

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии рассмотрены разделы физики «Волны. Оптика», «Атомная физика», «Молекулярная физика». Материал, данный шрифтом другого начертания, приведен для студентов специалитета, обучающихся по направлениям подготовки 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений и 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства очной формы обучения.

В курсе физики, читаемом в НИУ МГСУ, обобщается и уточняется школьный курс.

В разделе «Волны. Оптика» рассмотрены волновые и корпускулярные свойства света, раскрыты возможность сочетания непрерывности волн и прерывности частиц, корпускулярно-волновая природа света и частиц.

В разделе «Атомная физика» обоснована необходимость квантового рассмотрения поведения электронов в атомах, вытекающая из несоответствия ядерной модели атомов канонам классической физики, приведены исходные положения квантовой физики и квантовой теории электронов в водородоподобных атомах.

В разделе «Молекулярная физика» приведены основные представления статистической физики и термодинамики. При этом параллельно рассматриваются термодинамические параметры и законы на основе статистических толкований молекулярно-кинетических представлений о строении вещества и собственно их термодинамических толкований.

1. ВОЛНЫ. ОПТИКА

1.1. Общие сведения о волнах

Волной называется распространение колебаний в пространстве. Распространение механических колебаний в упругой среде называется *упругой волной*. Распространение электромагнитных колебаний (электромагнитного поля) называется *электромагнитной волной*.

Несмотря на различную природу, упругие и электромагнитные волны, как и колебания, подчиняются общим для них математическим закономерностям. Рассмотрим их на примере упругих волн.

В зависимости от направления колебаний частиц относительно направления распространения колебаний различают два вида волн: *поперечные волны*, если направление колебаний перпендикулярно направлению распространения колебаний (рис. 1.1 и 1.2, а), и *продольные волны*, если направление колебаний совпадает с направлением распространения колебаний (рис. 1.2, б и 1.3).

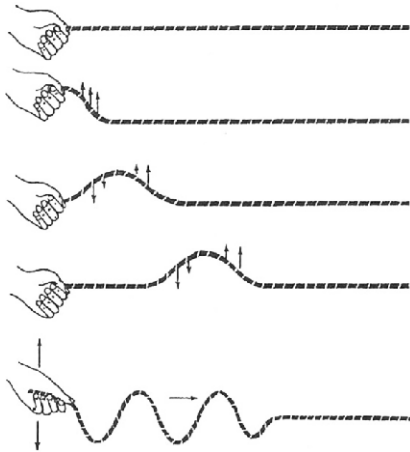


Рис. 1.1. Возникновение поперечной бегущей волны в натянутом шнуре

Быстрота распространения колебаний характеризуется *скоростью волны v* . Скорость волны определяется свойствами среды.

Расстояние λ , на которое распространяется колебание за время, равное периоду колебания T , называется *длиной волны* и определяется по формуле

$$\lambda = uT = \frac{u}{\nu}.$$



Рис. 1.2. Упругая волна в пружине:
 а — поперечная волна; б — продольная волна

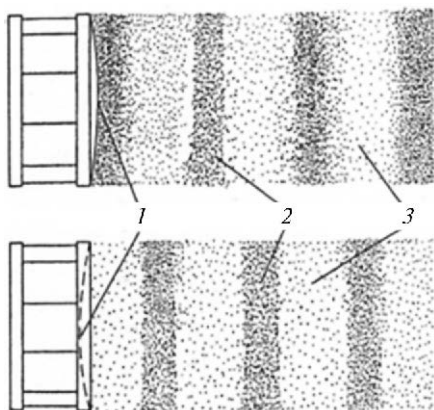


Рис. 1.3. Продольная волна в воздухе:
 1 — мембрана барабана; 2 — сжатие; 3 — растяжение

Длину волны можно определить и как расстояние между ближайшими точками, фазы колебаний которых отличаются на 2π .

