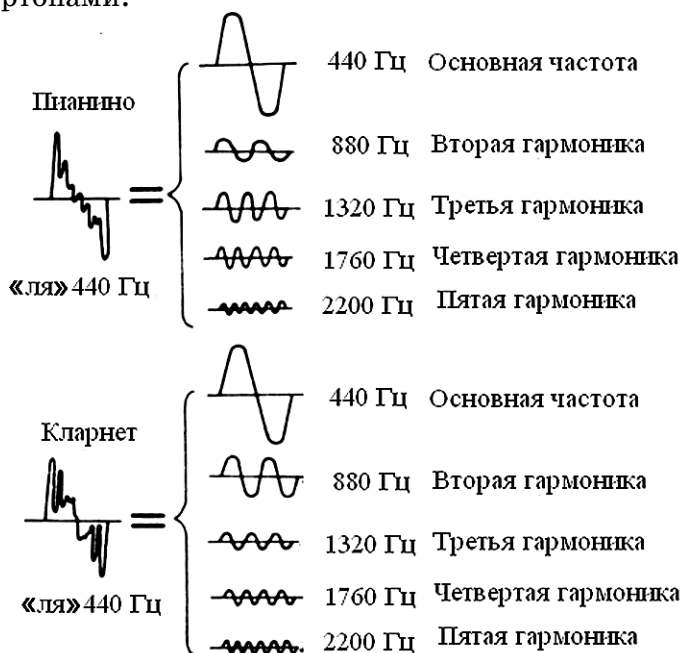


Рис. 7.8. Частотный спектр тона «ля», издаваемого пианино и кларнетом

Кроме того, звуки почти всех музыкальных инструментов сопровождаются, так называемыми, узкополосными шумами. Шумами в акустике называют звуки, которые, в отличие от синусоидальных тонов и созвучий, у которых спектры дис-

кретны, имеют *непрерывный спектр*. Например, играя на флейте, музыкант возбуждает не только периодический музыкальный тон, но и шум от вдувания воздуха. Из этого шума флейта, как акустический резонатор, выделяет узкую полосу вблизи основного тона. Этот узкополосный шум смешивается с основным тоном, благодаря чему звук флейты приобретает присущую ему выразительность.

7.3. Логарифмический закон восприятия Вебера-Фехнера. Уровень громкости звука

Следует отличать объективную характеристику звука — его *интенсивность* от субъективного ощущения *громкости*. Так при удваивании интенсивности раздражения громкость не воспринимается нами удвоившейся. Результаты исследований показали, что интенсивность ощущений возрастает медленнее, чем вызывающее его раздражение.

Согласно *психофизическому закону Вебера-Фехнера* слух одинаково оценивает равные относительные изменения силы звука. Если увеличивать раздражение в геометрической прогрессии (т.е. в одинаковое число раз), то ощущение этого раздражения возрастает в арифметической прогрессии (т.е. на одинаковую величину). Применительно к звуку это означает, что если интенсивность звука принимает ряд последовательных значений, например αI_0 , $\alpha^2 I_0$, $\alpha^3 I_0$ (α — некоторый коэффициент, $\alpha > 1$) и т.д., то соответствующие им ощущения громкости звука будут L_0 , $2L_0$, $3L_0$ и т.д.

Математически это означает, что с ростом интенсивности звука громкость возрастает по логарифмическому закону. На этом основании вводят объективную оценку громкости звука по измеренному значению его интенсивности:

$L = C \cdot \lg \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$	(7.2)
--	-------

где L — воспринимаемое изменение громкости (величину L называют *уровнем интенсивности звука*), I_1 и I_2 — сила звука соответственно до и после его изменения, C — некоторый коэффициент пропорциональности, $\lg$ — десятичный логарифм.



Напомним, логарифмом положительного числа b по основанию a называется показатель степени x , в которую нужно возвести a , чтобы получить b . Обозначение логарифма: $\log_a b = x$. Эта запись равнозначна следующей: $a^x = b$. При $a=10$ логарифм называется десятичным и обозначается lg , т.е. $\log_{10} b = lg b$.

Для пояснения закона Вебера-Фехнера изобразим график логарифмической функции $L = C \cdot lg I$ (рис. 7.9). При малых аргументах I функция $L = C \cdot lg I$ растет довольно быстро с увеличением аргумента. Это означает, что небольшое увеличение малой интенсивности (на величину ΔI) приводит к значительному увеличению громкости (на величину ΔL_1) — как только интенсивность звука немного превысила пороговое значение, уже возникает слуховое ощущение. Если же интенсивность звука велика, то ее дальнейшее увеличение на ту же величину ΔI дает малый прирост громкости (на величину ΔL_2) — при большой интенсивности звук хорошо слышен и дальнейшее увеличение интенсивности звука на возрастание ощущения громкости сказывается существенно слабее.

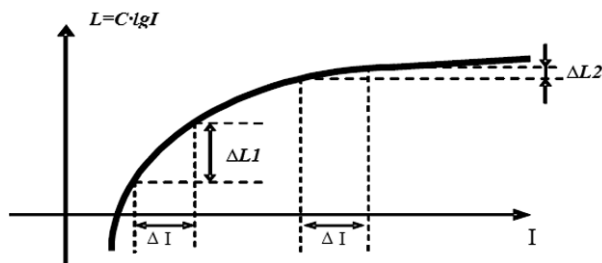


Рис. 7.9. К пояснению логарифмического закона восприятия

Итак, если сила звука увеличится в 100 раз ($I_2 = 100 \cdot I_1$), то субъективное ощущение громкости изменится пропорционально 2 (при $C=1$), т.к. $lg(100)=2$; если это изменение — 1000, то громкость возрастет пропорционально $lg(1000)=3$.

Принято измерять увеличение или уменьшение силы звука в специальных логарифмических единицах — «Белах» [Б] (в честь Александра Грэхема Белла, изобретателя телефона)

$$L = lg \left(\frac{I_2}{I_1} \right), \text{ в этом случае } C=1.$$

Небольшие изменения звуковых уровней измеряют в долях Бела. На практике в основном используется единица измерения, равная десятой части Бела — децибел (1 дБ=0,1 Б). Изменение уровня силы звука, выраженное в дБ, равно численному значению десятичного логарифма отношения сравниваемых уровней интенсивностей, умноженному на 10, т.е. $C=10$:

$L = 10 \cdot \lg\left(\frac{I_2}{I_1}\right), \quad [\text{дБ}]$	(7.3)
---	--------------

В качестве I_1 обычно берется порог слышимости (I_0), т.е. интенсивность самого тихого звука, который способен слышать средний человек $I_1=I_0=10^{-22}$ Вт/м². Так, например, уровень звука интенсивностью $I=10^{-10}$ Вт/м² равен

$$L = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{10^{-10}}{10^{-22}}\right) = 10 \cdot \lg(100) = 20 \text{ дБ}$$

(поскольку $\lg(100)=2$). Заметим, что на пороге слышимости

$$\text{уровень громкости равен } 0 \text{ дБ, т.к. } L = 10 \cdot \lg\left(\frac{10^{-12}}{10^{-12}}\right) = 10 \lg 1 = 0 \text{ дБ}$$

(поскольку $\lg 1=0$).

Если при вычислениях за исходные данные берется звуковое давление, а не интенсивность, то следует использовать формулу (7.4):

$L = 20 \cdot \lg\left(\frac{P_2}{P_1}\right), \quad [\text{дБ}]$	(7.4)
---	--------------

Задача 7.1. Разрыв барабанной перепонки наступает при уровне интенсивности звука $L=150$ дБ. Необходимо определить интенсивность и амплитуду смещения частиц в волне для звука частотой $f=1$ кГц ($\rho_{\text{возд}}=1.29$ кг/м³, $v=330$ м/с).

Решение

1. Интенсивность найдем из формулы (7.3):

$$L = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) \Rightarrow I = I_0 10^{L/10} = 10^{-22} \cdot 10^{15} = 10^{-7} \text{ Вт/м}^2.$$

2. Амплитуду смещения частиц найдем из формулы (3.9):

$$I = \frac{1}{2} \rho \cdot x_m^2 \cdot \omega_0^2 \cdot v \Rightarrow x_m = \sqrt{\frac{2I}{v\rho(2\pi\nu)^2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^3}{330 \cdot 1,29 \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 1000)^2}} \approx 345 \text{ мкм.}$$

Задача 7.2. Шуму на оживленной улице соответствует уровень интенсивности звука 70 дБ, крику — 80 дБ. Какой будет уровень громкости звука, полученный в результате сложения крика и шума улицы?

Решение

1. Из формулы (7.3) найдем значение интенсивности при 70 дБ и 80 дБ: $I_1 = I_0 10^{\frac{L_1}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^7 = 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$; $I_2 = I_0 10^{\frac{L_2}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^8 = 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$.

2. Теперь вычислим суммарную интенсивность крика и шума улицы: $I = I_1 + I_2 = 10^{-5} + 10^{-4} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$.

3. Уровень звука, полученный в результате сложения крика и шума улицы: $L = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{10^{-12}}\right) = 80,41 \text{ дБ.}$

Однако громкость не может быть охарактеризована только величиной силы звука, так как на восприятие громкости влияет частотный состав звукового сигнала. Например, звук с уровнем интенсивности 20 дБ и частотой 1000 Гц будет восприниматься существенно более громким, чем звук с тем же уровнем интенсивности, но частотой 100 Гц. Одинаковый уровень громкости на этих частотах будет достигнут, если для 1000 Гц уровень интенсивности составляет 20 дБ, а для 100 Гц — 50 дБ.

На практике используют физиологическую относительную величину, называемую *уровнем громкости звука*:

$\varepsilon = k \cdot L, \text{ [фон]}$	(7.5)
--	-------

где k — некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты и интенсивности звука.

Условно считают, что на частоте 1 кГц шкалы уровня громкости и уровня интенсивности звука полностью совпадают, т.е. коэффициент $k=1$, и

$$\varepsilon = 10 \cdot \lg\left(\frac{I_2}{I_1}\right).$$

Для отличия от шкалы интенсивности звука в шкале громкости децибелы (дБ) называют фонами (фон).

Громкость на других частотах можно измерить, сравнивая исследуемый звук со звуком частотой 1 кГц. Для этого с помощью звукового генератора создают звук частотой 1 кГц. Изменяют интенсивность звука до тех пор, пока не возникнет слуховое ощущение, аналогичное ощущению громкости исследуемого звука. Интенсивность звука частотой 1 кГц в децибелах, измеренная по прибору, равна громкости этого звука в фонах.

Для того, чтобы найти соответствие между громкостью и интенсивностью звука на разных частотах, пользуются кривыми равной громкости, называемые также *изофонами* (рис. 7.10). Эти кривые построены на основании средних данных, которые были получены у людей с нормальным слухом при измерениях по описанному выше методу.

Нижняя изофона соответствует интенсивностям самых слабых слышимых звуков — порогу слышимости; для всех частот $\varepsilon = 0$, для 1 кГц интенсивность звука $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м². Из приведенных кривых видно, что среднее человеческое ухо наиболее чувствительно к частотам 2500–3000 Гц. Каждая промежуточная изофона отвечает одинаковой громкости, но разной интенсивности звука для разных частот.

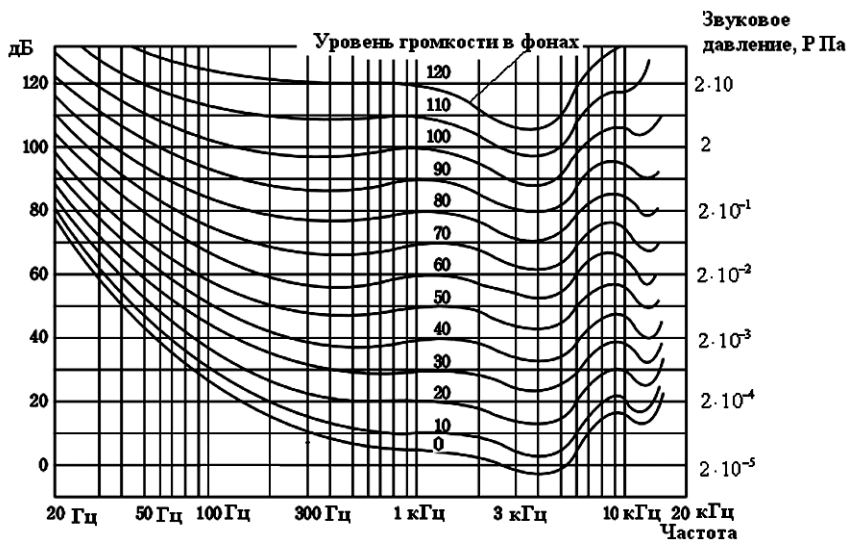


Рис. 7.10. Кривые равной громкости

По отдельной кривой равной громкости можно найти интенсивности, которые при определенных частотах вызывают ощущение этой громкости. Используя совокупность кривых равной громкости, можно найти для разных частот громкости, соответствующие определенной интенсивности. Например, пусть уровень интенсивности звука частотой 100 Гц равен 60 дБ. Какова громкость этого звука? На рис. 7.10 находим точку с координатами 100 Гц и 60 дБ. Она лежит на кривой, соответствующей уровню громкости 50 фон, что и является ответом.

