§8 Общие сведения о волнах

Кроме механических колебаний отдельных тел в природе широко распространены колебания сплошных твердых, жидких и газообразных сред. Эти колебания не остаются на том месте, где они возникли, а распространяются в пространстве.

Волна – это процесс распространения колебаний в пространстве.

8.1 *Классификация волн*

В зависимости от физической природы источника колебаний волны делят на:

– механические (звуковые, ударные, сейсмические и т.д.);
– волны на поверхности жидкости;
– электромагнитные (шкала электромагнитных волн в интервале от радиоволн до гамма-излучения).

Механическими волнами называются механические возмущения, возникающие в упругой среде, поэтому механические волны имеют второе название – ***упругие*** волны.

Поверхностные волны распространяются вдоль свободной поверхности жидкости или вдоль поверхности двух жидкостей, которые не смачиваются. В поверхностных волнах частицы жидкости одновременно совершают поперечные и продольные колебания, описывая эллиптические или более сложные траектории.

В зависимости от взаимной ориентации направления колебаний и направления распространения волн различают:

– поперечные волны
– продольные волны.

Волна называется ***поперечной***, если направление колебаний частиц среды перпендикулярно направлению распространения волны (рис. 8.1 а).

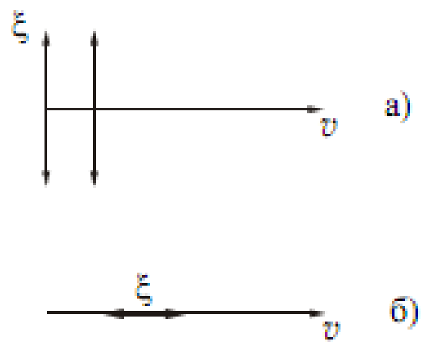


Рисунок 8.1

Волна называется ***продольной***, если направление колебаний частиц среды происходит вдоль направления распространения волны (рис. 8.1 б).

Поперечные волны возникают только в твердых средах. Продольные волны возникают в твердых, жидких и газообразных средах.

Распространяясь от источника колебаний, волновой процесс охватывает все новые области пространства. Область пространства, в которой существует волновой процесс, называется ***волновым полем***. ***Фронт волны*** – поверхность, которая отделяет часть пространства, уже вовлеченную в волновой процесс, от области, в которой колебания еще не возникли. В зависимости от геометрии фронта волны делят на:

– плоские (рис 8.2а);
– сферические (рис 8.2б).

Стрелки на рисунке указывают направление распространения волны.

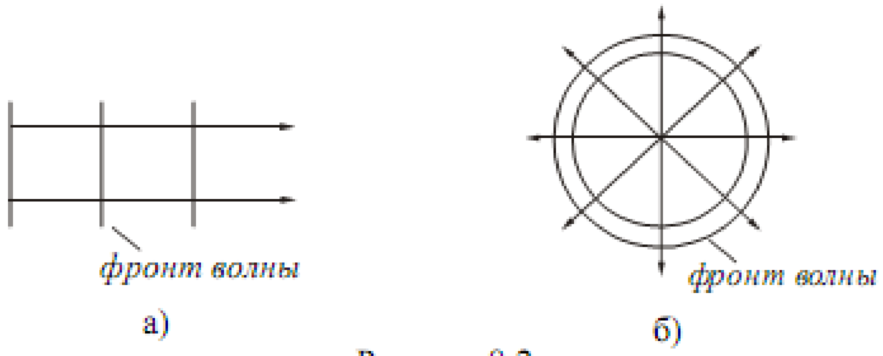


Рисунок 8.2

Плоские волны возникают от плоского или удаленного источника. Их волновые фронты представляют собой плоскости. Сферические волны возникают от точечного источника в пространстве. Их волновые фронты представляют собой сферы.

8.2 *Характеристики волн*

Гармоническая волна – это бесконечная синусоидальная волна, в которой все изменения состояния происходят по закону синуса или косинуса. Такие волны могли бы распространяться в однородной среде без искажения формы. На рис. 8.3 дан профиль поперечной волны в фиксированный момент времени t. Основными характеристиками волны являются:

Длина волны (λ) – расстояние между ближайшими точками, колеблющимися в одинаковой фазе (рис. 8.3).

Период колебаний (T) – время, в течение которого совершается один полный цикл колебаний.