Фаза колебания, вызванного волной в выбранной точке среды, зависит не только от текущего времени t , но и от времени t_c , за которое колебания доходят от источника волны до выбранной точки. Время t_c зависит от расстояния до источника волны r и скорости волны u в среде:

$$t_c = \frac{r}{u}.$$

Из определения циклической частоты $\omega = \Delta\varphi/\Delta t$ следует, что времени t_c соответствует сдвиг фазы колебаний φ_c , равный

$$\varphi_c = \omega t_c.$$

Учитывая, что циклическая частота $\omega = 2\pi/T$, а длина волны $\lambda = uT$, для φ_c получим выражение

$$\varphi_c = \frac{2\pi r}{uT} = \frac{2\pi}{\lambda} r.$$

Отсюда следует, что отставание фазы колебаний рассматриваемой точки φ_c от фазы колебаний источника волны $\varphi_{\text{и}}$ прямо пропорционально расстоянию r :

$$\varphi_c \sim r.$$

Коэффициент пропорциональности $2\pi/\lambda$ называется *циклическим волновым числом* k и определяется по формуле

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Тогда отставание фазы φ_c будет равно

$$\varphi_c = kr.$$

Если уравнение колебаний источника волны имеет вид

$$\psi_{\text{и}} = A_{\text{и}} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

то фаза колебания φ рассматриваемой точки, меньшая фазы колебания источника волны $\varphi_{\text{и}} = (\omega t + \varphi_0)$ на величину φ_c , будет равна

$$\varphi = \varphi_{\text{и}} - \varphi_c = \omega t - kr + \varphi_0.$$

Уравнение, описывающее колебания произвольно выбранной точки волны, называется *уравнением волны*. Уравнение плоской гармонической волны имеет вид

$$\psi = A \cos(\omega t - kr + \varphi_0).$$

При распространении плоской волны в непоглощающей среде амплитуда колебаний A одинакова во всех точках среды.

В случае сферической волны даже в непоглощающей среде амплитуда A уменьшается с увеличением расстояния r от источника волны:

$$A \sim \frac{A_0}{r},$$

где A_0 — амплитуда колебаний точечного источника волны.

Отметим, что уравнение волны является функцией зависимости смещения ψ от времени t и расстояния r : $\psi = \psi(t, r)$. Для выбранной точки на расстоянии $r' = \text{const}$ уравнение волны становится функцией зависимости ψ только от времени t и уравнением колебаний этой точки, а для определенного момента времени $t' = \text{const}$ уравнение волны становится функцией зависимости ψ только от r и показывает смещение всех точек среды в этот момент времени.

Разность фаз колебаний $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ точек среды, находящихся на расстояниях r_1 и r_2 от источника волны в направлении распространения волны, будет равна

$$\Delta\varphi = (\omega t - kr_1 + \varphi_0) - (\omega t - kr_2 + \varphi_0); \Delta\varphi = k\Delta r.$$

Отсюда следует:

$$k = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r},$$

т.е. циклическое волновое число показывает, на сколько отличаются фазы колебаний точек среды, находящихся на расстоянии единицы длины в направлении распространения волны.

Поверхность, во всех точках которой фаза колебания одинакова, называется *волновой поверхностью*. По виду волновой поверхности различают плоские, сферические, цилиндрические и другие волны.

Линия, касательная к которой в каждой ее точке совпадает с направлением распространения волны (с направлением переноса энергии волной), называется *лучом волны*. В однородной изотропной среде лучи имеют вид прямых линий, перпендикулярных волновым поверхностям.

Энергетические характеристики волн. Среда, в которой распространяется волна, обладает дополнительной энергией, обусловленной колебаниями частиц среды.

Для характеристики распределения энергии волны в пространстве вводится величина — *объемная плотность энергии волны* w , показывающая, какая энергия волны сосредоточена в единице объема вблизи данной точки:

$$w = \frac{dW}{dV}.$$

Если при распространении волны колебания продолжают возникать в новых областях среды (волна продолжает охватывать новые области среды), то волна называется бегущей. Источник бегущей волны должен быть источником энергии и излучать энергию. Колеблющиеся точки среды получают энергию от предыдущих точек и передают последующим, т.е. для каждой рассматриваемой точки среды роль источника волны выполняет предыдущая точка среды. Таким образом, в бегущей волне происходит перенос энергии от источника волны до новых вовлекаемых в колебания областей среды.

