

Купить книгу "Необыкновенная
физика обыкновенных явлений".

Том 2

Кл.Э. Суорц

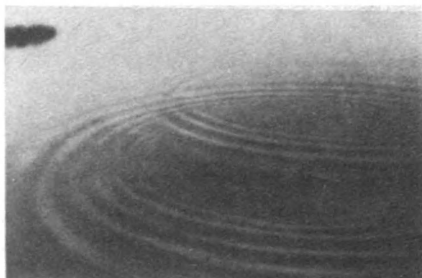
Необыкновенная **ФИЗИКА** обыкновенных **ЯВЛЕНИЙ**

2



ГЛАВА 15. ВОЛНОВЫЕ ИМПУЛЬСЫ И ПРОСТЫЕ ВОЛНЫ

Колебания окружают нас всюду. Вибрирующий воздух доносит звуки до наших ушей. Осциллирующие электрическое и магнитное поля приносят свет в наши глаза. У нас под ногами подобно гигантскому колоколу вибрирует Земля. Во всех этих случаях производимое



в одном месте возмущение приводит к передаче энергии и информации в другое место.

Однако в волнах никакого переноса вещества не происходит. В случае звуковых волн или волн на поверхности воды или земли возмущение распространяется благодаря изменениям, происходящим в упругой среде. При колебаниях воздуха его давление периодически повышается и понижается. Поверхность воды может подниматься и опускаться. Колебания земли могут происходить как вверх и вниз, так и вперед и назад вдоль ее поверхности, а также в ее глубине. Для распространения света никакой физической среды не требуется; осциллирующие электрическое и магнитное поля создают и поддерживают друг друга при движении волнового импульса.

Замечательная черта волнового движения заключается в том, что при благоприятных обстоятельствах оно может

переносить энергию на громадные расстояния с очень малыми потерями. Земля нагревается электромагнитным излучением, приходящим от Солнца. Мы в свою очередь можем послать радиоволны к планетам и за их пределы. Внезапный сдвиг земной поверхности в одном месте может вызвать колебания, способные разрушить дома, отстоящие на много миль. Подводное землетрясение в океане может создать цунами, которые иногда называют приливной волной.

Землетрясение 1 апреля 1946 года вблизи Алеутских островов всколыхнуло Тихий океан с такой амплитудой, что были разрушены селения на его берегах, отстоящих от эпицентра землетрясения на 4000 миль.

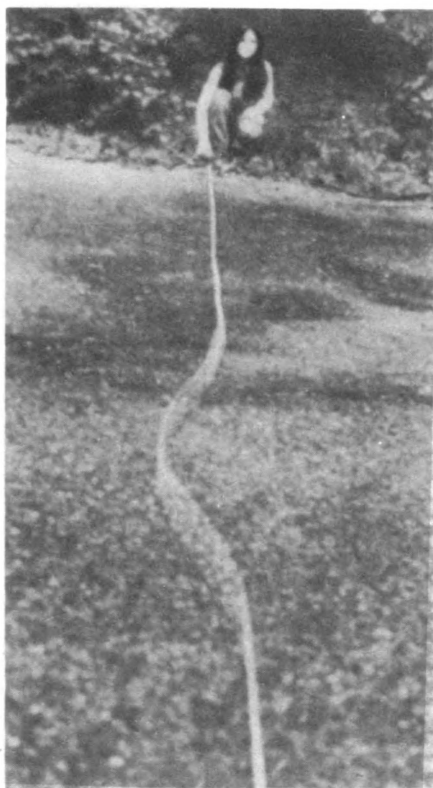
В этой главе мы изучим явления, связанные с распространением одиночных волновых импульсов и простых волн. Почему происходит распространение возмущения в упругой среде? Как зависит скорость распространения от свойств среды и самой волны? Что происходит, когда волна ударяется о границу среды или проходит из одной среды в другую, как, например, из воздуха в воду? Чем определяется переносимая волной энергия? В чем заключается «простота» простой волны? Каковы соотношения между частотой, длиной волны и скоростью в такой волне?

Мы установим немногочисленные основные принципы, управляющие волновым движением, изучая волны, которые легко получить и наблюдать в длинных веревках или на поверхности воды. Затем применим эти принципы для объяснения многих явлений, которые мы видим, слышим или ощущаем ежедневно.

ЗНАКОМСТВО С ЯВЛЕНИЯМИ

1. Можно наблюдать распространение и отражение волновых импульсов и волн, используя веревку или тяжелый провод, — чем он длиннее и тяжелее, тем лучше. Прикрепите один конец веревки к чему-либо неподвижному. Туго натяните веревку и пошлите вдоль нее импульс быстрым боковым движением руки. Обратите внимание, что происходит с импульсом, когда он достигает закрепленного конца. В частности, если вы посылаете импульс вдоль веревки по ее правой от вас стороне, то по какой стороне импульс возвращается?

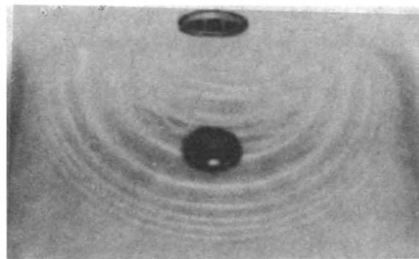
Понаблюдайте, что происходит со скоростью импульса, когда вы держите веревку натянутой слабо или очень сильно. Если у вас есть несколько веревок разной толщины, сравните скорости импульсов в легких и тяжелых веревках. Привяжите конец тяжелой веревки к очень длинной легкой бечевке или шнуру. Другой конец шнура привяжите к неподвижной опоре и пошлите им-



пульс вдоль веревки. Понаблюдайте, что происходит с импульсом, когда он переходит из одной среды в другую. Что происходит со скоростью импульса? Если в месте соединения появляется отраженный импульс, то возвращается он по той же стороне веревки или по противоположной?

Отличной «веревкой» для таких опытов может служить садовый шланг. Можно значительно изменить плотность шланга, просто заполняя его водой (при условии, что у вас есть накопник с пробкой). Понаблюдайте изменение скорости импульса, если шланг заполнен водой.

2. Много различных волновых явлений можно наблюдать на поверхности воды в стакане или в заполненной водой раковине умывальника, или, лучше



всего, в пруду. Дома используйте и умывальник, и мелкий противень. Понаблюдайте, как в частично заполненной раковине по поверхности воды разбегаются волны от падающих из крана редких капель. Обратите внимание на форму фронтов расходящихся волн и посмотрите, что происходит, когда они ударяются в стенки раковины.

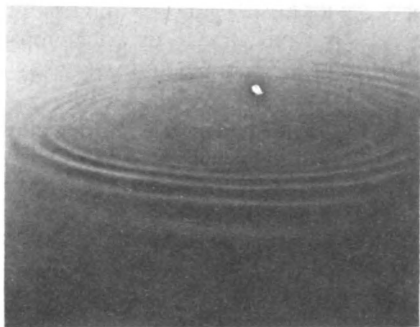
Используя большой плоский противень, легко контролировать глубину воды. Сделайте так, чтобы глубина не превышала 1 см. Приподнимая противень за один конец, можно получить постепенно изменяющуюся глубину. Посмотрите, как изменяется скорость ряби, когда глубина уменьшается до нуля.

В противне вы можете получить бегущие импульсы от точечного источника, погружая в воду палец, или можете создать волны с длинным прямым фронтом с помощью линейки или куска картона. Рябь будет отражаться от краев (границы) противня. Посмотрите

на отражения волн, ударяющихся в край под углом около 45° .

Вы можете в малом масштабе воспроизвести цунами, слегка приподняв один конец противня и затем быстро опуская его обратно. Обратите внимание, как мало энергии поглощается из бегущей волны, пока она не ударится о границу. Но даже и тогда, возможно, останется достаточно энергии, чтобы всплески прокатились много раз туда и обратно.

3. Если вы найдете подходящий пруд, многие из этих эффектов можно воспроизвести в большем масштабе без помех со стороны близких границ.



В частности, бросив в пруд камень, наблюдайте за амплитудой волнового фронта по мере его расширения. Попытайтесь оценить скорость ряби на поверхности пруда. Если вы будете ритмичными движениями опускать в воду палку или палец, получится стационарная цепочка волн, уходящих от источника. Испробуйте две разных частоты колебаний, удобных для измерения, — скажем, один раз и два раза в секунду. Оцените расстояния между гребнями в каждом случае. Соотношение расстояния между гребнями, частоты и скорости таково:

$$\text{расстояние} \cdot \text{частота} = \text{скорость}.$$

Грубые оценки этих величин достаточно хорошо показывают, что приведенное соотношение правдоподобно.