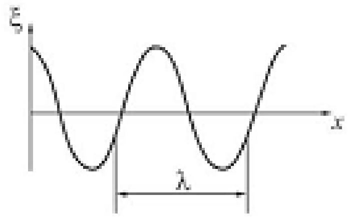


Рисунок 8.3

Амплитуда (A) – максимальное отклонение физической величины от положения равновесия.

Длина волны и период связаны соотношением:

$$\lambda = vT, \tag{8.1}$$

где v – скорость распространения волны.

Данная формула справедлива для волн любой природы. Используя соотношение (8.1), можно дать другое определение длины волны.

Длина волны – это расстояние, на которое распространяется фронт волны за время, равное периоду колебаний.

Частота (ν) – число колебаний за единицу времени. $\nu = 1/T$.

Из (8.1) получим

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \tag{8.2}$$

Период измеряется в секундах, частота – в герцах.

§11 Интерференция волн. Стоячие волны

11.1 *Принцип суперпозиции волн. Интерференция волн*

Когерентность – согласованное протекание во времени и пространстве нескольких волновых процессов.

Когерентные волны – волны, разность фаз которых остается постоянной во времени. Когерентными могут быть только волны, имеющие одинаковую частоту.

Наложение когерентных волн, в результате которого колебания в одних точках усиливают, а в других ослабляют друг друга, называется явлением ***интерференции***. Волны накладываются одна на другую, не возмущая друг друга. Результирующее смещение равно геометрической сумме смещений , которые получают частицы, участвующие в каждом из слагающих волновых процессов. Это утверждение называется ***принципом суперпозиции волн***.

11.2 *Стоячие волны*

Стоячие волны – это колебательный процесс, возникающий в результате сложения (интерференции) двух встречных бегущих волн с одинаковой амплитудой и частотой.

На практике стоячие волны возникают при отражении от преград. Падающая на преграду волна и бегущая ей навстречу отраженная волна, накладываясь друг на друга, дают стоячую волну. Уравнение стоячей волны получают сложением следующих уравнений:

$$\xi_1(x,t) = A\cos(\omega t - kx) \text{ – падающая волна;}$$

$$\xi_2(x,t) = A\cos(\omega t + kx) \text{ – отраженная волна.}$$

Преобразуем результат по формуле косинуса суммы:

$$\xi(x,t) = \xi_1(x,t) + \xi_2(x,t) = A\cos(\omega t - kx) + A\cos(\omega t + kx) = 2A\cos kx \cdot \cos\omega t$$

$$\xi(x,t) = 2A\cos kx \cdot \cos\omega t\,. \tag{11.1}$$

Уравнение (11.1) называется ***уравнением стоячей волны***. Величина

$$2A\cos kx = A(x) \tag{11.2}$$

называется амплитудой стоячей волны.
Заменив в (11.2) волновое число k согласно формуле (9.2), получим:

$$A(x) = 2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}x\,. \tag{11.3}$$

1. Если $\cos\frac{2\pi}{\lambda}x = 1$, т.е. $\frac{2\pi}{\lambda}x = \pm n\pi$, где n=0, 1, 2, …, то амплитуда колебаний достигает максимального значения $A(x)_{max} = 2A$.

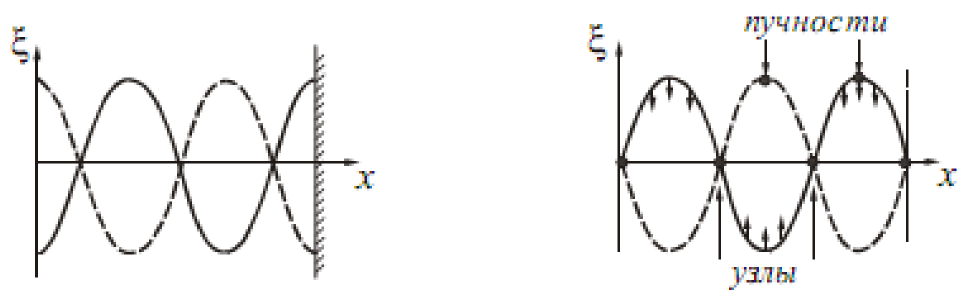
Точки, в которых амплитуда колебаний максимальна, называются ***пучностями*** (рис. 11.1 б). Координаты пучностей:

$$x_{\text{пучн}} = n\frac{\lambda}{2}. \qquad (11.4)$$

2. Если $\cos\frac{2\pi}{\lambda}x = 0$, т.е. $\frac{2\pi}{\lambda}x = \pm\frac{\pi}{2}(2n+1)$, где n=0, 1, 2, …то A=0.

Точки, в которых амплитуда колебаний равна нулю, называются ***узлами*** (рис. 11.1 б). Координаты узлов:

$$x_{\text{узл}} = (2n+1)\frac{\lambda}{4}. \qquad (11.5)$$



а) б)

Рисунок 11.1

Точки, находящиеся в узлах, колебаний не совершают. Узлы и пучности представляет собой не одну точку, а плоскости, точки которых имеют значения координат, определяемые формулами (11.4) и (11.5).

Из формул (11.4) и (11.5) следует, что расстояние между соседними пучностями, так же как и расстояние между соседними узлами, равно λ/2. Расстояние между ближайшими узлом и пучностью – λ/4.

Рассмотренный случай описывает образование стоячей волны, отраженной от менее плотной среды. График такой стоячей волны представлен на рис. 11.1 а. Примером является волна, возникающая в металлическом стержне с незакрепленными концами.

Если отражение происходит от более плотной среды, то отраженная волна меняет фазу на π. В этом случае формула (11.4) даст координату узла, а формула (11.5) – координату пучности, т.е. узлы и пучности меняются местами. График волны представлен на рис. 11.1 б. Такая волна возникает, например, в закрепленной струне. Для сравнения на рис. 11.2 дан график бегущей волны.

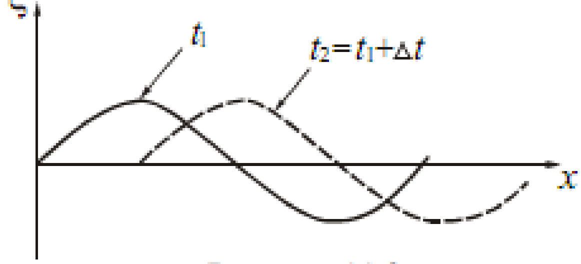


Рисунок 11.2

В упругой стоячей волне энергия периодически мигрирует от узлов стоячей

§14 Электромагнитные волны

14.1 *Плоская электромагнитная волна*

Рассмотрим электромагнитную волну, распространяющуюся в нейтральной непроводящей среде с постоянными проницаемостями ε и μ ($\vec{j}$=0, ε=const, μ=const). Направим ось 0*x* перпендикулярно волновым поверхностям. Тогда векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$, а, значит, и их компоненты по координатным осям не будут зависеть от координат *y* и *z*. При этом уравнения (13.8) и (13.9) упрощаются и принимают вид:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}, \tag{14.1}$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}. \tag{14.2}$$

Индексы *y* и *z* при E_y и H_z подчеркивают то, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ направлены вдоль взаимно перпендикулярных осей 0*y* и 0*z*. В этом случае E_x=E_z=0, а H_x=H_y=0. Колебания электрического и магнитного векторов в электромагнитной волне происходят с одинаковой фазой. Если считать, что начальные фазы колебаний α_1=α_2=0, то решение уравнений (14.1) и (14.2) будет иметь вид:

$$E_y = E_{\max} \cos(\omega t - kx), \tag{14.3}$$

$$H_z = H_{\max} \cos(\omega t - kx). \tag{14.4}$$

В этих формулах ω – циклическая частота волны, $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число,

Умножив уравнение (14.3) на единичный вектор оси 0*y*, а уравнение (14.4) – на единичный вектор оси 0*z*, получим уравнение плоской электромагнитной монохроматической волны в векторном виде:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\max} \cos(\omega t - kx), \tag{14.5}$$

$$\vec{H} = \vec{H}_{\max} \cos(\omega t - kx). \tag{14.6}$$

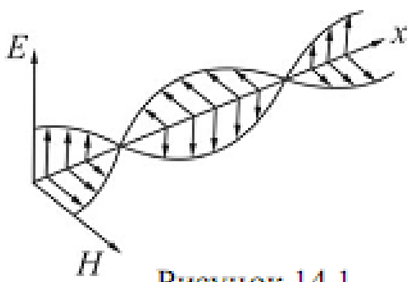


Рисунок 14.1

На рис. 14.1 показана «моментальная фотография» плоской монохроматической волны. Из рисунка видно, что векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ образуют с направлением распространения волны правовинтовую систему. В фиксированной точке пространства векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ изменяются со временем по гармоническому закону.