Количество энергии, переносимое волной через некоторую поверхность в единицу времени, называется *поток энергии волны* через эту поверхность:

$$\Phi = \frac{dW}{dt}.$$

Для характеристики распределения потока энергии по поверхности вводится векторная величина \vec{j} — *плотность потока энергии волны*. Модуль плотности потока энергии волны равен потоку энергии через единичную площадку, помещенную в данном месте перпендикулярно направлению переноса энергии:

$$j = \frac{d\Phi}{dS_{\perp}}.$$

За направление плотности потока энергии \vec{j} принимается направление переноса энергии.

Плотность потока энергии волны можно выразить через объемную плотность энергии волны и скорость волны:

$$j = wu, \vec{j} = w\vec{u}.$$

Объемная плотность энергии волны w , поток энергии волны Φ и плотность потока энергии волны j в данной точке изменяются со временем (колеблются). Среднее по времени значение плотности потока энергии волны называется *интенсивностью волны* J и определяется по формулам

$$J = j_c, J = uw_c.$$

Независимо от природы волны все энергетические характеристики волн прямо пропорциональны квадрату амплитуды колебаний в этой точке. В частности, интенсивность волны

$$J \sim A^2.$$

1.2. Упругие волны

Упругой волной называется распространение механических колебаний в упругой среде. Условиями возникновения и существования упругой волны являются взаимодействие частиц среды и наличие источника волны — источника энергии (см. рис. 1.1, 1.2, 1.3).

Продольные упругие волны возникают и в газах, и в жидкостях, и в твердых телах, поперечные упругие волны возникают только в твердых телах.

Скорость упругих волн зависит от механических свойств среды: плотности вещества ρ и модуля упругости: модуля сдвига G , модуля Юнга (модуля продольной упругости) E , модуля всестороннего сжатия (модуля объемной упругости) K .

Скорость поперечной волны в твердых телах определяется формулой

$$u = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

скорость продольной волны в тонком стержне — формулой

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

скорость поперечных волн в натянутом шнуре или натянутой струне — формулой

$$u = \sqrt{\frac{F}{\tau}} = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}},$$

где F — сила натяжения; τ — линейная плотность массы ($\tau = m/\ell = \rho S$; m , ℓ , S — масса, длина, площадь сечения шнура или струны соответственно; σ — механическое напряжение, $\sigma = F/S$;

скорость продольных волн в идеальных газах — формулой Лапласа

$$u = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где γ — показатель адиабаты; p — среднее давление газа; ρ — плотность газа; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура газа; M — молярная масса газа.

Энергетические характеристики упругих волн. При распространении упругой волны частицы среды обладают как кинетической энергией, так как они двигаются, так и потенциальной энергией, так как они взаимодействуют между собой. Следовательно, объемная плотность энергии упругой волны w складывается из объемной плотности кинетической энергии $w_k = dW_k/dV$ и объемной плотности потенциальной энергии волны $w_{\text{п}} = dW_{\text{п}}/dV$ и определяется по формуле

$$w = w_k + w_{\text{п}}.$$

Объемные плотности энергии волны $w_{\text{п}}$ и w_k изменяются со временем, но в отличие от потенциальной и кинетической энергий колеблющегося тела колебания $w_{\text{п}}$ и w_k совпадают по фазе, т.е. кинетическая и потенциальная энергии частиц среды одновременно достигают своих амплитудных значений (при прохождении положений равновесия) и нулевых значений (при амплитудном смещении). Это обусловлено тем, что потенциальная энергия частиц среды определяется не смещением от начального положения равно-

весия, а изменением положения относительно соседних частиц. Поэтому при амплитудном значении смещения участка среды его потенциальная энергия равна нулю (участок среды на «вершине синусоиды» отклонен от положения равновесия, но не деформирован), а при прохождении участка среды положения равновесия деформация и потенциальная энергия максимальны.

