

ГЛАВА XI УЧЕНИЕ О ВОЛНАХ

§ 63. Волновой процесс. Уравнение волн. Виды волн

Колебательная система может отдавать энергию во внешнюю среду. Эта передача энергии становится возможной благодаря тому, что вследствие упругости среды отдельные небольшие участки ее сами представляют собой миниатюрные колебательные системы.

Если в результате смещения частиц среды (например, воздуха, воды или другого вещества) в каком-либо месте среды нарушено равновесное значение ее плотности, то силы, действующие со стороны окружающих частиц, заставят смещенные частицы двигаться обратно, т. е. силы упругости будут стремиться восстановить нарушенное равновесие, однако по инерции частицы среды пройдут это положение равновесия и сместятся в противоположную сторону. При таком движении частицы, соседние с колеблющимися, также будут испытывать действие смещающих сил, отклоняясь от устойчивого положения равновесия. Следовательно, *каждое возмущение, однажды возникнув в определенном участке среды, будет постепенно распространяться*, захватывая частицы, все дальше и дальше отстоящие от места начального возмущения.

Находясь в какой-либо среде, колебательная система взаимодействует с непосредственно прилегающими к ней частицами. Совершая свои колебания, она создает вокруг себя периодический ряд возмущений, т. е. действует на прилегающие частицы как некоторая периодическая внешняя среда. Эта сила заставляет частицы среды совершать колебания с частотой вынуждающей силы, причем колебательный процесс благодаря взаимодействию частиц будет распространяться в среде с некоторой определенной, характерной для свойств этой среды скоростью.

Очевидно, что частица среды, находящаяся на расстоянии u от места начального возмущения, начнет колебаться только тогда, когда до нее дойдет распространяющийся в среде колебательный процесс.

Обозначим *скорость распространения колебательного процесса* через u . Колебательный процесс дойдет до рассматриваемой

нами частицы через промежуток времени

$$\tau = \frac{y}{u}.$$

Если колебания системы выражаются уравнением

$$x = a \sin \omega t,$$

то колебания рассматриваемой нами частицы будут происходить по такому же синусоидальному закону, но с запозданием на отрезок времени τ ; таким образом, мы можем написать для частицы уравнение

$$x' = A \sin \omega (t - \tau) = A \sin \omega \left(t - \frac{y}{u} \right). \quad (1)$$

Это уравнение определяет смещение частицы x' в функции от времени и от расстояния до начальной точки. Если, однако, о д н о

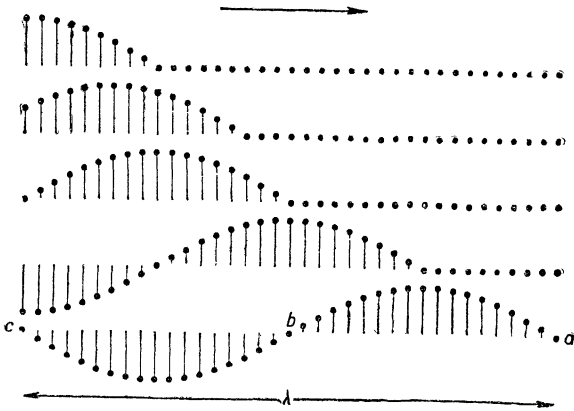


Рис. 146. Смещения частиц среды при распространении поперечных колебаний для пяти различных моментов времени.

в р е м е н н о рассматривать точки, лежащие на одной прямой, проходящей через начальную точку, то, задавая для y различные значения, мы можем выяснить посредством уравнения (1) распределение смещений вдоль выбранной нами прямой. В этом случае x' мы рассматриваем как функцию от одного только y (при $t = \text{const}$). Рис. 146 поясняет, как начинается и происходит передача колебательного движения в среде, когда частицы среды колеблются перпендикулярно к направлению передачи движения. Мы видим, что этот процесс периодичен не только во времени, но и в пространстве. По сходству явления с одним из его частных случаев (именно

с волнами на поверхности воды) этот процесс называют *волновым*, а распространяющееся в среде периодическое (или хотя бы мгновенное) возмущение — *волной*. Уравнение (1) есть *уравнение волн*, распространяющихся в положительном направлении оси x .

Чтобы с большей ясностью показать, что уравнение (1) выражает процесс, периодичный и во времени и в пространстве («волны»), мы можем поступить следующим образом.

Рассматривая сначала течение процесса в некоторой определенной точке среды ($y = \text{const}$), мы можем представить себе начало координат именно в этой точке; тогда $y = 0$ и уравнение (1) принимает вид

$$x' = A \sin \omega t.$$

Это уравнение есть уравнение колебаний выбранной нами частицы среды; оно определяет периодичность волнового процесса во времени.

Интересуясь распределением смещений в пространстве в некоторый определенный момент времени ($t = \text{const}$), мы можем выбрать именно этот момент за начальный, т. е. положить $t = 0$; тогда

$$x' = A \sin \omega \frac{y}{u} = A \sin \frac{2\pi}{uT} y.$$

Введя величину λ , определяемую равенством

$$\lambda = uT, \quad (2)$$

перепишем уравнение в следующем виде:

$$x' = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} y.$$

Последнее уравнение выражает пространственную периодичность процесса. Введенная в него величина λ имеет простой физический смысл. Так как T есть период колебаний, а u — скорость их распространения, то произведение uT определяет, очевидно, расстояние, на которое распространяется колебательный процесс за время одного периода. Следовательно, две частицы, отделенные друг от друга интервалом $\lambda = uT$, колеблются с одной и той же фазой; каждая из них проходит через нулевое положение одновременно с другой. Величину λ называют *длиной волны*.

Важно уяснить себе, что частицы среды не увлекаются движущейся волной; они совершают лишь колебательные движения около положения равновесия. Щепка, брошенная на поверхность непроточной воды, лишь колеблется вверх и вниз, оставаясь в одном и том же месте поверхности. Скорость волны u не есть скорость движения материальных частиц, — это есть скорость распространения импульса, вызывающего смещение частиц.

На первый взгляд может показаться неясным, почему *волна распространяется только в одном направлении*, а не в двух противоположных направлениях. Чтобы разобраться в причинах одностороннего распространения единичной волны, снова обратимся к рис. 146. На этом рисунке изображены смещения точек некоторого участка среды в различные моменты времени. Если бы мы сместили частицы среды так, как это показано в нижней строчке рис. 146, и если бы при этом в начальный момент все смещенные частицы были в покое, а потом мы предоставили бы им возможность двигаться к положениям равновесия, то такая деформация среды стала бы волнообразно распространяться и вправо и влево. В *проходящей* («бегущей») волне дело обстоит, однако, иначе: здесь все смещенные частицы, кроме тех, которые находятся в крайнем отклонении, в любой рассматриваемый момент времени имеют некоторую *скорость* движения к положениям равновесия или от положений равновесия. Частица *a*, находящаяся перед волной, была в покое и смещением находящихся перед нею частиц будет увлечена вверх. В середине волны частица *b*, двигаясь сверху вниз, подошла в рассматриваемый момент времени к положению равновесия и будет двигаться по инерции вниз (воздействие на частицу *b* смежных частиц взаимно компенсируется, так как передние тянут ее вверх, а задние — с той же силой вниз). Что же касается частицы *c*, находящейся в конце волны, то ее скорость направлена противоположно воздействию смежных частиц. Действительно, частица *c* была отклонена вниз и перед рассматриваемым моментом двигалась вверх, преодолевая воздействие смежных частиц, которые стремились оттянуть ее вниз. Вследствие этого частица *c* подойдет в рассматриваемый момент к положению равновесия, утратив скорость движения, и в дальнейшем будет оставаться в покое, если вслед за первой волной не идут другие волны.

Вид волн, распространяющихся в среде, существенно зависит от упругих свойств среды. Чтобы уяснить себе характер этой зависимости, разделим мысленно среду на ряд тонких, соприкасающихся друг с другом слоев, перпендикулярных к направлению распространения волны.

Газы, а также практически и жидкости не оказывают упругого сопротивления сдвигу слоев. Напротив, при попытке сблизить два соседних слоя или удалить их друг от друга возникают возвращающие силы, препятствующие деформации сжатия или растяжения. Колебания частиц происходят в направлении возвращающих сил, поэтому в среде, где отсутствует упругость сдвига, возможны лишь такие волны, в которых колебания частиц совпадают с направлением распространения волнового процесса; иначе говоря, в газах и в жидкостях упругая волна может распространяться лишь в направлении колебательного движения частиц. Такие волны называют *продольными*, так как движения материальных частиц происходят здесь вдоль волны.

Продольные волны представляют собой чередующийся ряд *сгущений и разрежений*, причем длина волны по смыслу этого понятия есть расстояние, между двумя соседними сгущениями или разрежениями (рис. 147, а). Типичным примером продольных волн являются звуковые волны в жидкостях и газах. Продольные волны могут, конечно, распространяться и в твердых телах.

В твердом теле деформация сдвига вызывает волну, распространяющуюся в направлении, перпендикулярном к направлению смещения частиц. Волна, в которой колебательное движение совершается перпендикулярно к направлению распространения колебаний, называется *поперечной* (рис. 147, б).

Как мы видели выше, в жидких и газообразных средах поперечные волны возникнуть не могут; в твердых же телах они распространяются наряду с волнами продольными. В чисто поперечной волне сгущения и разрежения среды уже не имеют места.

Продольные волны суть волны объемной деформации; поперечные же волны являются волнами деформаций сдвига.

Укажем здесь на два технически интересных примера поперечных волн: это волны, бегущие вдоль натянутой струны, и крутильные волны, вызываемые попеременным закручиванием и раскручиванием конца длинного стержня.

Продольные и поперечные колебания частиц волнонесущей среды представляют собой частные случаи волнового процесса. Существуют и другие волны, в которых колебательные движения складываются из одновременных продольных и поперечных смещений.

Например, когда мы ударяем молотком по торцовому срезу круглого стержня, то вдоль стержня бежит волна, причем смещения частиц будут чисто продольными только вдоль оси стержня, по мере же приближения к его поверхности частицы стержня будут совершать поперечные колебания возрастающей амплитуды (рис. 147, в). Такие волны можно назвать *волнами вздутия*; они возникают, например, в жидкостях (и даже в газах), заключенных в трубы с гиб-

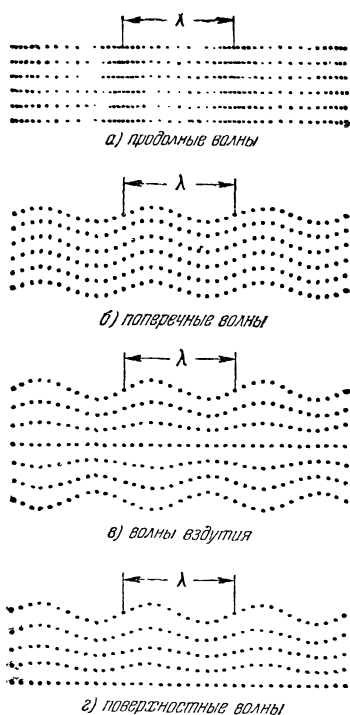


Рис. 147. Виды волн.

кими (податливыми) стенками. Условием возникновения волн вздутия является возможность смещения частиц перпендикулярно к поверхности.

Важным примером волнового движения являются *поверхностные волны* (рис. 147, з). Всем хорошо знакомы волны на поверхности воды. Нужно, впрочем, отметить, что законы поверхностных волн более сложны, чем законы прочих видов волн. Колебательные траектории частиц, участвующих в распространении поверхностной волны, не являются прямолинейными; частицы описывают замк-

нутые круговые или эллиптические орбиты (рис. 148).

Простые синусоидальные волны на поверхности могут существовать только при амплитудах, малых сравнительно с длиной волны,— таковы, например, волны морских приливов, длина которых может

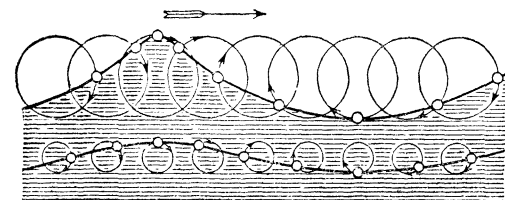


Рис. 148. Частицы волнующейся жидкости движутся по круговым траекториям.

доходить до сотен километров. Обычные же волны, например корабельные волны или волны от брошенного камня, имеют профиль, резко отличающийся от синусоиды: плоские длинные впадины и острые короткие верхушки (рис. 149). Поверхностная волна большой

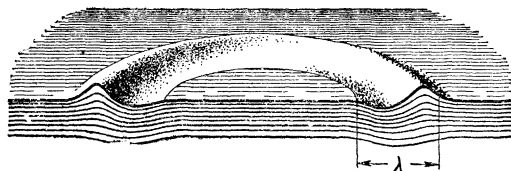


Рис. 149. Профиль волны на поверхности воды.

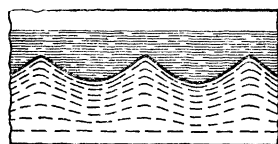


Рис. 150. Волны на поверхности раздела масла и воды.

амплитуды увлекает с собой колеблющиеся частицы, которые в этом случае описывают уже не круговые, а более сложные траектории. Именно поэтому большие волны выбрасывают на берег плавающие на них предметы.

Волны возникают не только на свободной поверхности жидкости, но вообще на поверхности раздела двух жидкостей, например масла и воды или соленой и пресной воды, а также на диффузионной границе двух газов различной плотности. На рис. 150 изображены волны на поверхности раздела масла и воды; свободная поверхность масла в этом случае почти спокойна.

Возникновением волн на поверхности раздела пресной и соленой воды объясняется интереснейшее явление — так называемая «мертвая вода», наблюдаемая недалеко от устьев рек, особенно в скандинавских фиордах. Идущие корабли вдруг тормозятся вследствие того, что корабль, попав на поверхность раздела пресной и соленой воды, разводит на ней невидимую с поверхности моря волну.

Смежные слои атмосферы могут иметь различную плотность благодаря разности температур. На поверхности раздела таких слоев атмосферы нередко возникают волны, которые движутся с очень малой скоростью и становятся заметными вследствие периодической конденсации водяного пара, поднимаемого на гребнях волн в более холодные слои атмосферы, где он образует так называемые «волнистые» облака.

§ 64. Интерференция волн. Стоячие волны

Очень часто в среде одновременно распространяются не один, а несколько волновых процессов; например, так обстоит дело в том случае, когда несколько колебательных систем одновременно излучают волны. При этом каждая частица среды, попадающая в такое сложное *волновое поле*, совершает результирующее колебательное движение, определенным образом складывающееся из колебаний, вызванных каждым из волновых процессов.

Результирующее смещение частицы среды в любой момент времени является геометрической суммой смещений, вызываемых каждым из складывающихся колебательных процессов в отдельности. Таким образом, каждый из одновременно существующих волновых процессов распространяется в среде так, как если бы никаких других одновременных процессов не существовало. Сформулированный здесь закон сложения колебаний или волн обычно называют *принципом суперпозиции*¹⁾ (независимого наложения волновых или колебательных процессов друг на друга).

Важный пример независимого сложения колебаний дают звуковые волны, распространяющиеся от нескольких источников звука. Слушая игру оркестра или пение хора, мы можем, сосредоточив внимание, различить каждый отдельный инструмент и каждый отдельный голос. Если бы принцип суперпозиции был ложен и складывающиеся колебания не продолжали существовать в результирующем сложном процессе, то речь и музыка сделались бы невозможными.

Представим себе два распространяющихся через одну и ту же точку среды волновых процесса *с одинаковой частотой и с одинаковым направлением смещения частиц*; если скорости распростра-

¹⁾ От латинского *super* — на д и *positio* — положение.