4. Электромагнитные волны переносят энергию. Объемная плотность энергии w электромагнитного поля складывается из объемной плотности энергии электрического поля $w_{эл}$ и объемной плотности энергии магнитного поля $w_{м}$:

$$w = w_{эл} + w_{м} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}. \qquad (14.11)$$

Из теории электромагнитных волн следует, что в любой момент времени эти величины одинаковы. Следовательно

$$w = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2. \qquad (14.12)$$

Перенос энергии волной принято характеризовать вектором плотности потока энергии. Для механических волн этот вектор называется вектором Умова. Вектор Умова равен произведению объемной плотности энергии на вектор фазовой скорости волны, т.е.

$$\vec{j} = w\vec{v}.$$

Для электромагнитных волн вводят аналогичный вектор, который называют вектором Пойнтинга.

Вектор Пойнтинга $\vec{S}$ – векторная физическая величина, численно равная энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения волны.

Получим формулу, связывающую вектор Пойнтинга с характеристиками электромагнитной волны. Согласно (13.10)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu}}. \qquad (14.13)$$

Тогда модуль вектора Пойнтинга будет равен

$$S = wv = \varepsilon\varepsilon_0 E^2 \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon\mu_0\mu}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon}{\mu_0\mu}} E^2. \qquad (14.14)$$

Учитывая, что $\varepsilon\varepsilon_0 E^2 = \mu\mu_0 H^2$, получим выражение для расчета мгновенного значения вектора Пойнтинга:

$$S = \frac{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon}\cdot E\cdot E}{\sqrt{\mu_0\mu}} = EH = E_{max} H_{max}\cos^2(\omega t - kx). \qquad (14.15)$$

Векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ взаимно перпендикулярны, т.е. угол между ними 90°, а $\sin 90^\circ = 1$. Следовательно, вектор Пойнтинга можно представить как векторное произведение векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}. \qquad (14.16)$$

Направление вектора $\vec{S}$ совпадает с направлением переноса энергии. Среднее значение вектора Пойнтинга определяет интенсивность электромагнитной волны:

$$I = < S > = \frac{E_{max} H_{max}}{2}, \qquad (14.17)$$

так как среднее значение $\cos^2(\omega t - kx)$ за период равно 1/2.

5. Электромагнитным волнам, как и любым волнам, присущи интерференция, дифракция, а также поляризация.
6. Электромагнитные волны поглощаются средой, а в диэлектрике, кроме этого, претерпевают дисперсию.

Первые опыты с несветовыми электромагнитными волнами были осуществлены Г. Герцем в 1888 году. Передача сообщения с помощью электромагнитных волн была впервые осуществлена в 1896 году А.С. Поповым.

14.3 *Шкала электромагнитных волн*

Электромагнитные волны принято условно классифицировать по длинам волн в вакууме $\lambda = c/\nu$ или по частоте $\nu = \omega/2\pi$. Границы между соседними диапазонами шкалы электромагнитных волн условны. Различные виды электромагнитного излучения отличаются лишь длиной волны (или, что то же самое, частотой). В зависимости от длины волны (частоты) меняются свойства волн, их действия, способы получения и названия отдельных участков.

Таблица 14.1. Шкала электромагнитных волн

Название диапазона волн	Примерный диапазон длин волн		Диапазон частот
	м	Другие единицы	Гц
Низкочастотные электрические колебания	$\infty \div 10^{+5}$	$\infty \div 100$ км	$0 \div 3 \cdot 10^3$
Радиоволны	$10^{+5} \div 10^{-3}$	100 км ÷ 1 мм	$3 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^{11}$
Инфракрасное излучение	$2 \cdot 10^{-3} \div 7{,}6 \cdot 10^{-7}$	2 мм ÷ 760 нм	$1{,}5 \cdot 10^{11} \div 4{,}0 \cdot 10^{14}$
Видимое излучение	$7{,}6 \cdot 10^{-7} \div 3{,}8 \cdot 10^{-7}$	760 ÷ 380 нм	$4{,}0 \cdot 10^{14} \div 8{,}0 \cdot 10^{14}$
Ультрафиолетовое излучение	$3{,}8 \cdot 10^{-7} \div 3 \cdot 10^{-9}$	380 ÷ 3 нм	$8{,}0 \cdot 10^{14} \div 10^{17}$
Рентгеновское излучение	$10^{-8} \div 10^{-12}$	10 нм ÷ 1 пм	$3 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{20}$
Гамма-излучение	10^{-11} и менее	10 пм и менее	$3 \cdot 10^{19}$ и выше