Следовательно, для объемных плотностей энергии w_k и w_{Π} получается одна и та же формула:

$$w_k = w_{\Pi} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 \sin^2 \omega t.$$

Для объемной плотности энергии упругой волны w получим формулу

$$w = \rho A^2 \omega^2 \sin^2 \omega t.$$

Объемная плотность энергии волны w изменяется со временем, опять же в отличие от полной механической энергии колеблющегося тела. Каждая частица получает энергию от предыдущей частицы (в конечном счете, от источника волны) во время отклонения от амплитудного смещения ($\psi = A$) до начального положения равновесия ($\psi = 0$) и отдает энергию последующей частице во время отклонения от $\psi = 0$ до $\psi = A$.

Поскольку среднее значение квадрата синуса равно $1/2$, среднее по времени значение плотности энергии волны равно

$$w_c = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} \rho v_A^2,$$

а интенсивность упругой волны равна

$$J = j_c = u w_c = \frac{1}{2} u \rho A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} u \rho v_A^2.$$

Интенсивность волны зависит от двух сомножителей — ρ и u , характеризующих среду, и двух сомножителей — A^2 и ω^2 , характеризующих колебания данной точки среды. Произведение ρ на u , зависящее только от свойств среды, называется акустическим сопротивлением среды R_a :

$$\rho u = R_a.$$

Используя понятие акустического сопротивления, формулу интенсивности волны можно записать в виде

$$J = \frac{1}{2} R_a A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} R_a v_A^2.$$

Упругая волна, распространяясь в газе или жидкости, создает области сжатия и разрежения, в которых давление соответственно повышается и понижается на Δp по отношению к давлению p в невозмущенной среде. Величину Δp называют избыточным звуковым давлением.

Изменение избыточного звукового давления идеального газа со временем в адиабатическом приближении описывается выражением

$$\Delta p = \rho u A \omega \sin \varphi = \rho u v = p_A v = p_A \sin \varphi,$$

где p_A — амплитуда избыточного звукового давления, $p_A = \rho u v_A = R_a v_A$.

Амплитуда избыточного звукового давления p_A связана с интенсивностью звуковой волны J :

$$J = \frac{p_A^2}{2R_a}.$$

Звук. Распространяющиеся в воздухе упругие волны, достигнув человеческого уха, вызывают специфическое ощущение звука, если частота этих волн лежит в интервале от 20 Гц до 20000 Гц.

Опыт показывает, что для каждой частоты имеется так называемый порог слышимости — минимальная интенсивность и минимальное звуковое давление, меньше которых ухо не реагирует на звук.

Чувствительность человеческого уха к различным частотам неодинакова. Наибольшую чувствительность ухо имеет к частотам от 500 до 5000 Гц, для этих частот порог слышимости наименьший.

Избыточное звуковое давление при неизменной частоте и форме колебаний определяет физиологическую (субъективную) характеристику звука, называемую громкостью звука.

Десятичный логарифм отношения одноименных физических величин называется уровнем соответствующей физической величины. Единица десятичного логарифма отношения значений двух одноименных физических величин называется белом. Обычно применяют 0,1 долю бела — децибел ($1 \text{ дБ} = 0,1 \text{ Б}$).

В акустике рассматриваются уровень интенсивности звука, уровень звукового давления, уровень громкости звука. Их принято рас-

смаатривать относительно интенсивности и звукового давления звука с частотой 1000 Гц.

Уровнем интенсивности звука L_J называется десятичный логарифм отношения интенсивности данного звука J_ν с частотой ν к интенсивности порога слышимости J_0 звука с частотой 1000 Гц ($J_0 = 10^{-12}$ Вт/м²):

$$L_J = \lg \frac{J_\nu}{J_0} (\text{Б}) = 10 \lg \frac{J_\nu}{J_0} (\text{дБ}).$$

За уровень звукового давления L_p принимается

$$L_p = 2 \lg \frac{p_A}{p_0} (\text{Б}) = 20 \lg \frac{p_A}{p_0} (\text{дБ}),$$

где p_0 — амплитуда звукового давления порога слышимости звука с частотой 1000 Гц ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па).