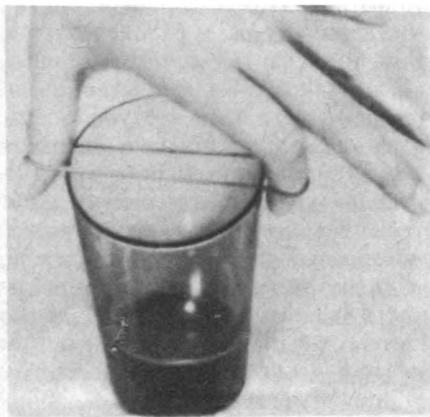
4. Если вы можете заполучить какой-либо струнный инструмент, наблюдайте, каковы соотношения между высотой издаваемого звука и длиной струны, ее натяжением, плотностью материала или толщиной струны. У скрип-



ки или гитары все струны имеют приблизительно одинаковую длину. Но звучащую часть струны можно укорачивать, прижимая струну к одному из ладов на грифе. Струны, издающие самый высокий и самый низкий звук, совершенно явно различаются по плотности или толщине. Высоту звука струны можно подстраивать, изменяя ее натяжение. Попробуйте варьировать все эти различные параметры до тех пор, пока не поймете, хотя бы качественно, как каждый из них влияет на высоту звука, издаваемого струной.

Поднимите крышку рояля и осмотрите устройство молоточков, струн и деки. Обратите внимание на то, что струны, издающие высокие и низкие ноты, различаются не только по длине, но также и по толщине или плотности. При открытой крышке рояля напойте или насвистите над струнами какую-нибудь ноту по возможности чисто и громко. Вы должны услышать, что по крайней мере одна из струн ответит вам звучанием на той же самой ноте.

Растяните резиновое колечко между пальцами и шипком заставьте его зву-



чать. Вы без труда можете изменять натяжение, чтобы получать более высокие или более низкие ноты. Эти звуки, скорее всего, будут слабыми и не очень музыкальными. Теперь прижмите растянутое резиновое кольцо к стеклянному стакану. Снова щипком возбуждите звучание резинки. Вы услышите совершенно другой звук.

Заметьте, что большинство струнных инструментов имеет деки или какого-либо типа воздушные резонаторные полости.

5. Чтобы вызвать и услышать эхо, вовсе не обязательно искать подходящую долину в горах. Для этой цели столь же хорошо подходит большая плоская кирпичная стена. Стена, однако, должна быть настолько большой, что, даже когда вы отойдете от нее на 30 или 40 метров, она все еще должна быть видна под значительным углом. Резко хлопните в ладоши и слушайте эхо, приходящее почти мгновенно. Когда вы будете уверены в том, что услышали его, можете измерить время, в течение которого звук от ваших ладоней возвращается обратно. Для этого ритмично хлопайте в ладоши, подобрав частоту так, чтобы эхо приходило в промежутках между хлопками. Если вы хлопаете три раза в секунду, то время распространения звука составляет $1/6$ секунды. Поэтому звук от ваших ладоней идет до стены в течение $1/12$ секунды (и в течение $1/12$ секунды возвращается назад). Вы можете найти скорость звука, измерив шагами расстояние до стены и разделив его на $1/12$ секунды.

6. Если у вас есть хорошая акустическая стереосистема, воспроизведите какую-нибудь из имеющихся испытательных записей. Большинство из них в течение нескольких секунд издают звук из каждого частотного диапазона, от очень низких звуков до очень высоких. Если вы достанете такую запись, испытайте вашу акустическую систему и собственный слух, чтобы определить свой диапазон частот, а также найдите частоты знакомых вам нот. Например, найдите частоту музыкальных нот С (до) или А (ля), по которым настраивают инструменты оркестра.

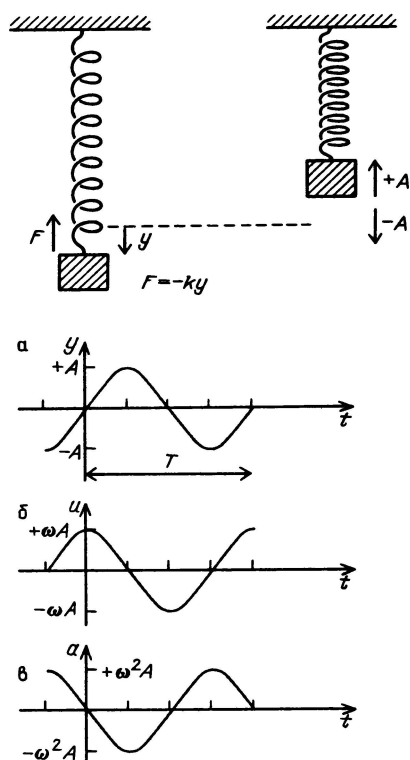
КОЛЕБАНИЯ ОСЦИЛЛЯТОРА

В главе 6 был описан частный вид колебаний грузика на пружине. Такое движение было названо простым гармоническим колебанием.

Вопрос 15-1

Что простого в этом движении и почему оно называется гармоническим?

Если справедлив закон Гука, а это так для большинства пружин (по крайней мере для малых смещений), действующая на груз возвращающая сила



пропорциональна смещению из положения равновесия. В результате смещение дается выражением

$$y = A \sin \omega t = A \sin (2\pi f t) = A \sin 2\pi (t/T).$$

Эта функция показана на рис. а. Частота в циклах за секунду обозначена f . Стандартное наименование в СИ для «циклов за секунду» — герц, сокращенно Гц. Круговая частота равна $\omega = 2\pi f$.

Период одного колебания равен $T = 1/f$. Амплитуда колебания A равна максимальному смещению. Грузик движется между $+A$ и $-A$.

В главе 6 было показано, что скорость грузика дается выражением

$$u = \Delta y / \Delta t = \omega A \cos \omega t.$$

(Обратите внимание, что скорость при колебаниях мы обозначили через u . Символ v сохраним для скорости волны или импульса, распространяющегося по системе осцилляторов.) Эта функция изображена на рис. 6. Заметьте, что как смещение, так и скорость представляют собой синусоидальные функции, но сдвинутые друг относительно друга по фазе на 90° . Когда грузик находится в положении равновесия ($y = 0$), его скорость максимальна по модулю, она положительна при движении вверх и отрицательна при движении вниз. С другой стороны, когда смещение максимально, скорость обращается в нуль.

Ускорение грузика дается выражением

$$a = \Delta u / \Delta t = -\omega^2 A \sin \omega t.$$

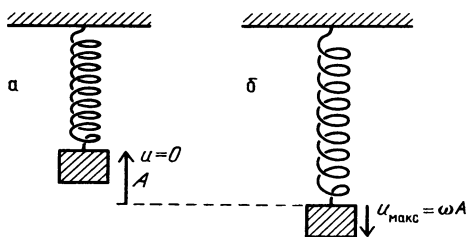
Эта функция показана на рис. 6. Это снова синусоидальная функция, сдвинутая по фазе на 90° относительно скорости и на 180° относительно смещения. Каждый раз, когда смещение равно нулю и скорость максимальна, ускорение грузика равно нулю. Когда смещение положительно и максимально, ускорение отрицательно и максимально по модулю. Этого и следовало ожидать, поскольку ускорение пропорционально действующей на грузик силе, которая в свою очередь пропорциональна смещению, взятому с противоположным знаком. Когда грузик смещен в некотором направлении, сила (и, следовательно, ускорение) имеет направление, противоположное направлению смещения, каждый раз стремясь вернуть грузик в его равновесное положение.

Если грузик сместить на расстояние A и затем освободить, он будет осциллировать так, как было описано выше. Период колебаний определяется жесткостью пружины k и массой грузика m . Жесткость пружины — это постоянная в законе Гука: $F = -ky$. Период этих

свободных колебаний равен $T = 2\pi \sqrt{m/k}$. Обратная величина равна их частоте: $f = (1/2\pi) \sqrt{k/m}$. Это довольно разумный результат, так как жесткая пружина с большой постоянной k будет стремиться быстро вернуть грузик в положение равновесия и тем самым способствовать высокой частоте колебаний. С другой стороны, массивный груз обладает большой инертностью, его движение будет замедленным и частота колебаний — низкой.

Однако осциллирующая система не обязательно должна совершать колебания на своей собственной частоте; вы можете раскачивать детские качели с любой частотой, на какую вы физически способны. И не обязательно раскачивающее движение должно быть синусоидальным. Но если вы раскачиваете качели на их собственной частоте или даже сообщаете им короткие толчки, следующие с этой частотой, реакция качелей будет гораздо значительней. Говорят, что в этом случае частота вынуждающей силы находится в резонансе с собственной частотой. Соответствующая амплитуда колебаний может стать очень большой даже при слабых толчках. Конечно, именно это и происходит, когда вы раскачиваете качели на нужной частоте.

В отсутствие трения энергия осциллятора, совершающего колебания на собственной частоте без вынуждающей силы, должна оставаться постоянной.



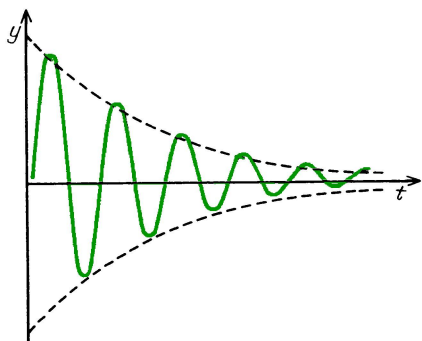
В некоторые моменты времени эта энергия целиком кинетическая, в другие — потенциальная. При максимальных отклонениях грузика, когда его скорость равна $u = 0$, потенциальная энергия равна $W_{\text{пот}} = (1/2) k y_{\text{макс}}^2 = (1/2) k A^2$ (рис. а). Когда грузик проходит через положение равновесия, его потенциальная энергия равна нулю, а ско-

рость максимальна. Полная энергия груза в этой точке равна $W_{\text{кин}} = (1/2)mv_{\text{макс}}^2 = (1/2)m\omega^2 A^2$ (рис. б).

Вопрос 15-2

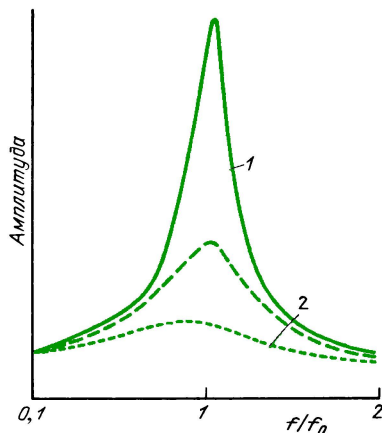
Не противоречат ли друг другу приведенные выражения? Равна ли максимальная потенциальная энергия максимальной кинетической энергии?

В большинстве физических систем присутствует некоторое трение. При каждом колебании осциллятора некоторая часть энергии теряется и поэтому амплитуда становится все меньше и меньше. График, показывающий типичное затухание колебаний пружины, приведен на рисунке. Обусловленное трением затухание можно предотвратить, сообщая



Затухание амплитуды колебаний пружины при наличии трения

осциллятору достаточную энергию на его собственной частоте. Если осциллятор получает в течение каждого периода большие энергии, чем нужно для компенсации потерь на трение, то амплитуда колебаний будет постепенно нарастать. Этот рост имеет предел, потому что потери на трение обычно увеличиваются с увеличением амплитуды и скорости. Когда осциллятор получает энергию в резонансе с собственной частотой, устанавливается столь большая амплитуда, что потери энергии в точности компенсируются энергией, получаемой за период. На следующем рисунке показана амплитуда как функция частоты вынуждающей силы для нескольких осцилляторов. Во всех случаях имеет место резонансное увеличение амплитуды,



При частоте, равной собственной частоте колебаний, наступает резонанс. Система реагирует на резонансную вынуждающую силу колебаниями большой амплитуды. 1 — малые потери энергии из-за трения, 2 — большие потери

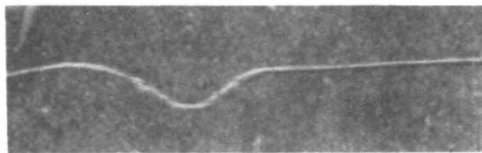
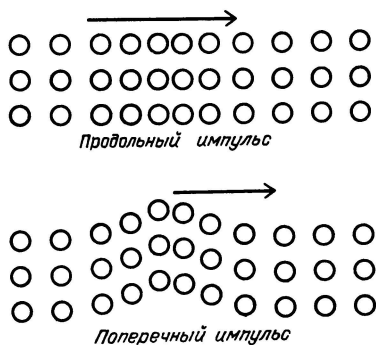
когда частота вынуждающей силы приближается к собственной частоте осциллятора. При больших потерях на трение кривая резонанса широкая и не поднимается до больших значений.

Резонансные явления можно наблюдать в системах многих различных типов. Ваш радио- или телевизионный приемник резонансным образом реагирует на электромагнитные колебания. В главе 22 мы изучим, как такие радиоволны создают и перехватывают. Настраивая свой приемник, вы изменяете его собственную частоту колебаний так, чтобы она совпала с частотой той радиостанции, передачу которой вы хотите прослушать. Очень небольшой энергии, извлекаемой из антенны на этой частоте, достаточно для того, чтобы привести остро настроенную электрическую цепь вашего приемника в колебания со значительным напряжением. Раньше, когда вы пели какую-то ноту над открытым роялем, ваш голос обеспечивал вынуждающую силу определенной частоты для осцилляторов, которые представляют собой натянутые струны. Струна, собственная частота которой совпадала с частотой вашего голоса, приводилась в резонансное колебание. Говорят, когда солдаты маршируют через пешеходный мост, они должны идти не в ногу, чтобы частота их шагов слу-

чайно не оказалась близка к одной из собственных частот колебаний подвешенного моста. Случалось, что подвесные мосты разрушались даже из-за того, что их колебания возбуждались сильным ветром, который благодаря аэродинамическим свойствам моста поставлял энергию на резонансной частоте.

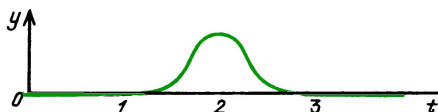
РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ВДОЛЬ ЛИНИИ

Рассуждая на атомном уровне, можно сказать, что большинство частиц находится в потенциальных ямах и при малых возмущениях ведет себя так, как если бы они удерживались пружинами. Когда кусок металла растягивают или сжимают, каждый атом немного сдвигается из своего равновесного положения. Движение любого атома сказывается на его соседях, а их движение в свою очередь влияет на их соседей. Результирующее смещение распространяется в среде в виде импульса. Если смещение каждой частицы происходит вдоль одной линии с направлением распространения импульса, волну называют *продольной*. Именно так распространяется звук. Ряд областей высокого и низкого давления, или сжатий и разрежений, распространяется от источника. Когда вы забиваете гвоздь молотком, продольный импульс высокой плотности пронесется вдоль гвоздя, загоняя его конец глубже в дерево. Смещение среды может также вызвать импульс, распространяющийся перпендикулярно к смещению. Именно такой эффект вы наблюдали, когда резким боковым движением посылали импульс вдоль веревки. Подобное волно-



вое движение называют *поперечным*. Как мы увидим в главе 22, электромагнитное излучение поперечно. Направления электрического и магнитного полей перпендикулярны к направлению, в котором они распространяются. При землетрясениях в земной коре возникают как продольные, так и поперечные волны. Волны на воде обычно представляют собой смесь продольных и поперечных. Каждая отдельная капля воды, возбужденная проходящей волной, совершает движение по эллипсу, перемещаясь как вверх и вниз, так и вперед и назад.

Независимо от того, является ли волновое движение продольным или поперечным, движение каждой отдельной частицы можно описать, выразив ее смещение как функцию времени. Движение частицы вовсе не обязательно будет синусоидальным, и даже обычно оно не бывает таковым. На рисунке показан

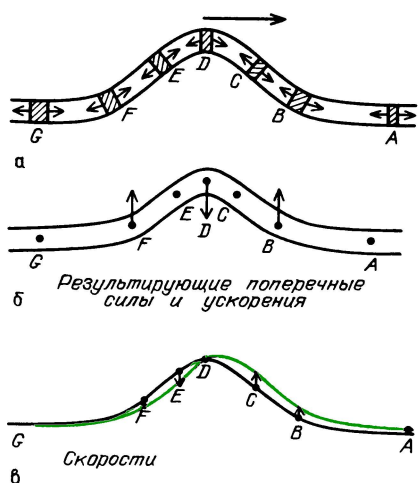


Смещение отдельной частицы веревки, находящейся в точке x_0 , как функция времени при прохождении поперечного импульса. При $t = 0$ частица была неподвижна, при $t = 2$ частица была смещена на максимальное расстояние от своего положения равновесия

график смещения как функция времени, $y(t)$, для частицы веревки, вдоль которой распространяется импульс. Этот график выглядит в точности как моментальный снимок веревки с распространяющимся импульсом. Это вполне разумно, поскольку моментальный снимок $y(x)$ показывает, что делает каждая отдельная частица в предшествующий или последующий момент времени.

Моментальный снимок импульса в веревке, показывающий зависимость $y(x)$, не дает никакой информации о направлении распространения импульса.

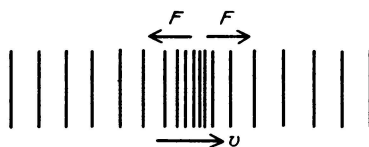
Откуда сам импульс «узнает», в каком направлении ему двигаться? Заметьте, что веревка натянута, и каждый отдельный ее участок подвержен противоположным силам натяжения, действующим на него с каждой стороны. Пока веревка прямолинейна, действующие на каждый участок силы уравновешены. Однако в тех местах, где веревка искривлена, действующие с двух сторон участка силы равны по модулю, но не лежат вдоль одной прямой. Поэтому возникнет результирующая поперечная сила. На рис. а показаны пары сил натяжения, действующие на некоторые



участки веревки, когда по ней пробегает импульс. На рис. б показаны результирующие поперечные силы. В точке А, куда импульс еще не прибыл, противоположные силы натяжения уравновешиваются. В точке В есть результирующая сила, направленная вверх. Она стремится поднять участок, прилегающий к этой точке, и сообщить ему направленную вверх скорость. В точке С, где форма импульса прямолинейна, противоположные силы натяжения уравновешиваются и результирующая сила равна нулю. Однако участок около точки С должен все еще двигаться вверх благодаря предшествовавшему ускорению. Как только импульс искривляется вниз, как на участке около точки D, появляется направленная вниз результирующая сила, которая стремится остановить движение вверх этого участка веревки. На участке около точки E веревка дви-

жется вниз, но результирующая сила равна нулю. Далее от этой точки, на участок около точки F, действует направленная вверх результирующая сила, замедляющая движение веревки вниз и приводящая ее в состояние покоя. Такая же последовательность событий повторяется для каждого участка веревки, через который проходит импульс. На рис. в показано, как результирующие поперечные скорости точек веревки формируют импульс, который распространяется вправо.

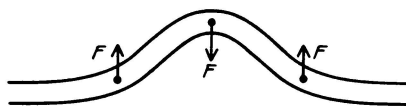
Рисунки такого же типа можно нарисовать и для продольного импульса. Вместо поперечных смещений график может показывать смещения вдоль линии распространения импульса. График такого же вида будет изображать изменения давления или плотности вдоль направления распространения. При прохождении импульса высокого давления на каждый отдельный участок будет действовать результирующая сила лишь тогда, когда давление с одной его стороны больше, чем с другой. На рисунке



показаны результирующие силы, действующие на участок среды при прохождении через него импульса высокого давления. И снова, после того как импульс минует участок, действие сил давления в одном направлении в конечном счете уравновешивается силами противоположного направления.

Вопрос 15-3

Что произойдет, если веревку оттянуть, придав ей форму, показанную на рисунке, а затем освободить? Как импульс «узнает», в какую сторону ему распространяться?



СКОРОСТЬ ВОЛНОВОГО ИМПУЛЬСА

Скорость распространения импульса зависит от восстанавливающей силы, которая возвращает каждый возмущенный участок назад, к положению равновесия. Эта скорость должна также зависеть от массы возмущенного участка. Как вы видели в «Знакомстве с явлениями», чем сильнее натяжение веревки, тем быстрее распространяется волновой импульс. Чем больше плотность веревки, тем медленнее перемещается импульс. Например, импульс в заполненном водой шланге движется значительно медленнее, чем в пустом и легком шланге. Скорость импульса может также зависеть от его формы. Может оказаться, что большие смещения движутся быстрее или медленнее, чем малые смещения. Возможно также, что очень острые короткие импульсы движутся с иной скоростью, нежели широкие и плавные.

Рассмотрим сначала простейшую ситуацию, когда скорость распространения возмущения в среде зависит только от характеристик самой среды и не зависит от формы или размера возмущения. В таком случае искомая скорость представляет собой функцию только восстанавливающей силы, создаваемой средой, и плотности среды: $v = f(F, \mu)$. Для импульса, распространяющегося в одномерной системе, плотность массы μ должна быть *массой единицы длины* (линейной плотностью). При таких предположениях мы можем вывести формулу для скорости импульса, не вникая в детали связанного с его распространением физического механизма.

Следующие несколько шагов могут создать впечатление, будто мы получаем нечто почти из ничего. Используемый метод называется *анализом размерностей*. Предположим, нам известно, что искомая скорость должна быть некоторой функцией силы и линейной плотности массы: $v = f(F, \mu)$. Вопрос состоит в том, что это за функция. Может быть, скорость зависит от квадрата восстанавливающей силы или от кубического корня линейной плотности массы? Какой бы ни была эта функцио-

нальная зависимость, она должна приводить к величине, имеющей *размерность* скорости. Предположим, что скорость зависит от силы в степени a и от линейной плотности массы в степени b :

$$v = F^a \mu^b.$$

Теперь выразим размерности скорости, силы и линейной плотности через размерности массы, длины и времени:

$$\begin{aligned} L^1 T^{-1} &= (MLT^{-2})^a (ML^{-1})^b = \\ &= M^{a+b} L^{a-b} T^{-2a}. \end{aligned}$$

Поскольку размерность величины, стоящей в одной части равенства, должна быть такой же, как и размерность величины, стоящей в другой части (в обоих случаях это размерность скорости), то, следовательно,

$$a + b = 0, \quad a - b = 1, \quad -2a = -1.$$

Поэтому

$$a = 1/2, \quad b = -1/2.$$

Теперь мы знаем вид функциональной зависимости скорости импульса от восстанавливающей силы и от линейной плотности массы:

$$v \sim \sqrt{F/\mu}, \quad v = K \sqrt{F/\mu}.$$

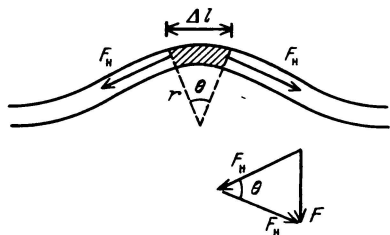
Анализ размерностей приводит к требованию, чтобы скорость импульса в среде была пропорциональна квадратному корню из восстанавливающей силы и обратно пропорциональна квадратному корню из линейной плотности массы. Это очень общий результат, применимый к любому волновому движению, удовлетворяющему нашим исходным предположениям. Импульсы должны быть достаточно малыми и достаточно широкими, чтобы их скорость не зависела от характеристик самого импульса. Однако анализ размерностей не может дать нам значение коэффициента пропорциональности.

Вопрос 15-4

Согласуется ли качественно выведенная выше формула для скорости импульса с результатами ваших наблюдений в «Знакомстве с явлениями»?

■ Дополнительный материал

Теперь попытаемся вывести скорость импульса в *натянутой веревке*, обращаясь к динамике реальных процессов. На рисунке показан идеализированный импульс в веревке, сила натяжения которой равна F_H . Предполагаем, что импульс имеет достаточно



плавную форму, так что вблизи вершины импульса ее можно аппроксимировать дугой окружности. Небольшой участок веревки на этой дуге имеет длину Δl и массу $\mu\Delta l$. Этот участок тянут в обоих направлениях силы натяжения веревки, но эти две силы направлены не совсем по одной прямой. Поскольку силы натяжения F_H всегда направлены вдоль веревки, действующая на каждый конец дуги сила направлена по касательной к дуге и поэтому перпендикулярна к радиусу. Результирующая сила, действующая на малый участок, направлена по радиусу вниз и имеет следующую величину:

$$F = 2F_H \sin \frac{\theta}{2} \approx F_H \theta.$$

Здесь использовано справедливое для малых углов приближение, что $\sin \theta \approx \theta$. Угол θ равен отношению стягиваемой им дуги к радиусу. Поэтому

$$F = F_H \frac{\Delta l}{r}.$$

Эта радиальная восстанавливающая сила должна играть роль центростремительной силы, действующей на рассматриваемый малый участок веревки.

Вопрос 15-5

Центробежная сила нужна для того, чтобы заставить движущееся тело следовать по круговому пути. В данном случае движется импульс, но разве каждый отдельный участок веревки движется по дуге, а не совершает просто движений вверх и вниз?

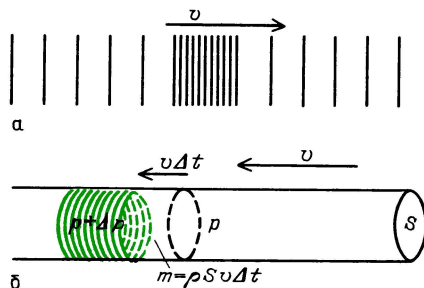
Теперь приравняем центростремительную силу и радиальную восстанавливающую силу:

$$F_{\text{ц.с.}} = \frac{mv^2}{r},$$

$$\frac{(\mu\Delta l)r^2}{r} = F_H \frac{\Delta l}{r}, \quad v = \sqrt{\frac{F_H}{\mu}}.$$

Отметьте, что эта формула согласуется с той, что была выведена на основе анализа размерностей. В данном случае восстанавливающая сила заменяется действующей силой натяжения веревки. Как мы видели, восстанавливающая сила пропорциональна натяжению веревки. В этом примере коэффициент пропорциональности равен $K = 1$. Мы получили формулу, согласно которой скорость импульса не зависит от его формы. Но обратите внимание на ограничения, при которых она справедлива. Амплитуда импульса должна быть мала, и его форма должна быть настолько гладкой, чтобы $\sin \theta$ можно было заменить на θ и чтобы натяжение веревки можно было считать постоянным вдоль всей веревки, включая область, занимаемую импульсом.

Найдем теперь скорость продольного импульса. Такой импульс может распространяться в газе, жидкости и даже твердом теле. (Твердое тело может переносить как поперечные, так и продольные волны; в идеальном газе могут существовать только продольные волны сжатия; волны в большинстве жидкостей обычно продольны, за исключением волн на поверхности раздела жидкостей, как, например, на границе воды и воздуха.) Для упрощения вывода будем предполагать, что вправо движется прямоугольный импульс *равномерного* давления, как показано на рис. а. И на этот раз



перейдем в другую систему отсчета и будем двигаться вместе с импульсом. В этой системе отсчета, связанной с областью высокого

давления, нам кажется, что жидкость (или газ) движется справа налево со скоростью v . Когда жидкость попадает в область высокого давления, ее скорость уменьшается, так как она встречает силу, направленную вправо. Выберем некоторый объем жидкости и применим к нему второй закон Ньютона для момента времени, когда этот объем только что вошел в область высокого давления. Пусть этот объем жидкости имеет форму цилиндра, как показано на рис. 6, с площадью поперечного сечения S и длиной $v\Delta t$. Короткий интервал Δt как раз равен тому промежутку времени, в течение которого этот цилиндр целиком входит в область высокого давления. Масса жидкости в объеме этого цилиндра равна $\rho S v \Delta t$. (Здесь мы используем *объемную* плотность массы ρ , измеряемую в кг/м^3 .) Пока выбранный объем жидкости (цилиндр жидкости) входит в область высокого давления, давление на его левое основание равно $p + \Delta p$, в то время как давление справа равно просто p . Поэтому действующая на цилиндр результирующая сила направлена вправо и равна $F_{\text{рез}} = S \Delta p$. Благодаря действию этой силы цилиндр жидкости испытывает отрицательное ускорение, равное $-\Delta v / \Delta t$. Второй закон Ньютона в применении к этому случаю дает

$$F_{\text{рез}} = ma, \quad S \Delta p = \rho S v \Delta t (-\Delta v / \Delta t).$$

Это выражение приводится к виду

$$\rho v^2 = -\frac{\Delta p}{\Delta v / v}.$$

Относительное изменение скорости $\Delta v / v$ следующим образом связано с относительным изменением объема цилиндра жидкости:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{S \Delta v \Delta t}{S v \Delta t} = \frac{\Delta v}{v}.$$

Вопрос 15-6

Почему должен изменяться объем цилиндра жидкости, когда он входит в область высокого давления?

Вместо относительного изменения скорости можно подставить относительное изменение объема:

$$\rho v^2 = -\frac{\Delta p}{\Delta V / V}.$$

Хотя на первый взгляд это выражение вы-

глядит очень сложным, с его правой частью мы уже встречались в главе 4. Отношение избыточного давления к относительному изменению объема называется *модулем объемного сжатия* B . Он отрицателен, поскольку увеличение давления ($\Delta p > 0$) приводит к уменьшению объема ($\Delta V < 0$).

Теперь имеем простое выражение для скорости продольного импульса через модуль объемного сжатия:

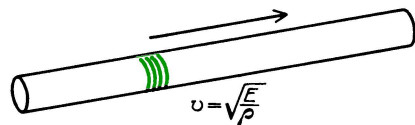
$$v = \sqrt{B / \rho}.$$

Обратите внимание, что мы снова получаем формулу, согласно которой скорость пропорциональна квадратному корню из силы, деленной на плотность.

Вопрос 15-7

В соответствии с нашим анализом размерностей скорость должна быть пропорциональна квадратному корню из силы, деленной на линейную плотность. В только что выведенную формулу входит величина, имеющая размерность давления, а не силы, и объемная (а не линейная) плотность массы. Все ли здесь в порядке?

Для импульса, распространяющегося вдоль твердого стержня, такой же анализ размерностей привел бы к формуле для скорости с модулем Юнга в числителе и объемной плотностью массы



в знаменателе. Хотя в этом выводе предполагалась особенно простая форма импульса высокого давления, полученная формула справедлива для импульса любой формы, лишь бы модуль объемного сжатия оставался постоянным. Для импульса, берущего начало в одной *точке* твердого тела и затем распространяющегося по всему объему, нужно использовать более сложное выражение, поскольку участки твердой среды подвергаются не только сжатию, но также и действию тангенциальных (или сдвиговых) сил.

Модуль объемного сжатия газа (при адиабатических изменениях) равен γp , где γ — отношение удельных теплоемкостей, которое было определено в главе 13, и p — давление. Значение γ зависит от строения молекулы газа и от числа атомов в ней. Для одноатомных газов $\gamma = 5/3$. Для двухатомных газов, к которым относится воздух, $\gamma = 7/5$.

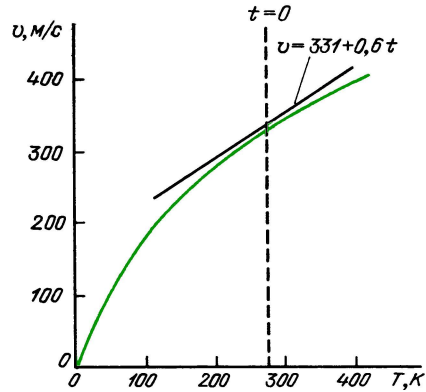
Формулу для скорости звука в газе можно преобразовать так, чтобы в нее входили более привычные характеристики газа. Из уравнения состояния газа имеем $p = NkT/V$. Плотность газа равна $\rho = m/V$. Отношение числа молекул в образце к массе газа равно отношению числа молекул в моле к массе 1 моля:

$$N/m = N_A/M,$$

где M — масса 1 моля. Подставим эти значения в нашу формулу для скорости звука в газе:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{NkT/V}{m/V}} = \\ &= \sqrt{\gamma kT \frac{N}{m}} = \sqrt{\gamma kT \frac{N_A}{M}}. \end{aligned}$$

Обратите внимание, что скорость продольного импульса в газе, равная скорости звука в газе, пропорциональна квадратному корню из термодинамической температуры и ряду констант, характеризующих тип газа. Подставим их значения для воздуха и посмотрим, что дает эта формула для скорости звука в обычных условиях. Отношение удельных теплоемкостей для воздуха равно $\gamma = 1,4$, постоянная Авогадро равна $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹, постоянная Больцмана равна $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Масса 1 моля смеси кислорода и азота, из которых состоит воздух, равна $M = 0,0288$ кг/моль. Подставляя эти значения в уравнение, получаем, что скорость звука в воздухе равна $v = 20,1\sqrt{T}$ м/с. При комнатной температуре, когда $T = 293$ К, скорость звука равна 344 м/с. Можно получить удобное приближение для этой формулы, если взять значение скорости при 0 °С и прибавлять небольшую величину на каждый градус выше 0 °С. Такая приближенная формула дает



Скорость звука в воздухе как функция температуры

нам $v = (331 + 0,6t)$ м/с. В этой формуле t — температура, измеренная по шкале Цельсия.

Вопрос 15-8

Насколько хороша эта приближенная формула при комнатной температуре 20 °С?

Скорость звука в различных веществах

Вещество	v , м/с
Воздух (20 °С)	343
Гелий (20 °С)	981
Водород (20 °С)	1328
Углекислый газ (20 °С)	267
Вода	1490
Морская вода	1530
Ртуть	1450
Железо	~ 5000
Стекло	~ 4500
Люцит	~ 1800
Алюминий	~ 5000

Здесь приведены значения скорости звука в различных веществах. Обратите внимание, насколько быстрее распространяется звук в водороде и гелии по сравнению с воздухом. Это различие скоростей обусловлено большой разницей атомных масс. Заметьте также, что скорость звука в металлах и воде значительно больше, чем в воздухе. Хотя плотность металла много больше, чем воздуха, отношение их модулей объемного сжатия еще больше. Если в нашем распоряжении есть длинная труба (например, перила) или участок железнодорожного пути (когда поблизости

нет поездов), вы можете наблюдать относительную скорость звука в стали и в воздухе. Приложите ухо к рельсу и попросите товарища ударить по рельсу на расстоянии по крайней мере от 30 до 40 метров. Сразу же, по вашим ощущениям, будет слышен звук, пришедший по стали, но звук того же удара, переданный по воздуху, вы услышите с небольшим запаздыванием.

ЦУГИ ВОЛН

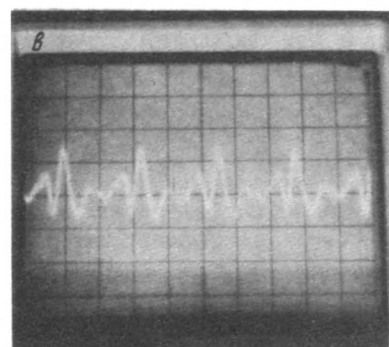
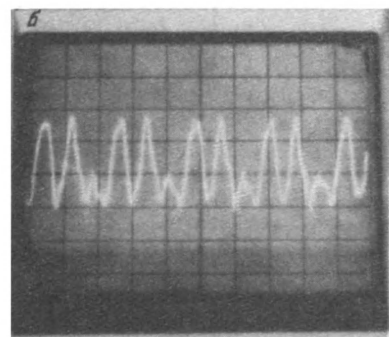
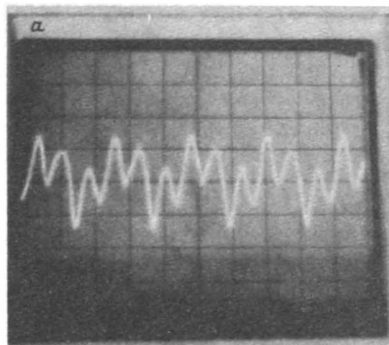
В большинстве случаев посылаемые нами сигналы, включая звуковые, радио и световые, состоят из длинных последовательностей импульсов. Обычно каждый импульс имеет приблизительно такую же форму и амплитуду, как и его ближайшие соседи. Наиболее часто встречается форма в виде синусоидальной волны.

Вопрос 15-9

Почему столь широко распространены сигналы в виде синусоидальной волны?

В следующей главе мы увидим, что волны сложной формы можно рассматривать как суперпозицию синусоидальных волн с различными амплитудами и частотами. Физическая природа этого понятия многим знакома из музыкальной терминологии — музыкальные звуки одной и той же высоты и громкости отличаются друг от друга по числу гармоник, сопровождающих основной тон. На приводимых фотографиях показаны волновые цуги, производимые различными музыкальными инструментами. Теперь мы собираемся ввести определения и вывести некоторые соотношения, используя в качестве примера синусоидальную волну. Эти определения и соотношения будут применимы к бегущим волнам общего вида, независимо от формы их составляющих отдельных импульсов.

Для начала будем рассматривать только волны, распространяющиеся по единственному направлению, как, например, волны в веревке или в параллельном пучке света или звука. Ось y изображает либо действительное сме-



Осциллограммы волновых импульсов, создаваемых звуками флейты (а), голоса (б) и трубы (в). Все звуки соответствуют среднему A с частотой 440 Гц. Скорость развертки составляла 2 мс/см

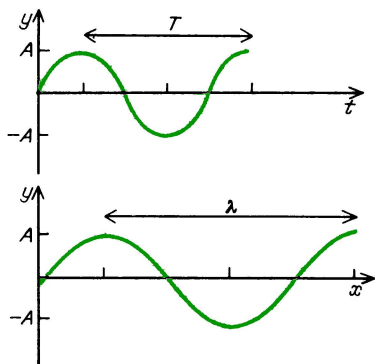
щение веревки, перпендикулярное к направлению волны, либо давление в продольной волне, либо напряженность электрического поля в электромагнитной волне. В каждой отдельной точке на линии распространения волны любая из этих физических величин совершает колебания от максимального положительного значения до максимального по модулю отрицательного значения. В каж-

дой точке рассматриваемая физическая величина представляет собой синусоидальную функцию времени: $y = A \sin \omega t$. Максимальное смещение A из положения равновесия называется амплитудой. С течением времени $\sin \omega t$ осциллирует между значениями $+1$ и -1 с круговой частотой ω , измеряемой в секундах в минус первой степени. Частота в циклах за секунду, или герцах, равна $f = \omega/2\pi$.

Вопрос 15-10

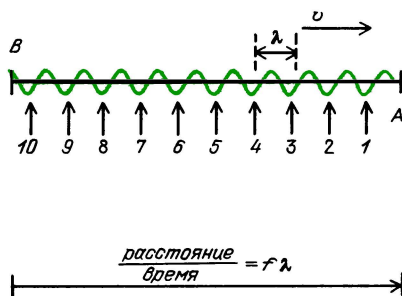
Как называется движение такого типа?

На рисунке изображены графики $y(t)$ и $y(x)$. Первый из них характеризует поведение некоторой отдельной точки x



с течением времени, когда волна проходит через нее. Второй график дает моментальную фотографию отрезка линии в некоторый определенный момент времени. На каждом рисунке даны обозначения некоторых величин. Период T равен промежутку времени, в течение которого y совершает полный цикл изменения от значения $+A$ до $-A$ и обратно до $+A$. Если период колебания равен $0,1$ секунды, то в течение 1 секунды должно происходить 10 таких колебаний. Частота равна 10 Гц ($f = 1/T$). Длина волны λ равна расстоянию между соседними гребнями или между любыми ближайшими точками на линии распространения, в которых y имеет одно и то же значение и одинаковый наклон.

Для бегущих волн существует фундаментальное соотношение между скоростью, длиной волны и частотой. Это



Через точку A за 1 секунду пройдет f волн

соотношение показано на рисунке, где отмечено число полных волн, которые пройдут через какую-либо отдельную точку, например A , за 1 секунду. Это число как раз равно частоте f . Первая из этих волн уже находится в отмеченной точке. Если проходит 10 волн в секунду и длина волны равна 1 см, то последняя волна, которая пройдет отмеченную точку через 1 секунду, находится сначала в точке B на расстоянии 10 см. Поэтому скорость волны должна быть равна 10 см/с. В общем случае

$$\lambda f = v.$$

Воспользуемся этим соотношением, чтобы найти длину волны или частоту некоторых знакомых волн. Как мы видели, скорость звука в воздухе при комнатной температуре равна 344 м/с. Частота музыкальной ноты A , по которой настраивают инструменты оркестра, равна 440 Гц. В соответствии с нашим уравнением

$$\lambda \cdot 440 \text{ Гц} = 344 \text{ м/с},$$

$$\lambda = 0,78 \text{ м} = 78 \text{ см}.$$

Как можно видеть, звуковые волны имеют размеры того же порядка, что и тело человека. Ниже приведены различные частоты и соответствующие им длины волн в спектре слышимых звуков. Для человеческого слуха спектр слышимых звуков простирается от 20 до 20000 Гц. В действительности эти пределы доступны только очень молодым людям. Мужчины начинают утрачивать чувствительность к высоким звукам раньше, чем женщины. Большинство мужчин среднего возраста не могут воспринимать ноты, более высо-

Диапазон звуковых частот и соответствующих им длин волн

	f , Гц	λ , м
Нижний предел слышимых звуков	16	21,5
Самая низкая нота рояля	27,5	12,4
Фон сети переменного тока	60	5,7
Нижний предел для настольных радиоприемников	100	3,4
«Среднее А» для настройки оркестра	440	$78 \cdot 10^{-2}$
«Верхнее С»	1048	$33 \cdot 10^{-2}$
Самая высокая нота рояля	4186	$8,2 \cdot 10^{-2}$
Верхний предел для звуков, воспроизводимых кассетными магнитофонами	$8 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Верхний предел слышимых звуков	$2 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
Ультразвук, используемый летучими мышами	$1 \cdot 10^5$	$0,34 \cdot 10^{-2}$
Ультразвук, используемый для диагностики в медицине	$2 \cdot 10^6$	$0,17 \cdot 10^{-3}$ (в воздухе) $0,74 \cdot 10^{-3}$ (в воде или в тканях организма)

кие, чем приблизительно 12 000 Гц. После 50 лет как мужчины, так и женщины утрачивают большую часть верхней области спектра. Обратите внимание на то, что воспринимаемый нами диапазон значительно больше того небольшого диапазона частот (лежащего обычно между 100 и 1000 Гц), который мы используем для речи или пения. Недорогие акустические системы небольших радиоприемников или магнитофонов обычно воспроизводят звуки только в диапазоне от 100 или 200 Гц приблизительно до 6000 Гц. Хотя в этом ограниченном диапазоне частот можно воспроизвести речь и музыку, звук кажется утратившим «качество», «присутствие», «насыщенность». Эти качественные слова описывают ваши ощущения. В следующей главе мы узнаем, что такое обертоны, или высокочастотные компоненты, производимых нами звуков. Когда эти высокие частоты обрезаны, музыкальные звуки утрачивают свою остроту, или яркость. Когда обрезаны низкие частоты, наш слух правильно воспринимает высоту тона, но звучание нот кажется приглушенным или монотонным.

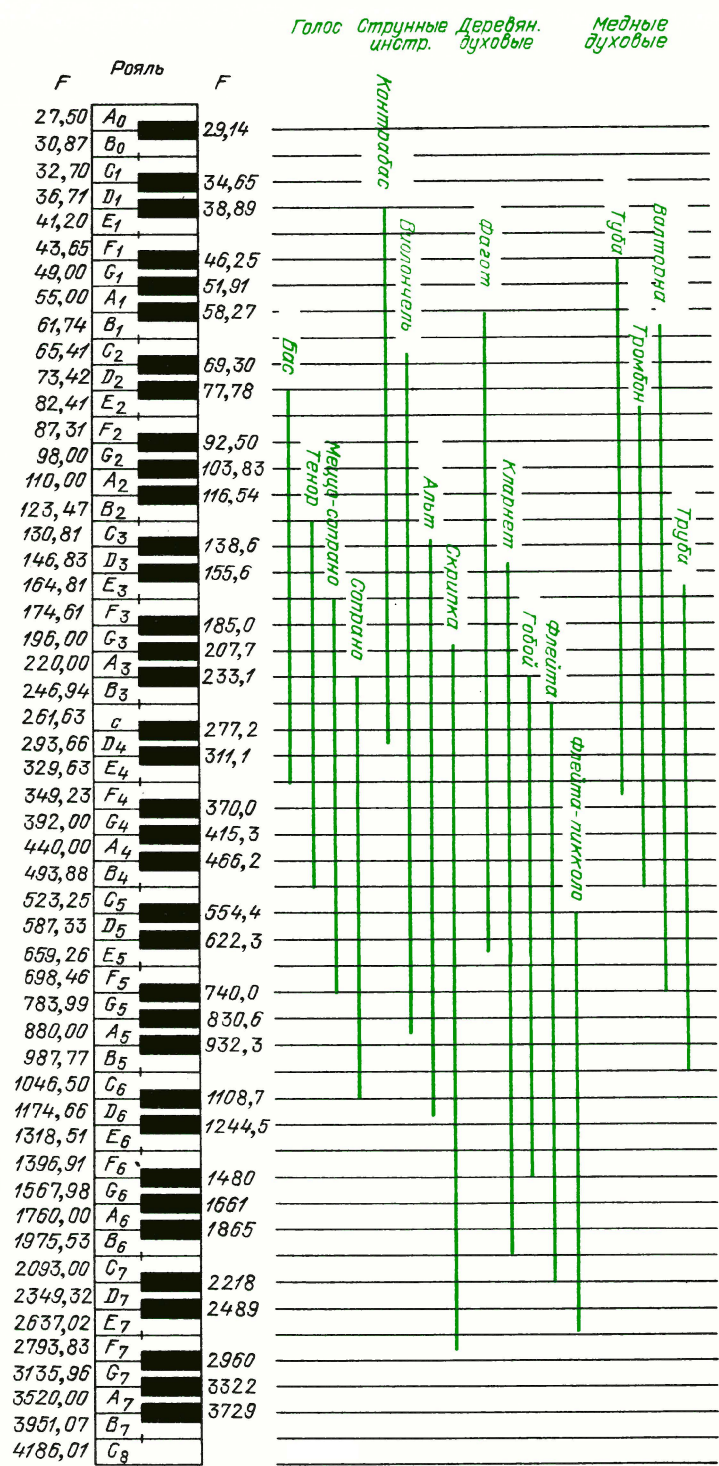
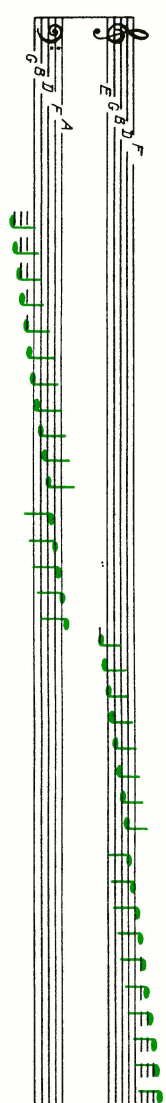
Некоторые существа могут производить и слышать звуки далеко за пределами воспринимаемого человеком диапазона частот. Летучие мыши и дельфины используют звук как разновид-

ность радара (называемую сонаром) для определения положения предметов.

Вопрос 15-11

Как будет показано ниже, можно «видеть» предмет в результате отражения направленных на него волн лишь тогда, когда размеры предмета больше, чем длина волны. Каковы размеры предметов, положение которых могут определить летучие мыши с помощью своего сонара с частотой звука 100 000 Гц? Дельфины также используют частоты вплоть до 100 000 Гц. Каков минимальный размер предметов, которые могут обнаружить дельфины? (Он не таков, как для летучих мышей! Не забудьте, что дельфины используют свой сонар под водой.) Соответствует ли минимальный размер в каждом из этих случаев предметам, представляющим интерес?

На следующей странице изображена клавиатура рояля с указанием частот и музыкальных обозначений для большинства клавиш. Вы можете увидеть здесь и приближенный диапазон частот для других инструментов и голосов. Мы еще обратимся к этому рисунку в одном из последующих разделов при описании других характеристик музыкальных звуков.



Другой тип волн, с которым мы имеем дело в повседневной жизни, — это электромагнитные волны, включающие в себя радиоволны и видимый свет. Многие детали этого излучения будут описаны в главе 22. Однако сейчас, раз уж зашел разговор о волнах, найдем длины волн и частоты для некоторых представляющих интерес электромагнитных волн. Середина шкалы вашего АМ-радиоприемника, например, соответствует частоте 1 мегагерц, или 1000 килогерц ($1 \cdot 10^6$ Гц). Любое электромагнитное излучение, в том числе свет и радиоволны, распространяется в вакууме с одной и той же скоростью. Во многих случаях можно считать, что скорость будет такой же и в воздухе. Благодаря особой роли, которую играет эта скорость (мы в этом уже убедились в главе о теории относительности), для нее используется специальный символ c . Для всех наблюдателей

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Для средней частоты АМ-радиоприемника

$$\lambda \cdot 1 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с,}$$

$$\lambda = 300 \text{ м.}$$

Длина волны диапазона средних волн обычного радиоприемника составляет около 1/6 мили. Длина волны видимого света чуть меньше минимальных размеров предмета, который можно увидеть с помощью обычного микроскопа (и в этом случае «щуп», с помощью которого вы «видите» предмет, должен быть меньше самого предмета). Предел разрешения микроскопа равен 1 микрометру: $1 \text{ мкм} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Найдем частоту зеленого света, длина волны которого составляет 0,5 мкм = $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$:

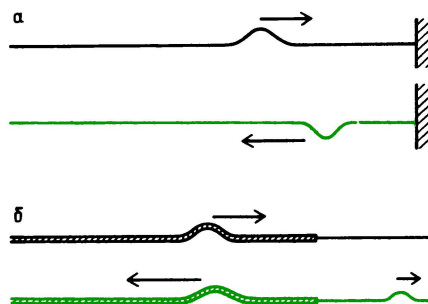
$$5 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot f = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с,}$$

$$f = 6 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Трудно себе представить что-либо, колеблющееся с частотой $6 \cdot 10^{14}$ циклов в 1 секунду. Как мы увидим ниже, частоты электромагнитных колебаний могут быть и гораздо больше.

ОТРАЖЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ И ВОЛН

В «Знакомстве с явлениями» вы видели, что происходит с бегущим по веревке импульсом, когда он приближается к ее концу. Импульс отскакивает назад и распространяется в обратном направлении. Если веревка привязана к неподвижной стене, импульс возвращается по противоположной стороне веревки, как показано на рис. а. В другом предельном случае, когда веревка привязана к длинной легкой бечевке, отраженный импульс возвращается по той



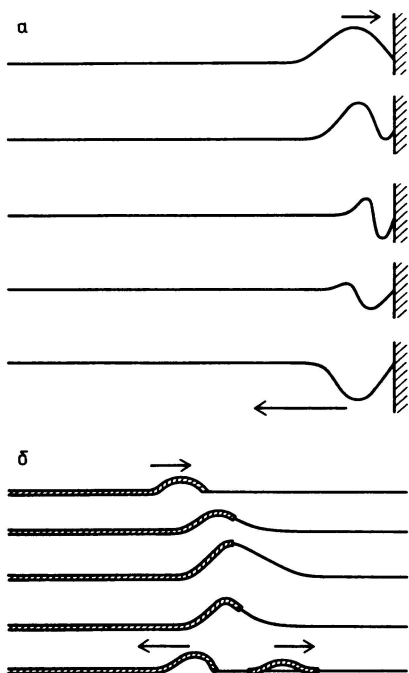
же самой стороне, как показано на рис. б. Это два предельных случая того, что происходит, когда импульс переходит из одной среды в другую. В общем случае имеет место частичное отражение и частичное прохождение.

Выясним, почему отражение от закрепленного конца порождает импульс, распространяющийся с противоположной стороны от исходного импульса. Когда импульс приближается к закрепленной границе, его край, где ускорение направлено вверх, начинает тянуть вверх границу, которая, однако, не двигается, а сама начинает тянуть веревку вниз. Фактически жесткость веревки в месте закрепления очень велика, так как следующий участок веревки уже не может двигаться. Вследствие этого при прохождении переднего края импульса веревка начинает выгибаться вниз, как если бы на границе некоторая сила тянула ее вниз. Чем выше приближающийся импульс стремится оттянуть вверх материал веревки вблизи границы, тем больше будет в этом материале восстанавливающая сила, отдергивающая конец веревки вниз. В резуль-

тате образуется такой же импульс, распространяющийся теперь в противоположном направлении и по противоположной стороне веревки.

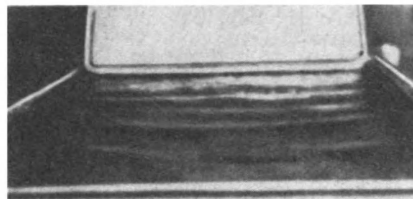
На незакрепленной (открытой) границе ситуация в точности противоположная. Легкая бечевка имеет очень небольшую линейную плотность массы и поэтому, когда передний край импульса подходит к ней, направленная вверх сила сообщает ей большое ускорение и высокую скорость вверх. Точка соединения взмывает вверх до почти удвоенной амплитуды исходного импульса, прежде чем ее потянет снова вниз. Получается точно такой эффект, как если бы кто-то поднял и опустил свободный конец веревки, посылая назад по веревке импульс с той же стороны, по которой пришел исходный импульс.

На рис. а и б показана поэтапная последовательность событий, происходящих при этих двух различных типах отражения.



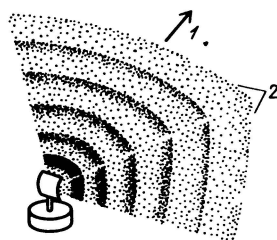
Мы можем создать волны, распространяющиеся в одном направлении, в среде, имеющей два или три измерения. Например, когда вы производите волнение в ванне (или противне с водой), погружая в нее линейку (или кусок

картона), по поверхности воды бежит плоская волна. Иллюстрация такого явления показана на фотографии. Радио- или световые волны могут распространяться, имея плоский волновой



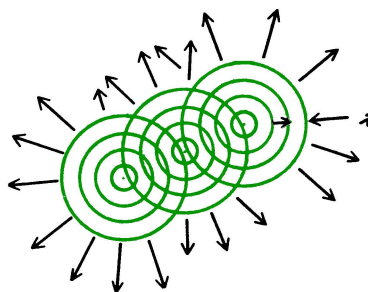
Плоские волны в наклонном противне

фронт в пространстве трех измерений, как показано на рисунке (1 — направление распространения, 2 — волновые



фронты, радиально расходящиеся от источника; на больших расстояниях фронты почти плоские). Это возможно и для звуковых волн. В главе 17 мы опишем такое распространение, используя представление о параллельных лучах.

В далеком от нас 1678 году голландец Христиан Гюйгенс (1629—1695) предложил способ, позволяющий предсказать движение волн с различной



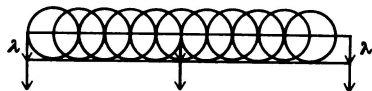
Построение волн по Гюйгенсу. Каждая из трех возмущенных точек становится источником новых волн, расходящихся из этой точки

геометрией. Его идея проста, если не вглядываться в нее слишком пристально, но она может оказаться весьма утонченной, когда вы начнете детально исследовать ее физический смысл. А пока воспользуемся ее простейшим приложением. Гюйгенс предположил, что каждая точка возмущенной среды (например, воды или воздуха) должна быть началом нового волнового фронта, исходящего из этой точки.

Вопрос 15-12

Какую форму будет иметь волновой фронт, исходящий от *точечного* источника в случае двумерной волны, например на поверхности воды? Какую форму будет иметь волновой фронт, порождаемый *точечным* источником в пространстве трех измерений, например в открытом воздухе?

Примем, что принцип Гюйгенса справедлив и рассмотрим, что произойдет с импульсом *прямолинейной* формы на поверхности воды. Если каждая точка гребня посылает возмущение *круговой* формы, то можно ожидать, что спустя период мы увидим волновые фронты, распространяющиеся по *всем* направлениям. Более детальный анализ, который мы частично выполним в следующей главе, показывает, что в каждом направлении, за исключением лишь одного, возмущение от любой точки линейного источника уничтожается соответствующими возмущениями от всех других точек. Движение поверхности в любой точке, лежащей впереди advancing волны, будет определяться

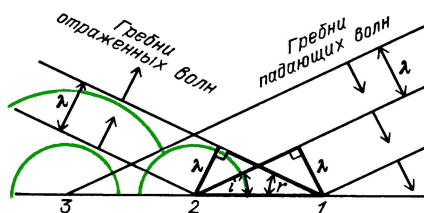


вкладами от *всего* волнового фронта. Оказывается, что результирующий волновой фронт спустя период располагается вдоль линии, касательной к круговым волновым фронтам, берущим начало от каждой точки исходного гребня. Линия, касающаяся всех этих окружностей, параллельна исходному гребню и изображает фронт, переместившийся за период на расстояние

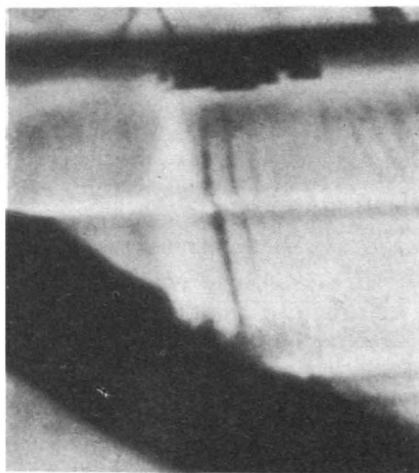
в одну длину волны в направлении распространения.

Легкий способ наблюдения этого эффекта на опыте состоит в том, чтобы в мелкую воду погружать расческу с редкими зубьями. Каждый зуб расчески становится источником круговых волновых фронтов. Однако результирующее возмущение будет плоской волной, такой же, как если бы вместо расчески была сплошная твердая линейка.

Теперь воспользуемся принципом Гюйгенса для того, чтобы увидеть, что происходит, когда плоская волна отражается под некоторым углом от границы. На рисунке показаны параллельные волновые фронты, приближающиеся под углом i к границе раздела.



Мы строим волновые фронты отраженных волн, проводя касательные к отраженным круговым волновым фронтам, исходящим от каждой точки границы. При этом мы должны, однако, соединять гребни волн, соответствующие одинаковой фазе. За один период до расположения, показанного на рисунке, гребень 1 находился в положении,



Отражение плоских волн в ванне для наблюдения поверхностных волн