Чтобы иметь определенные представления о различных по характеру звуках, приведем их физические характеристики (табл. 7.3).

Таблица 7.3.

**Физические характеристики различных
по характеру звуков**

Примерный характер звука	Интенсивность звука, Вт/м ²	Звуковое давление, Па	Уровень интенсивности звука относительно порога слышимости, дБ (или уровень громкости звука для частоты 1 кГц, фон)
Порог слышимости	10^{-12}	0,00002	0
Шепот	10^{-10}	0,0002	20
	10^{-9}	0,00064	30
Разговор тихий – нормальный – громкий	10^{-8}	0,002	40
	10^{-7}	0,0064	50
	10^{-6}	0,02	60
Шум на оживленной улице	10^{-5}	0,064	70
Крик	10^{-4}	0,2	80

Шум в поезде, метро –мотоцикла (максимальный) –двигателя самолета	10^{-3}	0,64	90
	10^{-2}	2	100
	10^{-1}	6,4	110
То же, вблизи	10^0	20	120
Порог болевого ощущения	10	64	130

Кроме оценки уровня громкости в фонах, применяют и другую единицу громкости звука — сон (от лат. «*sonus*» — «звук»). Громкость в 1 сон — это громкость чистого синусоидального тона частотой 1 кГц, создающего звуковое давление 2 мПа (40дБ=40фон), рис. 7.11. Шкалы сонов и фонов чистых тонов связаны однозначной зависимостью: при каждом увеличении уровня громкости на 10 фон число единиц сонов приблизительно удваивается.



Громкостью в 1 сон обладает тихий разговор. Тиканье часов характеризуется громкостью около 0,1 сон, шум на оживленной улице — 8 сон.

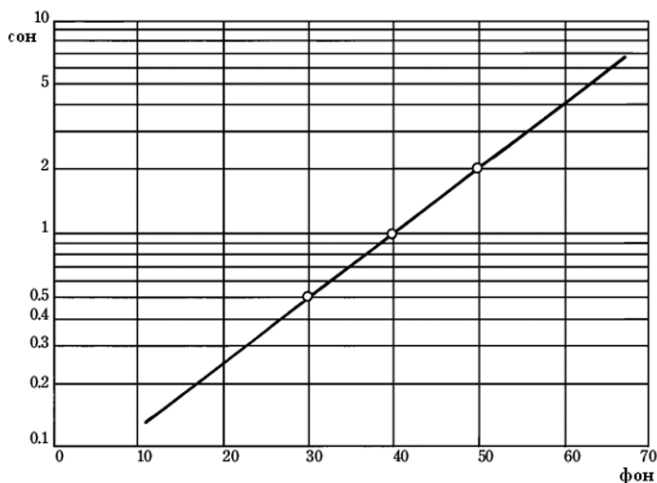


Рис. 7.11. График пересчета громкости звука в сонах от громкости в фонах

7.4. Голосовой и слуховой аппарат человека

7.4.1. Голосовой аппарат человека

Голосовой аппарат человека состоит *из лёгких, гортани с голосовыми связками, глоточной, ротовой и носовой полости* (рис. 7.12).

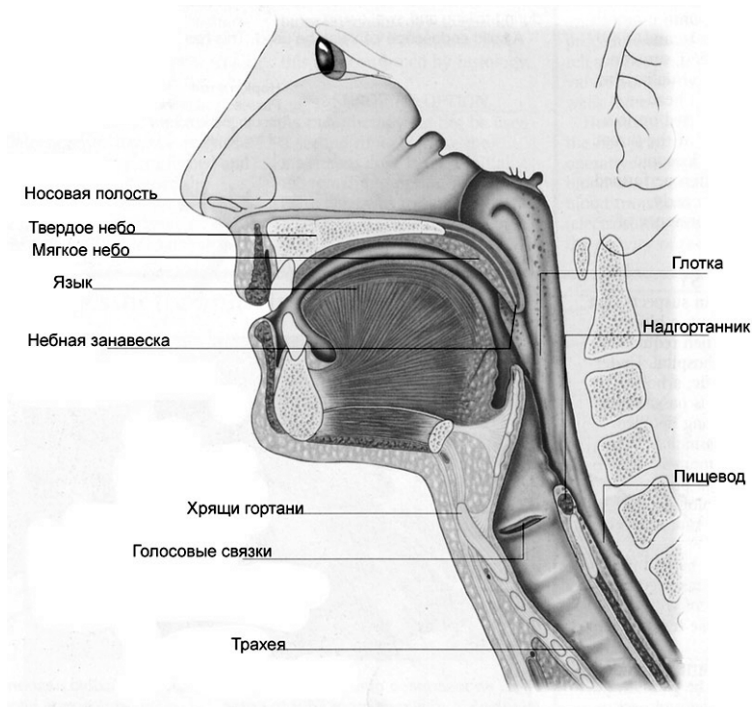


Рис. 7.12. Схема строения голосового аппарата человека

В гортани между передним и задним хрящами натянуты голосовые связки. При спокойном дыхании они вялы и между ними образуется широкая щель для свободного прохождения воздуха. При разговоре голосовые связки напрягаются и приближаются друг к другу, так что между ними остаётся лишь узкий промежуток, так называемая голосовая щель. Когда воздух, выдыхаемый лёгкими, проходит через эту щель, голосовые связки приходят в колебания, причём частота колебаний зависит от длины голосовых связок и их натяжения. Звуковые волны, образующиеся в голосовой щели, сложны и

представляют собой наложение большого числа всевозможных тонов. Ротовая и носовая полости, глотка играют роль *резонаторов*, проходя которые одни частоты ослабевают, другие усиливаются. Изменение формы рта и глотки дает преимущество гармоникам одних частот над другими (рис. 7.13).

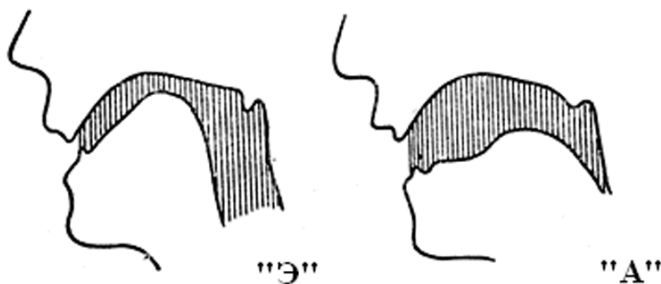


Рис. 7.13. Конфигурации рта и глотки при произнесении звуков «э» и «а»

Голосовые связки наиболее сильно колеблются при произношении гласных звуков. При образовании согласных звуков мягкое нёбо, кончик языка и губы приходят в самостоятельные колебания на различных участках. Эти колебания или сами по себе, или в соединении со смесью звуков, производимых голосовыми связками, образуют согласные звуки человеческой речи.

7.4.2. Слуховой аппарат человека

Слуховой аппарат человека принято делить на три составные части: наружное ухо, среднее ухо и внутреннее ухо (рис. 7.14).

Наружное ухо состоит из ушной раковины и наружного слухового прохода, который заканчивается мембраной, так называемой барабанной перепонкой.

Ушная раковина служит хорошим звукоулавливателем (рупором). Она способствует определению локализации источника звука. Эта функция особенно развита у некоторых видов животных (собак, кошек, летучих мышей), у которых рефлекторное управление ушной раковинной облегчает определение местонахождения источника звука.



Ушная раковина по форме напоминает ребенка, лежащего в утробе матери вниз головой.

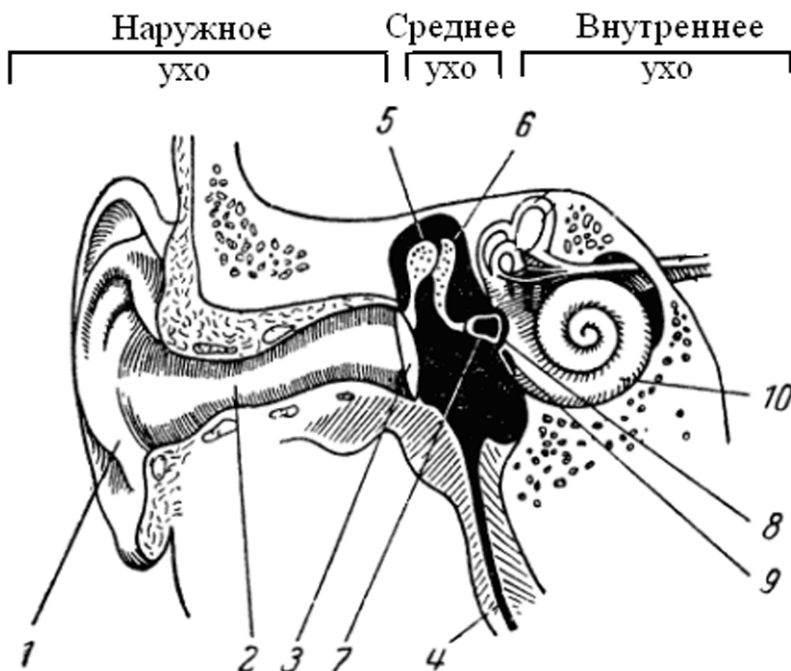


Рис. 7.14. Схематическое изображение уха человека в разрезе: 1 — ушная раковина, 2 — наружный слуховой проход, 3 — барабанная перепонка, 4 — евстахиева труба, 5 — молоточек, 6 — наковальня, 7 — стремечко, 8 — овальное окно, 9 — круглое окно, 10 — улитка (спиралевидный туннель)

Функция наружного слухового прохода заключается в проведении звуковых колебаний к барабанной перепонке. Слуховой проход имеет длину 21–27 мм и диаметр — 6–8 мм. В приближении его можно считать трубочкой, закрытой с одного конца барабанной перепонкой (рис. 7.15). Стоячая волна в нем возникает при условии, что длина столба L равна одной четверти длины бегущей волны: $L = \frac{\lambda}{4}$. Отсюда $\lambda = 4L$.

Поскольку частота $f = \frac{v}{\lambda}$, где v — скорость звуковой волны, то $f = \frac{v}{4L}$. Приняв скорость звука в воздухе $v=340$ м/с, а длину слухового прохода $L=27$ мм и подставив значения, найдем: $f = \frac{340}{4 \cdot 0,027} = 3148$ Гц. Таким образом, слуховой проход играет роль резонатора, имеющего собственную частоту колебаний, равную ~ 3 кГц.

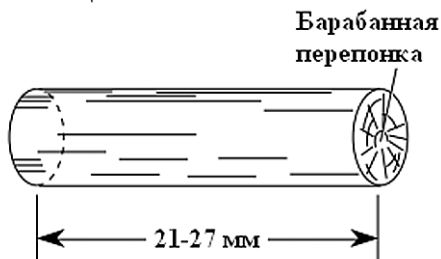


Рис. 7.15. Наружный слуховой проход

Барабанная перепонка — это малоподатливая и слаборастяжимая мембрана. Вблизи барабанной перепонки температура и влажность остаются постоянными независимо от изменений этих показателей в окружающей среде, что особенно необходимо для сохранения упругих свойств барабанной перепонки. Барабанная перепонка колеблется соответственно колебаниям воздуха, передавая их в среднее ухо.



В слуховом проходе и вблизи барабанной перепонки температура и влажность остаются постоянными независимо от изменений этих показателей в окружающей среде, что особенно необходимо для сохранения упругих свойств барабанной перепонки.

Среднее ухо — это полость, заполненная воздухом и отделенная от наружного уха барабанной перепонкой, имеет три слуховых косточки. За свою форму они получили названия — молоточек, наковальня и стремечко. Барабанная перепонка соединена с молоточком и передает колебания на наковальню, а та на стремечко, которое передает их на овальное окно внутреннего уха (рис. 7.16).

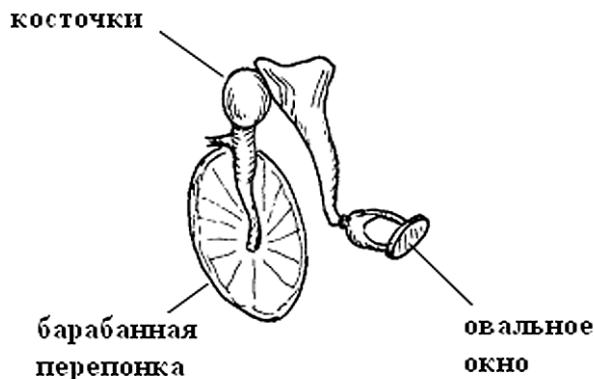


Рис. 7.16. Косточки (молоток, наковальня и стремя) среднего уха

Размеры воспринимающей поверхности барабанной перепонки ($S=70-80 \text{ мм}^2$) значительно преобладают над площадью овального окна. Таким образом, специальная система рычагов, созданная сочленениями слуховых косточек, а также различия в размерах эффективной поверхности мембраны овального окна и барабанной перепонки создают условия для роста давления, прилагаемого к овальному окну, которое примерно в 20–30 раз больше давления, действующего на барабанную перепонку.

Давление воздушного пространства в полости среднего уха близко к атмосферному, что служит необходимым условием для нормальных колебаний барабанной перепонки. Уравниванию давления способствует специальное образование, названное евстахиевой трубой, которая соединяет носоглотку с полостью среднего уха. Уравнивание давления в полости среднего уха происходит во время акта глотания, когда стенки евстахиевой трубы расходятся и атмосферный воздух попадает в барабанную полость. Это особенно важно и в случае с резким изменением давления (при подъеме или спуске на самолете, в скоростном лифте) — давящее ощущение в ушах исчезнет после нескольких глотков, так как давление уравнивается через евстахиеву трубу.

Внутреннее ухо расположено в височной кости, состоит из ряда сообщающихся каналов, образуя так называемый лабиринт. Из этого лабиринта лишь улитка, соединенная со слу-

ховым нервом имеет отношение к слуху. Три полукружных канала образуют орган равновесия.

Внутри улитки находятся каналы, наполненные жидкостью (лимфой). В среднем канале находится рецептор слуха — кортиев орган, состоящий из пяти рядов клеток с выступающими над ними волосками. Волосковые клетки тянутся вдоль спирали улитки по всей ее длине. Всего они образуют 4800 волокон, содержащих по пять клеток на каждом волокне. Эти клетки образуют основную мембрану, причем волокна мембраны имеют разную длину и толщину — они тоньше и короче у основания улитки, и толще и длиннее в ее вершине. Длина улитки 35–40 мм, что составляет 2,5 завитка.

Звуковые колебания, действующие на барабанную перепонку, через цепь слуховых косточек поступают в овальное окно. Овальное окно вызывает колебания лимфы и через нее — колебания волокон улитки. Сильнее всего возбуждаются волокна, собственная частота которых совпадает с частотами гармонического спектра данного колебания. Нервные клетки, связанные с этими волокнами, посылают нервные импульсы в центральный отдел слухового анализатора. Именно благодаря этому мы умеем различать тона и ощущать разницу в тембре. По существу кортиев орган осуществляет спектральный анализ поступающей в ухо звуковой волны и передает соответствующую информацию в мозг.

7.5. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки

- 7.1. Перечислите объективные характеристики звука.
- 7.2. Что такое частота и интенсивность звука?
- 7.3. Каков физический смысл имеет интенсивность звука?
- 7.4. Что определяет спектральный состав звука?
- 7.5. Перечислите субъективные характеристики звука.
- 7.6. Что такое высота тона? Громкость звука?
- 7.7. В каких единицах измеряется громкость?
- 7.8. Что такое порог слышимости? Порог болевого ощущения? Зависят ли они от частоты?
- 7.9. По какому закону ухо человека воспринимает интенсивность звука?
- 7.10. В чем отличие громкости от интенсивности звука?
- 7.11. Почему после удара молоточком по камертону его звук постепенно становится все тише и тише?

- 7.12. Как связан тембр звука с его спектральными свойствами? Какие параметры звука определяют тембр?
 - 7.13. От каких характеристик сложного звука зависит тембр?
 - 7.14. Чем отличаются по своей природе гласные и согласные звуки, входящие в человеческую речь?
 - 7.15. Почему октава делится на 12 равных частей (полутонов)?
 - 7.16. Что такое шум? Как шум влияет на организм человека?
 - 7.17. Каково строение наружного и среднего уха человека? Каковы основные функции среднего уха?
 - 7.18. Каково строение внутреннего уха?
 - 7.19. Каков средний динамический диапазон слухового восприятия человека?
 - 7.20. Что такое порог слышимости, какова его зависимость от частоты звука?
 - 7.21. Сформулируйте закон Вебера-Фехнера.
 - 7.22. Назовите единицы измерения громкости звука.
-



Почему человеку его голос при воспроизведении записи кажется чужим?



Почему свои сухарики хрустят громче, чем у соседа?



Почему успокаивает шум моря?

7.6. Задачи для самостоятельного решения

- 7.1. Вычислить максимальное смещение молекул воздуха для звука на пороге слышимости ($f=1$ кГц) при $t=0^\circ\text{C}$. Определить максимальное изменение давления в этой звуковой волне.
- 7.2. Нормальный разговор человека оценивается уровнем интенсивности звука (относительно порога слышимости) $L_I=50$ дБ. Определить уровень громкости звука, соответствующего 3 одновременно говорящим людям.
- 7.3. Одиночный москит, находящийся на расстоянии 10 м от человека, создает звук, близкий к порогу слышимости.

сти (0 дБ). Какой уровень интенсивности звука создадут 1000 москитов?

- 7.4. Шум на улице, которому соответствует уровень интенсивности звука $L^1=50$ дБ, слышен в комнате так, как шум $L_2=30$ дБ. Найдите отношение интенсивностей звука на улице и в комнате.
- 7.5. Определить среднюю силу, действующую на барабанную перепонку человека площадью 60 мм^2 для: 1) порога слышимости $I_0=10^{-12} \text{ Вт/м}^2$, 2) порога болевого ощущения $I=10 \text{ Вт/м}^2$. Скорость звуковой волны принять равной 330 м/с . Плотность воздуха $\rho=1,29 \text{ кг/м}^3$.
- 7.6. Согласно санитарным нормам, время нахождения человека в помещении с уровнем интенсивности шума 100 дБ не должно превышать 30 мин. Какая энергия проходит за это время через барабанную перепонку человека площадью 60 мм^2 ?
- 7.7. Звуковая волна с уровнем 60 дБ падает на барабанную перепонку площадью 60 мм^2 . Сколько энергии поглощает барабанная перепонка в секунду?
- 7.8. При частоте 1000 Гц стереофонический усилитель дает выходную мощность 40 Вт. При частоте 30 Гц уровень громкости падает на 5 дБ. Какова выходная мощность при частоте 30 Гц?
- 7.9. Интенсивность звука равна 10^{-4} Вт/м^2 . Найдите уровень громкости звука (для частоты 1 кГц).
- 7.10. На сколько фон увеличился уровень громкости, если интенсивность звука возросла: а) в 1000 раз, б) в 10 000 раз (для частоты 1 кГц)?
- 7.11. Уровень громкости звука частотой 200 Гц повысился с 20 до 50 фон. Во сколько раз увеличилась интенсивность звука? Для решения воспользуйтесь кривыми равной громкости.
- 7.12. Определить уровни громкости звуков, имеющих уровень интенсивности 60 дБ, если их частоты 50, 100, 800, 7000 Гц. Для решения воспользуйтесь кривыми равной громкости.
- 7.13. Одинаково ли громко воспринимаются ухом тон частотой 1000 Гц и интенсивностью 10^{-10} Вт/м^2 и тон частотой 200 Гц и интенсивностью 10^{-8} Вт/м^2 ? Для решения воспользуйтесь кривыми равной громкости.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Греческий и латинский алфавит

В физике для обозначения физических величин и переменных широко применяются латинский и греческий алфавиты. В таблице приводятся написание и названия прописных и строчных букв.

Греческий алфавит

всего в алфавите 24 буквы, хотя в доклассическую эпоху в некоторых диалектах греческого применялись ещё дигамма, сан и коппа

Печатные прописные и строчные буквы	Название	Печатные прописные и строчные буквы	Название
Α, α	альфа	Ν, ν	ню
Β, β	бета	Ξ, ξ	кси
Γ, γ	гамма	Ο, ο	омикрон
Δ, δ	дельта	Π, π	пи
Ε, ε	эпсилон	Ρ, ρ	ро
Ζ, ζ	дзета	Σ, σ	сигма
Η, η	эта	Τ, τ	тау
Θ, θ	тэта	Υ, υ	ипсилон
Ι, ι	йота	Φ, φ	фи
Κ, κ	каппа	Χ, χ	хи

Латинский алфавит

современный латинский алфавит состоит из 26 букв

A, a	a	N, n	эн
B, b	бе	O, o	о
C, c	це	P, p	пэ
D, d	де	Q, q	ку
E, e	е (э)	R, r	эр
F, f	эф	S, s	эс
G, g	ге (же)	T, t	тэ
H, h	аш (ха)	U, u	у
I, i	и	V, v	ве
J, j	йот (жи)	W, w	дубель-ве

К, k	ка	Х, х	икс
L, l	эл	У, у	игрек
М, m	эм	З, z	зед

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Единицы СИ (system international)

Величина	Наименование	Обозначение
Основные единицы СИ		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Сила света	кандела	кд
Количество вещества	моль	моль
Дополнительные единицы СИ		
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Приставки для образования кратных и дольных единиц СИ

В таблице приведены приставки, служащие для образования кратных и дольных единиц СИ. Приставки можно присоединять только к простым наименованиям (метр, грамм и т.д.).

**Приставки для образования кратных и
дольных единиц СИ**

Приставка	Числовое значение	Сокращенное обозначение	Приставка	Числовое значение	Сокращенное обозначение
Атто	10^{-18}	а	Деци	10^{-1}	д
Фемто	10^{-15}	ф	Дека	$10^1=10$	да
Пико	10^{-12}	п	Гекто	10^2	г
Нано	10^{-9}	н	Кило	10^3	к
Микро	10^{-6}	мк	Мега	10^6	М
Милли	10^{-3}	м	Гига	10^9	Г
Санتي	10^{-2}	с	Тера	10^{12}	Т

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Акустические свойства некоторых
твердых веществ

Вещество	Плотность ρ , кг/дм	Модуль упругости (Юнга) $E \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	Модуль сдвига $G \cdot 10^{-10}$, Н/м ²	Коэффициент Пуассона σ
Алюминий	2,71	7,1	2,6	0,33
Медь	8,90	12,3	4,55	0,35
Свинец	11,34	1,6	0,57	0,44
Сталь	7,70	20,6	8,0	0,29
Бериллий	1,85	30,0	14,5	0,03
Лед	0,90	10,1	4,0	-
Плавлен- ный кварц	2,2	7,2	3,1	0,17
Полиэтилен	0,92	0,020	-	-
Фторопласт	2,2	0,045	-	-
Пенопласт	0,1	0,005	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акустические свойства некоторых газообразных веществ

Вещество	Плотность, (0°C , 101,3 кПа) ρ , кг/дм	Газовая постоянная R , кДж/(кг К)	Показатель адиабаты γ	Коэффици- ент сдвига- вой вязко- сти (20°C , 101,3 кПа) η , мПа С
Воздух	1,29	287	1,40	0,0182
Азот	1,25	297	1,40	0,0175
Водород	0,09	4125	1,41	0,0088
Гелий	0,18	2078	1,66	0,0196

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Теоретический минимум

Автоколебания — незатухающие колебания, форма и параметры которых определяются свойствами системы, основное звено которой совершает собственные колебания, энергия которых поддерживается специальным источником, содержащимся в самой системе.

Акустика — область физики, которая изучает способы возбуждения звуковых волн, их распространение и взаимодействие со средой (веществом).

Амплитуда — наибольшее отклонение от нулевого значения какой-либо величины, колеблющейся по гармоническому закону.

Амплитудное значение звукового давления — разница между максимальным (или минимальным) значением абсолютного давления и средним атмосферным давлением.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) — зависимость амплитуды сигнала на выходе данного устройства от частоты сигнала, подаваемого на вход этого устройства при постоянной амплитуде синусоидального сигнала. На графике АЧХ по оси абсцисс откладывается частота, а по оси ординат

отношение амплитуд выходного и входного сигналов системы. В случае, когда используется логарифмический масштаб, АЧХ превращается в логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ).

Амплитудные искажения — искажения формы колебаний, заключающиеся в том, что соотношение между различными по величине амплитудами колебаний при передаче их через какое-либо устройство нарушается этим устройством.

Анализатор гармоник — прибор (или специальная программа на ПК) для исследования спектра колебаний.

Аудиометрия — метод измерения остроты слуха. При аудиометрии на специальном приборе — аудиометре определяют порог слухового ощущения на разных частотах, полученная кривая называется аудиограммой.

Бегущая волна — упругая волна, распространяющаяся в определенном направлении. В отличие от стоячей волны при распространении в среде переносит энергию.

Бел — единица логарифмической величины, представляющая собой логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную, и характеризующая уровень (звуковое давление, усиление, ослабление и др.). В практике используется десятичная единица — децибел (дБ), т.е. десятая часть Бела.

Биения — колебания с периодически меняющейся амплитудой, возникающие при сложении двух бегущих в одном направлении волн с разными (близкими), но не кратными частотами. Биения появляются вследствие того, что величина разности фаз между двумя колебаниями с различными частотами всё время изменяется так, что оба колебания оказываются в какой-то момент времени в фазе, через некоторое время в противофазе, затем снова в фазе и т.д. Соответственно амплитуда результирующего колебания периодически достигает то максимума, равного сумме амплитуд складываемых колебаний, то минимума, равного разности этих амплитуд. Биения используют для настройки музыкальных инструментов, а также для измерения частоты, емкости, индуктивности и т.д.

Бинауральный эффект — способность человека и животных определять, в каком направлении от них находится источник звука.

Волна — любое изменение состояния среды (возмущение), распространяющееся с конечной скоростью и несущее энергию. Акустические волны могут распространяться в любых средах, кроме вакуума. Отсутствие акустических волн в вакууме объясняется отсутствием давления среды. Жидкие и газообразные среды обладают упругостью объема, не имеют формы и, следовательно, не обладают упругостью формы. Жидкости и газы расширяются или сжимаются только в направлении распространения волны, и колебания частиц среды происходит вдоль этого направления. Твердые тела под действием механических сил изменяют свои размеры и форму. Возможные деформации твердых тел — сжатие, растяжение, сдвиг, изгиб и кручение. Акустическая волна в твердой среде представляет собой комбинацию продольной и поперечной (сдвиговой) волн.

Волновое сопротивление (удельное акустическое или импеданс) — сопротивление движению звуковых волн. Определяется отношением амплитуды звукового давления в определенной точке среды к амплитуде колебательной скорости в этой же точке. Численно, удельное акустическое сопротивление среды находится как произведение плотности среды ρ на скорость v распространения в ней звуковых волн.

Волновое число — число, обратно пропорциональное длине волны ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$). Применяется для упрощения расчетов. Физически — это число волн, которое укладывается вдоль расстояния в 2π единиц длины.

Волновой пакет (цуг волн) — последовательность непрерывных упругих волн, исходящих из одного источника и распространяющихся в одном направлении.

Вебера-Фехнера закон — при увеличении раздражения в геометрической прогрессии (т.е. в одинаковое число раз) ощущение этого раздражения возрастает в арифметической прогрессии (т.е. на одинаковую величину).

Вынужденные колебания — колебания, происходящие под периодическим воздействием внешней обобщенной силы.

Высота звука — субъективная характеристика — качество периодического или почти периодического звука, определяе-

мое человеком на слух и зависящее от частоты звука. С повышением частоты высота звука увеличивается, с уменьшением частоты — понижается.

Гармоника — собственная частота, кратная основной частоте. Единица измерения Гц.

Гармоническая волна — волна, при которой все точки среды совершают гармонические колебания. В зависимости от направления колебания частиц по отношению распространения волны различают продольные и поперечные волны.

Гидрофон — гидроакустический звукоприёмник. Гидрофоны являются электроакустическими преобразователями и применяются для прослушивания подводных сигналов и шумов. Наиболее распространены гидрофоны, основанные на электродинамическом, пьезоэлектрическом и магнитострикционном эффектах. Электродинамические гидрофоны по принципу действия не отличаются от воздушных электродинамических микрофонов, если не считать особенностей конструкции, связанных с изоляцией от воды. В пьезоэлектрическом гидрофоне используется прямой пьезоэффект некоторых кристаллов, при котором переменная деформация кристалла вызывает появление переменных поверхностных электрических зарядов и соответственно переменной электродвижущей силы (ЭДС) на электродах-обкладках. Магнитострикционные гидрофоны основаны на обратном магнитострикционном эффекте некоторых ферромагнитных металлов (в основном никеля и его сплавов), при котором деформация вызывает появление переменной магнитной индукции в магнитопроводе и как следствие — переменной ЭДС на обмотке.

Громкоговоритель — устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии в звуковую. Подводимое к электрической цепи громкоговорителя напряжение вызывает колебание механической подвижной системы (диффузора, диафрагмы и т.д.). В зависимости от способа возбуждения механических колебаний громкоговорители разделяются на конденсаторные, пьезоэлектрические, электродинамические и электромагнитные преобразователи.

Громкость звука — субъективная характеристика — величина, характеризующая слуховое ощущение для данного

звука и зависящая от интенсивности звука, частоты и формы звуковых колебаний. Также на громкость звука влияют локализация в пространстве, длительность воздействия звуковых колебаний и другие факторы.

Закон Гука — сила упругости, возникающая при малых деформациях тела, прямо пропорциональна удлинению тела и направлена противоположно перемещению частиц тела при деформации. Закон Гука выполняется при малых деформациях.

Принцип Гюйгенса — каждая точка среды, вовлеченная в волновое движение, становится источником новой волны, называемой элементарной волной. Наблюдаемый волновой фронт представляет собой результат сложения множества элементарных волн (рис. 1). Принцип Гюйгенса справедлив для всех видов волн, в том числе для акустических и электромагнитных.

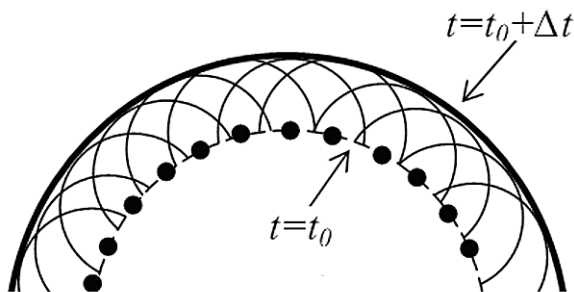


Рис. 1. Положение фронта волны в разные моменты времени, определяемое на основе принципа Гюйгенса

Деформация — это изменение формы, размеров или объема тела. Деформация может быть вызвана действием на тело приложенных к нему внешних сил. Деформации, полностью исчезающие после прекращения действия на тело внешних сил, называются упругими, а деформации, сохраняющиеся и после того, как внешние силы перестали действовать на тело, — пластическими. Различают деформации растяжения или сжатия (одностороннего или всестороннего), изгиба, кручения и сдвига.

Диссипация звуковой энергии (рассеяние) — явление, заключающееся в преобразовании звуковой энергии в тепловую при преодолении сил сопротивления среды.

Дифракция — явление, заключающееся в том, что волны огибают преграды, которые встречаются на их пути, если размеры последних соизмеримы с длиной волны. Явление дифракции будет наблюдаться и в случае прохождения волн через отверстия, размеры которых малы по сравнению с длиной волны. Волновые поверхности за преградой возникают в соответствии с принципом Гюйгенса, поскольку каждая точка открытой части фронта волны, который является самостоятельным источником, излучает волны во всех направлениях, в том числе и в область геометрической тени. Распределение амплитуд колебаний за преградой называют *дифракционной картиной*.

Диффузор — часть механической колебательной системы громкоговорителя, предназначенная для возбуждения звуковых волн в окружающем воздухе.

Длина волны — расстояние, на котором фаза гармонической волны изменяется на 2π (это изменение соответствует промежутку времени в один период T). Другими словами — это минимальное расстояние между точками волны, колеблющимися в одинаковых фазах.

Доплера эффект — изменение частоты принимаемых колебаний по сравнению с частотой излучаемых, возникающее в тех случаях, когда расстояние между излучателем и приемником изменяется. Если источник звука и приемник (слушатель) сближаются, то высота звука растет; если же они удаляются друг от друга, то высота звука понижается. Эффект Доплера используется в самых различных отраслях человеческой деятельности для измерения скорости объектов на расстоянии. Так, например, в медицине с помощью ультразвука измеряют скорость прохождения крови по сосудам. Принцип действия устройства, осуществляющего такое измерение, заключается в следующем: источник ультразвука испускает ультразвуковую волну, которая, встречаясь в крови с эритроцитом, ударяется о него и отражается в обратном направлении, после чего улавливается датчиком. По разнице длин прямой и отраженной волн можно определить скорость движения эритроцитов, а значит, и скорость прохождения крови. На аналогичном принципе действия основаны и самые различные средства радиолокации.

Запись магнитная — процесс, при котором изменяющиеся во времени электрические сигналы преобразуются в пространственные изменения магнитного состояния носителя, в результате чего создается сигналограмма.

Затухание колебаний — уменьшение амплитуды свободных колебаний системы с течением времени. Затухание колебаний обусловлено, как правило, сопротивлением воздуха и трением внутри колебательной системы. Энергия колебаний постепенно переходит в тепло, и амплитуда колебаний уменьшается.

Звук как физическое явление — колебательные движения частиц в упругой среде (упругие волны), вызванные каким-либо источником. Характеризуется скоростью распространения, направлением перемещения звуковых волн, звуковым давлением, создаваемым ими в среде, интенсивностью переноса звуковой энергии.

Звук как физиологическое явление — специфическое ощущение, вызываемое действием звуковых волн, распространяющихся в воздушной среде, на орган слуха.

Звуковое поле — область среды, в которой распространяются звуковые волны.

Звуковое поле вторичное — звуковое поле, образованное отраженными от препятствий волнами.

Звуковой луч — линия распространения звуковых волн (линия, перпендикулярная к фронту волны).

Звуковая мощность — количество звуковой энергии, излучаемой источником звука в единицу времени.

Звуковая тень — зона относительной тишины, возникающая за экраном или экранирующим сооружением.

Звуковое давление — дополнительно возникающее в упругой среде переменное давление при прохождении через нее звуковых волн. Единица измерения давления — паскаль [Па].

Звуковые волны — механические колебания, частоты которых лежат в пределах звуковых частот. Для людей слышимость обычно ограничивается частотами от 16 Гц до 20 кГц. Распространяются только в упругой среде — твердой, жидкой и газообразной (в вакууме звук не распространяется), излучаются телом, находящимся в этой среде и совершающим звуковые колебания. Звуковые волны в воздухе — это области

сжатия и разрежения. Хотя звуковая волна — это явление механическое, однако ее «поведение» существенно отличается от движения материальных тел. Обычные в законах механики понятия траектории, скорости, ускорения лишь частично применимы к волне. Для частиц же среды, в которой распространяется волна, эти понятия вполне корректны.

Интенсивность волны — средняя по времени энергия, переносимая волной в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны. Единица измерения Вт/м².

Интерференция звука — сложение в пространстве двух или нескольких звуковых волн, при котором происходит ослабление или усиление амплитуды результирующей волны. Интерференция — явление, свойственное всем волнам: и электромагнитным, и упругим, и волнам на поверхности жидкостей.

Инфразвук — упругие волны с частотами ниже области слышимых человеком частот (<16–20 Гц). Инфразвуковые волны возникают в результате вибрации при работе различных узлов механизмов, двигателей и т.д. В атмосфере инфразвуковые волны возникают во многих случаях, например, при ядерных взрывах или при землетрясениях. Инфразвуковые волны большой интенсивности искусственно излучать практически невозможно, так как мощность излучения пропорциональна квадрату частоты и на низких частотах она мала. В этом диапазоне также трудно создать направленный акустический излучатель.

Инфразвук и медузы. На краю «колокола» у медузы расположены примитивные глаза и органы равновесия — слуховые колбочки величиной с булавочную головку. Это и есть «уши» медузы, способные воспринимать инфразвуки с частотой 8–13 Гц. Перед штормом усиливающийся ветер срывает гребни волн и захлёстывает их. Каждое такое захлопывание воды на гребне волны порождает акустический удар, создаются инфразвуковые колебания, их-то и улавливает своим куполом медуза. Колокол медузы как рупор усиливает инфразвуковые колебания и передаёт на «слуховые колбочки». Шторм, разыгрывающийся за сотни километров от берега, придет в эти места примерно через несколько десятков часов, а медузы уже «слышат» его и уходят на глубину.

Когерентность — согласованное протекание во времени волновых процессов при их наложении.

Кавитация — образование газовых пузырьков в жидкости. Если давление в какой-либо точке жидкости становится равным давлению насыщенного пара этой жидкости, то жидкость в этом месте испаряется и образуется паровой пузырек. Примером может служить кипение воды. При нагревании воды давление ее насыщенного пара повышается. Когда достигается температура кипения, давление пара становится равным давлению окружающей среды, и в воде появляются паровые пузырьки. Паровые пузырьки в жидкости легче образуются при пониженном давлении. Когда же давление окружающей среды становится больше давления насыщенного пара жидкости, кавитационный пузырек с силой схлопывается. Такое схлопывание пузырьков создает шум, вызывает вибрацию и повреждения конструкций, неблагоприятно отражается на работе соответствующих машин и механизмов. Возникновение кавитации связано с местным понижением давления в жидкости, происходящее при различных обстоятельствах. Гидродинамическая кавитация возникает при быстром относительном движении тела и жидкости. Акустическая кавитация связана с прохождением акустической волны большой интенсивности во время полупериода разрежения (при распространении ультразвуковой волны даже сравнительно небольшой интенсивности, всего несколько ватт на квадратный сантиметр, в жидкости возникает переменное звуковое давление, амплитуда которого достигает порядка нескольких атмосфер). Полупериод сжатия интересен тем, что кавитационный пузырек захлопывается при перемещениях с потоками в область более высокого давления. Как было доказано множеством исследований, при процессе захлопывания пузырька излучается ударная волна.

Колебания — это процессы (движения или изменения состояния), в той или иной степени повторяющиеся во времени. Процессы эти могут быть весьма разнообразными. Если, например, подвесить на стальной спиральной пружине тяжелый шар, оттянуть его и затем предоставить самому себе, то он будет совершать колебания под действием сил упругости. Тако-

вы же упругие колебания струн, стержней, зданий, мостов и т.д. Колеблущейся величиной может быть и сила электрического тока (переменный ток), и напряжение электрического поля (электрические колебания) и т.д.

Прототипом всякого колебания может служить колебательное движение точки, т.е. движение назад и вперед по некоторому отрезку прямой между двумя крайними положениями.

Наиболее распространены:

- 1) механические колебания: колебания маятника, моста, струн, пластин, стержней, колебания плотности и давления воздуха при распространении в нем звука, волнение моря и т.п.;
- 2) электромагнитные колебания: колебания напряженностей электрического и магнитного полей;
- 3) электромеханические колебания (колебания мембраны телефона, диффузора электродинамического громкоговорителя и т.п.).

Различают колебания незатухающие, амплитуда которых постоянна, затухающие, нарастающие, амплитуда которых нарастает со временем, и модулированные. По форме различают гармонические колебания, прямоугольные, пилообразные и др. Колебания различной природы подчиняются одинаковым закономерностям. Наконец, различают свободные (или собственные) колебания, вынужденные колебания и автоколебания.

Колебания гармонические (монохроматическое колебание или колебание одной частоты) — это колебательный процесс, при котором периодические изменения физических величин, характеризующих состояние системы в зависимости от времени, происходят по закону синуса или косинуса. Интерес к изучению гармонической зависимости волны от времени обусловлен, во-первых, тем, что большинство источников создают волны, зависимость которых от времени близка к гармонической; во-вторых, любой сложный периодический процесс можно представить как наложение (сумму) гармонических колебаний. Основными параметрами гармонического колебания являются период (частота) и амплитуда (рис. II).

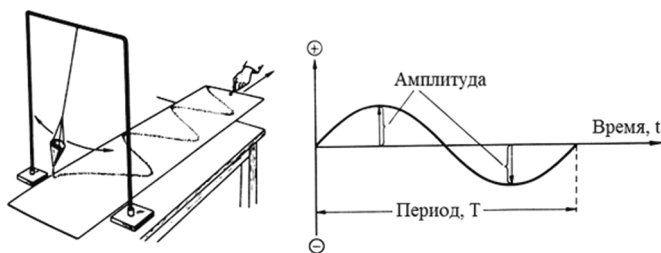


Рис. II. Колебания конусного сосуда с песком

Колебательные системы — системы, в которых в результате нарушения состояния равновесия могут возбуждаться собственные колебания. Колебательные системы делятся на консервативные (без потерь энергии), диссипативные (колебания затухают из-за энергетических потерь, например, маятник, колебательный контур) и активные, в число которых входят автоколебательные (потери энергии пополняются за счет источника энергии, например, генераторы электрических колебаний). Колебательные системы различают также по числу степеней свободы. В механике простейшими колебательными системами с одной степенью свободы являются маятники, например, пружинный. В электродинамике такой системой является электрический колебательный контур, состоящий из последовательно соединенных индуктивности L , емкости C и активного сопротивления R .

Колебательная система линейная — колебательная система, упругие свойства которой не зависят от амплитуды колебаний.

Колебательная система нелинейная — колебательная система, упругие свойства которой зависят от амплитуды колебаний.

Колебательная скорость частиц — это скорость, с которой движутся частицы среды, колеблющиеся при прохождении звуковой волны около положения равновесия, по отношению к среде в целом. Колебательную скорость частиц (c) следует отличать как от скорости движения самой среды, так и от скорости распространения звуковой волны (или скорости звука v). В плоской бегущей звуковой волне колебательная скорость частиц $c = p/\rho v$, где p — звуковое давление, ρ — плотность среды.

Круговая (циклическая) частота — единица измерения, показывающая, какой угол (в радианах) пройдет радиус-вектор за единицу времени.

Материальная точка — тело, размерами которого в данных условиях можно пренебречь.

Мембрана — тонкая пластинка, работающая на изгиб и закрепленная по внешнему контуру. Используется в громкоговорителях для возбуждения звуковых колебаний в окружающей среде, а в микрофонах — для приема звуковых колебаний. Примеры мембран — кожа, натянутая на барабане, тонкая металлическая фольга, играющая роль подвижной обкладки конденсаторного микрофона.

Микрофон — электроакустический прибор для преобразования звуковых колебаний в электрические. По принципу действия микрофоны подразделяются на угольные, электродинамические, конденсаторные, электретные, пьезоэлектрические и электромагнитные, по направленности действия — на ненаправленные, односторонне направленные и двусторонне направленные.

Музыкальный строй — ряд абсолютных частот ступеней. Современный музыкальный строй делит каждую октаву на 12 частей (называемых полутонами), причем «ля» 1-й октавы имеет частоту 440 Гц. Расстояние в два полутона называется целым тоном.

Нелинейная волна — это волна, под действием которой меняются свойства среды и соответственно меняются свойства самой волны. Это обычно происходит при большой интенсивности волны.

Нелинейные искажения — наличие на выходе испытуемого устройства частотных составляющих, которые отсутствовали в сигнале, поданном на его вход.

Нулевой порог слышимости — звуковое давление $2 \cdot 10^{-5}$ Па, соответствующее порогу чувствительности человеческого уха на частоте 1 кГц.

Ньютона I-й закон — всякое тело находится в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние.

Ньютона II-й закон — ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела):

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}, \quad [\text{м/с}^2]$$

или $\vec{F} = m \vec{a}$, т.е. 1 ньютон — это сила, которая массе 1 кг сообщает ускорение 1 м/с². II-ой закон Ньютона справедлив в инерциальных системах отсчета.

Ньютона III-й закон — любые два тела действуют друг на друга с силами, направленными вдоль одной прямой, равными по модулю и противоположными по направлению.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow \frac{m_1}{m_2} = -\frac{\vec{a}_2}{\vec{a}_1}$$

Из третьего закона Ньютона следует, что для каждой силы можно указать тело, являющееся причиной этой силы. Если же указать такое тело (причину возникшей силы) не удастся, то тогда причина силы — неинерциальность системы отсчета.

Обертон — гармоническое синусоидальное колебание более высокой частоты, сопровождающее основное колебание — основной тон. Если обертон имеет частоту, кратную частоте основного тона, он называется гармоническим обертоном (или *гармоникой* данного колебания).

Однородная среда — среда, свойства которой в любом выделенном объеме одинаковы.

Однородная абсолютно упругая среда — простейшая модель для изучения процессов образования и распространения упругих волн.

Октава — интервал (внесистемная безразмерная единица) между двумя частотами, одна из которых в два раза выше, чем другая.

Основная частота (первая гармоника) — низшая собственная частота колебательной системы. Единица измерения Гц.

Осциллограмма — кривая какого-либо электрического процесса, записанная посредством осциллографа.

Осциллограф — электроизмерительный прибор для наблюдения (записи) кривых каких-либо протекающих процессов.

Отражение звука — изменение направления движения звуковой волны при изменении импеданса среды.

Падающая волна — волна, падающая на границу раздела сред.

Период — это время, за которое совершается одно полное колебание. Период (T) и частота (f) любого колебания связаны между собой простой формулой $T = \frac{1}{f}$.

Плоская волна — волна, фронт которой представляет собой плоскость, перпендикулярную направлению распространения волны.

Поглощение волн — превращение энергии волн в другие виды энергии в результате взаимодействия со средой, в которой волна распространяется.

Поперечная волна — волна, распространяющаяся в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой происходят колебания частиц среды. Упругие волны могут распространяться в виде поперечных волн только в твердых телах, а в жидкостях и газах они распространяются только в виде продольной волны. Электрические и световые волны также являются поперечными.

Порог слышимости — наименьшая интенсивность звуковой волны, которая может быть воспринята органами слуха. Стандартный порог слышимости принимается равным 10^{-12} Вт/м² при частоте 1 кГц.

Порог болевого ощущения — наибольшая интенсивность звуковой волны, при которой восприятие звука не оказывает болевого ощущения. Этот порог зависит от частоты звука, изменяясь от 0,1 Вт/м² до 10 Вт/м².

Продольная волна — волна, в которой колебания происходят в направлении ее распространения.

Пучность — точка (линия, поверхность), в которой амплитуда колебательной величины, характеризующей стоячую волну, имеет максимальное значение.

Размах колебаний — разность между наибольшим и наименьшим мгновенными значениями. Это значение также называют «от пика до пика».

Ревербератор — устройство для создания искусственной реверберации электрическими или электроакустическими методами.

Реверберация — постепенное затухание свободных колебаний в замкнутом объеме. Другими словами, это затухание звука в закрытых помещениях после выключения его источника, обусловленное многократными отражениями (приходом в данную точку запоздавших отраженных или рассеянных звуковых волн).

Реверберометр — прибор для измерения реверберации помещений.

Резонанс — резкое возрастание амплитуды колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы с частотой собственных колебаний. Явление резонанса наглядно демонстрируется следующим опытом. На рейке подвешен массивный маятник *1* и легкие маятники разной длины, т.е. различных периодов (рис. III).

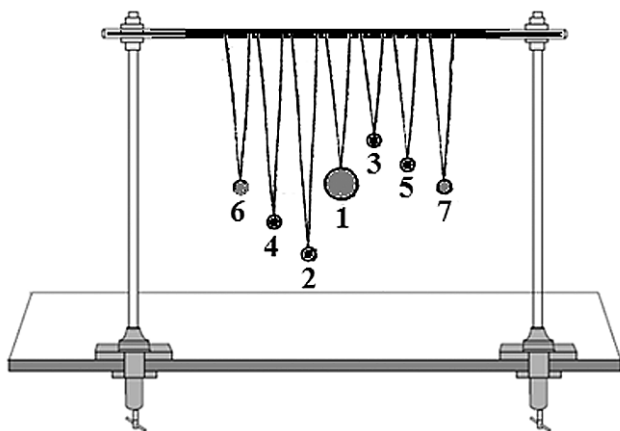


Рис. III. К демонстрации резонанса на маятниках

Заставим маятник *1* качаться в плоскости, перпендикулярной рейке. Его качания вызовут периодическое изгибание рейки, так что на все остальные маятники через их точки подвеса будет действовать сила с периодом маятника *1*. Мы увидим при этом, что маятники *2* и *3*, у которых периоды наиболее отличаются от периода маятника *1*, останутся практически неподвижными —

амплитуды колебаний весьма малы. Маятники 4 и 5, более близкие по своим периодам к маятнику 1, будут колебаться с немного большей амплитудой. Наконец, маятники 6 и 7, имеющие ту же длину, что и маятник 1, т.е. настроенные в резонанс, раскачиваются до очень большой амплитуды.

Акустический резонанс можно исследовать с помощью камертона, представляющего собой изогнутый U-образный металлический стержень. Сам камертон издает слабый звук. Это объясняется не только тем, что невелико излучение каждой ветви, но и потому, что обе ветви, расстояние между которыми гораздо меньше длины волны, колеблются в противофазе. Для усиления звука камертон устанавливают на деревянном ящике — резонаторе, частота собственных колебаний которого совпадает с частотой камертона.

Резонатор — колебательная система с резко выраженными резонансными свойствами.

Резонатор Гельмгольца (резонатор акустический) — сосуд, сообщающийся с внешней средой через небольшое отверстие или трубку (горло резонатора) и совершающий низкочастотные собственные колебания, длина волны которых значительно больше размеров резонатора.

Рефракция — искривление траектории распространения волны в неоднородной среде.

Рупор — звуковод, площадь поперечного сечения которого непрерывно изменяется: в приемном рупоре уменьшается, а в излучающем — увеличивается.

Сила упругости — это сила, которая возникает внутри тела в результате деформации и препятствует изменению формы.

Свободные колебания — колебания, которые возникают в системе под действием внутренних сил и происходят после того, как система тем или иным способом была выведена из состояния равновесия. Если на такую систему не действуют никакие внешние силы (вынуждающие или силы трения), то такие колебания совершаются по *гармоническому закону*. Если свободные колебания совершаются при действии сил трения, то они всегда являются *затухающими*. Например, гитарная струна при ударе по ней начинает колебаться довольно продолжительное время, т.е. совершать свободные затухающие

колебания. При этом воздушная среда вокруг колеблющейся струны начинает колебаться с частотой струны (собственно, благодаря этому мы и слышим звук), т.е. совершает вынужденные колебания с частотой свободных колебаний струны.

Связанные колебания — колебания, возникающие в тех случаях, когда две (или более) колебательные системы оказывают друг на друга взаимное влияние, либо система имеет несколько степеней свободы.

Сложение гармонических колебаний — нахождение закона результирующих колебаний системы в тех случаях, когда эта система одновременно участвует в нескольких колебательных процессах. Различают два предельных случая — сложение колебаний одинакового направления и сложение взаимно перпендикулярных колебаний.

Слуховое восприятие искажений — заметное на слух несоответствие звука, переданного через электроакустическую систему связи, подлинному звучанию первоисточника.

Скорость звука — скорость распространения какой-либо фиксированной фазы звуковой волны (называется также фазовой скоростью). При любой температуре $t^{\circ}\text{C}$ (если $|t| \ll 273^{\circ}\text{C}$) скорость акустической волны в воздухе можно определить с помощью соотношения $v = 331,2 + 0,6t$ (м/с), т.е. при увеличении температуры на 1°C скорость звука в воздухе увеличивается на $0,6$ м/с.

Собственная частота — частота свободных колебаний системы.

Спектр звука — графическое или табличное отображение зависимости уровней звукового давления от частоты (чаще всего исследуется частотно-амплитудный звуковой спектр). Так, длительное звучание музыкального инструмента, издающего одну ноту, вызывает периодический, но не гармонический звуковой колебательный процесс. Такие звуки имеют дискретный спектр. По оси абсцисс откладывают частоты гармоник, а по оси ординат соответствующие им амплитуды.

Стоячая звуковая волна — волна, возникающая в результате наложения двух одинаковых бегущих звуковых волн, распространяющихся во взаимно противоположных направлениях и имеющих одинаковые параметры. Воспринимается неподвиж-

ной, в то время как бегущая волна совершает видимое движение. Возникновение стоячих волн (т.е. специфического колебательного движения воздушной среды) является частным случаем явления интерференции волн. Плоская продольная стоячая волна возникает, например, при наложении падающей и отраженной плоских волн, если углы падения и отражения равны нулю, а в точке отражения волны имеют место одинаковые или противоположные фазы. При этом отражение должно происходить от среды с очень большим или, наоборот, с очень малым волновым сопротивлением. Так волны, бегущие по струне постоянной длины, интерферируют с волнами, отраженными от границ и идущими во встречном направлении. Стоячие волны возбуждаются не только в струнах, но и в любых телах, способных колебаться. Даже ударив по камню молотком, мы возбуждаем в нем стоячие волны. Образование стоячих волн происходит на собственных — резонансных частотах тела. Резонансные частоты зависят от размеров тела точно так же, как резонансные колебания струны зависят от ее длины. Во всех музыкальных инструментах звуки образуются благодаря стоячим волнам в струнах у струнных, в столбах воздуха у духовых, в барабанах и других ударных.

Струна — гибкая однородная нить. Струну обычно рассматривают как непрерывное (сплошное) образование. Размер струны (длина струны) в продольном направлении гораздо больше, чем в поперечном (диаметр). Поэтому в идеализированной модели струну можно рассматривать как геометрическую линию, т.е. линию, лишенную поперечных размеров. Изготовить струну можно из любой гибкой нити (например, капроновой лески), натянув ее и закрепив на концах. Струну, оба конца которой неподвижны, уже нельзя привести в движение воздействием на ее конец. Если какую-то часть струны в поперечном направлении действием внешней силы вывести из положения равновесия и затем отпустить, то благодаря натяжению возникнут силы, стремящиеся восстановить прямолинейную форму струны, возникнет волна. На практике начальное отклонение частиц струны не соответствует гармонической зависимости от координаты, поэтому и движение каждой частицы струны, хотя и периодически во времени, но не гармонично. Это приводит к появлению обертонов (дополнительных гармоник).

Сферическая волна — волна, фронт которой представляет собой сферическую поверхность с радиусом, совпадающим с направлением распространения волны.

Тембр звука — своеобразное звуковое ощущение, определяемое характером акустического спектра и распределением энергии между определенными частотами.

Точечный источник звука — синфазно пульсирующая сфера, радиус которой меньше длины излучаемой звуковой волны.

Ударная волна — это распространяющийся по среде фронт резкого, почти мгновенного, изменения параметров среды: плотности, давления, температуры, скорости. Ударные волны называют также сильными разрывами или скачками. Причины возникновения ударных волн в газах — полеты со сверхзвуковыми скоростями (звуковой удар), истечения с большими скоростями через сопла, мощные взрывы, электрические разряды, интенсивное горение. При прохождении ударной волны близко от человека возникает акустический удар. Ударные волны в воде носят название *гидравлического удара*. С этим явлением пришлось столкнуться при устройстве первых водопроводов, т.к. первоначально водопроводные задвижки перекрывали воду слишком быстро и резкое прекращение тока воды вызывало ударную волну (гидравлический удар), распространявшуюся в трубе водопровода, что зачастую приводило к порыву трубы.

Узел — точка (линия, поверхность), в которой амплитуда колебательной величины, характеризующей стоячую волну, имеет минимальное значение.

Ультразвук — упругие колебания и волны, частота которых лежит выше звукового диапазона, т.е. превышает 15–20 кГц (т.е. не вызывают слухового восприятия).

Упругость — свойство тел восстанавливать свою форму после прекращения действий, вызывающих деформацию сил.

Упругая среда — среда, любой выделенный объем которой обладает свойством упругости.

Упругие волны — волны, связанные с колебаниями частиц при механической деформации упругой среды (жидкой, газообразной, твердой). При этом имеет место перенос энергии при отсутствии переноса вещества. В акустической волне частицы совершают колебания вокруг точки покоя.

Упругая среда — среда, деформация которой пропорциональна приложенной силе (аналогично закону Гука).

Уравнение волны — зависимость колеблющейся величины от координат и времени. Например, при колебаниях струны — это зависимость от координат и времени смещения какой-либо точки струны от положения равновесия; при колебаниях воздуха — зависимость давления воздуха от координат и времени.

Уровень громкости — физиологическая характеристика — выражается в фонах (*фон*).

Усилитель — устройство для увеличения энергетических параметров входного сигнала за счет использования энергии вспомогательного источника.

Усилитель низкой частоты — устройство для усиления колебаний низкой (т.е. звуковой) частоты.

Фон — 1) единица уровня громкости звука; 2) помеха, возникающая в электрических системах передачи и усиления сигналов вследствие различных дефектов данной системы.

Фронт волны — самая далекая (в данный момент времени) волновая поверхность, куда дошла волна к этому моменту времени. По форме фронта различают 3 типа волн: плоские (фронт в виде плоскости, нормальной к направлению распространения волны), сферические и цилиндрические (фронт в виде боковой поверхности цилиндра).

Цилиндрическая волна — волна, фронт которой представляет собой цилиндрическую поверхность с радиусом, совпадающим с направлением распространения волны.

Частота колебаний — число полных колебаний в единицу времени.

Шум — случайное сочетание звуков различной интенсивности и частоты, которые образуют сплошной спектр частот (или линейчатый спектр с негармоническими составляющими). Воздействие шума на человека определяется уровнем звукового давления, звука и частотным составом.

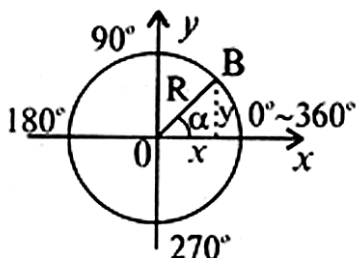
Электроакустические преобразователи — устройства, преобразующие электрическую энергию в акустическую (энергию упругих колебаний среды) и обратно. В зависимости от направления преобразования электроакустические преобразователи различают: излучатели и приемники.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж **Формулы тригонометрии** *(математическая справка)*

I. Понятие обобщенного угла



II. Определение тригонометрических функций



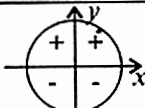
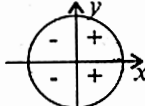
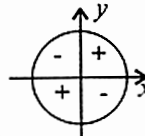
$\sin \alpha = \frac{y}{R}$	Отношение ординаты т. В к радиусу
-----------------------------	-----------------------------------

$\cos \alpha = \frac{x}{R}$	Отношение абсциссы т. В к радиусу
-----------------------------	-----------------------------------

$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x}$	Отношение ординаты т. В к ее абсциссе
--	---------------------------------------

$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{x}{y}$	Отношение абсциссы т. В к ее ординате
---	---------------------------------------

III. Некоторые свойства тригонометрических функций

$f(x)$	$\mathbb{D}$ - область определен.	$\mathbb{E}$ - область значений	Знаки по четвертям		Четность функции
			I II III IV	иллюстрац.	
$\sin \alpha$	$(-\infty; +\infty)$	$[-1; 1]$	$++--$		нечетная $\sin(-\alpha) = -\sin\alpha$
$\cos \alpha$	$(-\infty; +\infty)$	$[-1; 1]$	$+-+-$		четная $\cos(-\alpha) = \cos\alpha$
$\operatorname{tg} \alpha$	$\alpha \neq \frac{\pi}{2} + \pi n, n \in \mathbb{Z}$	$(-\infty; +\infty)$	$+-+-$		нечетная $\operatorname{tg}(-\alpha) = -\operatorname{tg}\alpha$
$\operatorname{ctg} \alpha$	$\alpha \neq \pi n, n \in \mathbb{Z}$	$(-\infty; +\infty)$	$+-+-$		нечетная $\operatorname{ctg}(-\alpha) = -\operatorname{ctg}\alpha$

IV. Таблица градусных и радианных мер

Градусы	0°	30°	45°	60°	90°	180°	270°	360°
Радианы	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$	2π

V. Основные тригонометрические тождества

1.	$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$
2.	$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}; \cos \alpha \neq 0$
3.	$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}; \sin \alpha \neq 0$
4.	$\operatorname{tg} \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 1; \begin{cases} \sin \alpha \neq 0 \\ \cos \alpha \neq 0 \end{cases}$
5.	$1 + \operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{1}{\cos^2 \alpha}; \cos \alpha \neq 0$
6.	$1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha = \frac{1}{\sin^2 \alpha}; \sin \alpha \neq 0$

VI. Значения тригонометрических функций некоторых углов

Градусы	Рadianы	$\sin a$	$\cos a$	$tg a$	$ctg a$
0°	0	0	1	0	∞
30°	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$
45°	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	1	1
60°	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\sqrt{3}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
90°	$\frac{\pi}{2}$	1	0	∞	0
180°	π	0	-1	0	∞
270°	$\frac{3\pi}{2}$	-1	0	∞	0
360°	2π	0	1	0	∞

VII. Формулы приведения

x	90°-α	90°+α	180°-α	180°+α	270°-α	270°+α	360°-α	360°+α
sin x	+ cos α	+ cos α	+ sin α	- sin α	- cos α	- cos α	- sin α	+ sin α
cos x	+ sin α	- sin α	- cos α	- cos α	- sin α	+ sin α	+ cos α	+ cos α
tg x	+ ctg α	- ctg α	- tg α	+ tg α	+ ctg α	- ctg α	- tg α	+ tg α
ctg x	+ tg α	- tg α	- ctg α	+ ctg α	+ tg α	- tg α	- ctg α	+ ctg α

VIII. Формулы сложения

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin\alpha \cdot \cos\beta + \cos\alpha \cdot \sin\beta$$

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin\alpha \cdot \cos\beta - \cos\alpha \cdot \sin\beta$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos\alpha \cdot \cos\beta - \sin\alpha \cdot \sin\beta$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos\alpha \cdot \cos\beta + \sin\alpha \cdot \sin\beta$$

$$tg(\alpha + \beta) = \frac{tg\alpha + tg\beta}{1 - tg\alpha \cdot tg\beta} \quad ctg(\alpha + \beta) = \frac{ctg\alpha \cdot ctg\beta - 1}{ctg\alpha + ctg\beta}$$

$$tg(\alpha - \beta) = \frac{tg\alpha - tg\beta}{1 + tg\alpha \cdot tg\beta} \quad ctg(\alpha - \beta) = -\frac{ctg\alpha \cdot ctg\beta + 1}{ctg\alpha - ctg\beta}$$

IX. Формулы двойного угла

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \quad \cos 2\alpha = 1 - 2 \sin^2 \alpha \quad \cos 2\alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1$$

$$tg 2\alpha = \frac{2tg\alpha}{1 - tg^2 \alpha} = \frac{2}{ctg \alpha - tg \alpha} \quad ctg 2\alpha = \frac{ctg^2 \alpha - 1}{2ctg \alpha} = \frac{ctg \alpha - tg \alpha}{2}$$

Х. Формулы понижения степени

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} \quad \cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$$

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{1 + \cos 2\alpha} \quad \operatorname{ctg}^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{1 - \cos 2\alpha}$$

ХI. Формулы тройного угла

$$\sin 3\alpha = 3 \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha$$

$$\cos 3\alpha = 4 \cos^3 \alpha - 3 \cos \alpha$$

ХII. Формулы преобразования суммы в произведение

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha + \beta}{2}$$

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

$$\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} \quad \operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

$$\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} \quad \operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta = \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$$

XIII. Формулы преобразования произведения в сумму

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$$

$$\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)]$$

XIV. Выражение тригонометрических функций через тангенс половинного угла

$$\sin \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}} \qquad \cos \alpha = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}} \qquad \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

К ТЕМЕ I

1. Алдошина И. Музыкальная акустика: учебник для ВУЗов / И. Алдошина, Р. Приттс. — СПб. : Изд-во «Композитор», 2006. — 720 с.
2. Александрова В. Томас Юнг / В. Александрова // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1973. — №9. — С. 9–11.
3. Андреев Н.Н. Архитектурная акустика в СССР / Н.Н. Андреев, В.С. Григорьев, И.Г. Лейзер и др. // Успехи физических наук. — 1949. — Т. 37, вып. 3. — С. 269–315.
4. Бархатов В.А. В те далекие времена, когда еще не было ультразвуковых дефектоскопов... [Электронный ресурс] / В.А. Бархатов. — С. 1–26. — Режим доступа : http://fpribor.ru/uploadedFiles/files/Far_Time_Away.pdf.
5. Белявский А.Г. Теория звука в приложении к музыке. Основы физической и музыкальной акустики / А.Г. Белявский. — М. : Госиздат, 1925. — 249 с.
6. Вайскопф В. Наука и удивительное. Как человек понимает природу / Виктор Вайскопф. — М. : Наука, 1965. — 228 с.
7. Гиндикин С. Г. Рассказы о физиках и математиках / С. Г. Гиндикин. — 3-е изд. — М. : МЦНМО, 2001. — 448 с.
8. Жмудь Л.Я. Пифагор и его школа / Л.Я. Жмудь. — Л. : Наука, 1990. — 193 с. — (Серия «Из истории мировой культуры»).
9. Красильников В.А. Введение в акустику / В.А. Красильников. — М. : МГУ, 1992. — 152 с.
10. Лебединский А.В. Гельмгольц / А.В. Лебединский, У.И. Франкфурт, А.М. Френк. — М. : Наука, 1966. — 320 с.
11. Липсон Г. Великие эксперименты в физике / Г. Липсон ; под ред. В.И. Рывкина. — М. : Мир, 1972. — 215 с.
12. Лукреций. О природе вещей / Тит Лукреций Кар; [пер. с латинского Ф. Петровского]. — М. : Художественная литература, 1983. — 383 с.
13. Мах Э. Популярные лекции по физике / Э. Мах. — Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 128 с.

14. Мелешко В.В. Изгибные колебания упругих прямоугольных пластин со свободными краями: от Хладни (1809) и Ритца (1909) до наших дней / В.В. Мелешко, С.О. Папков // Акустичний вісник. — 2009. — Т. 12, № 4. — С. 34–51.
15. Плужников М. Среди запахов и звуков / М. Плужников, С. Рязанцев. — М. : Молодая гвардия, 1991. — 270 с.
16. Ржевкин С.Н. Успехи советской акустики / С.Н. Ржевкин // Успехи физических наук. — 1948. — Т. 34, вып. 1. — С. 1–12.
17. Романов С.Н. Биологическое действие вибрации и звука: Парадоксы и проблемы XX века / С.Н. Романов. — Л. : Наука, 1991. — 158 с.
18. Спасский Б.И. История физики : в 2 т. / Б.И. Спасский. — 2-е изд. — М. : Высшая школа, 1977. — Т. 1. — 320 с.
19. Чедд Г. Звук / Г. Чедд ; [пер. с англ. Г.И. Кузнецова]. — М. : Мир, 1975. — 206 с.
20. Шредер М.Р. Модели слуха [Электронный ресурс] / М.Р. Шредер // Proceedings of the IEEE. — Vol. 63. — № 9, 1975. — P.1332 — 1350. — Режим доступа : http://www.shabad.ru/nfb/shroeder_rus.pdf.

К ТЕМЕ II

1. Боровой А. Колебания и маятники / А. Боровой, А. Херувимов // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1981. — №8. — С. 30–33.
2. Воронкин А.С. Введение в физику звука / А.С. Воронкин. — Луганск : Изд-во ЛГИКИ, 2012. — 96 с.
3. Джанколи Д. Физика : в 2 т. / Д. Джанколи ; [пер. с англ. А. Добраславского, М. Котельниковой и М. Суханова]. — Т. 1. — М. : Мир, 1989. — 656 с.
4. Засекіна Т.М. Фізика : підручник для 10 кл. загальноосвіт. навч. закл. (профільний рівень) / Т.М. Засекіна, В.М. Головка. — К. : Педагогічна думка, 2010. — 304 с.
5. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний / Л.И. Мандельштам. — М. : Наука, 1972. — 470 с.
6. Михайлов А. Волны в сердце / А. Михайлов // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1987. — № 9. — С. 9–14.

7. Можаяев В. Колебания / В. Можаяев // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1981. — № 3. — С. 46–50.
8. Мякишев Г.Я. Физика: Колебания и волны. 11 кл. / Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков. — М. : Дрофа, 2002. — 288 с.
9. Пиппард А. Физика колебаний / А. Пиппард. — М. : Высшая школа, 1985. — 456 с.
10. Овчинников А. Об амплитудах колеблющихся величин / А. Овчинников, В. Плис // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1999. — № 1. — С. 46–49.
11. Яворский Б.М. Основы физики. Колебания и волны. Квантовая физика. Физика ядра и элементарных частиц / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. — Т. 2. — 550 с.

К ТЕМЕ III

1. Асламазов Л. Что такое волна? / Л. Асламазов, И. Кикоин // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1982. — №6. — С. 2–7.
2. Асламазов Л. Уравнение волны / Л. Асламазов // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1984. — №11. — С. 27–28.
3. Асламазов Л. Как волны передают информацию? / Л. Асламазов // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1986. — №8. — С. 20–24.
4. Воронкин А.С. Введение в физику звука / А.С. Воронкин. — Луганск : Изд-во ЛГИКИ, 2012. — 96 с.
5. Кузнецов Е. О волнах на море и ряби на лужах / Е. Кузнецов, А. Рубенчик // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1980. — №9. — С. 22–26.
6. Островский Л. Волны на воде / Л. Островский // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1987. — № 8. — С. 16–22.
7. Перкальскис Б.Ш. Волновые явления и демонстрации по курсу физики / Б.Ш. Перкальскис. — Томск : Изд-во Томск. ун-та, 1984. — 280 с.
8. Руденко О., Черкезян В. В мире мощного звука / О. Руденко, В. Черкезян // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1989. — №9. — С. 19–25.

9. Рыдник В.И. О современной акустике : книга для внеклассного чтения / В.И. Рыдник. — М. : Просвещение, 1979. — 80 с.
10. Стонг К. Исследование волн на поверхности воды / К. Стонг // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1972. — № 5. — С. 20–24.
11. Чедд Г. Звук / Грэхэм Чедд ; [пер. с англ. Г. Кузнецова]. — М. : Мир, 1975. — 206 с.
12. Элементарный учебник физики : учебное пособие в 3-х т. / Под ред. Г.С. Ландсберга. — Т. III. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. — М. : Наука, 1986. — 656 с.

К ТЕМЕ IV

1. Варламов А. Что такое параметрический резонанс? / А. Варламов, А. Черноуцан // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1986. — №9. — С. 29–30.
2. Винокур Р. Домовой, колдун и... резонатор Гельмгольца / Р. Винокур // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1979. — №8. — С. 18–20.
3. Воронкин А.С. Краткий курс физики для высших учебных заведений искусств : уч. пособ. / А.С. Воронкин. — Луганск : Изд-во ЛГИКИ, 2011. — 236 с.
4. Гриффин Д. Эхо в жизни людей и животных / Д. Гриффин. — М. : Физматгиз, 1961. — 108 с.
5. Звук // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1992. — №8. — С.40–41.
6. Клюкин И.И. Удивительный мир звука / И.И. Клюкин. — Л. : Судостроение, 1978. — 168 с.
7. Лившиц М. Эхолокация / М. Лившиц // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1973. — №3. — С. 8–14.
8. Сабирзянов А.В. Физика. Аннотации к видеоклипам : методические указания / А.В. Сабирзянов, В.С. Саввин, Н.Д. Ватолина, Ю.А. Зубова, К.Ю. Панова. — Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2004. — 143 с.
9. Тарасов Л.В. Физика в природе / Л.В. Тарасов. — М. : Просвещение, 1988. — 351 с.

10. Хорбенко И.Г. Звук, ультразвук, инфразвук / И.Г. Хорбенко. — М. : Знание, 1986. — 192 с.

К ТЕМЕ V

1. Арабаджи В. Дифракционная окраска насекомых / В. Арабаджи // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1991. — №2. — С.18–19.
2. Духовнер А. Об интерференции, дельфинах и летучих мышах / А. Духовнер, А. Решетов, Л. Решетов // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1991. — №5. — С. 18–22.
3. Мякишев Г.Я. Физика: Колебания и волны. 11 кл. / Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков. — М. : Дрофа, 2002. — 288 с.
4. Стрелков С.П. Общий курс физики: Механика / С.П. Стрелков. — М. : Наука, 1975, 560 с.
5. Физика. Оптика и волны / под ред. А.С. Ахматова. — М. : Наука, 1973. — Ч. II. — 400 с.

К ТЕМЕ VI

1. Воронкин А.С. Введение в физику звука / А.С. Воронкин. — Луганск : Изд-во ЛГИКИ, 2012. — 96 с.
2. Николаев В.И. Пособие по физике для поступающих в вузы / В.И. Николаев и др. — М. : Изд-во МГУ, 1972. — 351 с.
3. Тімонюк В.А. Біофізика / В.А. Тімонюк, Е.Н. Животова. — К. : Професіонал, 2001. — 704 с.
4. Федіншин Я.І. Фізика з основами біофізики / Я.І. Федіншин. — Львів : Світ, 2000. — 458 с.
5. Douglas L. Jones. Frequency and Music / L. Jones Douglas, Schmidt-Jones Catherine [Электронный ресурс]. — Rice University, Houston, Texas. — Режим доступа : <http://cnx.org/content/col10338/1.1/pdf>.

К ТЕМЕ VII

1. Антонов В.Ф. Физика и биофизика: учеб. / В.Ф. Антонов, Е.К. Козлова, А.М. Черныш. — М. : ГЭОТАР-Медиа, 2010. — 480 с.
2. Воронкин А.С. Введение в физику звука / А.С. Воронкин. — Луганск : Изд-во ЛГИКИ, 2012. — 96 с.

3. Кикоин А. Энергия и громкость звука / А. Кикоин // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1983. — №12. — С. 28–30.
4. Ремизов А.Н. Курс физики, электроники и кибернетики для медицинских институтов : учебник / А.Н. Ремизов. — М. : Высш. школа, 1982. — 607 с.
5. Суслов Б.Н. Звук и слух / Б.Н. Суслов. — М. : Изд-во мин-ва вооруженных сил СССР, 1948. — 57 с.
6. Яворский Б.М. Основы физики: Колебания и волны. Квантовая физика. Физика ядра и элементарных частиц / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. — 5-е изд. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 550 с.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Альтаман Я.А. Тенденции развития физиологии слуха/ Я.А. Альтман, И.А. Вартамян, И.Г. Андреева и др // Успехи физиологических наук. — 2005. — Т. 36. — № 1. — С. 3–23.
2. Демьянов Ю.А. Почему звучат струнные музыкальные инструменты / Ю.А. Демьянов, А.А. Малашин // Природа, № 8, 2008.
3. Енохович А. С. Справочник по физике и технике / А.С. Енохович. — М. : Просвещение, 1983. — 255 с.
4. Жданов Л.С. Фізика : підручник для середніх спеціальних навчальних закладів / Л.С. Жданов, Г.Л. Жданов. — К. : Высшая школа, 1983.
5. Кабардин О.Ф. Физика : справочные материалы / О.Ф. Кабардин. — М. : Просвещение, 1988. — 367 с.
6. Крендалл И.Б. Акустика / И.Б. Крендалл. - 2-е изд. — М. : КомКнига, 2005. — 170 с.
7. Кузнецов С.И. Колебания и волны. Геометрическая и волновая оптика: учебное пособие / С.И. Кузнецов. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2007. — 170 с.
8. Купер Л. Физика для всех : в 2-х томах / Л. Купер. — М. : Мир. — 489 с.
9. Майер В. Изгибная волна в пластинках / В. Майер // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1978. — №8. — С. 26–27.

10. Майер В.В. Простые опыты со струями и звуком : учебное руководство / В.В. Майер. — М. : Наука, 1985. — 128 с.
11. Майер В.В. Простые опыты с ультразвуком : учебное руководство / В.В. Майер. — М. : Наука, 1978. — 160 с.
12. Морин Р. Ультразвук в медицине / Р. Морин, Р. Хобби // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант», 1990. — № 9. — С. 17–19.
13. Мясников С.П. Пособие по физике : учеб. пособие для подгот. отделений вузов / С.П. Мясников, Т.Н. Осанова. — М. : Высшая школа, 1988. — 399 с.
14. Орир Дж. Популярная физика / Дж. Орир. — М. : Мир, 1964. — 446 с.
15. Орлянський О.Ю. Фізика. Готуємось до тестування : зб. задач для абітурієнтів / О.Ю. Орлянський, Р.С. Тутік. — Дніпропетр. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2006. — 232 с.
16. Павленко Ю.Г. Пособие по физике для поступающих в вузы / Ю.Г. Павленко. — М. : Изд-во МГУ, 1978. — 480 с.
17. Перельман Я.И. Занимательная физика: в 2 книгах / Я.И. Перельман. — Книга 1. — М. : Наука, 1983. — 224 с.
18. Роуэлл Г. Физика : учебник для английских средних школ / Г. Роуэлл, С. Герберт. — М. : Просвещение, 1994. — 576 с.
19. Тренин А.Е. Готовимся к экзамену по физике / А.Е. Тренин, В.А. Никеров. — М. : Рольф, 2000. — 224 с.
20. Фейнман Р. Дюжина лекций: шесть попроще и шесть сложнее / Р. Фейнман. — М. : Бином, 2006. — 318 с.
21. Фурдуев В.В. Акустические основы вещания / В.В. Фурдуев. — М. : Связьиздат, 1960. — 321 с.
22. Хендель А. Основные законы физики / Альфред Хендель [под редакцией проф. Н.Н. Малова]. — М. : Физматгиз, 1963. — 312 с.
23. Хорошавина С. Г. Справочник по физике. Для старшеклассников, абитуриентов, студентов / С. Г. Хорошавина. — Ростов н/Д : Феникс, 2002. — 386 с.
24. Чешев Ю.В. Методическое пособие по физике для поступающих в вузы / Ю.В. Чешев, В.В. Можаяев и др. — М. : Физматкнига, 2006. — 288с.
25. Шахмаев Н.М. Физика. Книга 2. Колебания и волны. Оптика. Строение атома : учебное пособие для техникумов / Н.М. Шахмаев. — М. : Высшая школа, 1977.

26. Эллиот Л. Физика / Л. Эллиот, У. Уилкоккс. — М. : Наука, 1975. — 736 с.
27. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. — М. : Наука, 1980. — 508 с.
28. Яковенко В.А. Общая физика. Механика : учебник для вузов / В.А. Яковенко, Г.А. Заборовский, С.В. Яковенко. — Минск : Республиканский институт высшей школы Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка, 2008. — 320 с. — Режим доступа : <http://phys.bspu.unibel.by/static/um/phys/meh/1mehanika/index.htm>.
29. Фриш С.Э. Курс общей физики. Том I. Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны / С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 1962. — 467 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
I. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ АКУСТИКИ.....	6
1.1. I-й период истории развития акустики.....	6
1.2. II-й период истории развития акустики.....	12
1.3. III-й период истории развития акустики.....	28
1.4. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки.....	33
II. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ.....	34
2.1. Колебания.....	34
2.2. Свободные колебания.....	37
2.3. Гармоническое колебание. Гармонические осцилляторы.....	39
2.4. Графическое представление гармонического колебания.....	42
2.5. Математический маятник.....	43
2.6. Пружинный маятник.....	47
2.7. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний.....	48
2.8. Энергия гармонического колебания.....	51
2.9. Вынужденные колебания и резонанс.....	52
2.10. Автоколебания.....	55
2.11. Классификация колебаний.....	57
2.12. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки.....	60
2.13. Задачи для самостоятельного решения.....	62
III. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ.....	64
3.1. Волновой процесс.....	64
3.2. Демонстрация волнового движения: связанные маятники и волновые машины.....	65
3.3. Поперечные, продольные и поверхностные волны....	69
3.3.1. Поперечные волны.....	69
3.3.2. Продольные волны.....	71
3.3.3. Поверхностные волны.....	74
3.4. Связь между длиной волны, скоростью ее распространения и периодом (частотой).....	75
3.5. Волновая поверхность.....	76

3.6. Смещение частиц среды в бегущей волне.....	77
3.7. Поток энергии и интенсивность волны. Вектор Умова.....	80
3.8. Понятие о линейных и нелинейных волнах.....	82
3.9. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки.....	83
3.10. Задачи для самостоятельного решения.....	84
IV. ЗВУК И АКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ:	
РЕЗОНАНС, ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ВОЛН.....	85
4.1. Распространение звука в газах.....	85
4.2. Скорость распространения звука.....	90
4.2.1. Скорость распространения звука в газах.....	90
4.2.1.1. Теплоемкость газа.....	90
4.2.1.2. Скорость распространения звуковых волн в идеальных газах.....	90
4.2.1.3. Скорость звука в воздухе.....	92
4.2.2. Скорость звука в жидкостях и твердых телах..	92
4.3. Акустический резонанс.....	94
4.3.1. Демонстрация акустического резонанса при помощи камертона.....	94
4.3.2. Поющий бокал. Гармоника Франклина.....	98
4.3.4. Демонстрация звукопроводности твердых тел и жидкостей.....	101
4.3.5. Эксперимент с гибкой однородной нитью.....	101
4.3.6. Эксперимент с резонаторами Германа Гельмгольца.....	102
4.4. Отражение и преломление волн.....	104
4.4.1. Законы отражения и преломления.....	104
4.5. Звуковое эхо.....	107
4.7. Затухание звука.....	109
4.8. Волновое движение в замкнутом объеме. Реверберация.....	109
4.9. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки.....	111
4.10. Задачи для самостоятельного решения.....	114
V. ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ И ДИФРАКЦИИ.....	
5.1. Явление интерференции.....	115
5.1.1. Принцип суперпозиции.....	115
5.1.2. Интерференция от двух монохроматических источников одинаковой частоты.....	116

5.1.3. Условия образования максимумов и минимумов интерференции.....	120
5.1.4. Интерференция и закон сохранения энергии....	121
5.2. Дифракция звуковых волн.....	126
5.3. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки.....	129
5.4. Задачи для самостоятельного решения.....	131
VI. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ.....	132
6.1. Возникновение стоячих волн — простейший случай интерференции.....	132
6.1.1. Демонстрация стоячих волн в струнах.....	135
6.1.2. Стоячие волны в трубах.....	139
6.1.3. Стоячая волна и акустический резонанс в цилиндрическом сосуде с водой	143
6.1.4. Демонстрация звуковой стоячей волны при помощи трубы Кундта.....	144
6.1.5. Демонстрация звуковой стоячей волны при помощи трубы Рубенса	145
6.1.6. Демонстрация звуковой стоячей волны, возникающей при конвекционном движении воздуха сквозь трубу Рийке.....	146
6.2. Собственные колебания плоских и пространственно протяженных фигур.....	148
6.3. Наблюдение стоячей волны на поверхности жидкости.....	153
6.4. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки.....	154
6.5. Задачи для самостоятельного решения.....	154
VII. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКА.....	156
7.1. Субъективные характеристики.....	156
7.1.1. Громкость.....	156
7.1.2. Высота звука.....	158
7.1.3. Тембр звука.....	158
7.2. Объективные характеристики.....	160
7.2.1. Интенсивность (сила) звука.....	160
7.2.2. Частота звуковых колебаний. Интервалы в музыке.....	162
7.2.3. Гармонический спектр сложного колебания.....	165
7.3. Логарифмический закон восприятия Вебера–Фехнера. Уровень громкости звука.....	167

7.4. Голосовой и слуховой аппарат человека.....	174
7.4.1. Голосовой аппарат человека.....	174
7.4.2. Слуховой аппарат человека.....	175
7.5. Контрольные вопросы и вопросы для самоподготовки.....	179
7.6. Задачи для самостоятельного решения.....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ А	
Греческий и латинский алфавит.....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	
Единицы СИ (system international)	183
ПРИЛОЖЕНИЕ В	
Приставки для образования кратных и дольных единиц СИ.....	183
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	
Акустические свойства некоторых твердых веществ.....	184
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	
Акустические свойства некоторых газообразных веществ.....	185
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	
Теоретический минимум.....	185
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	
Формулы тригонометрии.....	205
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	210
СОДЕРЖАНИЕ.....	218

ДЛЯ ЗАМЕТОК

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

Навчальне видання

Відповідальний за випуск —
Воронкін Олексій Сергійович

ЛІНІЙНІ КОЛИВАННЯ ТА ХВИЛІ ВСТУП ДО АКУСТИКИ

Навчальний посібник

(російською мовою)

Технічний редактор — Куценко М.Є.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб'єктів видавничої справи
ДК № 1692 від 17.02.2004.

Здано на виробництво 09.10.12. Підписано до друку 14.11.12.
Формат 60x84/16.

Папір офсетний. Друк RIZO. Гарнітура SchoolBookC.
Ум. друк. арк. 13,02. Зам. № 11/5.

Видавець: СПД Рєзніков В.С.
91055, м. Луганськ, вул. Луначарського, 58.
Тел.: (0642) 52-50-67, 71-76-93.
e-mail: r_vlad@ukr.net.