При таком выборе уровня интенсивности звука L_J и уровня звукового давления L_p они будут равны друг другу:

$$L_J = L_p.$$

Субъективное ощущение громкости звука характеризуется объективной величиной L , называемой уровнем громкости. Громкость звука данной частоты принято оценивать, сравнивая ее с громкостью чистого тона с частотой 1000 Гц. Уровнем громкости L данного звука называется уровень звукового давления или уровень интенсивности звука с частотой 1000 Гц столь же громкого (сравнением на слух), как и измеряемый звук, т.е.

$$L = 10 \lg \frac{J_{0\nu}}{J_0} = 20 \lg \frac{p_{0\nu}}{p_0},$$

где $J_{0\nu}$ и $p_{0\nu}$ — интенсивность и амплитуда звукового давления звука с частотой $\nu_0 = 1000$ Гц, равногромкого с исследуемым звуком с частотой ν , интенсивность и амплитуда звукового давления которого равны J_ν и p_ν .

Единица уровня громкости в отличие от единицы уровня интенсивности и уровня звукового давления (децибела) называется фоном.

Значения $J_{0\nu}$ и $p_{0\nu}$, соответствующие интенсивности J_ν и звуковому давлению p_ν , исследуемого звука, находятся по кривым равной громкости.

1.3. Электромагнитные волны

Электромагнитной волной называется распространение электромагнитных колебаний (электромагнитного поля).

Электромагнитными колебаниями называются взаимосвязанные колебания электрического и магнитного полей.

Существование электромагнитных волн было предсказано в середине XIX века на основе положений Максвелла о порождении электрического поля изменяющимся со временем магнитным полем и порождении магнитного поля изменяющимся со временем электрическим полем (рис. 1.4, а). Направления напряженностей возникающих полей таковы, что в предыдущих точках поля компенсируют друг друга и исчезают, но возникают в последующих областях.

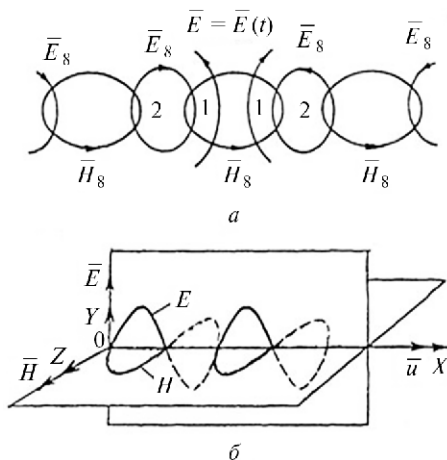


Рис. 1.4. Схема возникновения электромагнитной волны

Такое распространение совокупности взаимно порождаемых электрических и магнитных полей представлялось первоначально как электромагнитная волна. Однако впоследствии была установлена корпускулярно-волновая природа электромагнитного излучения (света). По современным представлениям электромагнитное излучение — это поток фотонов, распространение которых описывается уравнениями электромагнитных волн: квадрат амплитуды колебаний в данном месте определяет вероятность пребывания фотонов в этом месте. Поэтому для математического описания электромагнитного

излучения можно использовать первоначальное представление об электромагнитной волне.

Электромагнитные излучения разных интервалов частот были получены или открыты в разное время разными учеными при изучении разных явлений, поэтому они получили разные названия: низкочастотные волны, радиоволны, инфракрасные лучи, видимый свет (световые волны), ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи, γ -лучи. Они излучаются при разных процессах и изучаются в разных разделах физики и в разных дисциплинах: в электротехнике, в радиотехнике, в оптике, в атомной физике, в ядерной физике.

Условие возникновения электромагнитной волны — наличие изменяющегося и повторяющегося со временем электрического или магнитного поля ускоренно движущихся зарядов.

Укажем некоторые особенности и свойства электромагнитных волн:

- В отличие от упругих волн электромагнитные волны распространяются и в вакууме. Поэтому в космосе «светло», но «тихо» («видно», но «не слышно»).

- Направления напряженностей \vec{E} и \vec{H} и скорости \vec{u} электромагнитной волны взаимно перпендикулярны так, что последовательность векторов \vec{E} , \vec{H} , \vec{u} составляет правовинтовую тройку, и электромагнитная волна является поперечной волной.

- Фазы колебаний напряженностей \vec{E} и \vec{H} электромагнитной волны совпадают, они в каждой точке одновременно достигают нулевых и амплитудных значений (рис. 1.4, б).

- Скорость электромагнитной волны в среде с электрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ равна

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

где c — скорость света в вакууме, $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

Зависимость скорости электромагнитных волн от электрических и магнитных свойств вещества характеризуется показателем преломления вещества n , показывающим, во сколько раз скорость электромагнитных волн в вакууме больше, чем в веществе:

$$n = \frac{c}{u} = \sqrt{\epsilon \mu}.$$

Оказывается, что при переходе электромагнитной волны из одной среды в другую отношение показателей преломления сред n_1 и n_2 равно отношению синуса угла падения луча α к синусу угла преломления β :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Используя понятие показателя преломления, длину волны λ и волновое число k электромагнитной волны в среде можно выразить через длину волны в вакууме λ_0 и волновое число в вакууме k_0 :

$$\lambda = uT = \frac{cT}{n} = \frac{\lambda_0}{n}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_0} n = nk_0.$$

• Для учета зависимости фазы колебания \vec{E} и \vec{H} в данной точке пространства не только от расстояния r до источника волны, но и от скорости волны u в данной среде вводится величина — оптическая длина пути (о.д.п.) волны δ , равная произведению показателя преломления среды на расстояние, которое проходит волна в данной среде:

$$\delta = nr.$$

В вакууме ($n = 1$) и в воздухе ($n \approx 1$) о.д.п. волны δ и расстояние r равны друг другу ($\delta = r$).

В случаях, когда электромагнитная волна (свет) распространяется в среде, отставание фазы колебания в точке наблюдения от фазы колебания источника волны удобно выразить через волновое число в вакууме k_0 и оптическую длину пути волны δ в этой среде:

$$\varphi_c = \omega t_c = \frac{2\pi r}{T u} = \frac{2\pi m}{T c} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta = k_0 \delta,$$

и уравнение плоской гармонической электромагнитной волны записывать в виде

$$\psi = A \cos(\omega t - k_0 \delta + \varphi_0),$$

где букве ψ соответствует или напряженность электрического поля \vec{E} , или напряженность магнитного поля \vec{H} , а букве A — их амплитуды E_A и H_A .

• Объемная плотность энергии электромагнитной волны w складывается из равных друг другу объемной плотности энергии электрического поля $w_э$ и объемной плотности энергии магнитного поля $w_м$:

$$w = w_э + w_м = \frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon E^2 + \frac{1}{2}\mu_0\mu H^2 = \epsilon_0\epsilon E^2 = \mu_0\mu H^2 = \sqrt{\epsilon_0\epsilon\mu_0\mu}EH = \frac{EH}{u}.$$

Среднее по времени значение объемной плотности энергии электромагнитной волны одинаково во всех точках среды и равно

$$w_c = \frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon E_A^2 = \frac{1}{2}\mu_0\mu H_A^2 = \frac{1}{2}\sqrt{\epsilon_0\epsilon\mu_0\mu}E_A H_A = \frac{E_A H_A}{2u}.$$

Плотность потока энергии электромагнитной волны равна

$$j = wu = EH, \vec{j} = \vec{E} \times \vec{H}.$$

Среднее по времени значение модуля плотности потока энергии электромагнитной волны, т.е. интенсивность электромагнитной волны, прямо пропорциональна квадрату амплитуды колебаний \vec{E} или \vec{H} :

$$J = j_c = w_c u = \frac{1}{2}E_A H_A = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\epsilon_0\epsilon}{\mu_0\mu}}E_A^2 \sim E_A^2 \sim H_A^2.$$

Отметим, что при учете корпускулярно-волновой природы электромагнитного излучения энергия электромагнитного излучения, а следовательно, и все энергетические характеристики излучения определяются числом фотонов, а частота электромагнитного излучения определяет энергию отдельного фотона $W_\phi = h\nu$.

• Электромагнитное излучение взаимодействует с веществом, причем разные интервалы частот по-разному. В результате происходят: отражение, преломление, поглощение, дисперсия, рассеяние, двойное лучепреломление, вращение плоскости поляризации, давление света, фотоэффект, эффект Комптона, различные фотохимические процессы (фотосинтез, фотография и др).

С позиции волновых представлений, при падении электромагнитной волны на вещество каждый электрон оказывается под воздействием силы, изменяющейся со временем. Выведенные из положения равновесия, электроны начнут колебаться и излучать вто-

ричные электромагнитные волны. Эти волны, накладываясь на падающую (первичную) волну, дают результирующую волну.

На самом деле взаимодействие электромагнитного излучения с веществом сводится к поглощению падающих фотонов и излучению других фотонов.

1.4. Интерференция двух волн

Интерференция волн — это сложение двух или нескольких волн, при котором в разных точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

Интерференция волн возможна, если они когерентны. Когерентность — это согласованное протекание во времени и в пространстве нескольких колебательных или волновых процессов, проявляющиеся при их сложении. В частности, колебания будут когерентными, если разность их фаз остается постоянной во времени.

Простейший случай интерференции волн — сложение двух гармонических волн одинаковой частоты ($\omega_1 = \omega_2 = \omega$) с совпадающим направлением колебаний.

Пусть уравнения складывающихся волн имеют вид

$$\psi = A_{01}\cos(\omega t - kr), \quad \psi = A_{02}\cos(\omega t - kr).$$

(Чтобы не усложнять приводимые ниже выражения, начальные фазы φ_{01} и φ_{02} источников волн приняты равными нулю: $\varphi_{01} = \varphi_{02} = 0$.)

Уравнениями колебаний, вызванных этими волнами в точке наблюдения P на расстояниях r_1 и r_2 от источников волн S_1 и S_2 (рис. 1.5), будут

$$\psi_1 = A_1\cos(\omega t - kr_1) = A_1\cos \varphi_1, \quad \psi_2 = A_2\cos(\omega t - kr_2) = A_2\cos \varphi_2,$$

где A_1 и A_2 — амплитуды; φ_1 и φ_2 — фазы колебаний, вызванных волнами в точке наблюдения.

Для сложения колебаний, совершающихся вдоль одной прямой с одинаковой частотой, их удобно представить в виде вращающихся векторов амплитуд колебаний.

Представление гармонического колебания в виде вращающегося вектора. Сложение гармонических колебаний, совершающихся вдоль одной прямой с одинаковой частотой. Колебания можно представить в виде вектора амплитуды колебаний \vec{A} , проведенного из начала числовой оси колеблющейся величины ψ под углом к этой оси, рав-

ным фазе колебания φ (рис. 1.6), и вращающегося вокруг начала координат с угловой скоростью, равной циклической частоте колебаний ω . Проекция вращающегося вектора \vec{A} на ось ψ равна значению колеблющейся величины ψ в соответствующий момент времени.

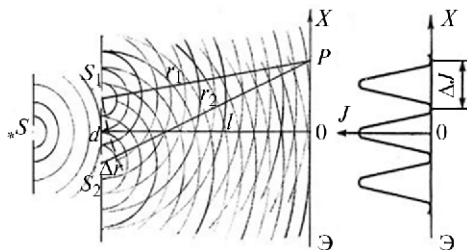


Рис. 1.5. Интерференция двух волн

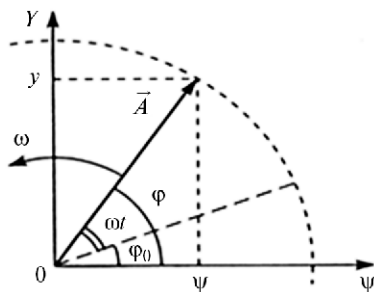


Рис. 1.6. Представление гармонического колебания в виде вращающегося вектора амплитуды

Колебаниям, вызванным в точке наблюдения волнами при их интерференции, соответствуют векторы A_1 и A_2 (рис. 1.7), результирующему колебанию $\psi = \psi_1 + \psi_2$ соответствует вектор \vec{A} , равный сумме \vec{A}_1 и \vec{A}_2 :

$$\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2.$$

Векторы \vec{A}_1 и \vec{A}_2 вращаются с одинаковой угловой скоростью ω , поэтому вектор \vec{A} вращается с той же угловой скоростью ω . Следовательно, результирующее колебание будет также гармоническим с той же циклической частотой ω , а уравнение результирующего колебания имеет вид

$$\psi = A_p \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru