СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Целями освоения дисциплины физика являются: освоение знаний о механических, тепловых, электромагнитных и квантовых явлениях; величинах, характеризующих эти явления; законах, которым они подчиняются; методах научного познания природы.

Овладение умениями проводить наблюдения природных явлений, описывать и обобщать результаты наблюдений, использовать простые измерительные приборы; применять полученные знания для объяснения принципов действия технических устройств; для решения физических задач.

Развитие познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей в ходе решения физических задач и выполнения лабораторных работ; способности к самостоятельному приобретению новых знаний в соответствии с жизненными потребностями и интересами.

Воспитание убежденности в необходимости разумного использования достижений науки и технологий для дальнейшего развития человеческого общества.

Применение полученных знаний и умений для решения практических задач в повседневной жизни и в своей будущей профессии.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов следующих общекультурных (ОК) и профессиональных компетенций (ПК) в соответствии с ФГОС ВПО по данному направлению:

а) общекультурных (ОК):

- владение культурой мышления, способностью к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения (ОК-1);

- способностью представить современную картину мира на основе естественнонаучных, математических знаний, ориентироваться в ценностях бытия, жизни, культуры (ОК-11);

б) профессиональных (ПК):

- способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ПК-1).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Знать:

- ❖ Смысл основных понятий: физическое явление, физическая величина, модель, гипотеза, принцип, постулат, теория.
- ❖ Смысл основных физических величин.
- ❖ Смысл физических законов (механики, термодинамики, электромагнетизма, оптики и атомной физики), принципов и постулатов (формулировка, границы применимости).
- ❖ Вклад российских ученых, оказавших наибольшее влияние на развитие физики.

Уметь:

- ❖ Применять законы физики в сельскохозяйственном производстве;
- ❖ Логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь;
- ❖ Описывать и объяснять результаты наблюдений и экспериментов;
- ❖ Описывать фундаментальные опыты, оказавшие существенное влияние на развитие физики.
- ❖ Применять полученные знания для решения физических задач.

Владеть:

- ❖ Методикой проведения физического эксперимента в лабораторных условиях;
- ❖ Навыками работы на современной учебно-научной аппаратуре при проведении лабораторных экспериментов;
- ❖ Умением правильного объяснения результатов эксперимента;
- ❖ Навыками использования приобретенных знаний и умений в практической деятельности и повседневной жизни для обеспечения безопасности жизнедеятельности в процессе использования бытовых электроприборов, средств радио- и телекоммуникационной связи.

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.

Лекция №1
Тема: “Кинематика материальной точки”.

План лекции:

Введение
1. Предмет физика. Механика. Кинематика.
2. Движение, способы описания движения.
3. Скорость и ускорение как производные.
4. Вращательное движение. Угловая скорость. Угловое ускорение.
5. Связь между линейными и угловыми величинами.

Введение

Физика *– наука о наиболее общих законах природы. Источниками физических знаний являются наблюдения физических явлений и опыты.*

Физическое явление *– совокупность закономерно связанных изменений, происходящих в природе с течением времени.*

Наблюдение – *созерцание физического явления.*

Опыт *– специально воспроизведенное в лабораторных условиях физическое явление.*

На основе анализов физических явлений и опытов выявляется физические законы – закономерные связи между происходящими явлениями. При их анализе бывает трудно отделить главное от второстепенного. Для этого используют физические модели или схемы, которые дают упрощенное (приблизительное) представление отдельного физического явления. При этом учитываются только существенные признаки данного явления. Например: любой предмет в физике называется *телом*. *Тело, размером, которого в данных условиях можно пренебречь называется* ***материальной точкой***. Считают, что масса материальной точки сосредоточена в ней (то есть тело не имеет размеров).

1. Предмет физика. Механика. Кинематика

Понятие механика, физика, кинематика появились в древней Греции в 7-6 вв. до н.э. Еще в древней Греции говорилось о первичности материи и о материальности окружающего нас мира.

Материя существует в виде вещества и полей: гравитационных, электрических, электромагнитных, атомных, ядерных и др.

Задача физиков не только объяснить те или иные явления, но и создать целостное представление о мире. Эйнштейн писал: «Высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых возможно получить картину мира».

Первым известным физиком механиком в истории человечества был Архимед, который уделял большое внимание созданию различных приборов, в том числе и военного оборудования.

Механика – *(«механе» - орудие, приспособление, уловка, ухищрение, позволяющее перехитрить природу). В механике рассматривается движение тел.*

Кинематика – *раздел физики, в котором изучается движение тел, но не исследуются причины вызывающие это движение.*

Динамика — *(от греч, dynatis сила) раздел механики, в котором изучается движение тел под действием приложенных к ним сил.*

Статика — *раздел механики, изучающий равновесие тел — твердых, жидких или газообразных, находящихся в состоянии покоя под воздействием внешних сил.*

Единицы измерения физических величин

Принято различать два основных вида измерений:

1. ***Прямое*** *– результат получается из опытных данных сравнения измеряемой величины с эталоном (измерение длины – линейкой, штангенциркулем, микрометром; времени – часами, секундомером).*

2. ***Косвенное*** *– результат получается на основании опытных данных прямых измерений нескольких величин, связанных между собой функциональной зависимостью.*

Например: $\upsilon = \frac{S}{t}$.

Совокупность основных единиц и выраженных через них производных, называется системой единиц СИ, принятой Международной конвенцией.

Основные единицы: длина – метр (м), масса – килограмм (кг), время – секунда (с), сила тока – Ампер (А), температура – Кельвин (К), количество вещества – моль (масса изотопа C^{12} 0,012 кг), сила света – Кандела.

Дополнительные единицы: радиан, стерадиан (плоский и объемный угол).

Широко используются другие системы, например, физическая СГС. Название системы складывается из названий основных единиц – сантиметр, грамм, секунда.

2. Движение. Способы описания движения

Механическое движение – *изменение положения тела или частей тела в пространстве с течением времени.*

Существует два вида механического движения:

1) поступательное;

2) вращательное.

При **поступательном движении** *все точки тела движутся одинаково, имеют одинаковые скорости и ускорения.*

Вращательным движением *называют такое движение, при котором все точки тела, движутся в плоскостях, перпендикулярных неподвижной прямой, называемой* ***осью вращения****, и описывают окружности, центры которых лежат на этой оси (роторы турбин, генераторы двигателей).*

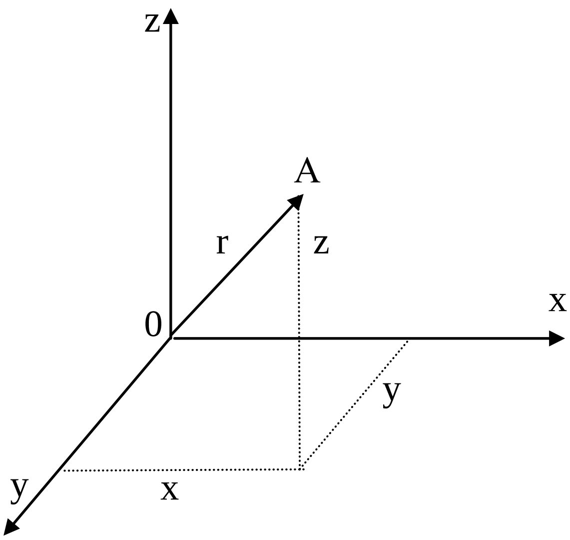


Рис.1.1. Определение положения точки A координатами x, y и z, или радиусом – вектором $\vec{r}$

Тело, относительно которого определяется положение других (движущихся) тел, называется **телом отсчета**. Тело отсчета, связанная с ним система координат и синхронизированные между собой часы образуют **систему отсчета**. Основным свойством механического движения является **относительность**.

Наиболее простым случаем движения является движение материальной точки.

Материальной точкой *называется тело, формой и размерами которого можно пренебречь в данных условиях движения или по сравнению с расстоянием, на котором оно рассматривается (спутник, футбольный мяч в полете).*

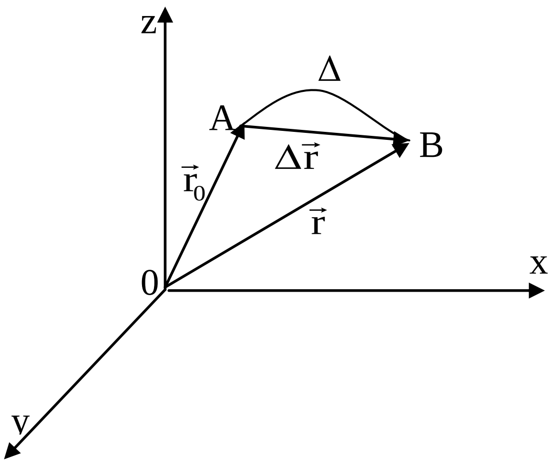


Рис.1.2. Движение материальной точки вдоль произвольной траектории AB

Выбираем систему отсчета, относительно которой будем рассматривать движение материальной точки. Например: прямоугольную систему координат XYZ. Движение материальной точки можно задать тремя скалярными уравнениями $x = f_1(t)$; $y = f_2(t)$; $z = f_3(t)$ или одним векторным $\vec{r} = \vec{r}(t)$ (рис.1.1), а положение материальной точки A – тремя координатами (X, Y, Z).

Траектория – *это линия, вдоль которой движется тело.*

В зависимости от формы траектории движение может быть:

-**прямолинейным** (траектория – прямая линия)

-**криволинейным** (траектория – кривая линия)

Траектория зависит от системы отсчета (предмет, падающий в равномерно движущемся поезде, падает вертикально вниз относительно поезда и по параболе относительно земли).

Путь – *расстояние, измеренное по траектории от начальной точки до конечной (длина траектории), (AB – путь = ΔS), где ΔS – скалярная физическая величина.*

Перемещение $\Delta\vec{r}$ – *направленный отрезок, соединяющий начальную точку с конечной.* $\Delta\vec{r}$ *- векторная величина (модуль, направление).*

$$\Delta\vec{r} = \vec{r} - \vec{r}_0 \qquad (1.1)$$

3. Скорость и ускорение как производные

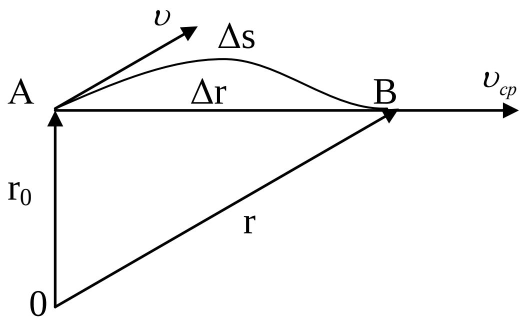


Рис.1.3. Движение точки по криволинейной траектории

Для более полной характеристики движения вводится понятие *скорости.*

Скорость – *это векторная физическая величина, определяющая быстроту движения, и его направление в данный момент времени.*

Пусть материальная точка, двигаясь по криволинейной траектории, прошла за промежуток времени Δt путь ΔS (рис.1.3)

Отношение пути, пройденного материальной точкой, к промежутку времени, за который этот путь пройден, называется **средней скоростью движения.**

$$<\vec{\upsilon}> = \frac{\Delta\vec{S}}{\Delta t}\left[\frac{м}{с}\right]$$

$$\text{или } <\vec{\upsilon}> = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}\left[\frac{м}{с}\right] \qquad (1.2)$$

Предел этого отклонения при Δt→0 назовем скоростью в данный момент времени или ***мгновенной скоростью.***

$$\vec{\upsilon} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{S}}{\Delta t} = \frac{dS}{dt} \qquad (1.3)$$

или $\vec{\upsilon} = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}$

Мгновенная скорость движения *в любой точке траектории есть вектор, направленный по касательной к траектории, а по модулю равный пределу средней скорости при стремлении промежутка времени к нулю.*

Мгновенная скорость – *первая производная перемещения по времени.*

При $\Delta t \to 0$ численное значение скорости $\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{S}}{dt}$, откуда $d\vec{S} = \vec{\upsilon} dt$.

Проинтегрируем это выражение от t до t+Δt

$$S = \int_{t}^{t+\Delta t} \upsilon dt \tag{1.4}$$

Если движение равномерное

$$S = \upsilon t \tag{1.5}$$

где S=[м]; υ=[м/с]; t=[с].

Равномерным *называется движение с неизменной скоростью.*

При ***неравномерном*** движении скорость может меняться как по модулю, так и по направлению.

Если движение неравномерное, то для его характеристики вводится понятие ускорения.

Ускорение – *физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости по величине и направлению.*

Пусть материальная точка переместилась за малый промежуток времени Δt из точки “А”, где она имела скорость $\vec{\upsilon}_1$, в точку “В”, где она имеет скорость υ_2.

Изменение скорости движения точки есть вектор $\Delta\upsilon$, равный разности векторов конечной и начальной скоростей

$$\Delta\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_2 - \vec{\upsilon}_1 \tag{1.6}$$

Среднее ускорение – *это отношение изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло.*

$$< \vec{a} > = \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} \tag{1.7}$$

Ускорение направлено в ту же сторону, что и приращение скорости $\Delta\vec{\upsilon}$.

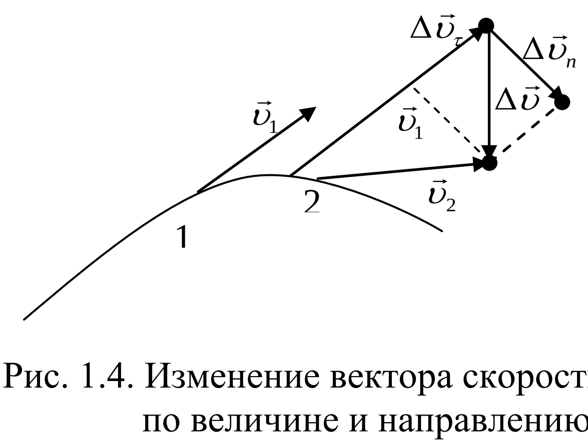


Рис. 1.4. Изменение вектора скорости по величине и направлению

Предел этого отношения при $\Delta t \to 0$ есть 1-я производная скорости по времени и называется ***мгновенным ускорением.***

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} \qquad (1.8)$$

так как

$$\upsilon = \frac{dS}{dt} \Rightarrow \vec{a} = \frac{d\left(\frac{dS}{dt}\right)}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2} \qquad (1.9)$$

Ускорение *есть вторая производная пути по времени*. Измеряется [a] =[м/с^2].

В общем случае ускорение может зависеть от времени. Это движение с переменным ускорением. Ускорение, как и скорость, имеет направление – если его направление совпадает с вектором скорости – **движение равноускоренное**, а если противоположно – **равнозамедленное**.

Рассмотрим *пример*, когда пройденный путь определяется выражением

$$S = A + Bt + Ct^2 \qquad (1.10)$$

Возьмем первую и вторую производные пути по времени

$$\frac{dS}{dt} = \upsilon = B + 2Ct, \qquad (1.11)$$

$\frac{d^2S}{dt^2} = a = 2C = const \Rightarrow$ это случай равноускоренного движения.

Более наглядным будет обратный вывод через интегрирование:

$$S = \int_{t_1}^{t_1} \upsilon \cdot dt$$

$$\upsilon = \int_{t_1}^{t_1} a \cdot dt$$

Значит, $C = \frac{a}{2}$. Если в выражениях пути и скорости приравнять t=0 и обозначить S_0 = A – начальный пройденный путь, υ_0 = B – начальная скорость.

Получаем формулы при равноускоренном движении без учета времени: путь, скорость и ускорение при равноускоренном движении

$$S = S_0 + \upsilon_0 t + \frac{at^2}{2} \qquad (1.12)$$

$$\upsilon = \upsilon_0 + at \qquad (1.13)$$

Из формулы скорости выразим ускорение

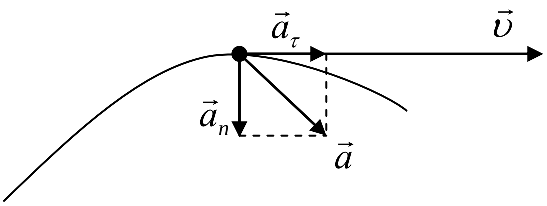


Рис. 1.5. Касательное и нормальное ускорение

$$a = \frac{\upsilon - \upsilon_0}{t} \quad (1.14)$$

При криволинейном движении вектор ускорения может образовать с вектором скорости произвольный угол.

Разложим вектор ускорения $\vec{a}$ на две составляющее $\vec{a}_\tau$ - тангенциальное, и $\vec{a}_n$ - нормальное. По теореме Пифагора

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} \quad (1.15)$$

$\vec{a}_\tau$ - ***тангенциальное ускорение*** *характеризует изменение скорости по величине и определяется по формуле*:

$$a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt} \quad (1.16)$$

$\vec{a}_n$ - ***нормальное ускорение*** *характеризует изменение скорости по направлению и определяется по формуле:*

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{R} \quad (1.17)$$

1. $\vec{a}_n = 0$, $\vec{a}_\tau = 0$ - равномерное прямолинейное движение;
2. $\vec{a}_n = \mathrm{const}$, $\vec{a}_\tau = 0$ - равномерное движение по окружности;
3. $\vec{a}_n = \mathrm{const}$, $\vec{a}_\tau = \mathrm{const}$ - равноускоренное движение по окружности;
4. $\vec{a}_n = 0$, $\vec{a}_\tau = \mathrm{const}$ - равноускоренное прямолинейное движение.

4. Вращательное движение. *Угловая* скорость. Угловое ускорение

Абсолютно твердым телом, *называется тело деформациями которого можно пренебречь в данных условиях.*

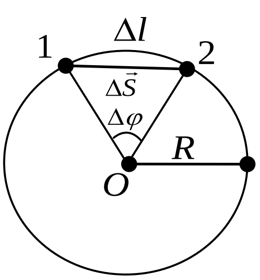


Рис. 1.6. Движение тела по окружности

При **вращательном движении** все точки, принадлежащие твердому телу, описывают окружности относительно оси вращения.

Вращательное движение характеризуется углом поворота $\Delta\varphi$, [рад]; **угловой скоростью ω** [рад/с; $с^{-1}$] **и угловым ускорением** $\vec{\varepsilon}$ [рад/с^2].

Средней угловой скоростью ω *называется отношение $\Delta\varphi$ углового пути к промежутку времени, за который этот поворот произошел.*

В случае равномерного движения

$$<\vec{\omega}>=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \qquad (1.18)$$

где $\Delta\varphi$ – угол поворота, рад; $<\vec{\omega}>$ – средняя скорость рад/с; Δt – время, с.

В случае неравномерного движения мгновенная угловая скорость будет определяться выражением:

$$\vec{\omega}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}=\frac{d\varphi}{dt} \qquad [\text{рад/с};\ \text{с}^{-1}] \qquad (1.19)$$

Мгновенная угловая скорость – *первая производная угла поворота по времени.*

При неравномерном вращательном движении вводится понятие углового ускорения.

Среднее угловое ускорение – *отношение изменения угловой скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло*

$$<\vec{\varepsilon}>=\frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} \qquad (1.20)$$

Мгновенное угловое ускорение – *предел среднего углового ускорения при $\Delta t\to 0$*

$$\vec{\varepsilon}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\omega}{\Delta t}=\frac{d\omega}{dt} \quad [\text{рад/с}^2] \qquad (1.21)$$

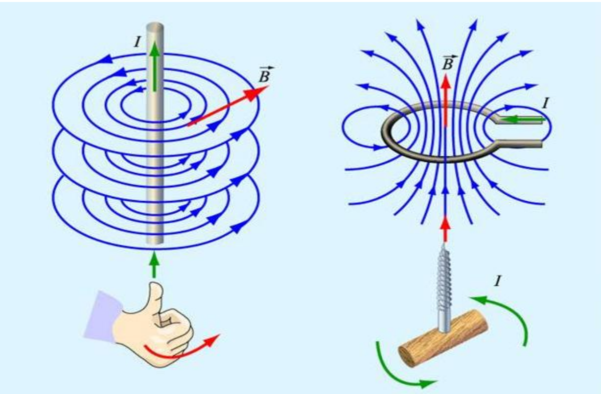


Рис. 1.7. К правилу Буравчика

Мгновенное угловое ускорение – *это первая производная угловой скорости по времени и вторая производная угла поворота по времени*

$$\varepsilon=\frac{d\omega}{dt}=\frac{d(\frac{d\varphi}{dt})}{dt}=\frac{d^2\varphi}{dt^2} \qquad (1.22)$$

Линейное а и угловое ε ускорения связаны между собой соотношением:

$$a=\varepsilon R \qquad (1.23)$$

Направление угловой скорости определяется **правилом буравчика**: *вектор угловой скорости направлен в сторону поступательного движения буравчика, рукоятка которого вращается в направлении линейной скорости.*

Линейная υ и угловая ω скорости связаны между собой соотношением:

$$\upsilon=\omega R \qquad (1.24)$$

При равномерном движении тела по окружности величины υ и ω остаются неизменными. В этом случае при движении изменяется только направление вектора $\vec{\upsilon}$. Равномерное движение тела по окружности является движением с нормальным (центростремительным) ускорением. Модуль центростремительного ускорения связан с линейной υ и угловой ω скоростями соотношениями:

$$a_n = \frac{\upsilon^2}{R} = \omega^2 R \qquad (1.25)$$

Пусть материальная точка совершила полный оборот: $<\varphi = 2\pi$, тогда $\Delta t = T$ - **период** – *время, в течение которого совершается один полный оборот, следовательно*

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ - **угловая скорость при равномерном вращении**} \qquad (1.26)$$

Так как $\nu = \frac{1}{T}$ - **частота** – *число полных оборотов в единицу времени,* $\nu = [\text{Гц}]$ - герц, то

$$\omega = 2\pi\nu \qquad (1.27)$$

Если материальная точка совершает полный оборот, то путь, пройденный ею - $\Delta S = 2\pi r R$, линейная скорость $\upsilon = \omega R$, тогда

$$\upsilon = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu \qquad (1.28)$$

5. Связь между линейными и угловыми величинами

Поступательное движение	Вращательное движение
$<\vec{\upsilon}> = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$, $<\vec{\upsilon}> = \frac{\Delta\vec{S}}{\Delta t}$	$<\vec{\omega}> = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$
$\vec{\upsilon} = \frac{dr}{dt}$, $\vec{\upsilon} = \frac{dS}{dt}$	$\vec{\omega} = \frac{d\varphi}{dt}$
$<\vec{a}> = \frac{\Delta\vec{\upsilon}}{\Delta t}$	$<\varepsilon> = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$
$a = \frac{d\upsilon}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2}$	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$
$\upsilon = \upsilon_0 + at$	$\omega = \omega_0 + \varepsilon t$
$\upsilon = \int a \cdot dt$	$\omega = \int \varepsilon \cdot dt$
$x = \int (\upsilon_0 + at) \cdot dt$	$\varphi = \int (\omega_0 + \varepsilon t) \cdot dt$
$S = \upsilon_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}$	$\varphi = \omega_0 \cdot t + \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2}$
$\upsilon = \frac{2\pi R}{T}$	$\omega = \frac{2\pi}{T}$
$\upsilon = 2\pi\nu R$	$\omega = 2\pi\nu$
$S = R\varphi$, $\upsilon = R\omega$, $a_\tau = R\varepsilon$, $a_n = \omega^2 R$	

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое физика?
2. Дайте определение механического движения.
3. Дайте определение механики, кинематики, динамики.
4. Дайте определение системы отсчета.
5. Дайте определение траектории.
6. Дайте определение пути движения.

7. Дайте определение перемещения.
8. Дайте определение скорости движения.
9. Дайте определение ускорения.
10. Укажите формулу для вычисления средней скорости.
11. Дайте определение мгновенной скорости.
12. Укажите формулу для вычисления мгновенной скорости, как производной координаты по времени.
13. Укажите формулу для вычисления среднего ускорения.
14. Укажите формулу для вычисления мгновенного ускорения.
15. Укажите уравнение равноускоренного движения.
16. Запишите формулу для вычисления тангенциального ускорения.
17. Укажите формулу для вычисления нормального ускорения.
18. Укажите формулу средней угловой скорости.
19. Укажите формулу для вычисления мгновенной угловой скорости.
20. Выведите формулу, связывающую угловую и мгновенную скорости.
21. Дайте определение периода обращения.
22. Дайте определение частоты обращения.
23. Запишите формулу для вычисления циклической частоты.
24. Запишите формулу для вычисления среднего углового ускорения.
25. Запишите формулу для вычисления мгновенного углового ускорения.
26. Выведите формулу, связывающую угловое и тангенциальное ускорение.

Вопросы для самостоятельного изучения

1.Роль физики в сельскохозяйственном производстве.

Лекция №2

Тема: “Динамика материальной точки и твердого тела”.

План лекции:

1 1-ый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета.
2. Масса. Сила. Плотность.
3. 2-й и 3-й законы Ньютона.
4. Силы в природе.
5. Динамика вращательного движения.

1. 1-ый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета

Динамика *– это раздел механики, рассматривающий причины, вызывающие те или иные перемещения. В основе динамики лежат законы Ньютона.*

Законы Ньютона (1687), являются ***фундаментальными законами природы,*** подтвердить или опровергнуть которые можно только на опыте.

Первый закон Ньютона: *всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока внешние воздействия не выведут его из этого состояния.*

Способность тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется **инерцией.** Поэтому 1-ый закон Ньютона называется ***законом инерции.***

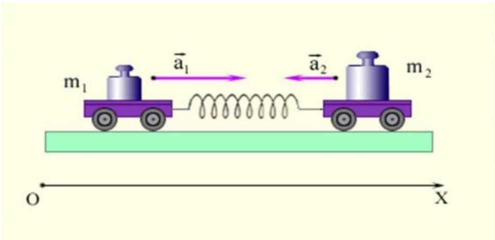


Рис. 2.1.
Сравнение масс двух тел

Из 1-го закона Ньютона следует, что равномерное прямолинейное движение или покой есть естественные состояния тел, освобождённых от внешнего воздействия. Инерция – не причина движения, а его свойство.

В кинематике все системы отсчета равноправны. В динамике одно и то же движение в различных системах будет различным.

Система отсчета, в которой выполняется 1-ый закон Ньютона, называется ***инерциальными.***

Существование инерциальных систем отсчета постулируется (принимается без доказательства) в классической механике. Но если есть хотя бы одна инерциальная система отсчета, то любая другая система, движущаяся относительно нее равномерно и прямолинейно, так же будет являться инерциальной системой.

2. Масса. Сила. Плотность

Масса *– это свойство тела, характеризующее его инертность*. При одинаковом воздействии со стороны окружающих тел, одно тело может быстро изменять свою скорость, а другое в тех же условиях – значительно медленнее. Принято говорить, что второе из этих двух тел обладает большей инертностью, или, другими словами, второе тело обладает большей массой.

Масса тела – *мера инертности тела в поступательном движении,* ***скалярная величина***. Опыт показывает, что если два тела с массами m_1 и m_2 соединить в одно, то масса m составного тела остаётся равной сумме масс m_1 и m_2 этих тел (рис.2.1):

$$m = m_1 + m_2$$

Это свойство масс называют ***аддитивностью***. Причиной ускорения тела служит некомпенсированное действие на него других тел. Это действие носит взаимный характер и называется ***взаимодействием.***

Физическая величина, численно равная массе единицы объёма вещества, ***называется плотностью (ρ)***. При равномерном распределении массы по объёму - $\rho = \frac{m}{V}\ \left[\frac{кг}{м^3}\right]$, при неравномерном - $\rho = \frac{dm}{dV}$.

Силой *называется векторная величина физическая величина, которая является мерой механического воздействия на тело со стороны других тел или полей, в результате, которого тело приобретает ускорение или деформируется.*

3. 2-й и 3-й законы Ньютона

Второй закон Ньютона*: ускорение материальной точки в инерциальной системе отсчета прямо пропорционально действующей на точку силе, и обратно пропорционально его массе, по направлению совпадает с силой:*

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \qquad (2.1)$$

или

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \qquad (2.2)$$

Известно, что

$$\vec{a} = \frac{d\vec{\upsilon}}{dt} \qquad (2.3)$$

Подставим значение ускорения в формулу силы. Получим ***основное уравнение динамики поступательного движения***:

$$\vec{F} = m\frac{d\vec{\upsilon}}{dt} \qquad (2.4)$$

Введем массу под знак дифференциала.

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{\upsilon})}{dt}$$

где $\vec{p} = m\vec{\upsilon}$ - импульс материальной точки (2.5)

Импульсом *материальной точки называется векторная величина, равная произведению массы точки на скорость ее движения.*

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = p'(t) \qquad (2.6)$$

- второй закон Ньютона, выраженный через производную импульса по времени.

Третий закон Ньютона: *в инерциальной системе отсчета силы взаимодействия двух тел равны по модулю и направлены в противоположные стороны (рис. 2.2):*

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \qquad (2.7)$$

Знак минус указывает на противоположную направленность векторов сил. Эти силы имеют одну и ту же природу, приложены к различным телам и не имеют равнодействующей.

Силы, действующие между частями одного и того же тела, называются **внутренними.** Если тело движется как целое, то его ускорение определяется только внешней силой. Внутренние силы исключаются из второго закона Ньютона, так как их векторная сумма равна нулю, и они не могут изменить состояния системы.

Рассмотрим пример: Человек действует на груз с такой же по модулю силой, с какой груз действует на человека. Эти силы направлены в противоположные стороны.

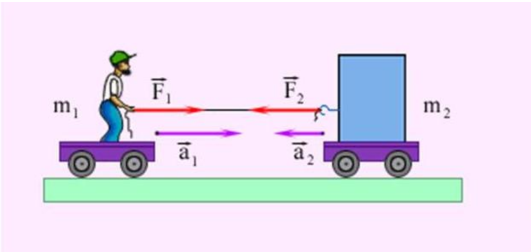


Рис. 2.2. Иллюстрация третьего закона Ньютона

Они имеют одну и ту же физическую природу – это упругие силы каната. Сообщаемые обоим телам ускорения обратно пропорциональны массам тел

$$\vec{a}_1 = -\frac{m_2}{m_1}\vec{a}_2 \qquad \frac{\overrightarrow{a_1}}{\overrightarrow{a_2}} = -\frac{m_2}{m_1}$$

4. Силы в природе

В природе существуют много разных видов сил: упругости, тяготения, тяжести, Лоренца, Ампера, взаимодействия неподвижных зарядов и т.д., но все они, в конечном счете, сводятся к небольшому числу фундаментальных (основных) взаимодействий. Современная физика считает, что существуют в природе лишь четыре вида взаимодействий:

1) Гравитационное взаимодействие (осуществляется через гравитационные поля);
2) Электромагнитное взаимодействие (осуществляется через электромагнитные поля);
3) Ядерное (или сильное) (обеспечивает связь частиц в ядре);
4) Слабое (отвечает за процессы распада элементарных частиц).

В рамках классической механики имеют дело с гравитационными и электромагнитными силами, к которым относятся упругие силы и силы трения. Гравитационные и электромагнитные силы являются фундаментальными – их нельзя свести к другим, более простым силам. Упругие силы и силы трения не являются фундаментальными. Фундаментальные взаимодействия отличаются простотой и точностью законов.

Гравитационные силы (силы тяготения) – это силы притяжения, которые подчиняются закону всемирного тяготения (рис. 2.3). Закон всемирного тяготения был открыт И. Ньютоном в 1682 году.

Зная, как движутся планеты, Ньютон хотел определить, какие силы на них действуют. Такой путь носит название обратной задачи механики. Решение этой задачи и привело Ньютона к открытию **закона всемирного тяготения:** *Все тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними*

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r_2} \tag{2.8}$$

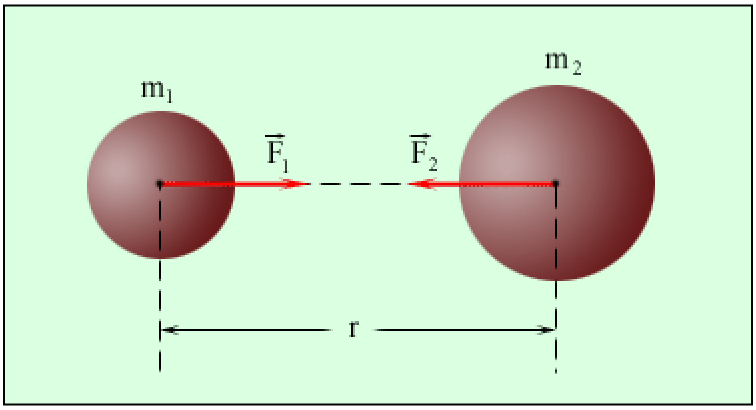


Рис. 2.3. Гравитационные силы притяжения

Коэффициент пропорциональности G одинаков для всех тел в природе. Его называют ***гравитационной постоянной***

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11}\ \frac{Н \cdot м^2}{кг^2} \tag{2.9}$$

Одним из проявлений силы всемирного тяготения является ***сила тяжести.*** *Сила, с которой тело притягивается к Земле, называется* **силой тяжести.**

$$\vec{F} = mg \qquad (2.10)$$

Так принято называть силу притяжения тел к Земле вблизи ее поверхности. Если обозначить M - массу Земли, $R_з$ – ее радиус, m – массу данного тела, то сила тяжести будет определяться выражением:

$$F = G\frac{M}{R_з^2}m = mg \qquad (2.11)$$

где ***g – ускорение свободного падения*** у поверхности Земли:

$$g = G\frac{M}{R_з^2} \qquad (2.12)$$

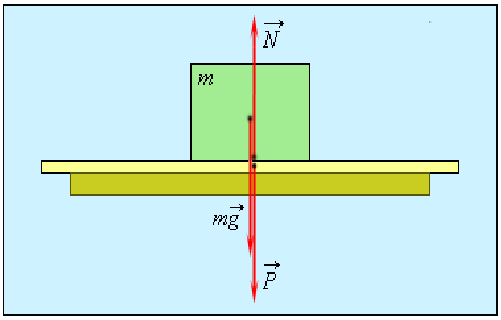


Рис. 2.4. Вес тела и сила тяжести

Пусть тело лежит на неподвижном относительно Земли горизонтальном столе (рис. 2.4). Систему отсчета, связанную с Землей, будем считать ***инерциальной.*** На тело действуют две силы: сила тяжести $m\vec{g}$ и сила реакции опоры $\vec{N}$. По второму закону Ньютона $m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$. Так как тело покоится, то *a*=0. В проекциях на ось X получим: $N - mg = 0$. Отсюда $N = mg$.

Сила, с которой тело действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес называется ***весом тела.***

По третьему закону Ньютона сила, с которой поверхность действует на тело, равна силе, с которой тело действует на поверхность. Таким образом, в состоянии покоя или при равномерном движении вес тела равен силе тяжести: $P = mg$

Вес тела $\vec{P}$ и сила реакции опоры $\vec{N}$ ***приложены к разным телам!***

Если тело покоится или движется равномерно прямолинейно по горизонтальной поверхности, то *P*=*mg* (рис. 2.6)

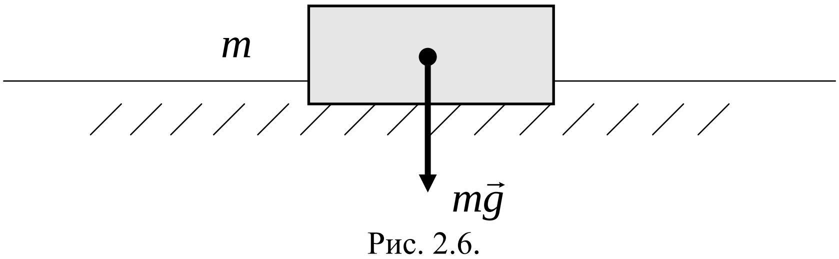


Рис. 2.6.

Если тело массой m поднимается вверх с ускорением $\vec{a}$, то *P*=*mg*+*ma*=*m*(*g*+*a*) – **состояние перегрузки** (рис. 2.7)

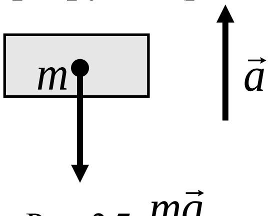


Рис. 2.7. $m\vec{g}$

Если тело массой m опускается вниз с ускорением $\vec{a}$ $P = mg - ma = m(g - a)$ - **состояние частичной невесомости** (рис. 2.8)

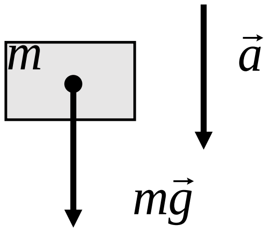


Рис. 2.8.

В случае, если тело падает с ускорением $\vec{a} = \vec{g}$, то $P = m(g - g) = 0$ - **состояние полной невесомости**.

Состояние невесомости, когда тело не давит на опору и не испытывает внутренних напряжений. Оно возникает, например, в кабине космического корабля при его движении по орбите при выключенных реактивных двигателях.

Если вектор ускорения $\vec{a}$ направлен вертикально вверх (рис. 6), то *a<0* и, следовательно, вес тела всегда будет превышать по модулю силу тяжести.

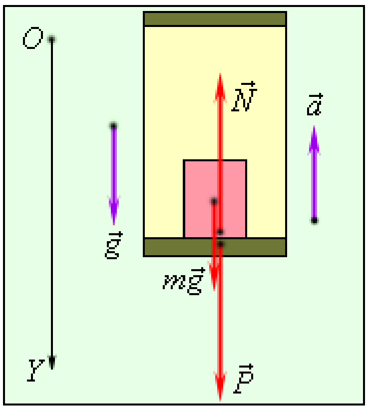


Рис. 2.9. Перегрузка

Увеличение веса тела, вызванное ускоренным движением опоры или подвеса, называют перегрузкой. Действие перегрузки испытывают космонавты, как при взлете космической ракеты, так и на участке торможения при входе корабля в плотные слои атмосферы. Большие перегрузки испытывают летчики при выполнении фигур высшего пилотажа, особенно на сверхзвуковых самолётах.

Сила упругости

Сила, возникающая при деформации тел, называется силой упругости. *Смещение частей тела относительно друг друга под действием внешней силы, называется* ***деформацией тел****.*

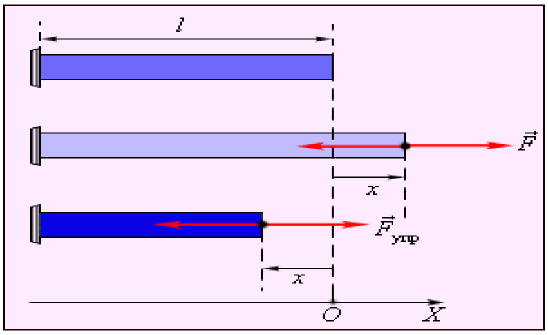


Рис. 2.10. Деформация растяжения

Если после снятия внешней нагрузки, тело полностью восстанавливает свои размеры и форму, то ***деформация называется упругой***.

В области упругой деформации сила упругости прямо пропорциональна деформации и направлена в противоположную сторону смещения частей тела – ***закон Гука.***

$$F = -k \cdot x \tag{2.13}$$

Физическая величина $\varepsilon = \dfrac{\Delta\ell}{\ell_0}$, *показывающая во сколько раз абсолютная деформация отличается от начальных размеров тела, называется* ***относительной деформацией***.

Физическая величина, равная отношению силы, действующей на образец, к площади поперечного сечения образца, называется ***механическим напряжением***.

$$\sigma = \frac{F}{S} \tag{2.14}$$

В СИ измеряется в паскалях $[Па] = \left[\dfrac{Н}{м^2}\right]$.

Опыт показывает, что *в области упругой деформации механическое напряжение прямо пропорционально относительной деформации тела* (закон Гука для относительной деформации).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{2.15}$$

Физическая величина E называется модулем Юнга и зависит от рода вещества, из которого состоит тело. ***Модуль Юнга*** *численно равен механическому напряжению, которое способно изменить размеры образца в два раза.*

Силы трения

Силы трения являются одним из проявлений контактного взаимодействия тел, в частности сила трения скольжения возникает при скольжении одного тела по поверхности другого и направлена по касательной к трущимся поверхностям в сторону, противоположную движению данного тела относительно другого (рис. 2.11*)*.
Трение является одним из проявлений контактного взаимодействия тел.

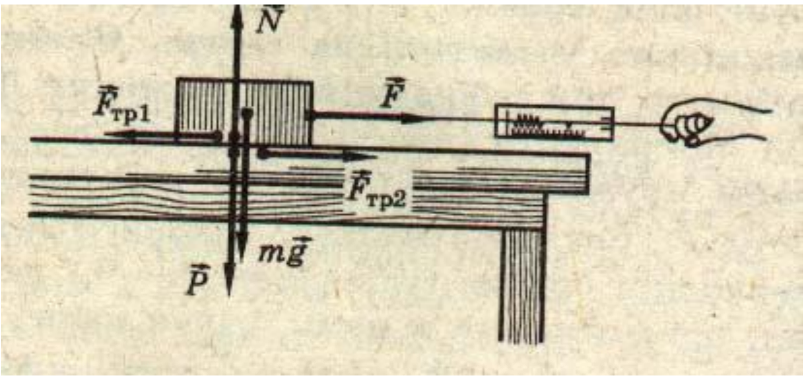


Рис. 2.11.
К определению силы трения

Трение различают двух видов: внешнее и внутреннее.

Силы внешнего трения возникают на поверхности контакта двух тел. ***Внутреннее трение*** *– это тангенциальное взаимодействие между слоями одного и того же тела.* Если сила трения возникает при движении твердого тела в жидкой или газообразной среде, то ее относят к силам внутреннего трения.

Трение между поверхностями твердых тел при отсутствии какой-либо прослойки или смазки называется ***сухим****. Трение между твердым телом и жидкой или газообразной средой, а также между слоями такой среды называется* ***вязким или жидким****.*

Рассмотрим сухое трение. Различают три его вида: трение покоя, трение скольжения и трение качения.

а) **Сила трения покоя** – *это сила, действующая между соприкасающимися телами, находящимися в состоянии покоя, равная по величине и противоположно направленная силе, понуждающей тело к движению.*

До возникновения скольжения сила трения покоя может иметь любое направление и принимать любое значение от нуля до некоторого максимального, при котором возникает скольжение: $0 \le \vec{F}_{тр.пок} \le \vec{F}_{тр.пок}^{\max}$.

$$\vec{F}_{тр.пок}^{\max} = \mu \mathrm{N},$$

где μ- коэффициент трения покоя, зависит от физической природы соприкасающихся тел и обработки их поверхностей,

б) **Трение скольжения**. Если к телу приложить внешнюю силу, превышающую $\left|\vec{F}_{тр.пок}^{\max}\right|$, то тело начинает скользить. Сила трения продолжает существовать и называется силой трения скольжения.

Силы трения скольжения также зависят от нормального давления на поверхность соприкосновения. При постоянной скорости движения:

$$F_{тр.ск} = \mu_{ск} \mathrm{N}. \qquad (2.16)$$

Коэффициент трения скольжения $\mu_{ск}$ зависит от материала тел, состояния поверхностей и от относительной скорости движения тел.

в) **Трение качения**. При качении тела по поверхности другого возникает особая сила – сила трения качения, которая препятствует качению тела. Сила трения качения при тех же материалах соприкасаемых тел всегда меньше силы трения скольжения. Этим пользуются на практике, заменяя подшипники скольжения шариковыми или роликовыми подшипниками. Кулон опытным путем установил для катящегося цилиндра радиуса R:

$$F_K = \mu_K \frac{N}{R}, \qquad (2.17)$$

Где $\mu_к$ – коэффициент трения качения, величина которого уменьшается с увеличением твердости материала и шероховатости его поверхности.

Для катящегося обода $$F_K = \mu_K \frac{N}{2R}. \qquad (2.18)$$

5. Динамика вращательного движения

Пусть материальная точка m_i находится на расстоянии r_i от оси вращения. Приложим к этой точке силу $\vec{F}_i$. Под действием силы точка начинает вращательное движение вокруг оси (рис. 2.12).

Момент инерции материальной точки определим по формуле:

$$I_i = m_i \cdot r_i^2 \qquad (2.19)$$

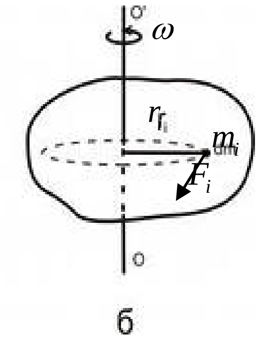


Рис. 2.12.

Момент инерции материальной точки, *вращающейся вокруг неподвижной оси, равен произведению массы этой точки на квадрат расстояния до оси.* Любое тело можно рассматривать как совокупность материальных точек, не смещающихся друг относительно друга. Такое, не поддающееся деформации тело, называется ***абсолютно твердым***.

Момент инерции твердого тела *равен сумме моментов инерций материальных точек, из которых это тело состоит*

$$I = \sum_{i=1}^{n} m_i \cdot r_i^2 \qquad [кг \cdot м^2] \qquad (2.20)$$

Для тел правильной геометрической формы выведены формулы для расчета момента инерции. Рассмотрим случай, когда ось вращения проходит через центр масс этих тел (рис.2.13).

Момент инерции является мерой инертности тела при вращательном движении. Он играет такую же роль, что и масса при описании поступательного движения. Но если масса считается величиной постоянной, то момент инерции данного тела зависит от положения оси вращения.

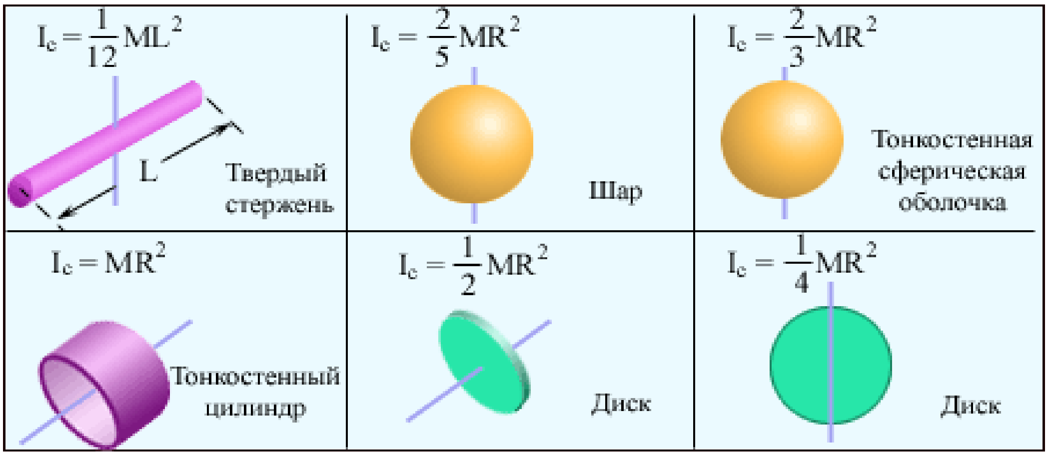


Рис. 2.13. Моменты инерции I_c некоторых однородных твердых тел.

Изменение момента инерции тела при переносе оси вращения

Если для какого- либо тела известен его момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс, то легко может быть найден и момент инерции относительно любой оси, параллельной первой, с использованием теоремы Штейнера.

$$I = I_c + md^2 \qquad (2.21)$$

где I_c – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс; m – масса диска; d – расстояние между осями.

Теорема Штейнера: *момент инерции относительно любой оси вращения равен моменту инерции относительно параллельной ей оси, проходящей через центр масс, сложенному с произведением массы тела на квадрат расстояния от центра масс до оси вращения.*

Например, для диска ось вращения, которого проходит через его край (d=R)

$$I = \frac{1}{2}mR^2 + md^2 = \frac{mR^2}{2} + mR^2 = \frac{3}{2}mR^2 \qquad (2.22)$$

Уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси

Пусть твердое тело вращения вокруг неподвижной оси (см. рис. 2.12). Разобьем это тело на элементарные участки m_i. Выбираем произвольную материальную точку, принадлежащую этому телу. Точка вместе с вращающимся телом описывает окружность. Проведем от точки линию и обозначим ее r_i. Приложим к точке силу $\vec{F}_i$. Под действием силы $\vec{F}_i$ направленной перпендикулярно к оси по касательной к окружности, описываемой материальной точкой, движущаяся точка начинает вращательное движение. По второму закону Ньютона $F_i = m_i a_i$, $a_i = \frac{d\upsilon_i}{dt}$.

Используем формулу, устанавливающую связь между линейной и угловой скоростью $\upsilon_i = \omega R_i$,

где ω – угловая скорость; у всех точек вращающегося тела она одинакова.

Подставим значение линейной скорости в формулу ускорения

$$a_i = \frac{d(\omega r_i)}{dt} = r_i \frac{d\omega}{dt}.$$

Подставим значение ускорения во второй закон Ньютона

$$F_i = m_i r_i \frac{d\omega}{dt},$$

Умножим обе части последнего равенства на r_i и просуммируем его

$$\sum_{i=1}^{n} F_i r_i = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 \frac{d\omega}{dt},$$

Где $\sum_{i=1}^{n} F_i r_i$ - момент силы; $\sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2$ - момент инерции; $\frac{d\omega}{dt}$ - ускорение.

$$M = I \cdot \varepsilon \qquad (2.23)$$

Основное уравнение динамики вращательного движения или второй закон Ньютона для вращательного движения: *Момент вращающей силы, приложенной к телу, равен произведению момента инерции тела на угловое ускорение.*

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте первый закон Ньютона.
2. Какая система отсчета называется инерциальной?
3. Дайте определение массы.
4. Дайте определение силы.
5. Дайте определение импульса.
6. Дайте определение плотности.
7. Запишите формулы плотности.
8. Запишите формулу импульса.
9. Сформулируйте второй закон Ньютона.
10. Выведите формулу второго закона Ньютона, как производную импульса по времени.
11. Дайте определение третьего закона Ньютона.
12. Формула третьего закона Ньютона.
13. Сила упругости определение. Закон Гука.
14. Дайте определение относительной деформации, механического напряжения.
15. Дайте определение силы трения. Сила трения покоя, сила трения скольжения, сила трения качения.
16. Дайте определение вес тела (формула, ед. измерения). Знать четыре случая движения тел.
17. Дать определение момента инерции тела относительно оси.
18. Укажите формулу для вычисления момента инерции материальной точки.
19. Укажите формулы для вычисления момента инерции тонкого стержня, кольца, диска (цилиндра), шара.
20. Сформулируйте теорему Штейнера.
21. Выведите второй закон Ньютона для вращательного движения.
22. Сформулируйте основное уравнение динамики вращательного движения.

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Неинерциальные системы отсчета. Силы инерции.

ЛЕКЦИЯ № 3/1
Тема: «Работа и энергия». «Механические колебания и волны»

План лекции:

1. Механическая работа. Мощность.
2. Закон сохранения импульса.
3. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса.
4. Кинетическая энергия. Кинетическая энергия вращающегося тела.
5. Потенциальная энергия.
6. Закон сохранения полной механической энергии.

1. Механическая работа. Мощность

Физическая величина, равная скалярному произведению силы, действующей на тело, на перемещение, совершаемое под действием этой силы, называется механической работой.

$$A = [\vec{F} \cdot \vec{S}], \text{ или } A = F \cdot S \cdot \cos\alpha \qquad (3.1)$$

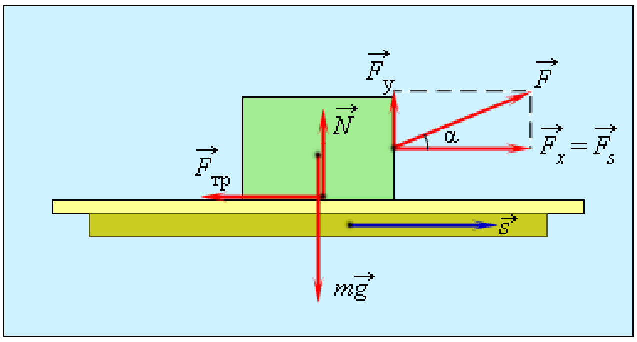


Рис. 3.1. Работа постоянной силы

где α – угол между направлениями силы и перемещения (рис. 3.1). Если под действием силы в 1 Н, оно совершает перемещение на 1 м, то сила совершает работу в 1 Джоуль $[Дж] = [Н \cdot м]$.

Если работа совершается переменной силой, то можно говорить об элементарной работе, совершаемой на бесконечно малом участке пути длиной dS.

Тогда: $dA = F \cdot dS$, (3.2)

где сила F=f(S) является функцией перемещения.

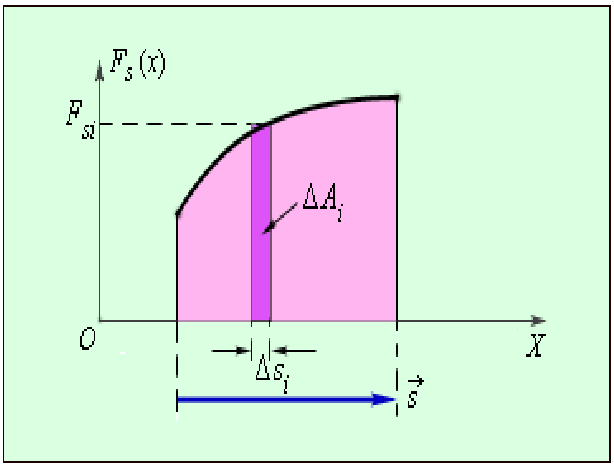


Рис. 3.2. Графическое определение работы

Работа во вращательном движении определяется по формуле:

$$dA = M \cdot d\varphi,$$

где $M = f(\varphi)$.

Полная работа будет определяться выражением:

$$A = \int_{S_1}^{S_2} F \cdot dS \qquad (3.3)$$

Во вращательном движении $A = \int\limits_{\varphi_1}^{\varphi_2} M \cdot d\varphi$. (3.4)

Графически работа определяется по площади криволинейной фигуры под графиком $F_S(x)$ (рис. 3.2).

Примером силы, модуль которой зависит от координаты, может служить упругая сила пружины, подчиняющаяся закону Гука. Для того, чтобы растянуть пружину, к ней нужно приложить внешнюю силу $\vec{F}$, модуль которой пропорционален удлинению пружины (рис. 3.3).

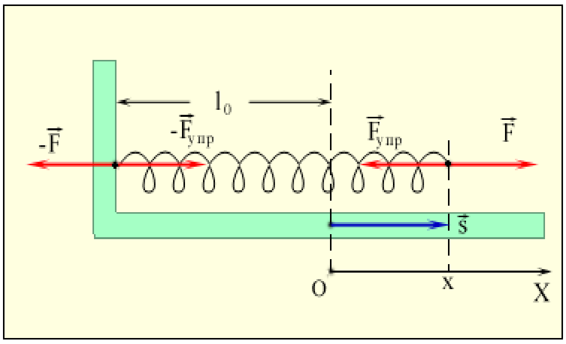


Рис. 3.3. Растянутая пружина

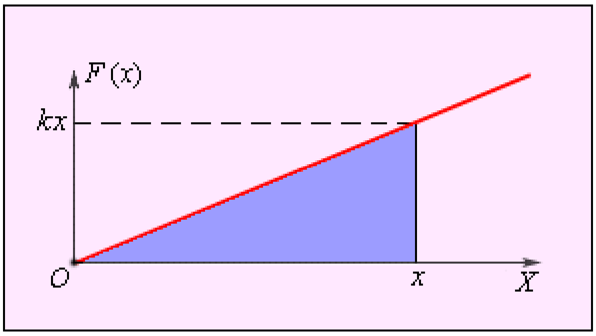


Рис. 3.4. Зависимость модуля внешней силы от координаты при растяжении

З ав исимость модуля внешней силы от координаты x изображается на графике прямой линией (рис. 3.4). По площади треугольника на рис. 3.4 можно определить работу, совершённую внешней силой, приложенной к правому свободному концу пружины:

$$A = \frac{kx^2}{2} \qquad (3.5)$$

Этой формулой выражается работа, совершенная внешней силой при сжатии пружины. В обоих случаях работа упругой силы $\vec{F}_{упр}$ равна по модулю работе внешней силы $\vec{F}$ и противоположна ей по знаку. Если к телу приложено несколько сил, то общая работа всех сил равна алгебраической сумме работ, совершаемых отдельными силами и равна работе **равнодействующей приложенных сил.**

Мощность

Физическая величина, показывающая быстроту совершения механической работы, называется ***мощностью.***

Средняя мощность:

$$< N >= \frac{A}{t} \qquad [Вт] = \left[\frac{Дж}{с}\right] \qquad (3.6)$$

Мгновенная мощность:

$$dN = \frac{dA}{dt} \qquad (3.7)$$

Пусть под действием постоянной силы $\vec{F}$ тело движется с постоянной скоростью $\vec{\upsilon}$, причем $\vec{F}$ со направлена с $\vec{\upsilon}$. Тогда по (3.1) $A = F \cdot S$. Из (3.5) $N = \frac{F \cdot S}{t}$. Учитывая (1.3) получим:

$$N = F \cdot \upsilon. \tag{3.8}$$

Во вращательном движении $dN = M \cdot d\omega$. (3.9)

Так как $F = \frac{N}{\upsilon}$, при одной и той же мощности сила тяги тем больше, чем меньше скорость движения. Поэтому при подъеме в гору нужно снизить скорость.

2. Закон сохранения импульса

Прежде чем вводить закон сохранения импульса ознакомимся с некоторыми понятиями:

Механическая система – *совокупность материальных точек и тел, рассматриваемых как единое целое.*

Внутренние силы – *силы взаимодействия между материальными точками системы.*

Внешние силы – *силы, с которыми внешние тела действуют на материальные точки система.*

Замкнутая система – *система, которая не взаимодействует с внешними силами (внутренние силы во много раз превосходят внешние силы).*

Пусть дана замкнутая механическая система, состоящая из n количества материальных точек массами $m_1, m_2, m_3, \ldots m_n$, обладающими скоростями $\upsilon_1, \upsilon_2, \upsilon_3 \ldots \upsilon_n$. F' – равнодействующая внешних сил. F – равнодействующая внутренних сил. Запишем второй закон Ньютона для каждой точки системы:

$$\frac{d(m_1\upsilon_1)}{dt} = F_1' + F_1$$

$$\frac{d(m_2\upsilon_2)}{dt} = F_2' + F_2$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$\frac{d(m_n\upsilon_n)}{dt} = F_n' + F_n$$

Сложим почленно все уравнения и получим:

$$\frac{d(m\upsilon)}{dt} = F_1' + F_1 + F_2' + F_2 + \ldots + F_n' + F_n$$

Система замкнутая, следовательно, действие внешних сил равно нулю

$F_1' + F_2' + \ldots + F_n' = 0$; материальные точки внутри системы взаимодействуют между собой по третьему закону Ньютона, с силами равными по величине и противоположными по направлению, т.е. геометрическая сумма всех внутренних сил $F_1' + F_2' + ... + F_n' = 0$.

Второй закон Ньютона для замкнутой системы запишется в виде:

$\frac{d(m\upsilon)}{dt} = 0; \ \frac{dP}{dt} = 0; \ P = const; \ m\upsilon = const$ **- закон сохранения импульса.**

Закон сохранения импульса: в изолированной замкнутой системе сумма импульсов всех тел системы есть величина постоянная. Это фундаментальный закон Ньютонской механики.

Закон сохранения импульса находит широкое отражение в науке и технике.

Например, при выстреле из орудия, неизбежно происходит его откат. Определяющую роль в этом явлении играет сила взаимодействия снаряда и орудия. Она значительно превосходит силы сопротивления и тяготения, действующие на снаряд при выстреле. Поэтому систему снаряд – оружие можно считать замкнутой и применить к ней закон сохранения импульса. С учетом того, что до выстрела скорости снаряда и орудия равны нулю, следует $m \cdot \upsilon = M \cdot \upsilon_0$, где m, υ - масса и скорость снаряда ; M, υ_0 – масса и скорость орудия после выстрела. Отсюда

$$\upsilon_0 = \frac{m}{M} \cdot \upsilon \qquad (3.10)$$

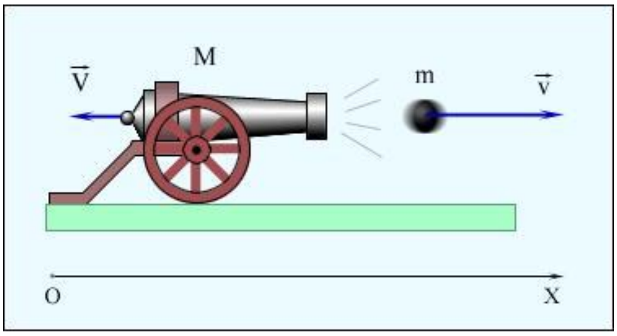


Рис. 3.5. Отдача при выстреле из орудия.

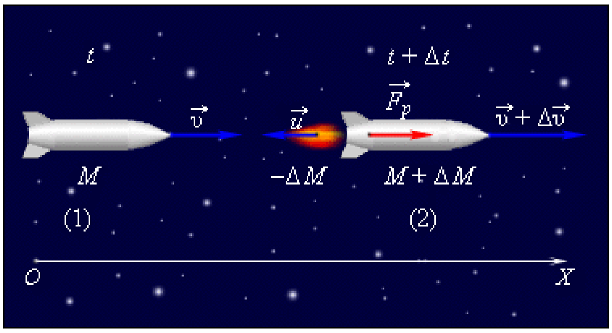


Рис. 3.6. Ракета, движущаяся в свободном пространстве (без гравитации)

Закон сохранения импульса объясняет работу реактивного двигателя, приводящего в движение, например, ракеты.

В природе реактивное движение используют некоторые живые организмы: кальмары, спруты, медузы и некоторые двустворчатые моллюски передвигаются посредством отдачи воды, выбрасываемой из особых полостей тела. При этом кальмары достигают скорости 70 км/ч и выпрыгивают из воды на высоту 5-7 метров. Своеобразным реактивным снарядом является «бешеный огурец» - растение южного Крыма. Внутри созревшего плода находится жидкость под высоким давлением. Будучи оторванным от стебля «бешеный огурец» вырывается из рук и отлетает в сторону за счет отдачи струи жидкости, выбрасываемой из отверстия в месте крепления плодоножки.

3. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса

Запишем основное уравнение динамики вращательного движения

$$M = I \cdot \varepsilon \qquad (3.11)$$

Где $\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$, следовательно, $M = I \cdot \frac{d\omega}{dt}$ или $M = \frac{d(I \cdot \omega)}{dt}$

Величина равная произведению момента инерции на угловую скорость называется моментом импульса, *определяется по формуле**:***

$$L = I \cdot \omega \qquad (3.12)$$

Если момент внешних сил, приложенных к телу, равен нулю (М=0), то $\frac{d(I\omega)}{dt} = 0$. Дифференциал равен нулю, когда значение числа под дифференциалом постоянно, а это может быть только в случае, если момент импульса

$$L = I\omega = const\,.$$

Закон сохранения момента импульса: при отсутствии момента сил (М=0), момент количества движения остается постоянным (L=const).

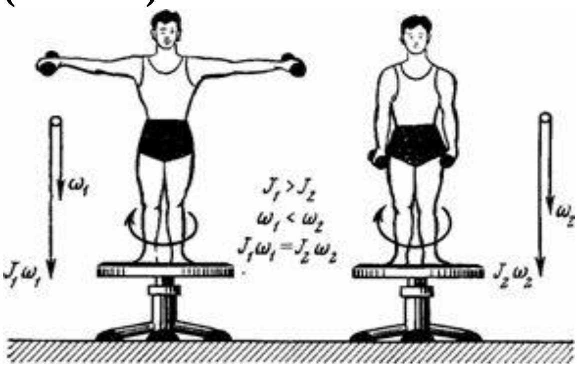


Рис. 3.7. Скамья Жуковского

Сохранение момента количества движения может быть продемонстрировано с помощью **«скамьи Жуковского»** (рис. 3.7) - скамеечки, которая может без трения вращаться вокруг вертикальной оси. Когда человек опускает руки, момент инерции его уменьшается, и человек начинает вращаться быстрее и наоборот.

4. Момент силы

Момент силы – векторная физическая величина, характеризующая вращательное действие силы.

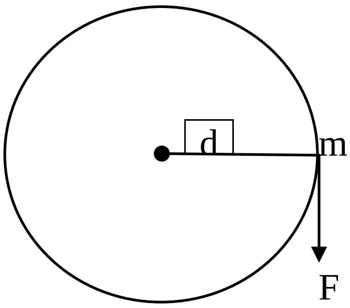


Рис. 3.8. Момент силы

Пусть дано твердое тело, имеющее неподвижную ось вращения. Под действием силы $\vec{F}$ тело начинает вращаться

$$\vec{M} = \vec{F}d\,, \qquad (3.13)$$

где d (или R) – плечо силы F.

Момент силы равен произведению силы на плечо $[M] = [H \cdot м]$.

Плечо – кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы. *Чем больше плечо, тем меньше сила.*

5. Кинетическая энергия

Энергия – это скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных форм движения материи и перехода движения материи из одних форм в другие.

Механическая энергия *показывает, какую механическую работу может совершить тело.*

Кинетическая энергия *– это энергия механического движения системы.*

Пусть под действием постоянной силы $\vec{F}$ тело совершает равноускоренное движение, причем векторы силы и перемещения со направлены. Тогда $A = F \cdot S$. По второму закону Ньютона $F = ma$, $S = \upsilon_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}$, $a = \frac{\upsilon - \upsilon_0}{t}$. Подставляя в формулу работы значения F, S, a, получим

$$A = \frac{m\upsilon^2}{2} - \frac{m\upsilon_0^2}{2} \tag{3.14}$$

Физическая величина $$E_k = \frac{m\upsilon^2}{2} \tag{3.15}$$

и есть **кинетическая энергия тела**.

Учитывая (3.15) уравнению (3.14) можно придать вид:

$$A = E_k - E_{k_0} = \Delta E_k \tag{3.16}$$

Теорема об изменении кинетической энергии*: работа силы равна изменению кинетической энергии тела*.

Кинетическая энергия вращающегося тела

При поступательном движении кинетическая энергия тела определяется по формуле (для материальной точки)

$$E_{кин_i} = \frac{m_i \upsilon_i^2}{2}. \tag{3.17}$$

Пусть материальная точка m_i, вращаясь вокруг оси O–O', имеет линейную скорость υ_i. Кинетическая энергия материальной точки m_i определяется

$$\upsilon_i = \omega R_i. \tag{3.18}$$

Подставим значение линейной скорости в формулу кинетической энергии

$$E_{кин_i} = \frac{m_i \omega^2 R_i^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} m_i R_i^2, \tag{3.19}$$

для всего тела

$$E_{кин} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\omega^2}{2} m_i R_i^2 = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^{n} m_i R_i^2 = I \frac{\omega^2}{2}, \tag{3.20}$$

$$E_{кин} = I\frac{\omega^2}{2}, \qquad (3.21)$$

кинетическая энергия вращающегося тела

Если тело одновременно учувствует во вращательном и поступательном движениях, то его полная энергия определится по формуле

$$E_{кин} = \frac{I\omega^2}{2} + \frac{m\upsilon^2}{2}, \qquad (3.22)$$

По данной формуле можно рассчитать кинетическую энергию колеса движущегося автомобиля.

6. Потенциальная энергия

Потенциальная энергия - это энергия, которая зависит от взаимного расположения тел или частей одного и того же тела.

Понятие потенциальной энергии можно ввести только для сил, *работа которых не зависит от траектории движения тела и определяется только начальным и конечным положениями* (сила тяжести, сила упругости и т.д.). Такие силы называются **консервативными**.

Работа консервативных сил на замкнутой траектории равна нулю. Это утверждение поясняет рисунок 3.9. Если тело перемещается вблизи поверхности Земли, то на него действует постоянная по величине и направлению сила тяжести $\vec{F} = m\vec{g}$.

Работа этой силы зависит только от вертикального перемещения тела.

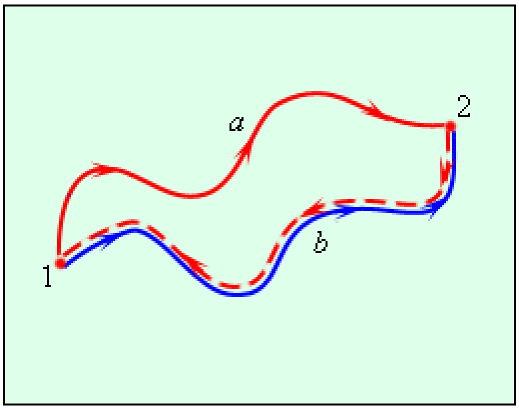


Рис. 3.9. Работа консервативной силы

На любом участке пути работу силы тяжести можно записать в проекциях вектора перемещения $\Delta\vec{S}$ на ось OY, направленную вертикально вверх:

$\Delta A = F_T \Delta S \cdot \cos\alpha = -mg \cdot \Delta S_y$,

где $F_T = F_{TY} = -mg$ - проекция силы тяжести, ΔS_y - проекция вектора перемещения. При подъеме тела вверх сила тяжести совершает отрицательную работу, так как $\Delta S_y > 0$. Если тело переместилось из точки, расположенной на высоте h_1, в точку, расположенную на высоте h_2 от начала координатной оси OY (рис.3.10), то сила тяжести совершила работу $A = -mg(h_2 - h_1) = -(mgh_2 - mgh_1)$. Эта работа равна изменению некоторой физической величины mgh, взятому с противоположным знаком. Эту физическую величину называют потенциальной энергией тела в поле силы тяжести

$$E_p = mgh \qquad (3.23)$$

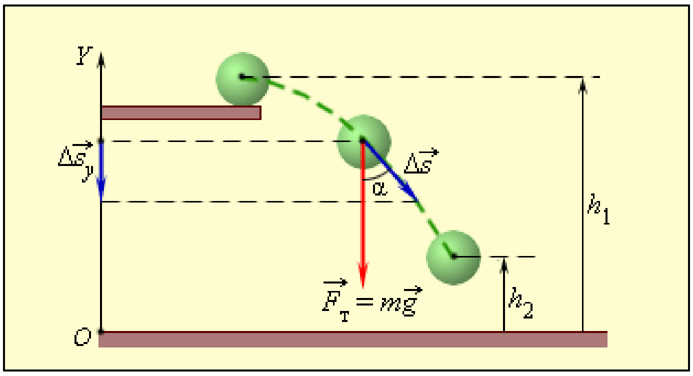


Рис. 3.10. Работа силы тяжести

Она равна работе, которую совершает сила тяжести при опускании тела на нулевой уровень.

Работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком.

$$A = -\left(E_{p_2} - E_{p_1}\right). \qquad (3.24)$$

Потенциальная энергия E_p зависит от выбора нулевого уровня, т.е. от выбора начала координат оси OY. Изменение $\Delta E_p = E_{p_2} - E_{p_1}$ при перемещении тела из одного положения в другое не зависит от выбора нулевого уровня.

7. Закон сохранения полной механической энергии

Рассмотрим тело, свободно падающее на землю. Как было показано выше, с одной стороны работа силы тяжести $A = -\Delta E_p$; с другой стороны $A = \Delta E_k$. Приравнивая правые части, получим: $\Delta E_k = -\Delta E_p$. Отсюда:

$$E_{k_1} + E_{p_1} = E_{k_2} + E_{p_2} \qquad (3.25)$$

Или

$$E_k + E_p = const \qquad (3.26)$$

Уравнения (3.19) и (3.20) являются математической формой записи **закона сохранения полной энергии**: *В замкнутой системе взаимодействующих тел энергия не появляется из ниоткуда и не уходит в никуда, а переходит из одного вида в другой. При этом сумма кинетической и потенциальной энергии есть величина постоянная.*

Сопоставление основных формул динамики поступательного и вращательного движения

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ	ВРАЩАТЕЛЬНОЕ
1. Линейная скорость: $\vec{\upsilon} = \dfrac{d\vec{r}}{dt}$	1. Угловая скорость: $\vec{\omega} = \dfrac{d\vec{\varphi}}{dt}$
2. Линейное ускорение: $\vec{a} = \dfrac{d\vec{\upsilon}}{dt}$	2. Угловое ускорение: $\vec{\varepsilon} = \dfrac{d\vec{\omega}}{dt}$
3. Сила: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$	3. Момент силы $\vec{M} = E \cdot \left[\vec{r} \cdot \vec{F}\right]$, $\vec{M} = \vec{F} \cdot d$
4. Масса: m	4. Момент инерции: $\vec{I} = m \cdot R^2$
5. Импульс: $m\vec{\upsilon} = \Delta p$	5. Момент импульса: $L = I \cdot \vec{\omega}$
6. Закон сохранения импульса:	

$m\vec{\upsilon} = const$	6. Закон сохранения момента импульса: $IW = const$
ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА	
7. $\vec{a} = \dfrac{\vec{F}}{m} \to \vec{F} = m\vec{a}, \quad F = \dfrac{dp}{dt}$	7. $\vec{\varepsilon} = \dfrac{\vec{M}}{I} \to \vec{M} = I\vec{\varepsilon}, \quad M = \dfrac{dL}{dt}$
КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ	
8. $W_к = \dfrac{m \cdot \vec{\upsilon}^2}{2}$	8. $W_к = \dfrac{I \cdot \vec{\omega}^2}{2}$

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение механической работы?
2. Формула работы постоянной силы.
3. Формула работы переменной силы.
4. Дайте определение мощности?
5. Формулы средней и мгновенной мощности.
6. Выведите формулу мощности при движении с постоянной скоростью.
7. Что такое кинетическая энергия?
8. Теорема об изменении кинетической энергии.
9. Запишите формулу кинетической энергии для поступательного движения.
10. Запишите формулу кинетической энергии для вращательного движения.
11. Что такое потенциальная энергия?
12. Формула потенциальной энергии.
13. Дайте определение консервативных сил.
14. Сформулируйте и запишите закон сохранения полной механической энергии.
15. Дайте определение плеча силы.
16. Дайте определение момента силы, формула, ед. измерения.
17. Дайте определение момента импульса, формула.
18. Сформулируйте и запишите закон сохранения импульса.
19. Сформулируйте и запишите закон сохранения момента импульса.

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Момент силы относительно точки и относительно оси. Пара сил. Момент пары сил.
2. Мощность во вращательном движении.

3. Графический способ расчета работы.

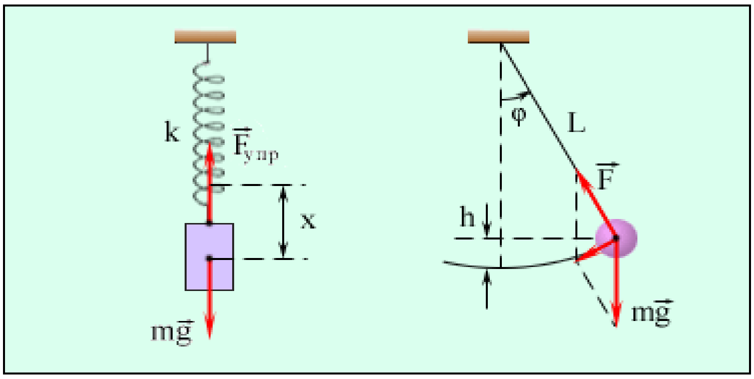
Лекция №3/2
Тема: « Работа. Мощность. Энергия. Механические колебания и волны»

План лекции:

1. Гармонические колебания и их характеристики.
2. Скорость и ускорение гармонических колебаний.
3. Энергия гармонического колебательного движения.
4. Свободные колебания. Гармонический осциллятор.
5. Пружинный, математический и физический маятники.
6. Затухающие колебания.
7. Вынужденные колебания. Резонанс. Автоколебания.
8. Примеры проявления резонансных явлений в живых организмах.
9. Механические волны. Поперечные и продольные волны. Уравнение бегущей волны. Принцип Гюйгенса.
10. Энергия волны. Объемная плотность энергии. Плотность потока энергии. Вектор Умова.
11. Природа и источники звука. Физические характеристики звука. Эффект Доплера в акустике.

1.Гармонические колебания и их характеристики

Колебаниями называются процессы, отличающиеся той или иной степенью повторяемости (качели, ветка дерева, фазы луны, морские приливы и отливы, пульсовая волна, сердце, гортань…). В технике и окружающем нас мире часто приходится сталкиваться с периодическими (или почти периодическими) процессами, которые повторяются через одинаковые промежутки времени. Такие процессы называют ***колебательными.***



а) б)

Рис. 3.11. а) Пружинный маятник;
б) Математический маятник

Колебания широко распространены в природе и технике. Колебательные процессы лежат в основе таких отраслей техники как электротехника, радиотехника и т.д.

Во многих случаях колебания играют негативную роль (вибрации крыльев самолёта, корпусов судов, зданий и сооружений из за резонанса с работающим там оборудованием), что необходимо учитывать при их изготовлении.

В зависимости от физической природы колебания бывают *механические* и *электромагнитные*. **Механическими колебаниями называют движения тел, повторяющиеся точно (или приблизительно) через одинаковые промежутки времени.** Примерами простых колебательных систем могут служить груз на пружине или математический маятник.

В зависимости от характера воздействия на колеблющуюся систему, различают: свободные, (собственные) колебания, вынужденные колебания, автоколебания и параметрические колебания.

1. **Свободные или собственные** – колебания, которые происходят в системе, предоставленной самой себе после того, как она была выведена из положения равновесия.
2. **Вынужденные** - система подвергается воздействию внешней, периодически изменяющийся силы (колебание моста при прохождении солдат, идущих в ногу).
3. **Автоколебания** - система сама управляет внешним воздействием (маятник часов получает толчки в момент прохождения её через среднее положение).
4. **Параметрические колебания** - происходит периодическое изменение, какого- либо параметра системы за счет внешнего воздействия (например, длины нити математического маятника).

Простейшими колебаниями из параметрических, являются ***гармонические колебания. Гармонические колебания – это колебания, при которых некоторая физическая величина изменяется во времени по закону синуса или косинуса.***

Этот вид колебаний важен по двум причинам:

1. колебания в природе и технике часто имеют характер, близкий к гармоническому;
2. периодические процессы иной формы могут быть представлены как наложение нескольких гармонических колебаний.

Выведем уравнение гармонического колебания при помощи установки, состоящей из экрана и вращающегося диска с закреплённым на нём непрозрачным шариком.

Пусть материальная точка М движется против часовой стрелки по окружности радиусом A. Тогда её проекция на экране совершает периодические колебания около положения равновесия в пределах от A до $-A$.

Выразим величину смещения x в любой момент времени:

$x = A \cdot \sin\varphi$ - уравнение гармонического колебания (3.27)

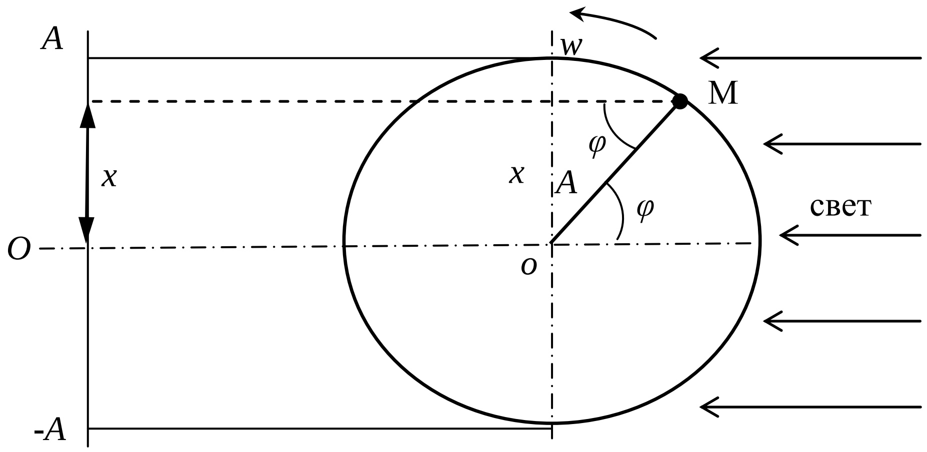


Рис. 3.12. Гармоническое колебание материальной точки

Так как диск вращается с угловой скоростью w, то $w = \frac{\varphi}{t} \to \varphi = w \cdot t$.

Подставим значение φ в уравнение гармонического колебания:

$x = A \cdot \sin wt$ - уравнение гармонического колебания (3.28)

Если диск совершает полный оборот $w = \frac{2\pi}{T}$; $T = \frac{1}{v}$; $v = \frac{1}{T}$; $w = 2\pi \cdot v$

$$x = A \cdot \sin\frac{2\pi}{T}t \qquad (3.29)$$

$$x = A \cdot \sin 2\pi v t \qquad (3.30)$$

Основные характеристики гармонического колебания:

1) Смещение *x*- отклонение от положения равновесия в данный момент времени (может быть >0 и <0);

2) Амплитуда *A* – максимальное отклонение от положения равновесия;

3) Период *T*- время в течение, которого система совершает одно полное колебание;

4) Фаза колебания *wt*- характеризует состояние колебательной системы в любой заданный момент времени;

5) Частота *v*- число колебаний в единицу времени.

Если к началу наблюдения фаза имела некоторое начальное значение φ_0, то уравнение запишется:

$x = A \cdot \sin(wt + \varphi_0)$ - гармоническое колебание с начальной фазой (3.31)

*2.*Скорость и ускорение гармонических колебаний

Скорость гармонических колебаний *есть первая производная смещения по времени.*

Для гармонического колебания скорость и ускорение определяются следующим образом :

$$\upsilon = \frac{dx}{dt} = \frac{d(A \cdot \sin wt)}{dt} = A \cdot w \cdot \cos wt \qquad (3.32)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(A \cdot w \cdot \cos wt)}{dt} = -A \cdot w^2 \cdot \sin wt \qquad (3.33)$$

Колебательное движение выполняется под действием силы, которая может быть определена по второму закону Ньютона: $F = m \cdot a$, но ускорение при гармонических колебаниях определяется по формуле $a = -A \cdot w^2 \cdot \sin wt$. Подставим значение ускорения во второй закон Ньютона $F = -m \cdot A \cdot w^2 \cdot \sin wt$, т.к. $A \cdot \sin wt = x$, то получим

$F = -m \cdot x \cdot w^2$ - **сила, действующая на колеблющееся тело** (3.34)

Значение данной силы пропорционально смещению, знак «-» указывает на, то что сила направлена в противоположную сторону относительно смещения. Обозначив $k = m \cdot \omega^2$, получим:

$F = -k \cdot x$ - *квазиупругая сила, вызывающая колебательные движения*(3.35)

3.Энергия гармонического колебательного движения

Квазиупругая сила является консервативной и поэтому полная механическая энергия системы остаётся постоянной. *В процессе колебаний происходит превращение кинетической энергии в потенциальную, и наоборот,* причём в моменты *наибольшего отклонения от положения равновесия полная энергия состоит только из потенциальной энергии,* которая достигает своего максимального значения.

$$E = E_{n.\max} = \frac{k \cdot A^2}{2} , \qquad (3.36)$$

где A- амплитуда.

При прохождении системы через положение равновесия полная энергия состоит только из кинетической энергии, которая достигает своего максимума:

$$E = E_{кин.\max} = \frac{m \cdot \upsilon_{\max}^2}{2} = \frac{m \cdot A^2 \cdot w^2}{2} \qquad (3.37)$$

4.Свободные колебания. Гармонический осциллятор

Если колебания совершаются за счёт первоначально сообщённой энергии и в дальнейшем внешнее воздействие на колебательную систему отсутствует, то такие колебания называются **свободными**. *Система, движущая под действием упругой среды называется* **одномерным гармоническим осциллятором.**

Известно, что ускорение при гармоническом колебании определяется следующим образом:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} \text{ или } x^{//} = -A \cdot w_0{}^2 \cdot \sin wt;$$

$$x^{//} = -A \cdot w^2 \cdot \sin wt \text{, но } A \cdot \sin wt = x \text{, то}$$

$$x^{//} = -x \cdot w^2 \text{ или}$$

$$x'' + w^2 \cdot x = 0 \qquad (3.38)$$

- ***уравнение движения гармонического осциллятора.***

Колебания гармонического осциллятора являются важным примером периодического движения и служат моделью во многих задачах классической и квантовой физики.

5. Пружинный, математический и физический маятники

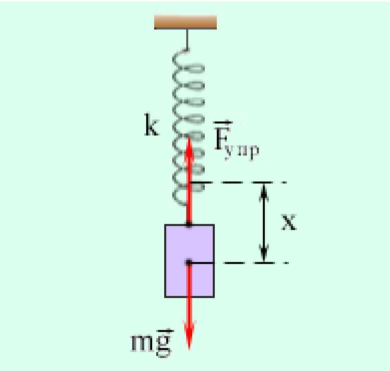


Рис. 3.14.
Пружинный маятник

Пружинный маятник - это груз массой m подвешенный на упругой пружине и совершающий гармонические колебания.

Колебания маятника совершаются под действием силы упругости. $F = -k \cdot x$, k- коэффициент упругости, а в случае с пружиной он называется коэффициентом жёсткости.

Уравнение движения маятника записывается:

$$m \cdot a = -k \cdot x \qquad (3.39)$$

Ускорение - это вторая производная смещения по времени:

$m \cdot x'' = -k \cdot x$, т.к $a = x''$

Разделим обе части уравнения на m, то получим

$$x'' + \frac{k}{m} x = 0 \qquad (3.40)$$

Сравним между собой уравнения (3.38) и (3.40), очевидно, что $w_0{}^2 = \frac{k}{m}$, а $w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $w_0 = \frac{2\pi}{T}$; $T = \frac{2\pi}{w_0}$ - период колебания, подставим в формулу периода колебания значение w, через k и m, то

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

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

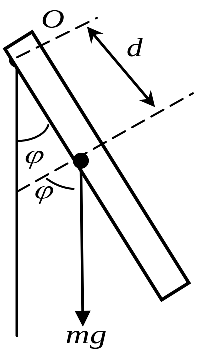


Рис. 3.15.
Физический маятник

Период колебания пружинного маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (3.41)$$

Физический маятник - твёрдое тело способное совершать колебания относительно

оси, не совпадающей с центром масс (рис. 3.15).

Из основного уравнения динамики вращательного движения

$J \cdot \varepsilon = M$,

где $M = -m \cdot g \cdot d \cdot \sin\varphi$.

Для малых колебаний можно получить $J \cdot \varepsilon - M = 0$

$$J \cdot \varphi'' + m \cdot g \cdot d \cdot \varphi = 0 \qquad (3.42)$$

Разделим уравнение (3.42) на J. Введём обозначение $w_0^2 = \dfrac{m \cdot g \cdot d}{J}$,

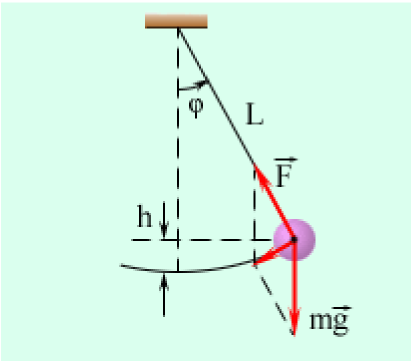


Рис. 3.16.
Математический маятник

получим уравнение $\varphi'' + w^2\varphi = 0$, которое аналогично полученному ранее. Период колебания физического маятника $T = \dfrac{2\pi}{w_0} = \dfrac{2\pi}{\sqrt{\dfrac{m \cdot g \cdot d}{J}}}$

Период колебания физического маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{m \cdot g \cdot d}} \qquad (3.43)$$

Математический маятник - материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити. Реальный маятник, у которого масса тела во много раз больше массы нити, а размеры тела во много раз меньше длинны нити, можно считать математическим.

Учитывая, что момент силы тяжести $M = -m \cdot g \cdot l \cdot \sin\alpha$ и момент инерции точки $J = m \cdot l^2$, из динамического уравнения вращательного движения получим: $J \cdot \varepsilon = M$; $\quad m \cdot l^2 \cdot \alpha'' + m \cdot g \cdot l \cdot \alpha = 0 \qquad (3.44)$

Разделив уравнение (3.44) на ml^2, получим:

$$\alpha'' + \frac{m \cdot g \cdot l}{m \cdot l^2} \cdot \alpha = 0$$

$$\alpha'' + \frac{g}{l} \cdot \alpha = 0, \Rightarrow \; \alpha'' + w_0^2 \cdot \alpha = 0 \qquad w_0^2 = \frac{g}{l}$$

Период колебания математического маятника

$$T = \frac{2\pi}{w_0} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad (3.45)$$

Мы приходим к выводу, что во всех случаях колебания описываются одним и тем же уравнением $x'' + w_0^2 \cdot x = 0$, совпадающим с уравнением движения гармонического осциллятора.

6. Затухающие колебания

Во всякой реальной системе имеются силы сопротивления, действие которых приводит к уменьшению энергии системы, т.е. затуханию колебаний.

Уравнение в случае малого затухания $(\beta << \omega_0)$ можно представить в виде:

$$x = x_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \text{, где } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$

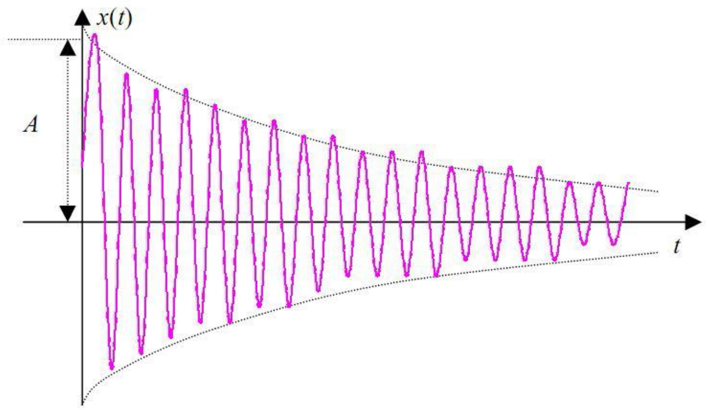


Рис. 3.17. Затухающие колебания

Гармонический множитель $\cos(\omega t + \varphi_0)$ в этом выражении ответственен за колебание, а множитель $x_0 \cdot e^{-\beta \cdot t}$ представляет собой амплитуду колебания (рис. 3.17). Затухающее колебание происходит с частотой ω меньшей, чем частота собственных колебаний ω_0. **Величина** $\beta = \dfrac{r}{2m}$ называется **коэффициентом затухания.** Коэффициент затухания численно равен обратному значению промежутка времени τ, в течение которого амплитуда колебания уменьшается в «е» раз.

Затухание колебаний принято характеризовать **логарифмическим декрементом затухания** - *натуральным логарифмом отношения двух амплитуд колебания, отстоящих друг от друга на время равное периоду T.*

$$\ln\frac{x_1}{x_2} = \frac{x_0 \cdot e^{-\beta \cdot t}}{x_0 \cdot e^{-\beta(t+T)}} = \beta \cdot T \tag{3.46}$$

Обозначим **логарифмический декремент затухания** буквой $\lambda = \beta \cdot T$.

Так как $\beta = \dfrac{1}{\tau}$, то для логарифмического декремента затухания $\lambda = \dfrac{T}{\tau}$.

Величина $\dfrac{\tau}{T} = N_e$ - число колебаний, которое должна совершить система, чтобы амплитуда колебания уменьшилась в «е» раз, => логарифмический декремент затухания λ численно равен величине, обратной числу колебаний, в течение которых амплитуда колебания уменьшается в «е» раз.

$$\lambda = \frac{1}{N_c}. \tag{3.47}$$

Для характеристики колебательной системы часто используют также величину, называемую **добротностью системы.**

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} \tag{3.48}$$

При слабом затухании колебаний добротность системы равна отношению энергии, запасенной системой в данный момент времени, к убыли этой энергии в течение одного полного колебания.

7.Вынужденные колебания. Резонанс. Автоколебания

Вынужденными колебаниями называется незатухающие колебания системы, которые вызываются действием на неё внешних сил, периодически изменяющихся с течением времени.

Сила, вызывающая вынужденные колебания, называется возмущающей (вынуждающей) силой.

Вынуждающая сила изменяется по закону: $F(t) = F_0 \cdot \cos w \cdot t$

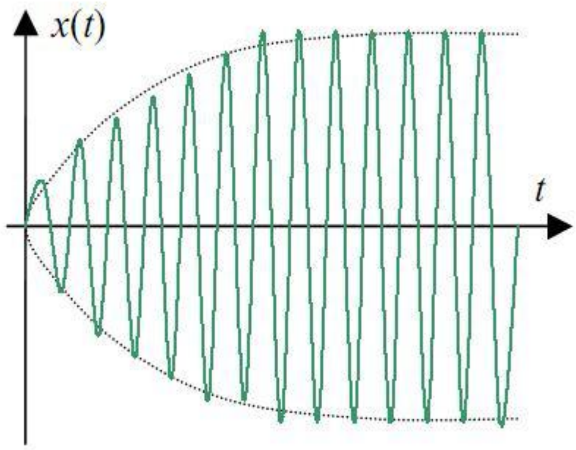


Рис. 3.18. Вынужденные колебания

F_0 - амплитуда вынуждающей силы, *w*- циклическая частота.

Под действием этой силы в системе устанавливаются гармонические колебания с циклической частотой *w*.

$$\Delta x = A \cdot \cos(w \cdot t + \varphi_1)$$

где *A*- амплитуда вынужденных колебаний смещения; φ_1- разность фаз между вынужденными колебаниями Δx и силой *F(t)*.

Амплитуда вынужденных колебаний зависит от амплитуды вынуждающей силы и её частоты, зависимость амплитуды колебаний от частоты приводит к тому, что при некоторой частоте амплитуда вынужденного колебания достигает максимального значения. Это явление получило название ***резонанса***, а соответствующая частота - ***резонансной частотой.***

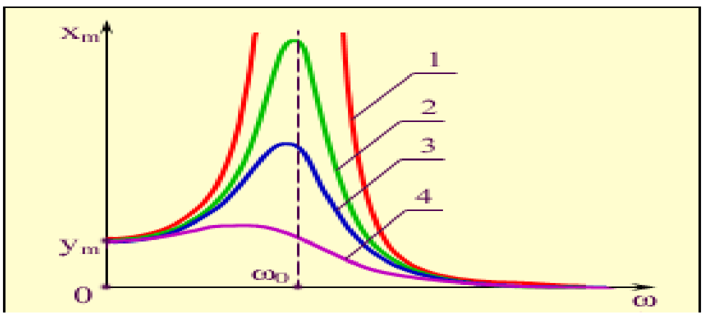


Рисунок 3.19.
Резонансные кривые при различных уровнях затухания: 1 – колебательная система без трения; 2, 3, 4 – реальные резонансные кривые для колебательных систем с различной добротностью: *Q*2>*Q*3>*Q*4.

Если $\beta \neq 0$, то *A* достигнет максимального значения при частоте $w_{рез} \neq w_0$

$$w = w_{рез} = \sqrt{w_0^2 - 2\beta^2} = w_0\sqrt{1 - \frac{2\beta^2}{w_0^2}}$$

Явление возрастания амплитуды вынужденных колебаний, при приближении циклической частоты вынуждающей силы к значению $w_{рез}$ – называется **резонансом** , $w_{рез}$ – резонансная циклическая частота.

При наличии трения резонансная циклическая частота $w_{рез}$ несколько $< w_{зат} = \sqrt{w_0^2 - \beta^2}$ и меньше w_0.

Форма резонансных кривых зависит от значения β. Чем больше β, тем более пологими становятся кривые.

Явление резонанса используется в акустике - для анализа звуков, их усиления и.т.д. Под действием периодически изменяющихся нагрузок в машинах и различных сооружениях могут возникнуть явления резонанса, которые могут быть опасны для эксплуатации машин.

Автоколебания

Колебательная система, совершающая незатухающие колебания за счёт источника энергии, не обладающего колебательными свойствами - называется автоколебательной системой.

Примеры автоколебаний: часы с анкерным ходом, паровые машины, двигатели внутреннего сгорания, отбойные молотки, электрические звонки, смычёк для скрипки, воздушные столбы в духовых инструментах, языки в баянах и аккордеонах, голосовые связки при разговоре.

8. Примеры проявления резонансных явлений в живых организмах

В лаборатории электроакустики в Марселе испытывали генератор, создававший акустические волны с частотой 7 Гц (инфразвук). Люди испытывали сильные внутренние боли, нарушение координации движений и зрения. Оказалось, что инфразвук, собственная частота которого 2…20 Гц, действует на вестибулярный аппарат, он же переходит в резонансные колебания, нарушающий деятельность вестибулярного аппарата.

Инфразвук также вызывает вынужденные колебания различных органов, каждый из которых обладает собственной частотой.

Некоторые из них, такие как печень, почки, сами по себе не совершают колебательных движений, но под действием внешней периодической силы могут войти с ней в резонанс. Медики обратили внимание на опасный резонанс брюшной полости (4…8 Гц). Резонансные явления раздражают рецепторы, передающие информацию в нервные центры. Таким образом, создаются рефлекторные реакции организма на раздражитель. Это сопровождается ощущением боли, неприятными ощущениями, затруднением дыхания.

Особенно вредны резонансные явления для сердца. Это приводит к расширению кровеносных сосудов и кровоизлияниям. Если резонансные колебания находятся в противофазе, то возможны торможение кровообращения, остановка сердца.

Некоторые исследователи указывают на психическое действие инфразвука. У облученных им людей поражаются все виды интеллектуальной деятельности, появляется чувство тревоги, страха. Такие же явления имеют место и у животных (источники – двигатели, компрессоры, электродойки). Отрицательное воздействие оказывается на молокоотдачу и многие физиологические функции сельскохозяйственных животных.

9. Механические волны. Поперечные и продольные волны. Уравнение бегущей волны. Принцип Гюйгенса

Процесс распространения колебаний в упругой среде называется волной. При волновом процессе частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия, передовая друг другу импульс и энергию. Таким образом, волна есть перенос энергии без переноса вещества.

Если частицы среды колеблются в направлении перпендикулярном направлению распространения волны, то волна называется поперечной (рис. 3.20).

Такие волны образуются в твердых телах и на поверхностях жидкостей.

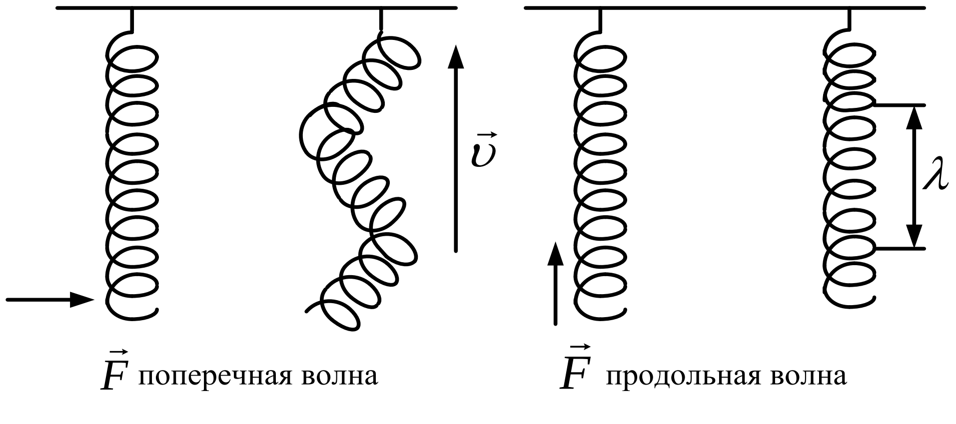


Рис. 3.20. Направление распространения волн

Продольной называется волна, в которой частицы колеблются вдоль направления распространения волны (рис. 3.20). Такие волны могут распространяться в любой среде.

Если по концу свободно висящей пружины ударить снизу вверх, то по пружине пробежит волна, состоящая из сгущений и разрежений.

Одной из основных характеристик волн является длина волны. **Длиной волны** λ *называется расстояние между двумя ближайшими точками, совершающими колебания в одинаковой фазе.*

Колебания таких точек отстают друг от друга на время, равное периоду колебаний, поэтому скорость распространения волны может быть найдена по формуле:

$$\upsilon = \frac{\lambda}{T} \text{ или } \upsilon = \lambda \cdot \nu \qquad (3.49)$$

Опыт показывает, что если источник волн покоится, то их скорость величина постоянная и зависящая только от свойств среды. Ещё одной характеристикой волн является **волновое число** $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

(3.50)

$$k = \frac{\omega}{\upsilon} \qquad (3.51)$$

Геометрическое место точек, до которых в данный момент времени дошло возмущение, называется **волновым фронтом**.

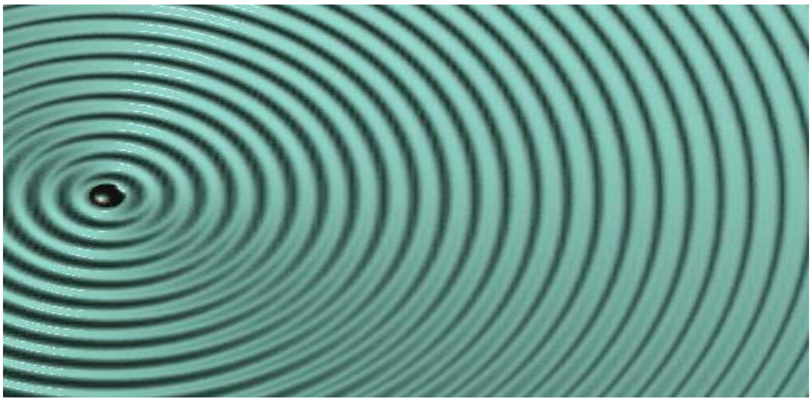


Рис.3.21. Волновой фронт

Уравнение бегущей волны

Бегущей называется волна, уносящая в пространство энергию колебаний источника. Уравнение бегущей волны выражает зависимость смещения колеблющейся точки от положения равновесия от её координаты и времени колебаний.

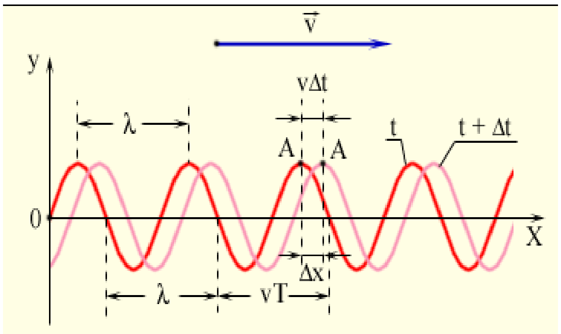


Рис. 3.22. «Моментальные фотографии» бегущей синусоидальной волны в моменты времени *t* и *t*+Δ*t*.

Волны, все точки которых перемещаются с одной и той же скоростью, принято называть бегущими.

Рассмотрим плоскую волну. Пусть точка О (рис. 3.22) совершает гармонические колебания согласно уравнению: $y = A_0 \cdot \cos\omega \cdot t$. До точки *A*, имеющей координаты (*x; 0*), это колебание дойдёт спустя время $\tau = \frac{x}{\upsilon}$.

Тогда колебания точки *A* описываются уравнением: $y = A_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - \omega \cdot \tau)$

или, учитывая значение *τ:* $y = A_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{\omega}{\upsilon} \cdot x)$ (3.52)

Учитывая (3.51), получим: $$y = A_0 \cos(\omega \cdot t - k \cdot x) \qquad (3.53)$$
Уравнения (3.52) и (3.53) и есть уравнения бегущей волны, позволяющие определять смещения точки от положения равновесия в любой момент времени на любом расстоянии от источника волн.

Скорость перемещения волны - *это есть скорость перемещения фазы, поэтому эта скорость называется фазовой скоростью*.

$\upsilon = \dfrac{\omega}{k}$ - фазовая скорость зависит от частоты. Это явление получило название ***дисперсия волн***, а среда, в которой волны распространяются - ***диспергирующей средой***.

Скорость распространения волны зависит от свойств среды

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

где E – модуль Юнга, ρ - плотность среды.

Принцип Гюйгенса

Пусть некоторая точка колеблется в сплошной упругой однородной среде. Тогда колебания от этой точки будут распространяться во все стороны.

Геометрическое место точек, до которых к данному моменту дошли колебания, называется ***фронтом волны***.

Если источник колебаний точечный и колебания распространяются в однородной среде, то фронт волны будет сферой и волна называется ***сферической.***

Если фронт волны плоский, то волна называется ***плоской.***

Голландский физик Гюйгенс в конце XVII века дал способ построения нового фронта волны, если известно положение его в некоторый предыдущий момент.

Принцип Гюйгенса: каждая точка фронта волны является источником элементарных вторичных волн. Огибающая всех этих элементарных волн представляет собой новый фронт волны.

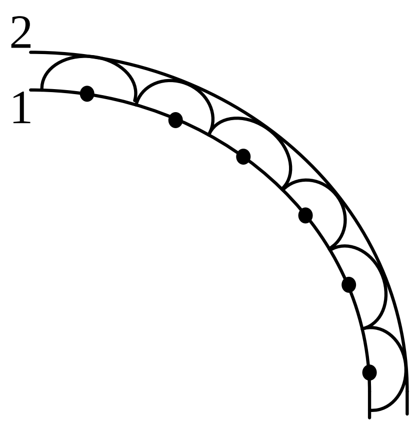


Рис. 3.23. К принципу Гюйгенса

1 – фронт волны в некоторый момент времени t.

2 – новый фронт волны за промежуток времени Δt.

Явление наложения волн друг на друга, приводящее к усилению волнового процесса в одних местах и его ослаблению в других, получило название интерференции.

Явление огибания волнами препятствий получило название дифракции волн.

10. Энергия волны. Объемная плотность энергии. Плотность потока энергии. Вектор Умова

Объемная плотность энергии волны - *количество энергии, заключенное в единице объема среды.* Пусть в единице объема находится N частиц, каждая из которых обладает полной энергией $E = \dfrac{m \cdot A^2 \cdot \omega^2}{2}$.

Объемную плотность энергии получим, умножая полную энергию одной частицы на число частиц в единице объема, но $m \cdot N = \rho$, тогда

$$\varepsilon = \frac{E}{V} = \frac{\rho \cdot A^2 \cdot \omega^2}{2}. \tag{3.54}$$

Основной единицей измерения объемной плотности в СИ является Дж/м^3.

Из полученной формулы видно, что ***объемная плотность энергии зависит от плотности среды***.

Так, например, браконьеры для запрещенного лова рыбы взрывают в воде толовую шашку, взрыв которой в воздухе не производит разрушений уже на расстоянии нескольких метров. Но поскольку плотность воды во много раз больше плотности воздуха, то взрыв такой шашки приводит к гибели рыбы на расстоянии в десятки, а иногда и в сотни метров от места взрыва. По этой же причине глубинные бомбы небольшой мощности приводят к деформации и разрыву корпусов подводных лодок на значительных расстояниях. В волне энергия не локализована, а перемещается вместе с ней.

11. Природа и источники звука. Физические характеристики звука. Эффект Доплера в акустике

Акустика - наука, изучающая распространяющиеся в среде механические волны с частотами от самых низких (условно от 0 Гц) до предельно высоких 10^{11} - 10^{13} Гц. **Звук** - продольная волна. Человек слышит звук в диапазоне 20 Гц – 20 кГц. В звуковой волне чередуются последовательные фазы повышения давления - сжатия и понижения давления - разрежения. **Шумы** – звуки с различными частотами колебаний.

Физические характеристики звука:

1. **Скорость звука** $\upsilon = \lambda \cdot \nu$. В воздухе υ = 330*м/с,* в воде υ = 1500*м/с,* в кости υ = 4000*м/с*. Скорость звука увеличивается с увеличением плотности среды. В вакууме звук не распространяется - там нет среды, способной совершать колебания.

2. **Интенсивность звука -** его энергетическая характеристика, показывающая энергию, переносимую волной за единицу времени через единицу площади поверхности перпендикулярной направлению распространения звука.

$$I = \frac{dW}{dS \cdot dt} \qquad [I] = \left[\frac{Дж}{м^2 \cdot с}\right] = \frac{Вт}{м^2} \tag{3.55}$$

Интенсивность звука – объективная характеристика.

3. **Избыточное давление** - это давление, создаваемое звуковой волной сверх атмосферного давления. $\Delta p = \sqrt{2 \cdot I \cdot \rho \cdot \upsilon}$, где ρ - плотность вещества.

Для плоской гармонической волны звуковое давление связано с интенсивностью звука $I = \frac{\Delta p}{\rho \upsilon}$. Произведение $\rho\upsilon$- **удельное акустическое сопротивление среды.** Оно является основной характеристикой свойств среды.

4. **Громкость** (слышимость) - субъективная оценка силы звука, воспринимаемая нашим ухом. Для данной частоты громкость определяется высотой амплитуды колебаний. По закону **Вебера–Фехнера**

$$L = \lg \frac{I}{I_0} \tag{3.56}$$

где $I_0 = 10^{-12} Вт/м^2$ - так называемый **порог слышимости.** В СИ громкость звука измеряется в беллах. На практике используется единица в 10 раз меньше – децибел. $[L] = [дб]$. Из закона Вебера-Фехнера следует, что при возрастании интенсивности звука в 100 раз его громкость увеличивается всего в 2 раза.

5. **Высота** (бас, тенор) – субъективная характеристика, определяемая частотой (длиной) волны.

6. **Тембр** – субъективная характеристика оттенка (индивидуальности) звука, определяемая наличием других частот.

Эффект Доплера в акустике

Эффектом Доплера в акустике называется явление изменения частоты звуковых колебаний при движении источника и приёмника звука относительно друг друга. Если источник и приёмник звука покоятся относительно друг друга, то

$$\nu_0 = \frac{\upsilon_0}{\lambda} \tag{3.57}$$

где υ_0 – скорость распространения звука в данной среде.

Если источник приближается к приёмнику со скоростью υ , то скорость распространения звука относительно приёмника будет $\upsilon_0 + \upsilon$. Тогда частота колебаний будет $\nu = \frac{\upsilon_0 + \upsilon}{\lambda}$. По (3.57) $\lambda = \frac{\upsilon_0}{\nu_0}$, тогда

$$\nu = \nu_0 \cdot \frac{\upsilon_0 + \upsilon}{\upsilon_0} \tag{3.58}$$

Как видно при взаимном сближении источника и приёмника звука его частота увеличивается, а тон повышается.

Если источник удаляется от приёмника со скоростью υ , то скорость звука относительно приёмника υ_0 - υ. Тогда

$$\nu = \nu_0 \cdot \frac{\upsilon_0 - \upsilon}{\upsilon_0} \tag{3.59}$$

При взаимном удалении источника и приёмника частота звука уменьшается, а его тон понижается.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие колебания называют свободными?
2. Какие колебания называют гармоническими?
3. Какие колебания называют вынужденными?
4. Что такое амплитуда колебаний?
5. Что такое период колебаний?
6. Что такое частота колебаний?
7. Что такое циклическая частота колебаний?
8. Что такое фаза колебаний?
9. Уравнения гармонических колебаний (5 уравнений).
10. Какие силы называют квазиупругими?
11. Формула периода колебаний физического маятника.
12. Формула периода колебаний математического маятника.
13. Формула периода колебаний пружинного маятника.
14. Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний.
15. Формула зависимости амплитуды свободных затухающих колебаний от времени.
16. Формула коэффициента затухания.
17. Формула частоты затухающих колебаний.
18. Что такое логарифмический декремент затухания?
19. Формулы логарифмического декремента затухания.
20. Что такое резонанс?
21. Формула амплитуды установившихся вынужденных колебаний.
22. Формулы резонансной частоты и амплитуды.
23. Дайте определение механической волны.

24. Какие волны называются продольными?
25. Какие волны называются поперечными?
26. Что является источником волны?
27. Что такое фронт волны?
28. Запишите формулу Лапласа для скорости волны в твердых телах.
29. Запишите формулу Лапласа для скорости волны в газах.
30. Что такое длина волны?
31. Запишите уравнение бегущей волны.
32. Волновое число.
33. Объемная плотность энергии волны.
34. Интенсивность волны.
35. Принцип Гюйгенса-Френеля.
36. Акустика.
37. Звук.Физические характеристики звука.
38. Закон Вебера-Фехнера.
39. Порог слышимости звука.
40. Ультразвук и его действие на живой организм.
41. Инфразвук и его действие на живой организм.
42. Шум и его действия на живой организм.
43. Эффект Доплера.
44. Формула частоты звуковых колебаний при взаимном сближении источника и приемника звука.
45. Формула частоты звуковых колебаний при взаимном удалении источника и приемника звука.

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение.
2. Логарифмический декремент затухания. Добротность.
3. Вывод уравнения плоской волны.

РАЗДЕЛ 2. «МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА»

Лекция № 4

Тема: “Молекулярная физика и термодинамика”

План лекции:

1. Основные положения молекулярно-кинетической теории газов. Идеальный газ и его параметры.
2. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.
3. Экспериментальные газовые законы. Изопроцессы.

4. Понятие абсолютного нуля.
5. Число степеней свободы. Закон равнораспределения энергии по степеням свободы. Средняя энергия многоатомной молекулы.
6. Первое начало термодинамики.
7. Удельная и молярная теплоёмкости.
8. Работа идеального газа. Круговые циклы.
9. Циклические (круговые) процессы. Работа цикла**.**
10. Тепловые машины. Второе начало термодинамики.
11. Энтропия.
12. Цикл Карно и его КПД для идеального газа.
13. Явления переноса.

1.Основные положения молекулярно-кинетической теории газов. Идеальный газ и его параметры

Представление о том, что все тела построены из мельчайших частиц – атомов, возникло еще в древности и было высказано греческим философом Демокритом (V в. до н. э.). Однако в дальнейшем эти представления были забыты, и лишь во второй половине XVII в. были разработаны в качестве научной теории, получившей название ***классической молекулярно-кинетической теории***.

Молекулярная физика – *раздел физики, изучающий строение и свойства вещества исходя из так называемых молекулярно-кинетических представлений.*

Она основана на следующих положениях.

1. Все вещества состоят из очень маленьких частиц – молекул.

Каждое вещество состоит из одинаковых молекул. Сколько веществ в природе, столько и видов молекул. Молекулы состоят из еще более мелких частиц – атомов. Число атомов равно числу химических элементов и их изотопов (109 хим. элементов и более 1500 изотопов известно в наше время).

Молекулы – различные комбинации из атомов (молекулярно-кинетическая теория не рассматривает строение атома).

2. Между молекулами тела одновременно действуют силы взаимного притяжения (сцепления) и силы взаимного отталкивания, причем силы отталкивания с увеличением расстояния убывают быстрее, чем силы сцепления. Поэтому на определенном расстоянии друг от друга молекулы могут находиться в устойчивом равновесии. Согласно современным исследованиям, положение устойчивого равновесия соответствует *минимуму их потенциальной энергии.*

3. Молекулы, образующие тело, находятся в состоянии непрерывного беспорядочного движения.

Скорость движения молекул возрастает с увеличением температуры, поэтому движение называется ***тепловым движением.***

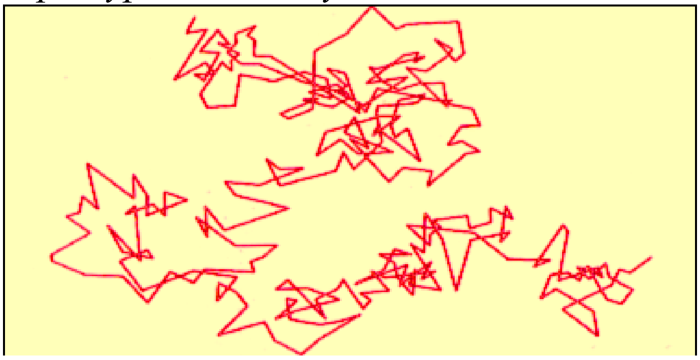


Рис.4.1. Траектория броуновской частицы

По мере увеличения интенсивности теплового движения, среднее расстояние между молекулами возрастает, следовательно, тело переходит из твердого состояния в жидкое. При дальнейшем нагреве расстояние между молекулами увеличивается настолько, что силы сцепления исчезают, следовательно, тело переходит в газообразное состояние.

Идеальный газ. Его параметры

Идеальным газом *называется газ, между частицами которого отсутствуют силы взаимного притяжения.* При соударениях между собой, частицы газа ведут себя как упругие шарики крайне малого размера.

Существующие в действительности газы при не слишком низких температурах и достаточно малых давлениях называются разряженными газами и по своим свойствам близки к идеальному газу.

Состояние газа определяется тремя параметрами: давлением p [Па]=[Н/м^2], объемом V [м^3], термодинамической температурой T [К].

Давление *– физическая величина, равная модулю силы, действующей на единичную площадку поверхности тела перпендикулярно к ней*

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S}, \qquad (4.1)$$

если p = const

$$p = \frac{F}{S} \qquad (4.2)$$

$[p]=[\frac{H}{м^2}]$=[Па].

Наряду с объемом газа V часто используется также удельный объем v.

Удельным объемом *называется объем одного килограмма вещества*

$$V = \frac{1}{\rho}, \tag{4.3}$$

где ρ – плотность вещества.

$$\nu = \frac{V}{M}, \tag{4.4}$$

где V – объем вещества;

M – масса вещества.

Термодинамическая температура

$$T = 273{,}16 + t, [K]. \tag{4.5}$$

Т = 0К = – 273,16°C – абсолютный нуль.

Измеряется температура по нескольким шкалам.

Шкала Цельсия: точка плавления льда – 0 ^{0}C; точка кипения воды – 100 ^{0}C (при нормальном атмосферном давлении).

Шкала Кельвина или абсолютная шкала температур (T = t + 273); точка плавления льда – 273 К; точка кипения воды – 373 К (при нормальном атмосферном давлении).

Шкала Фаренгейта: точка таяния льда равна +32 °F, а точка кипения воды +212 °F (при нормальном атмосферном давлении).

2.Основное уравнение МКТ

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов устанавливает зависимость между давлением (р); объемом (V) и кинетической энергией поступательного движения его молекул.

Для вывода формулы рассмотрим одноатомный идеальный газ, находящийся в цилиндрическом сосуде с площадью основания ΔS.

Молекулы движутся хаотически и беспорядочно, их количество N. Определим давление, оказываемое газом на площадку ΔS.

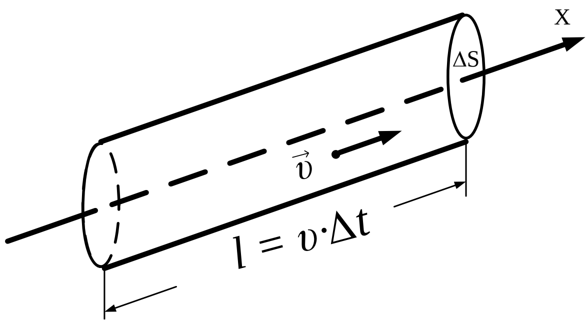


Рис. 4.2. К основному уравнению МКТ

$$p = \frac{F}{\Delta S} \tag{4.6}$$

р - давление;

$$\text{Так как } F = \frac{\Delta p}{\Delta t}; \tag{4.7}$$

Подставим 4.7 в формулу 4.6 получим

$$p = \frac{\Delta p}{\Delta S \Delta t}, \tag{4.8}$$

$\Delta p -$изменение импульса одной молекулы; р - давление;

$$\Delta p = mv - (-mv) = 2mv, \tag{4.9}$$

$\Delta p -$импульс;

$\Delta p = 2mv -$импульс, сообщенный одной молекулой площадки ΔS.

Найдем общее число молекул *n* в объеме цилиндра $l = \upsilon \Delta t$

$$N = n_0 * V = n_0 \Delta S V \Delta t \tag{4.10}$$

Вследствие хаотического движения молекул в цилиндре треть их будет двигаться вдоль оси Х, треть вдоль оси У и треть вдоль оси Z.

К площадке ΔS дойдем 1/6 от общего числа молекул.

$$N_{\Delta S} = \frac{1}{6} n_0 \Delta S V \Delta t \tag{4.11}$$

где $n_0 -$концентрация молекул, число молекул в единице объема. Для того чтобы найти импульс сообщаемый площадке ΔS, молекулами $N_{\Delta S}$ умножим правую часть 4.9 уравнения на $N_{\Delta S}$

$$\Delta p = 2mV \frac{1}{6} \Delta S v \Delta t = \frac{1}{3} m v^2 n_0 \Delta S \Delta t \tag{4.12}$$

Подставим правую часть уравнения 4.11 в уравнение 4.8

$$p = \frac{1 m v^2 \Delta S \Delta t n_0}{3 \Delta S \Delta t} = \frac{1}{3} m v^2 n_0 \tag{4.13}$$

Молекулы газа обладают различными скоростями $v_1, v_2, ..., v_n$ поэтому вводят понятия средней квадратичной скорости.

$< V_{кв} >= \sqrt{\sum_{i=1}^{n} v_i^2 \frac{1}{N}}$ - средняя квадратичная скорость молекул

$P = \frac{1}{3} m \langle V_{кв}{}^2 \rangle n_0 -$ **основное уравнение МКТ (первый вид)** (4.14)

Известно, что кинетическая энергия поступательного движения определяется по формуле: $E_k = \frac{m \langle V_{кв}{}^2 \rangle}{2}$.

Умножим и разделим правую часть уравнения 4.14 на 2, получим:

$P = \frac{2}{3} \frac{m \langle V_{кв}{}^2 \rangle}{2} n_0 = \frac{2}{3} E_k n_0$ **– основное уравнение МКТ (второй вид)**(4.15)

Так как кинетическая энергия определяется по формуле:

$$E_k = \frac{3}{2} \kappa T, \quad \textbf{то} \quad p = n_0 k T \tag{4.16}$$

где k – постоянная Больцмана, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *Дж/К.*

Известно, что $n_0 = \frac{N}{V}$, подставим n_0 в формулу 4.16 получим:

$P = \frac{N}{V}kT$ или $PV = NkT$ **– основное уравнение МКТ (третий вид)**

(4.17)

где p– давление, V – объем, N – число молекул,k - постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

3. Экспериментальные газовые законы. Изопроцессы

Всякое изменение состояния тела или системы тел называется ***термодинамическим процессом.***

Изопроцессы *– термодинамические процессы, протекающие в системе с неизменной массой при постоянном значении одного из параметров состояния системы.*

Изотермический процесс

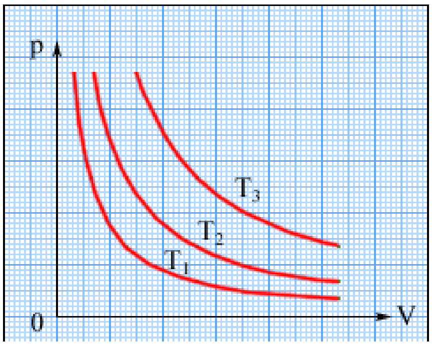


Рис. 4.3. Семейство изотерм на плоскости (p, V). $T_3 > T_2 > T_1$.

Подчиняется закону Бойля-Мариотта. Протекает при неизменной температуре *(T=const).*

Уравнение данного процесса имеет вид:

$$pV = const \qquad (4.18)$$

Для данной массы газа при неизменной температуре произведение значений давления и объема есть величина постоянная.

В координатах *P-V* изотермический процесс изображается кривой – ***изотермой.***

Изобарический (изобарный) процесс

Подчиняется закону Гей-Люссака. Протекает при постоянном давлении *(P=const)*. Уравнения данного процесса имеют вид:

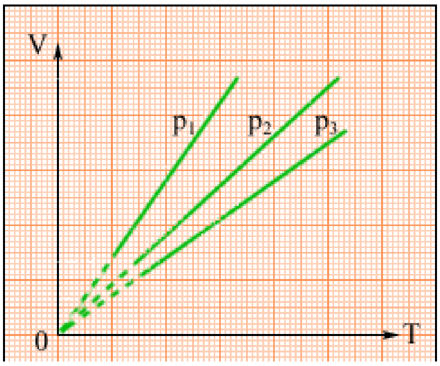


Рис. 4.4. Семейство изобар на плоскости (V, T). $p3 > p2 > p1$.

1). $\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$, (4.19)

2). $V = V_0 \frac{T}{T_0}$, (4.20)

3). $\alpha_v = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273{,}16\,град^{-1}}$, (4.21)

4). $V = \alpha_V V_0 T$, (4.22)

5). $V = V_0(1 + \alpha_V t)$, (4.23)

где t – температура, °C; V_0 – объем идеального газа при температуре T_0 = 273,16 K.

Термический коэффициент объемного расширения (одинаков для всех идеальных газов)

$$\alpha_V = \frac{V}{V_0 T}. \qquad (4.24)$$

характеристика относительного увеличения объема газа при изменении температуры на 1 град. В координатах *V-T* изобарический процесс изображается кривой – ***изобарой.***

Изохорный процесс

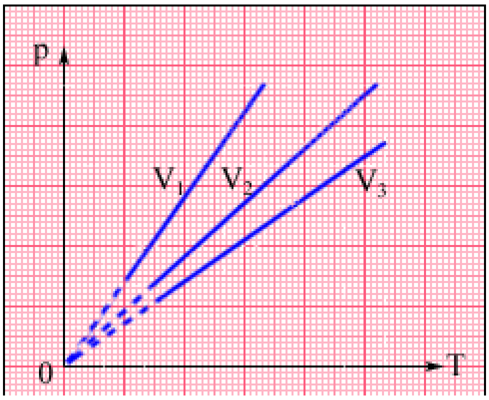


Рис. 4.5. Семейство изохор на плоскости (*p*, *T*).
*V*3 > *V*2 > *V*1

Описывается законом Шарля. Протекает при постоянном объеме *(V=const)*. Уравнения данного процесса имеет вид:

$$p = p_0(1+\alpha_p t) \qquad (4.25)$$

или

$$p = \alpha_p p_0 T = p_0 \frac{T}{T_0}, \qquad (4.26)$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0}, \qquad (4.27)$$

где $\alpha_p = 1/T_0$ – термический коэффициент повышения давления.

$\alpha_p = \frac{p}{p_0 T}$ – характеризует относительное увеличение давления газа при нагревании его на один градус.

В координатах *P-T* изохорический процесс изображается кривой – ***изохорой***.

Адиабатный процесс

Адиабатным называется процесс, *осуществляющий без теплообмена с окружающей средой*. Подчиняется уравнению Пуассона

$$pV^{\gamma} = const, \qquad (4.28)$$

$$\frac{p}{p_0} = \frac{V^{\gamma}}{V_0^{\gamma}}. \qquad (4.29)$$

Рис. 4.6.Адиабата

В координатах *P-V* адиабатный процесс изображается кривой – ***адиабатой***.

Закон Авогадро

При одинаковых давлениях и одинаковых температурах в равных объемах различных газов содержится одинаковое число частиц, иными словами:
при одинаковых давлениях и температурах моли различных идеальных газов занимают одинаковые объемы.

Закон Дальтона

Парциальным давлением газа, входящего в газовую смесь, называется давление, которое имел бы этот газ, если бы он один занимал весь объем, предоставленный газовой смеси

$$p = p_1 + p_2 + \ldots + p_n . \tag{4.30}$$

Давление газовой смеси равно сумме давлений, входящих в нее газов.

4. Понятие абсолютного нуля

Абсолютный нуль – *это температура, при которой прекращается поступательное движение молекул, и давление, производимое газом, становится равным нулю.*
При температуре 0К
т. е.
$P = P_0(1+\alpha t) = 0$;
$P_0 \neq 0$, $1+\alpha t = 0$;
$1 = -\alpha t$;
$t = -\frac{1}{\alpha}$;
$t = -273\,^0C$ - абсолютный нуль.

$$V = V_0(1+\alpha t) = V_0\left(1+\frac{-273}{273}\right) = 0 . \tag{4.31}$$

Это говорит о том, что экспериментальные газовые законы неприменимы в области низких температур.

Действительно, при низких температурах газы переходят в жидкое состояние ($T_{N_2} = 17K$ - жидкое состояние).

Кельвин в 1852 г. установил, что 0 К – самая низкая из возможных температур вещества. При 0 К полностью прекращается хаотическое движение молекул, однако сохраняется движение электронов в атоме.

В настоящее время удается охлаждать малые объемы вещества до температур, не достигающих нескольких тысячных долей до 0К.

Хаотичность теплового движения частиц газа означает, что ни одно их направлений их движения не является преимущественным. Соударения между частицами приводит к тому, что скорость их движения непрерывно изменяется по модулю и направлению.

Движение каждой частицы может быть описано законами механики. Но число частиц в газе очень велико и силы, действующие между ними таковы, что описать свойства совокупности частиц невозможно.

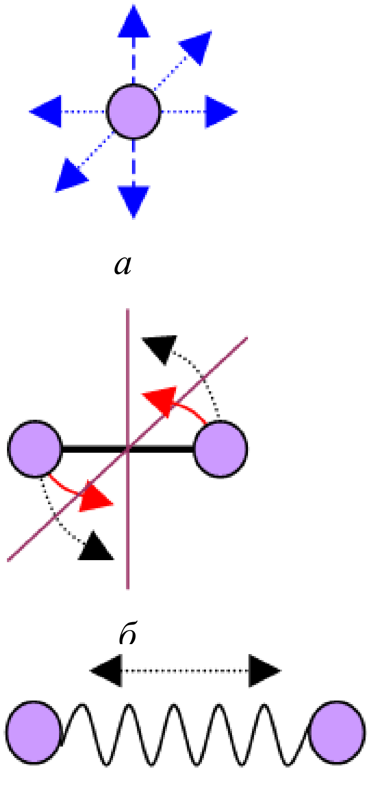


Рис. 4.7. Число степеней свободы молекул

5.Число степеней свободы. Закон равнораспределения энергии по степеням свободы. Средняя энергия многоатомной молекулы

Числом степеней свободы i *называется число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве.* Одноатомная молекула рис. 4.7 (*а*) имеет 3 степени свободы, двухатомная (*б*) – 5 и многоатомная (*в*) – 6. Сколько бы степеней свободы не имела молекула, три из них поступательные и все эти степени свободы равновероятны. Поскольку ни одна из поступательных степеней свободы молекулы не имеет преимущества перед другими, то на каждую степень свободы должна приходиться в среднем одинаковая энергия. Так как для одноатомной молекулы $E = \frac{3}{2}kT$, а число степеней свободы $i = 3$, то можно утверждать, что на одну степень свободы приходится энергия

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{2}kT. \qquad (4.32)$$

В классической физике доказывается закон ***равнораспределения энергии по степеням свободы,*** согласно которому на каждую степень свободы молекулы приходится в среднем одинаковая энергия, равная $\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{2}kT$.

Следовательно, молекула, имеющая число степеней свободы равное i будет обладать энергией

$$E = \frac{i}{2} kT. \qquad (4.33)$$

Умножив (10.2) на число молекул $N = N_A \frac{m}{M}$ можно найти энергию системы как сумму энергий входящих в эту систему молекул

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT. \qquad (4.34)$$

Где $R = k \cdot N_A = 8.31 \frac{Дж}{моль \cdot К}$ – универсальная газовая постоянная.

Эта энергия получила название **внутренней энергии системы.**

К внутренней энергии не относится кинетическая энергия движения системы в целом и потенциальная энергия системы во внешних полях.

Дифференцируя (10.3) можно найти $dU = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \cdot dT$ или в приращениях

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \cdot \Delta T, \qquad (4.35)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$. Если $\Delta T = 0$, то и $\Delta U = 0$.

Изменение внутренней энергии не зависит от процесса или совокупности процессов, приведших к изменению состояния газа, а определяется только начальным и конечным состоянием системы. Внутренняя энергия является однозначной функцией состояния, т.е. каждому состоянию системы соответствует одно и то же значение внутренней энергии, независимо от того, какие процессы привели ее в это состояние.

6. Первое начало термодинамики

Термодинамика – *раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, не касаясь микропроцессов.*

Основу термодинамики образует 2 её начала:

1-ое начало термодинамики*:* *Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение внутренней энергии и совершение работы против внешних сил.*

$$dQ = dU + dA \qquad (4.36)$$

Первый закон термодинамики применителен к изопроцессам:

1. Изотермический *T=const, то dU=0; dQ=dA*
2. Изохорный *V=const, то dA=0; dQ=dU*
3. Изобарный *P=const, то dQ=dU+dA*

4. Адиабатный $\Delta Q=0;$

$A= -\Delta U$ - адиабатное расширение

$\Delta U= -A$ - адиабатное сжатие.

7. Удельная и молярная теплоёмкости

Теплоёмкость - *физическая величина, численно равная отношению количества теплоты, которое необходимо затратить, чтобы нагреть систему на 1 К.*

$$C=\frac{\Delta Q}{\Delta T} \qquad [C]=\left[\frac{Дж}{К}\right] \tag{4.37}$$

Теплоёмкость бывает:

- *удельной*
- *молярной*

Удельная теплоёмкость вещества - *это количество теплоты, которое необходимо для нагревания 1 кг вещества на 1 К.*

$$dQ=c\cdot m\cdot dT \tag{4.38}$$

$$c=\frac{dQ}{mdT} \qquad [c]=\left[\frac{Дж}{кг\cdot К}\right] \tag{4.39}$$

Молярная теплоёмкость - *это количество теплоты, которое необходимо для нагревания 1 моля вещества на 1 К.*

$$dQ=C\cdot\nu\cdot dT \tag{4.40}$$

где ν - количество вещества.

$$C=\frac{dQ}{\nu dT} \qquad [C]=\left[\frac{Дж}{моль\cdot К}\right] \tag{4.41}$$

Удельная и молярная теплоёмкости связаны между собой формулой:

$$C=\frac{c}{M} \tag{4.42}$$

Теплоёмкость тела зависит*: от его массы, химического состава, термодинамического состояния и вида того процесса в котором телу передается энергия.*

В адиабатном процессе $\Delta Q=0, \Rightarrow C=0$

В изотермическом процессе $\Delta T=0, \Rightarrow C=\infty$

Теплоёмкости *при постоянном давлении называется изобарной теплоемкостью C_p , при постоянном объёме - изохорной теплоемкостью C_v.*

$C_p = C_v + R$,-уравнение Майера (4.43)

$Cv=\frac{i}{2}R$, где i- число степеней свободы.

$Cp=\frac{i+2}{2}R$

В термодинамике важное значение имеет величина $\gamma = \frac{Cp}{Cv}$ - ***адиабатическая постоянная***. Подставляя значения теплоёмкостей можно получить: $\gamma = \frac{i+2}{i}$

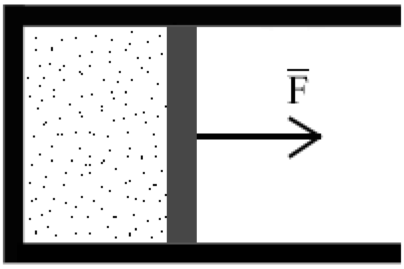


Рис. 4.8. К определению работы

8. Работа идеального газа. Круговые циклы

Пусть газ находится в сосуде, который закрыт поршнем, ΔS - площадь поршня. Переместим поршень на расстояние Δl, под действием силы F (рис.4.8).

При этом совершится работа:

$$A = F \cdot \Delta l \qquad (4.44)$$

Известно, что $P = \frac{F}{\Delta S} \rightarrow F = P \cdot \Delta S$ (4.45)

Подставим правую часть уравнения 4.45 в 4.44, получим:

$A = P \cdot \Delta S \cdot \Delta l = p \cdot \Delta V, \Delta V = \Delta S \cdot \Delta l$ - изменение объёма.

а) **А=** $p \cdot \Delta V$ **- работа при изобарном процессе.**

б) **при изохорном процессе А=0** , т.к. V=const

в) **при изотермическом процессе** (T= const)

$$A = \int_{V1}^{V2} pdV, \qquad (4.46)$$

обозначим $p = \frac{RT}{V}$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} \frac{RT}{V} dV = RT \ln \frac{V_2}{V_1} \qquad (4.47)$$

т.к. $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$, то работа при изотермическом процессе будет равна

$$A = RT \ln \frac{P_1}{P_2} \qquad (4.48)$$

г) **при адиабатном процессе**

$dA=-dU$, обозначим $dU=C_V dT$

$dA=- C_V dT$

$$A = \int_{T_1}^{T_2} -C\nu dT = -C\nu(T_2 - T_1) = C\nu(T_1 - T_2)$$

$$A = C_v(T_1 - T_2) \tag{4.49}$$

9. Циклические (круговые) процессы. Работа цикла

Круговым процессом или циклом *называется процесс, при котором система, пройдя ряд состояний, возвращается в исходное состояние*. На *pV*- диаграмме цикл изображается замкнутой кривой. Если цикл осуществляется по часовой стрелке (I), то он называется ***прямым***, если в обратном направлении (II)- ***обратным***.

Совершив цикл, система возвращается в исходное состояние. Поэтому изменение внутренней энергии за цикл равно нулю, т.е. $dU=0$. Следовательно, работа, совершенная системой, будет равна количеству теплоты полученному системой. Работа, совершенная системой равна площади цикла на *pV*- диаграмме. Однако нужно иметь в виду, что в процессе осуществления цикла, система не только получает, но и отдает некоторое количество теплоты и, следовательно $Q=Q_1 - Q_2$,

где Q_1– количество теплоты, полученное системой;

Q_2 – количество теплоты, отданное системой (Q_2 <0).

Поэтому термический коэффициент полезного действия цикла можно найти по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \tag{4.50}$$

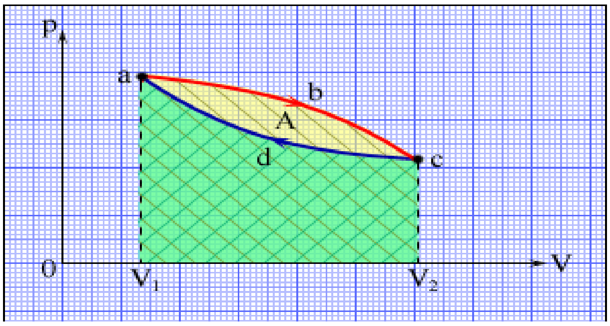


Рис. 4.9 Круговой процесс на диаграмме (*p*, *V*). *abc* – кривая расширения, *cda* – кривая сжатия. Работа *A* вкруговом процессе равна площади

Цикл называется обратимым, *если он может осуществляться как в прямом, так и в обратном направлении и при этом в окружающей среде и в самой системе не происходит никаких изменений. Всякий другой процесс, не удовлетворяющий этим условиям будет* **необратимым.**

Работа цикла определяется по формуле:

$$A_ц = A_{расшир.} - A_{сжат.}$$

Процесс будет обратимым, если он является равновесным. Обратимость равновесного процесса следует из того, что его любое промежуточное состояние также является состоянием термодинамического равновесия.

10.Тепловые машины. Второе начало термодинамики

Второе начало термодинамики устанавливает необратимость макроскопических процессов. Первая формулировка этого начала была дана в 1850 году Клаузиусом: *невозможен процесс, при котором теплота самопроизвольно переходила бы от менее нагретого тела к более нагретому.*

Исторически второе начало термодинамики возникло из анализа работы теплового двигателя.

Тепловой двигатель *представляет собой систему, работающую за счет внешних источников тепла, которая периодически повторяет тот или иной термодинамический цикл и преобразует теплоту в механическую работу.*

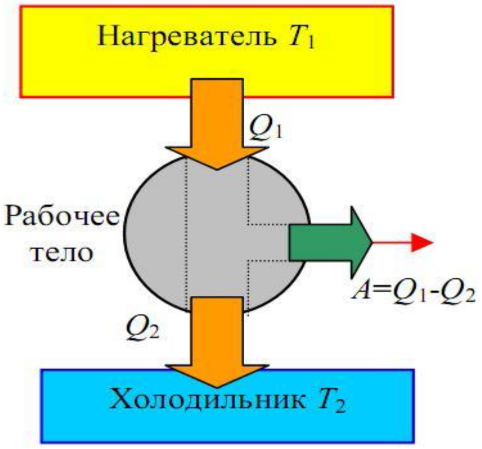


Рис.4.10. Тепловой двигатель

Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рис. 4.10. Любой тепловой двигатель должен иметь рабочее тело, нагреватель с температурой T_1, который передает рабочему телу количество теплоты Q_1 и холодильника с температурой T_2, который забирает у рабочего тела количество теплоты Q_2.

В результате совершается работа $A= Q_1 - Q_2$. Отсюда следует, **что невозможно создать двигатель, который всю полученную теплоту превращал бы в работу. Этот принцип называется вторым началом термодинамики в формулировке Кельвина-Планка.**

КПД двигателя равен: $$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < 1 \qquad (4.51)$$

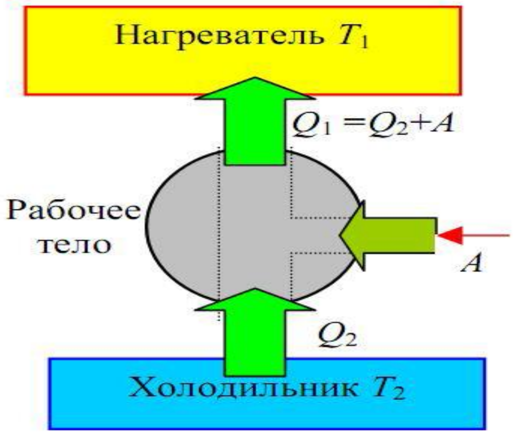


Рис. 4.11. Холодильная машина

Холодильной установкой называется циклически действующее устройство, которое поддерживает в холодильной камере температуру более низкую, чем окружающей среде.

Рассмотрим работу холодильной машины. В этом случаи, от более холодного тела отбирается некоторое количество теплоты Q_2, а более горячему передаётся количество теплоты $Q_1 > Q_2$. Чтобы это было возможно, над рабочим телом надо совершить работу $A = Q_1 - Q_2$. Из анализа работы холодильной машины вытекает другая формулировка второго начала термодинамики (Клаузиус). **Без совершения работы нельзя отобрать теплоту у более холодного тела и передать её более горячему. Самопроизвольно теплота может переходить только от более горячих тел к менее горячим.**

Величина $\eta = \dfrac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$ **> 1 называется коэффициентом полезного действия** ***холодильной установки.***

Холодильная установка может быть использована как тепловой насос для отопления. При этом электроэнергия используется для того, чтобы привести в действие холодильную установку, в которой нагревателем является отапливаемое помещение, а холодильной камерой - наружная атмосфера. При этом отапливаемое помещение получает большее количество теплоты, чем его выделяется при непосредственном преобразовании электрической энергии во внутреннюю энергию нагревателем типа электрических печей, электрических плиток и т.д.

Применение первого и второго начала термодинамики к живым организмам.

Живые организмы - это своеобразные тепловые двигатели, получающие теплоту в результате происходящих в нём экзотермических реакций, в которых участвуют биологические макромолекулы. Как любой тепловой двигатель, организм выделяет теплоту и совершает работу. Это возможно лишь при наличие в организме источника тепла. На один из источников «животного тепла» впервые указал в конце 18 века французский химик Лавуазье, который установил, что сущность дыхания заключается в экзотермической (с выделением энергии) реакции присоединения кислорода воздуха к водороду и углероду, находящимся в молекулах органических веществ. Поэтому жизнь, по образному выражению Лавуазье, представляет собой «замедленное горение».

Майер, немецкий ученый середины 19 века, служивший врачом на корабле, заметил, что при плавании в тропиках цвет венозной крови, которую он видел при кровопусканиях у членов команды, ярче, чем при плавании в холодных морях. Он с удивлением отмечал, что в сильную жару венозная кровь по цвету почти не отличается от артериальной, значит она сильно насыщена кислородом, который был мало израсходован организмом в артериальной системе. Следовательно, предположил Майер, при наличии большого притока тепла извне в жаркую погоду потребление кислорода организмом уменьшается и внутренние источники тепла работают менее интенсивно.

Вывод (в 1842 г.) сделан Майером:

Выделяющаяся в процессе окисления внутри живого организма энергия частично превращается в тепло, а частично расходуется на совершение механической работы. т.о. Майер впервые распространил первое начало термодинамики на живой организм, заложил основы биоэнергетики.

Дальнейшие работы Г. Гемгольца (1847) и Д. Джоуля (1850) и обобщение результатов их исследований позволили сформулировать закон сохранения и превращения энергии.

11. Энтропия

Энтропия *- функция состояния, дифференциалом которой является отношение:* $\dfrac{dQ}{T}$

$$\Delta S = \frac{dQ}{T} \qquad \left[\frac{Дж}{К}\right] \tag{4.52}$$

где ΔS- приращение энтропии; dQ - количество теплоты; T - температура системы.

Энтропия является количественной мерой степени молекулярного беспорядка в системе.

Сообщение системе тепла приводит к усилению теплового движения молекул и следовательно к увеличению степени беспорядка в системе. Чем выше температура (т.е. больше внутренняя энергия системы), тем относительно меньшей оказывается доля беспорядка, обусловленного сообщением данного количества тепла dQ.

При температуре абсолютного нуля энтропия всякого вещества равна 0. (теорема Нереста) или третье начало термодинамики. Отсюда вытекает, что энтропия всякого тела стремится к нулю при стремлении к нулю температуры.

$$\lim_{T \to 0} \Delta S = 0$$

12. Цикл Карно и его КПД для идеального газа

Основываясь на втором начале термодинамики Карно доказал теорему: *из всех периодически действующих машин, имеющих одинаковые температуры нагревателя и холодильника, большим коэффициентом полезного действия обладают обратимые машины; при этом КПД этих машин одинаков и не зависит от конструкции и природы рабочего тела.*

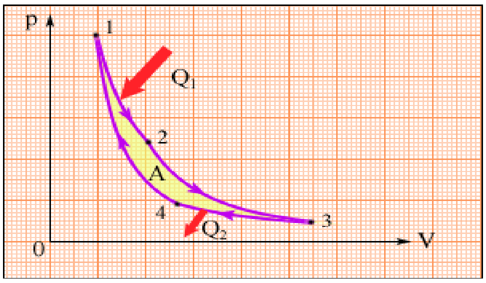


Рис. 4.12. Цикл Карно

Карно придумал цикл, коэффициент полезного действия которого является наибольшим. Этот цикл получил название цикла **Карно.** Он состоит из двух адиабат (1-2, 3-4) и двух изотерм (2-3, 4-1) (рис. 4.12).

Коэффициент полезного действия такого **цикла**, как показал Карно, определяется по формуле:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \tag{4.53}$$

где T_1 – температура нагревателя, T_2 – температура холодильника.

Во второй теореме Карно доказал, *что коэффициент полезного действия реальной машины, работающей с теми же нагревателем и холодильником всегда меньше этого значения. Формула Карно, таким образом, определяет максимальное значение коэффициента полезного действия теплового двигателя.*

Теорема Карно послужила основанием для установления термодинамической шкалы температур. Из формул $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ и $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, следует, что $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$. Для сравнения температур T_1 и T_2 двух тел надо осуществить обратимый цикл Карно, в котором одно тело используется в качестве нагревателя, а другое в качестве холодильника. Из полученного равенства следует, что отношение температур равно отношению количеств теплоты отданного в данном цикле к полученному в данном цикле.

При этом химический состав рабочего тела не влияет на результат сравнения, поэтому такая температурная шкала не связана со свойствами веществ.

14.Явления переноса

Явлениями переноса *называются необратимые процессы, в результате которых происходит пространственный перенос энергии, массы, количества движения.*

К явлениям переноса относятся:

а) диффузия (перенос массы)

б) теплопроводность (перенос энергии)

в) внутреннее трение (перенос количества движения).

Перенос энергии, массы, и количества вещества всегда происходит в направлении, обратном их градиенту.

Средняя длина свободного пробега молекулы прямо пропорциональна её средней арифметической скорости <υ>и обратно пропорциональна среднему числу столкновений <Z> за единичный промежуток времени.

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle \nu \rangle}{\langle Z \rangle} \qquad (4.54)$$

Диффузия. Осмос. Осмотическое давление и его роль в жизнедеятельности растений.

Пусть в некотором объёме газа имеет место неоднородность а именно: газ имеет различные плотности ρ_1 и ρ_2.

Молекулы диффундируют туда, где плотность меньше, где концентрация ниже, в результате начнется перемешивание газа.

Явление проникновения молекул одного вещества в межмолекулярное пространство другого (перемешивание вещества) называется диффузией.

Описывается процесс ***диффузии уравнением Фика***:

$$\Delta M = -Д \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t \qquad (4.55)$$

где Δ М - переносимая масса; $\frac{\Delta\rho}{\Delta x}$ – градиент плотности; ΔS – площадь; Δt- время; Д- коэффициент диффузии, зависящий от рода вещества, температуры, давления.

Знак минус говорит о том, что масса переносится в сторону уменьшения убывания плотности.

Если в этом уравнении принять:

$\Delta S = 1м^2$, $\Delta t = 1с$, $\frac{\Delta\rho}{\Delta x} = 1\frac{кг}{м^4}$, то

Д= $-\dfrac{\Delta M}{\frac{\Delta\rho}{\Delta x}\cdot\Delta S\cdot\Delta t}$ Д=ΔМ, где Д- коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии *численно равен массе вещества, переносимого в единицу времени через единицу площади перпендикулярно направлению распространения при градиенте плотности равном единице.*

Коэффициент диффузии *зависит от температуры и массы диффундирующих молекул.*

Диффузия протекает не только в газообразных, но и в твердых и жидких телах.

В жидкости диффузия протекает в 1000 раз медленнее, чем в газах, (например, для O_2 Д=$8\cdot10^{-6}\,\frac{м^2}{с}$, а для жидкости Д=$10^{-10}$ - 10^{-9} $\frac{м^2}{с}$).

Коэффициент диффузии для жидкости определяется по формуле:

$$Д = \frac{KT}{6\Pi R\eta} \quad ,$$

где К- постоянная Больцмана; Т- абсолютная температура; R- радиус молекул; η - (этта) коэффициент динамической вязкости жидкости.

То есть скорость протекания диффузии в жидкости прямо пропорциональна температуре и обратно пропорциональна вязкости. В твердых телах скорость протекания диффузии ещё меньше (опыт со свинцовой и золотой пластинками).

Диффузия, протекающая через полупроницаемые перегородки, называется осмосом.

Осуществляется осмос за счет дополнительного давления, обусловленного различной концентрацией диффундирующих частиц по разные стороны перегородки.

Это давление называется ***осмотическим*** и может быть рассчитано по формуле:

$$p = \frac{2}{3} n_0 \langle E \rangle \qquad (4.56)$$

где n_0- концентрация (число молекул вещества в единицу объёма); $\langle E \rangle$ – средняя кинетическая энергия молекул.

$p=\rho gh$- гидростатическое давление.

Диффузия имеет важное значение в жизнедеятельности животных и растений. Около 98% необходимого животному организму кислорода поглощается легкими в процессе диффузии.

Обменные процессы в живых организмах протекает благодаря диффузии ионов через клеточные мембраны. Проникновение растворенного вещества в растительную клетку определяется уравнением:

$\Delta M = -Д\Delta C$, где ΔC- разность концентраций внутри клетки и снаружи.

Диффузия является основным механизмом, обеспечивающим газообмен между почвенным и атмосферным воздухом, т.е. вынос углекислого газа в атмосферу и перенос кислорода в обратном направлении. Путем диффузионного обмена через листья осуществляется частично и питание растений.

Теплопроводность - это процесс распространения теплоты от более нагретых частиц тела к менее нагретым, не сопровождающийся переносом массы вещества или излучением энергии в виде электромагнитных волн.

Теплопроводность обусловлена тем, что частицы воздуха (молекулы, атомы, электроны) обладают большой кинетической энергией и передают её менее быстрым частицам.

Передача теплоты теплопроводностью может осуществляться между любыми телами либо через промежуточную среду. Через вакуум теплота не передается, так как там отсутствуют частицы вещества. Процесс теплопроводности описывается ***уравнением Фурье***:

$$\Delta Q = -x \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta t \qquad (4.57)$$

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$- градиент температур, показывает изменение температур на единицу длины $\left(\frac{К}{м}\right)$. Знак минус говорит, о том что энергия переносится в сторону уменьшения температуры. ΔS- площадь поверхности. (1м^2) , Δt-время (1с).

Пусть $\frac{\Delta T}{\Delta x} = 1\frac{К}{м}$, ΔS=1м^2 , Δt=1с, тогда $\Delta Q = \chi$

χ ***(коэффициент теплопроводности)***- *численно равен количеству теплоты; переносимой через площадку 1м^2 перпендикулярной* *потоку за 1с при градиенте температуры равным –1, он зависит от свойств среды (вещества).*

$$\chi = \frac{\Delta Q}{\frac{\Delta T}{\Delta x}\Delta S \Delta t} \qquad \left[\frac{Вт}{м \cdot К}\right]$$

Интенсивностью теплового потока называется количество теплоты, переносимое в единицу времени через единицу площади поверхности:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta S \Delta t} = \frac{-\chi \frac{\Delta T}{\Delta x}\Delta S \Delta t}{\Delta S \Delta t} = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (4.58)$$

Наибольшую теплопроводность имеют металлы ($\chi = 40 - 400\frac{Вт}{м \cdot К}$).

Для сравнения: $\chi воздуха = 0.024\frac{Вт}{м \cdot К}$.

В живых организмах ткани имеют различные теплопроводности и это различие весьма существенно для теплового режима организма.

Значительная теплопроводность мышечных тканей ($\chi = 0.5\frac{Вт}{м \cdot К}$),позволяет быстро переносить тепло от внутренних органов к наружным (кожа), предохраняя внутренние органы от перегрева.

При низких температурах внешней среды слой жировой ткани ($\chi = 0.17$)
препятствует быстрой утечке тепла.

Между молекулами жидкости существуют силы взаимного притяжения, которые проявляются при движении одного слоя жидкости относительно другого в ***виде внутреннего трения или вязкости.***

Внутреннее трение (вязкость) – это свойство реальных жидкостей (или газов) благодаря которому выравнивается скорость движения различных слоев.

Пусть дана неподвижная пластина А в жидкости, а другую пластину В- положили на поверхность жидкости. Переместим её под действием силы F.

Скорость движения слоёв жидкости возрастает от пластины А к пластине В. Так как слои жидкости перемещаются друг относительно друга, то каждый слой получает ускорение со стороны верхнего слоя и тормозится нижним.

Ньютон установил, что силы трения между слоями жидкости, движущимися с разными скоростями, зависят от площади соприкасающихся слоёв и быстроты, с которой меняется скорость при переходе от одного слоя к другому в направлении, перпендикулярно течению жидкости, эта величина ***называется градиентом скорости.***

$$grad\overline{\upsilon} = \frac{\Delta\overline{\upsilon}}{\Delta l}$$

Сила внутреннего трения согласно формуле Ньютона равна:

$$F_{тр} = -\eta\frac{\Delta\upsilon}{\Delta l}\Delta S \ , \qquad (4.59)$$

где ΔS - площадь соприкосновения слоев жидкости; η - коэффициент динамической вязкости жидкости.

$$\eta = \frac{F}{\frac{\Delta\upsilon}{\Delta l}\Delta S} \quad , \text{ если } \frac{\Delta\upsilon}{\Delta l} = 1, \quad \Delta S = 1, \text{ то } \quad \eta = F$$

Коэффициент динамической вязкости *численно равен силе внутреннего трения, действующий на единицу площади трущихся слоёв, при градиенте скорости равном 1.*

Коэффициент динамической вязкости η зависит от рода жидкости и от её температуры. С повышением температуры η уменьшается.

$$[\eta] = \left[\frac{Н}{м^2}\cdot c\right] = [Па\cdot c]$$

В системе СГС единицей измерения вязкости служит Пуаз (П).

$$[1П] = \left[\frac{1дн}{см^2}\cdot c\right]$$

$$1Па\cdot c = \frac{10^5 c}{10^4} = 10П$$

Данная единица вязкости названа в честь знаменитого ученого Пуазейля.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулировать основные положения молекулярно–кинетической теории.
2. Что такое идеальный газ? Перечислите основные характеристики идеального газа.
3. Основное уравнение молекулярно–кинетической теории газа.
4. Формула зависимости давления идеального газа от температуры.
5. Закон Дальтона.
6. Уравнение Менделеева–Клапейрона.
7. Что такое изопроцессы (определение)?
8. Сформулировать закон Бойля–Мариотта.
9. Сформулировать закон Гей–Люссака.
10. Сформулировать закон Шарля.
11. Что такое число степеней свободы молекулы?
12. Формула внутренней энергии.
13. Формулы работы газа.

14. Сформулировать первое начало термодинамики.
15. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам.
16. Что такое удельная теплоёмкость?
17. Что такое молярная теплоёмкость?
18. Формула молярной теплоёмкости при постоянном объёме.
19. Формула молярной теплоёмкости при постоянном давлении.
20. Физический смысл универсальной газовой постоянной.
21. Уравнение Майера.
22. Адиабатическая постоянная.
23. Какой процесс называют адиабатным?
24. Применение первого начала термодинамики к адиабатному процессу.
25. Уравнения Пуассона.
26. Какие процессы называют циклическими?
27. Работа цикла.
28. Второе начало термодинамики в формулировке Кельвина–Планка.
29. Второе начало термодинамики в формулировке Клаузиуса.
30. КПД цикла.
31. Цикл Карно. КПД цикла Карно.
32. Что такое энтропия?
33. Что такое длина свободного пробега молекулы?
34. Формула Ньютона для вязкого трения.
35. Формула Фика для диффузии.
36. Формула Фурье для теплопроводности.

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Массы атомов и молекул. Относительная молекулярная масса. Количество вещества. Число Авогадро. Молярная масса.
2. Постоянная Больцмана.
3. Средняя кинетическая энергия поступательного движения одноатомной молекулы и ее связь с температурой.
4. Термометрическое тело. Шкалы температур.
5. Распределение молекул по скоростям.
6. Распределение Максвелла.
7. Распределение Больцмана.
8. Барометрическая формула.

РАЗДЕЛ №3 «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ»

Лекция №5

Тема лекции: «Электрическое поле в вакууме»

План лекции:

1. Электрический заряд. Носитель заряда. Элементарный электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда.
2. Закон Кулона.
3. Электрическое поле и его свойства.
4. Напряжённость поля.
5. Поток вектора напряженности электрического поля. Теорема гаусса.
6. Работа сил электрического поля при перемещении в нем заряда. Потенциал. Разность потенциалов.
7. Напряженность электрического поля как градиент потенциала
8. Циркуляция вектора напряженности электрического поля по замкнутому контору.

1. Электрический заряд. Носитель заряда. Элементарный электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда

Изучение электрических явлений начнем с электростатики.

В природе существуют два рода электрических зарядов – положительные и отрицательные.

Положительные заряды возникают, например, на стекле, натёртом кожей, а отрицательные – на янтаре, натертом шерстью. Одноименно заряженные заряды отталкиваются друг от друга, а разноименные притягиваются.

Знак заряда, возникающего на теле при электризации трением, зависит не только от химического состава тела, но и от того, с каким другим телом оно соприкасается при трении. Так, стекло, натёртое фланелью, заряжается положительно. Кроме того, знаки зарядов, возникающих при трении, зависят от состояния трущихся поверхностей.

При электризации тел трением всегда оба тела одновременно электризуются, причем одно из них получит положительный заряд, а другое – отрицательный. Если до электризации тела не были заряжены, то положительный заряд одного тела равен отрицательному заряду другого. Т.о. был установлен **закон сохранения электрических зарядов: «Электрические заряды не возникают и не исчезают, они могут**

быть лишь переданы от одного тела к другому или перемещены внутри данного тела».

Из закона сохранения электрических зарядов следует, что в любом нейтральном веществе имеются заряды обоих знаков, причем в равных количествах. В результате соприкосновения двух тел при трении часть зарядов переходит из одного тела в другое. Тела заряжаются разноименно.

В результате опытов было выяснено, что электрический заряд любого тела состоит из целого числа элементарных зарядов.

В обычных лабораторных опытах для обнаружения и измерения электрических зарядов используется **электрометр** - прибор, состоящий из металлического стержня и стрелки, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси (рис. 5.1).

Наименьшая частица, обладающая отрицательным электрическим зарядом, называется электроном. Его масса равна $9{,}1\times10^{-31}$кг. *Наименьшая частица, имеющая положительный заряд называется протоном*. Его масса приблизительно равна массе атома водорода $1{,}6\times10^{-27}$кг. Протон и электрон входят в состав всех атомов и молекул.

Все тела делятся на проводники и диэлектрики. *Проводником называется тело, в котором электрические заряды могут свободно перемещаться по всему объему.* Проводники – металлы, растворы кислот, солей и щелочей, расплавленные соли, раскаленные газы и др.

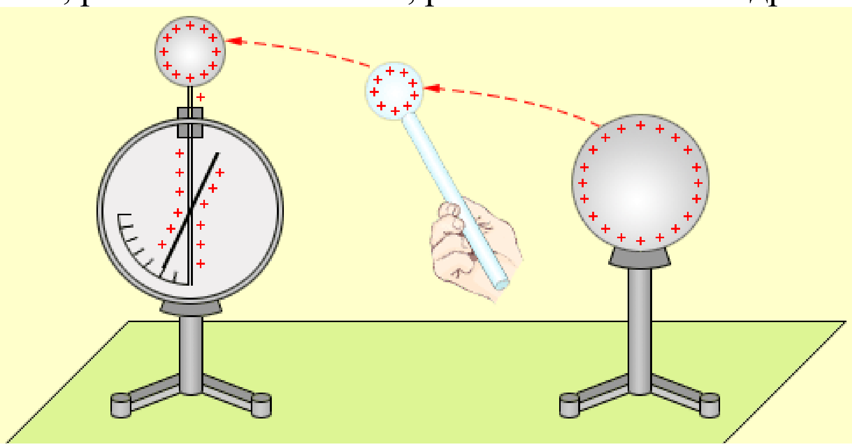


Рисунок 5.1.Перенос заряда с заряженного тела на электрометр.

У диэлектрика сообщаемые ему заряды остаются на тех же местах, куда были первоначально помещены (диэлектрики - янтарь, стекло, каучук, масла, сера, смола, эбонит, газы при обычных температурах).
Разделение тел на проводники и диэлектрики условно, так как способности тел проводить электрический ток зависят от условий, в которых эти тела находятся, например, при высокой температуре стекло становится проводником. Кроме того, существует *группа веществ, называемых полупроводниками – которые занимают промежуточное положе-*

ние между проводниками и диэлектриками. Примеры полупроводников: германий, кремний, теллур, селен.

2. Закон Кулона

В конце XVIII века появилась настоятельная необходимость перехода от качественного исследования электрических явлений к количественным.

В 1784 году Кулон закончил своё блестящее исследование упругого кручения нити. Он установил, что сила закручивания нити пропорциональна углу закручивания нити. Это давало новый, исключительно чувствительный метод измерения силы путем сравнения с силой, возникающей при закручивании нити. Новый прибор получил название крутильных весов.

Закон взаимодействия точечных зарядов был установлен Кулоном в 1875 году с помощью крутильных весов (рис. 5.2).

Рисунок 5.2.
Прибор Кулона

Точечным зарядом называется заряд, сосредоточенный на теле, размерами которого в данных условиях можно пренебречь.

Закон Кулона: *сила взаимодействия двух точечных зарядов, расположенных в вакууме, пропорциональна произведению зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами и направлена вдоль прямой, проходящей через центры зарядов.*

$$F_к = k\frac{|q_1|\times|q_2|}{r^2} \qquad (5.1)$$

Сила F называется кулоновской силой. Эта сила является центральной (рис.6.3).

Если заряды находятся в однородной и изотропной среде, то закон Кулона имеет вид:

$$F_к = k\frac{q_1\times q_2}{\varepsilon r^2}, \qquad (5.2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, величина, показывающая, во сколько раз уменьшается сила взаимодействия зарядов в среде по сравнению с вакуумом.

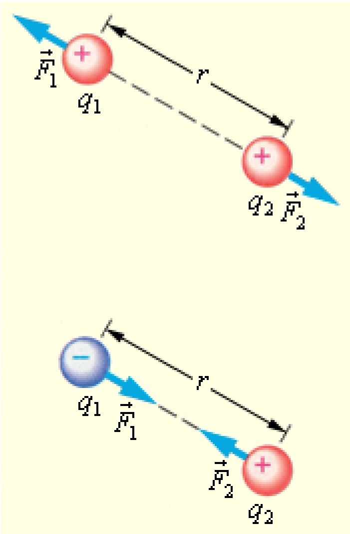


Рисунок 5.3.
Силы взаимодействия одноименных и разноименных зарядов

Значение коэффициента k зависит от выбора системы единиц. В международной системе (СИ) коэффициент k принимается равным

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \qquad (5.3)$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 * 10^{-12}\ \frac{\Phi}{м}$ - электрическая постоянная, относящаяся к числу фундаментальных физических постоянных.

3. Электрическое поле

При исследовании взаимодействия электрических зарядов встает вопрос, почему возникают силы, действующие на заряды, и как они передаются от одного заряда к другому.

Для понимания происхождения и передачи сил, действующих между покоящимися зарядами, необходимо допустить наличие между зарядами какого-то физического агента, осуществляющего это взаимодействие. Этим агентом, по мнению М. Фарадея, является электрическое поле. Когда в каком-либо месте появляется электрический заряд, то вокруг него образуется электрическое поле. **Электрическое поле представляет собой созданную зарядами особую форму материи, через которую осуществляется взаимодействие между зарядами (иными телами).**

Поле, как вещество, является формой материи, обладающей массой и энергией.

Основное свойство электрического поля заключается в том, что на всякий другой заряд, помещенный в это поле, будет действовать сила. Мы будем рассматривать электрические поля, создаваемые неподвижными электрическими зарядами и называемые *электростатическими полями*.

Для обнаружения и опытного исследования, электростатических полей используется пробный электрический заряд, размеры которого настолько малы, что не искажают исследуемое электрическое поле.

4. Напряжённость поля

Отношение силы **F**, действующей на неподвижный пробный заряд **q**, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда не зависит от величины этого заряда **q** и может быть принято за характеристику поля в данной точке. Указание на неподвижный заряд имеет принципиальное значение. Дело в том, что силы, действующее на электрический заряд, зависят не только от электрического, но магнитного поля. Однако магнитное поле, как показывает опыт, действует только на движущийся электрический заряд и не действует на неподвижный заряд.

Напряженностью электрического поля $\vec{E}$ называется физическая величина, численно равная силе $\vec{F}$, действующей на положительный единичный заряд, помещенный в данную точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \tag{5.4}$$

Как следует из формул 5.1 и 5.4, для поля точечного заряда q будем иметь

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}. \tag{5.5}$$

Вектор напряженности электрического поля совпадает по направлению с направлением силы, действующей на положительный заряд. Поэтому вектор напряженности электрического поля направлен от положительного заряда к отрицательному заряду (рис. 5.4).

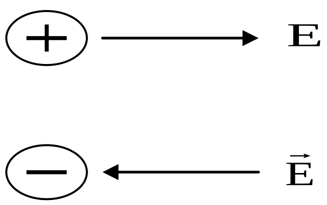
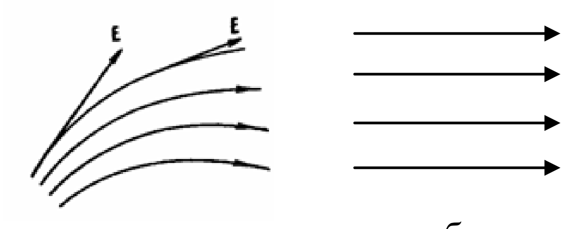


Рис. 5.4. Направление вектора напряженности электрического поля

Электрическое поле можно представить графически, используя так называемые силовые линии (линии напряженности).

Непрерывная линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором напряженности электрического поля, называется силовой линией поля (рис. 5.5.а*)*.



а б

Рис.5.5. К определению сило-вых линий электрического

Если в каждой точке поля вектор напряженности остается величиной постоянной, то поле называется однородным, в противном случае поле считается – неоднородным. Силовые линии такого поля представляют собой прямые параллельные линии (рис. 5.5.б).

Силовые лини силовые линии электрического поля начинаются на положительном заряде и заканчиваются на отрицательном заряде (рис.5.6). Поэтому иногда говорят, что положительный заряд можно считать истоком электрического поля, а отрицательный заряд – стоком поля.

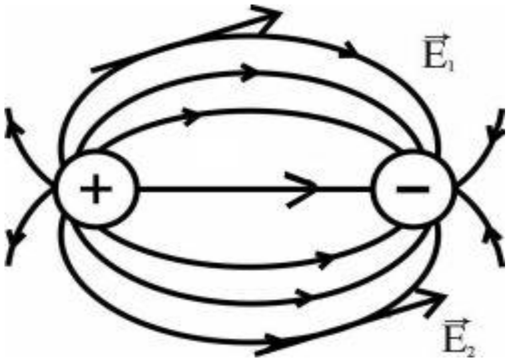


Рис. 5.6. К определению направления силовых линий поля

Если электрическое поле создаётся не одним, а несколькими зарядами, то на основании принципа независимости действия сил $\vec{F} = \sum \vec{F}_i$ можно утверждать, **что напряженность результирующего электрического поля будет равна геометрической сумме напряженностей, создаваемых каждым зарядом в отдельности**, т.е.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i \qquad (5.6)$$

Формула 5.6 выражает принцип суперпозиции полей. Используя принцип суперпозиции полей, можно рассчитать напряженность поля, создаваемого протяженным электрическим зарядом.

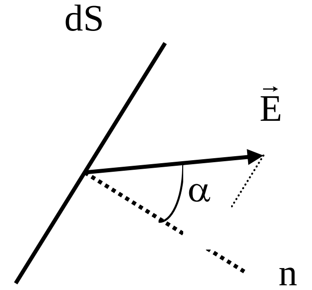


Рис. 5.7. К определению потока вектора напряженности электрического поля

4. Поток вектора напряженности электрического поля. Теорема Гаусса

Число силовых линий, пронизывающих некоторую поверхность, расположенную в электрическом поле, называется потоком напряженности электрического поля сквозь эту поверхность.

Число линий напряженности, пронизывающих элементарную площадку dS, нормаль к которой образует угол α с вектором напряженности E, будет равно: $E \times dS \times \cos\alpha$. $E \times dS \times \cos\alpha.$

В*еличина* $d\Phi = E \times dS \times \cos\alpha = E_n \times dS$ *называется* ***потоком вектора напряженности*** *через площадку dS* (рис. 5.7).

Для произвольной поверхности S поток вектора напряженности Φ определяется по формуле:

$$\Phi = \int_S E_n \times dS \qquad (5.7)$$

где интегрирование должно быть произведено по всей поверхности S.

Поток вектора напряженности – величина скалярная. Знак потока зависит не только от электрического поля, но и от выбора положительного направления нормали $\vec{n}$ к поверхности. Как правило, за положительное направление нормали принимается направление внешней нормали к поверхности.

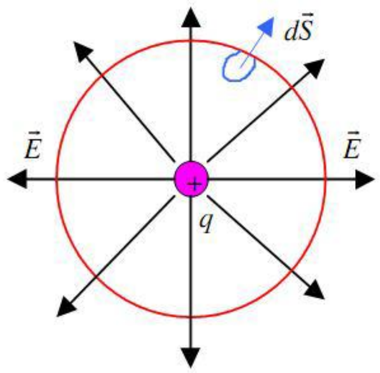


Рис. 5.8. К доказательству теоремы Гаусса

Расчет электрических полей значительно упрощается, если использовать теорему Гаусса, теорему, определяющую поток вектора напряженности электрического поля через любую замкнутую поверхность. Она была установлена М.В. Остроградским в виде некоторой общей математической теоремы и Гауссом – применительно к случаю электрического поля. Докажем теорему вначале для точечного заряда q. Окружим точечный заряд сферой радиусом R (рис. 6.8) и тогда для потока вектора напряженности, с учетом формул 5.7 и 5.5, получим

$$\Phi = \int_S E \times dS = E\int_S dS = E \times S = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R^2} \times 4\pi R^2 = \frac{q}{\varepsilon_0} \qquad (5.8)$$

Полученный результат будет справедлив и для любой другой замкнутой поверхности. Если поверхность не охватывает зарядов, то Φ=0. В этом случае линии напряженности и входят, и выходят из поверхности.

В общем случае, когда замкнутая поверхность охватывает N электрических зарядов,

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N} \Phi_i = \sum_{i=1}^{N} \frac{q_i}{\varepsilon_0} = \frac{\sum_{i=1}^{N} q_i}{\varepsilon_0}. \qquad (5.9)$$

Формула 5.9 выражает **теорему Гаусса – поток вектора напряженности электрического поля через любую замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охватывающих этой поверхностью, деленной на электрическую постоянную.**

Используя теорему Гаусса можно рассчитать напряжённость электрического поля во многих случаях. Рассмотрим некоторые примеры.

Равномерно заряженная плоскость

Пусть имеется бесконечная плоскость, равномерно заряженная с поверхностной плотностью заряда σ.

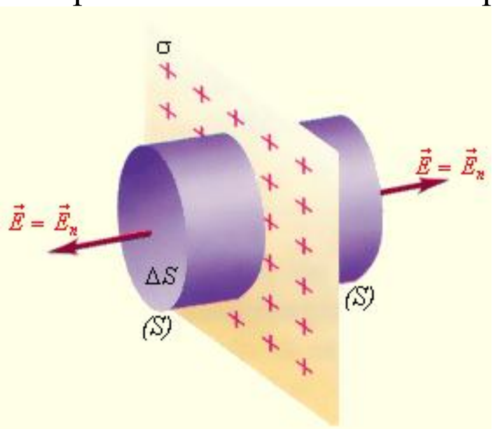


Рис. 5.9. Поле равномерно заряженной плоскости

В этом случае в качестве замкнутой поверхности удобно выбрать прямой цилиндр, перпендикулярный к заряженной плоскости, ограниченный двумя плоскими основаниями, площадью S каждая, перпендикулярными к линиям напряженности и расположенными по обе стороны плоскости (рис. 5.9). Так как вектор напряженности не пронизывает боковой поверхности цилиндра, то $\Phi = 2 \times E \times S$, но по теореме Гаусса

$$\Phi = \frac{q}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma \times S}{\varepsilon_0}.$$

Из равенства правых частей этих выражений следует, что равномерно заряженная плоскость создает однородное электрическое поле с напряженностью

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \qquad (5.10)$$

Поле у поверхности заряженного проводника

Учитывая, что вектор напряженности поля перпендикулярен поверхности проводника (рис. 5.10) и поле внутри проводника отсутствует, можно получить $\sigma = \varepsilon_0 \vec{E} = \vec{D}$. или

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \qquad (5.11)$$

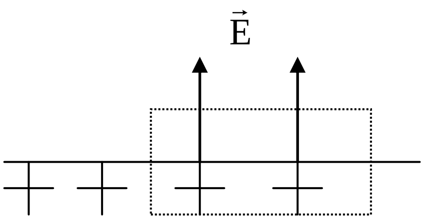


Рис. 5.10. Поле у поверхности проводника

Величина D получила название электрического смещения, так как у поверхности заряженного проводника она равна поверхностной плоскости заряда σ, т.е. величине заряда, сместившегося внутри проводника, на единице площади поверхности.

Как видно из полученного выражения, напряженность электрического поля в этом случае не зависит от формы проводника и распределения зарядов в нем.

Поле двух заряженных пластин

Рассмотрим электрическое поле, создаваемое двумя равномерно заряженными пластинами. При появлении на одной из пластин заряда с поверхностной плотностью +σ (рис.5.11). Эти заряды под действием силы взаимного притяжения будут сосредоточены на внутренних поверхностях пластин. Заряженные плоскости каждой создают по обе стороны от себя электрическое поле с напряженностью, выражаемой формулой $E = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}$.

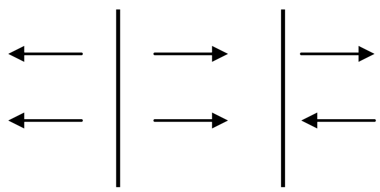


Рис. 5.11. Поле двух заряженных плоскостей

Вне пластин эти напряженности направлены в разные стороны и их сумма равна нулю (рис. 5.11). Между пластинами, напротив, эти поля направлены в одну сторону и, складываясь, дают

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}. \qquad (5.12)$$

Поле равномерно заряженной нити

Рассмотрим электрическое поле, создаваемое равномерно заряженной с линейной плотностью заряда τ нитью. В качестве замкнутой поверхности в этом случае удобно взять цилиндрическую поверхность, ось которой совпадает с нитью. Очевидно, что и в этом случае вектор напряженности перпендикулярен нити и будет пронизывать боковую поверхность цилиндра радиусом r. Следовательно, поток вектора напряженности $\Phi = E \cdot 2\pi r \cdot \ell$, но по теореме Гаусса $\Phi = \dfrac{q}{\varepsilon_0} = \dfrac{\tau \cdot \ell}{\varepsilon_0}$. Из равенства правых частей этих выражений следует, что напряженность электрического поля равномерно заряженной нити определяется выражением

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\tau}{r} \qquad (5.13)$$

6. Работа сил электрического поля при перемещении в нем заряда. Потенциал. Разность потенциалов

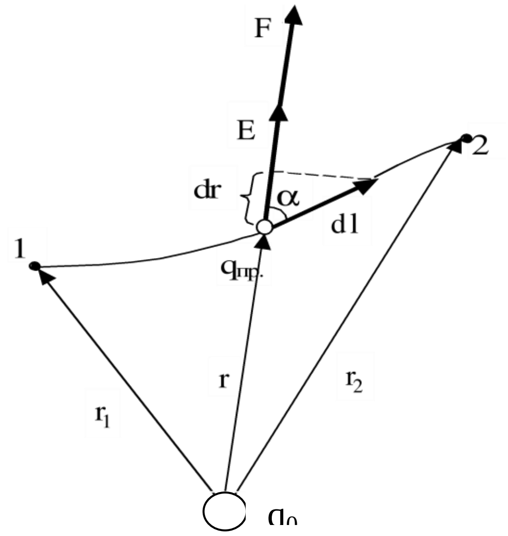


Рис. 5.12. К определению работы поля по перемещению заряда

Найдем работу электрического поля, создаваемого точечным электрическим зарядом q_0, при перемещении заряда q из точки 1 точку 2 (рис. 5.12). По определению работа на малом участке пути определяется по формуле $dA = F \times dS \times \cos\alpha$

Обозначив $dS \times \cos\alpha = dr$ и $F = k\dfrac{qq_0}{r^2}$, получим для элементарной работы $dA = k\dfrac{qq_0}{r^2}dr$. Интегрируя полученное выражение, будем иметь

$$A = \int_{r_1}^{r_2} k\frac{qq_0}{r^2}dr = -kqq_0\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right). \qquad (5.14)$$

Введем функцию

$$\varphi = k\frac{q_0}{r} + C. \qquad (5.15)$$

Функция φ, определяемая выражением 5.15, называется ***потенциалом электрического поля в данной точке***. С учетом формулы 5.15 выражение 5.14 примет вид

$$A = -q(\varphi_2 - \varphi_1). \qquad (5.16)$$

Величину (φ_2-φ_1)=Δφ называют разностью потенциалов между двумя точками электрического поля. Из уравнения 5.16 следует, что разность потенциалов численно равна работе сил поля при перемещении единичного положительного заряда между этими точками поля.

Выбор произвольной постоянной C в выражении 5.15 может быть произвольным. Простейший случай мы получим, если положим C=0, тогда потенциал точки, удалённой в бесконечность, будет равен нулю. В этом случае

$$\varphi = k\frac{q}{r} = \frac{A}{q} = \frac{W}{q} \qquad (5.17)$$

Потенциал данной точки электрического поля численно равен работе, которую совершают силы поля перемещения положительного единичного заряда из бесконечности в данную точку поля.

На практике оказалось удобнее считать потенциал земной поверхности равным нулю.

Потенциал электростатического поля представляет собой функцию, меняющуюся от точки к точке. Однако во всяком реальном случае можно выделить совокупность точек, имеющих одинаковый потенциал.

Геометрическое место точек, имеющих одинаковый потенциал, называются поверхностью равного потенциала, или эквипотенциальной поверхностью.

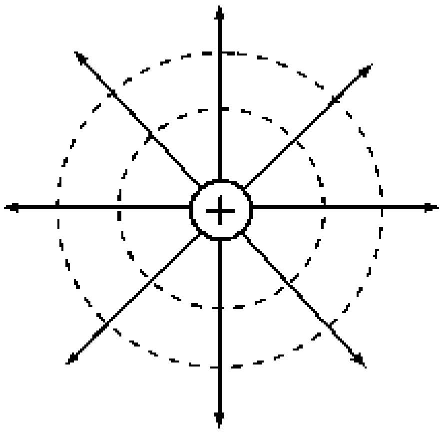


Рис.5.13. Лини напряженности и эквипотенциальные поверхности точечного заряда

Электрическое поле можно изображать не только с помощью линий напряженности, но и с помощью эквипотенциальных поверхностей. При этом нужно иметь в виду, что линии напряженности всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Эквипотенциальные поверхности точечного заряда представляют собой сферы с центром, совпадающим с точечным зарядом (пунктирные линии на рис. 5.13).

Из выражения 5.16 следует, что работа сил электрического поля не зависит от формы и длины пути, а определяется начальным и конечным положением заряда в поле. Работа сил электрического поля на замкнутом пути ($\varphi_1=\varphi_2$) равна нулю. Следовательно, электрическое поле является потенциальным, а электрические силы – консервативными.

Ранее мы показали, что работа консервативных сил равна изменению потенциальной энергии, взятой с противоположным знаком: $A=-(W_2-W_1)=\Delta W$. Поскольку в бесконечности $W_1=0$, то $A=-W_2=-q\varphi$. Следовательно, потенциальная энергия заряда в поле определяется по формуле

$$W=q\times\varphi \qquad (5.18)$$

Из данного следует, что **потенциал – энергетическая характеристика поля.**

7. Напряженность электрического поля как градиент потенциала

Установим связь между напряженностью поля и потенциалом. Существования такой связи следует из того факта, что работа электрических сил, выражаемая через напряженность, может быть выражена и через разность потенциалов.

Найдем работу по перемещению заряда в направлении оси X. С одной стороны, $dA=E_x\times dx\times q$, но с другой - $dA=-q\times d\varphi$. Отсюда следует, что

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx},\ E_Y = -\frac{d\varphi}{dy}, E_z = -\frac{d\varphi}{dz}.$$

Тогда в общем случае будем иметь

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right) = -\operatorname{grad}\varphi = -\nabla\varphi. \tag{5.19}$$

Напряженность электрического поля равна градиенту потенциала, взятому с противоположным знаком. Знак минус говорит о том, что напряженность поля всегда направлена в сторону убывания потенциала.

Для однородного электрического поля выражение 5.19 принимает вид

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{d}, \tag{5.20}$$

где d – расстояние между двумя точками,

$\Delta\varphi$ – разность потенциалов между ними.

Для поля со сферической или цилиндрической симметрией выражение 5.19 имеет вид

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}. \tag{5.21}$$

8. Циркуляция вектора напряженности электрического поля по замкнутому контору

Если в качестве заряда, переносимого в поле, взять положительный единичный заряд, то работу по его перемещению на пути dl можно найти по формуле: $dA = F \times dl \times \cos\alpha$, но в этом случае $\vec{F} = \vec{E}$, $dl\cos\alpha = d\vec{l}$ и, следовательно, $dA = \vec{E} \times d\vec{l}$.

Для определения работы на замкнутом пути это выражение необходимо проинтегрировать: $A = \oint\limits_l \vec{E} \times d\vec{l}$.

Выражение $\oint\limits_l \vec{E} \times d\vec{l}$ называется **циркуляцией вектора напряженности** электрического поля. Ранее мы показали, что работа сил электрического поля на замкнутом пути равна нулю, значит

$$\oint\limits_l \vec{E} \times dl = 0 \tag{5.22}$$

Равенство нулю этого интеграла говорит о том, что в природе существует два вида электрических зарядов, являющихся истоками и стоками электрического поля.

Применение электричества в технике, медицине и биологии

С течением времени областей применения электричества становится всё больше. Для предотвращения забивания ячеек сита при просеивании мелких частиц над ситом помещают тело, заряженное положительно. Сито заряжают отрицательно. Частицы, попадая на сито, заряжаются отрицательно и притягиваются к положительно заряженному телу, заряжаются положительно и т.д., пока не провалятся в отверстие. Для покраски автомобилей. Автомобиль заряжают положительно, а частички краски - отрицательно. Одноименные частички краски отталкиваются друг от друга и притягиваются к автомобилю. Слой краски одинаковой толщины, нет разбрызгивания краски. Для увеличения интенсивности копчения рыбы, ее заряжают положительно, а дым - отрицательно. В этом случае нет рассеяния дыма. В химии, начало которому положил Фарадей. Перемещение вещества – движение зарядоносителей - нашло одно из первых своих применений в медицине для ввода соответствующих лекарственных соединений в тело человека. Суть метода состоит в следующем: нужными лекарственными соединениями пропитывается марля или любая другая ткань, которая служит прокладкой между электродами и телом человека; она располагается на участке тела подлежащему лечению. Электроды подключаются к источнику постоянного тока. Метод подобного ввода лекарственных соединений впервые применён во второй половине XIX века, широко распространён и сейчас. Он носит название электрофореза или ионофореза. Новые достижения электротехники соответственно расширили возможности исследования "живого" электричества. Маттеучи, применив созданный к тому времени гальванометр, доказал, что при жизнедеятельности мышц возникает электрический потенциал. Разрезав мышцу поперёк волокон, он соединил её с одним из полюсов гальванометра, а продольную поверхность мышцы соединил с другим полюсом и получил потенциал в пределах 10-80 мВ. Значение потенциала обусловлено видом мышц. По утверждению Маттеучи, биоток течёт от продольной поверхности к поперечному разрезу, и поперечный разрез является электроотрицательным. Этот любопытный факт был подтверждён опытами над различными животными - черепахами, кроликами и птицами, проводимыми рядом исследователей, из которых следует выделить немецких физиологов Дюбуа-Реймона, Германа и нашего соотечественника В.Ю. Чаговца. Пельтье в 1834 году опубликовал работу, в которой излагались результаты исследования взаимодействия биопотенциалов с протекающим по живой ткани постоянным током. Оказалось, что полярность биопотенциалов при этом меняется. Изменяется и амплитуда. Одновременно наблюдалось и изменение физиологических функций. В лабораториях физиологов, биологов, медиков появляются электроизмерительные приборы, обладающие достаточной чувствительностью и соответствующими пределами измерений. Накапливается большой и разносторонний экспериментальный материал. Так, например, в лаборатории УНИЛ СГАУ создана установка для измерения биопотенциала семян.

Вопросы для самоконтроля

1. Закон сохранения электрических зарядов (формула, формулировка).
2. Электрический заряд (определение). Назовите два рода электрических зарядов.
3. Закон Кулона (формула, формулировка).
4. Что показывает диэлектрическая проницаемость среды?
5. Если взаимодействующие заряды находятся в однородной изотропной среде, чему равна кулоновская сила?
6. Что такое электрическое поле?
7. Какие вещества называются диэлектриками, привести примеры.
8. Какое поле называется однородным, неоднородным?
9. Что такое пробный заряд.
10. Линии напряженности (определение).
11. Какие вещества называются проводниками, привести примеры.
12. Графически изобразить линии напряженности разноименных зарядов и одноименных зарядов.
13. Что такое напряженность электрического поля (формула, определение, ед. измерения)?
14. Чему равен поток вектора напряженности в однородном поле?

15. Чему равен поток вектора напряженности в неоднородном поле?
16. Теорема Гаусса (формула, формулировка).
17. Чему равна напряженность поля у поверхности заряженного проводника?
18. Чему равна напряженность поля равномерно заряженной нити?
19. Чему равна напряженность поля равномерно заряженной плоскости?
20. Чему равна напряженность поля двух заряженных пластин?
21. Чему равна работа по перемещению заряда в поле.
22. Записать формулу, которая связывает напряженность и разность потенциалов. На что указывает знак минус в формуле.
23. Принцип суперпозиции полей (формула, определение).
24. Потенциал электрического поля. Разность потенциалов (формула, определение, единицы измерения).
25. Эквипотенциальные поверхности. Изобразите эквипотенциальные поверхности точечного заряда.
26. Циркуляция вектора напряженности по замкнутому контору (формула).

Лекция №6

Тема лекции: «Электрическое поле в среде. Проводники в электрическом поле»

План лекции:

1. Электрический диполь. Диполь в однородном и неоднородном поле.
2. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Напряженность поля в диэлектрике.
3. Проводники в электростатическом поле. Электроемкость. Конденсаторы.
4. Энергия взаимодействия точечных зарядов. Энергия электростатического поля.

1. Электрический диполь. Диполь в однородном и неоднородном поле

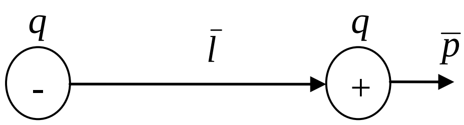


Рис. 6.1

Электрический диполь – это система из двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов, расстояние между которыми во много раз меньше расстояний до рассматриваемых точек.

Вектор l, направленный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному, и равный расстоянию между зарядами, называется **плечом диполя**.

$$\text{Вектор } \vec{p} = q \cdot \vec{l} \tag{6.1}$$

называется **дипольным моментом** или **электрическим моментом диполя**.

Во внешнем однородном поле на диполь будет действовать момент пары сил F.

$$M = F \cdot l \sin\alpha = |q| E l \sin\alpha = pE\sin\alpha \tag{6.2}$$

$$\text{где } \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \qquad \vec{F} = \vec{E}q$$

Очевидно, что M=0, при $\sin\alpha$ =0, т.е. в однородном электрическом поле диполь ориентируется так, что его дипольный момент направлен вдоль вектора напряженности поля.

Рассмотрим, как будет себя вести диполь в неоднородном поле. В этом случае диполь будет обладать потенциальной энергией
$W = q(\varphi_2 - \varphi_1)$

Так как $(\varphi_2 - \varphi_1) = \left(\frac{d\varphi}{dx} \cdot l \cdot \cos\alpha\right)$ и $\frac{d\varphi}{dx} = -E$, то для потенциальной энергии получим выражение $W = -p \cdot E\cos\alpha$.

Раннее мы показали, что

$$F_x = \frac{dW}{dx}$$

и значит, что на диполь в этом случае будет действовать сила

$$F_x = p \cdot \frac{dE}{dx} \cdot \cos\alpha \tag{6.3}$$

При $\alpha < \frac{\pi}{2}$, F_x>0 - диполь будет втягиваться в поле.

При $\alpha > \frac{\pi}{2}$, F_x<0 - диполь будет выталкиваться из поля.

2. Диэлектрики. Поляризация диэлектриков. Напряженность поля в диэлектрике

Диэлектрики (как и всякое вещество) состоят из атомов и молекул. Положительный заряд сосредоточен в ядрах атомов и молекул, а отрицательный – в электронных оболочках атомов. Так как положительный заряд всех ядер молекулы равен суммарному заряду электронов, то молекула в целом нейтральна и её можно рассматривать как электрический диполь с дипольным моментом определяемым по формуле: $\vec{p} = q \cdot \vec{l}$

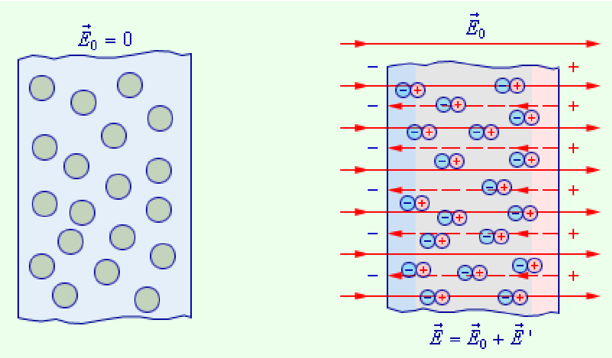


Рис. 6.2.
Поляризация неполярного диэлектрика

Первую группу диэлектриков (азот, водород, кислород и др.) составляют вещества, молекулы которых имеют симметричное строение и, следовательно, дипольный момент $\vec{p}_i = 0$. Молекулы таких диэлектриков называются **неполярными.**

Во внешнем электрическом поле с напряженностью $\vec{E}$ заряды неполярных молекул смещаются в разные стороны (**деформационная или электронная поляризация**) и диэлектрик приобретает дипольный момент

$$\vec{p}_v = n \cdot \beta \cdot \varepsilon_0 \cdot V \cdot E\,. \tag{6.4}$$

где β - коэффициент пропорциональности, называемый **поляризуемостью молекулы** и зависящий от строения молекулы; ε_0 - электрическая постоянная; V - объем диэлектрика.

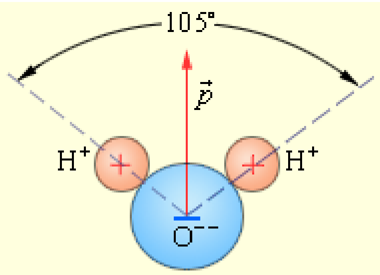


Рис. 6.3.
Молекула воды

Вторую группу диэлектриков (вода, окись углерода, метан, нитробензол, аммиак) образуют вещества, молекулы которых имеют ассиметричное строение и обладают дипольным моментом $\vec{p}_i \neq 0$. Молекулы таких диэлектриков называют **полярными**. В отсутствии внешнего электрического поля, вследствие хаотического теплового движения, дипольные моменты молекул ориентированы хаотически и результирующий дипольный момент равен нулю. Если такой диэлектрик поместить во внешнее электрическое поле, то силы этого поля будут стремиться повернуть диполи вдоль поля (**ориентационная поляризация**) и диэлектрик приобретает дипольный момент

$$\vec{p}_v = n \cdot E \cdot V \cdot \frac{\vec{p}_i}{3kT}. \qquad (6.5)$$

где n – концентрация молекул; $\vec{p}_i$ - дипольный момент молекулы; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; V – объем диэлектрика.

Как видно из этого выражения ориентационная поляризация зависит от абсолютной температуры.

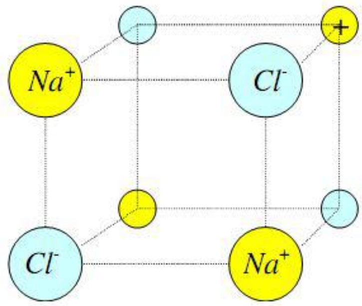


Рис. 6.4.
Ионный кристалл

Третью группу диэлектриков (NaCl, KCl, KBr) представляют так называемые **ионные кристаллы**, представляющие собой кристаллические решетки с правильным чередованием ионов различных знаков. В этом случае нельзя рассматривать отдельные молекулы, а нужно рассматривать две подрешетки вдвинутые друг в друга. При помещении такого диэлектрика во внешнее электрическое поле решетки смещаются относительно друг друга (**ионная поляризация**) и диэлектрик приобретает дипольный момент, отличный от нуля.

Итак, внесение диэлектрика во внешнее электрическое поле приводит к возникновению отличного от нуля результирующего дипольного момента, т.е. к поляризации диэлектрика.

Поляризация диэлектрика - *это переход его в такое состояние, когда внутри малого объёма вещества геометрическая сумма векторов дипольных электрических моментов молекул не равна 0. Такой диэлектрик называется поляризованным.*

Поляризация диэлектриков с полярными молекулами называется **ориентационной**. Она уменьшается с повышением температуры.

Поляризация диэлектриков с неполярными молекулами называется **деформационной или электронной поляризацией.**

В твердых кристаллических диэлектриках типа NaCl, имеющих ионную кристаллическую решётку, возможна **ионная поляризация**.

Для характеристики процесса поляризации вводят понятия вектор поляризации.

$$\overrightarrow{P_e} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\overrightarrow{P_i}}{V}. \qquad (6.6)$$

где $\vec{p}_i$ - дипольный момент отдельной молекулы; V- объём тела.

Вектор поляризации определяется суммарным электрическим моментом всех его молекул, расположенных в единице объёма.

Пьезоэффект. Опыт показывает, что в некоторых кристаллах поляризация может возникать только под действием электрического поля, но и под действием механических напряжений. Это явление, впервые изучено П. и Ж. Кюри, получило название пьезоэлектрического эффекта или пьезоэффекта.

Если из кристалла кварца вырезать определенным образом пластинку и сжимать (растягивать) её в направлении перпендикулярном к оптической оси, то в ней возникает поляризация, и на поверхности пластинки появляются поляризованные заряды (рис. 6.5). Опыт показывает, что при изменении знака деформации, т. е. при переходе от растяжения к сжатию, знак поляризационных зарядов изменяется. Величина вектора поляризации (в определенном интервале изменений) пропорциональна механическому напряжению.

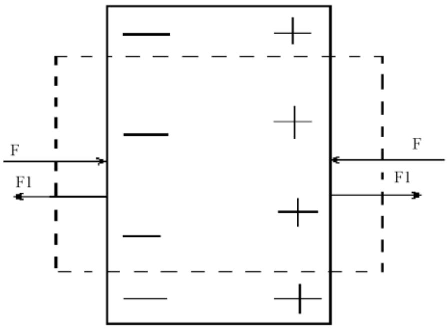


Рис. 6.5. Пьезоэффект

Наряду с прямым пьезоэффектом, существует и обратное ему явление (обратный пьезоэффект): в пьезоэлектрических кристаллах возникновение поляризации всегда сопровождается механическими деформациями. Поэтому, если на металлические обкладки, укрепленные на кристалле, подать напряжение, то он под действием поля поляризуется и деформируется.

Напряженность поля в диэлектрике

Итак, во внешнем электростатическом поле диэлектрик поляризуется - приобретает отличный от нуля дипольный момент $\overrightarrow{P_v} = \sum_{i=1}^{n} p_i$.

Для определения напряженности электрического поля в диэлектрике рассмотрим следующий опыт. Поместим пластинку из диэлектрика в однородное электрическое поле с напряженностью $\vec{E}_0$, создаваемое бесконечными заряженными пластинами. Под действием электрического поля заряды в диэлектрике смещаются: отрицательные заряды против поля, положительные по полю. В результате этого на поверхностях пластинки появляются связанные электрические заряды, создающие дополнительное электрическое поле с напряженностью $\vec{E}'$.

Согласно принципу суперпозиции полей напряженность поля в диэлектрике будет определяться по формуле

$$E = E_0 - E'. \tag{6.7}$$

Так как поле E' создается заряженными плоскостями, то

$$E' = \frac{\sigma'}{\varepsilon_0} . \tag{6.8}$$

где σ' - поверхностная плотность связанных зарядов.

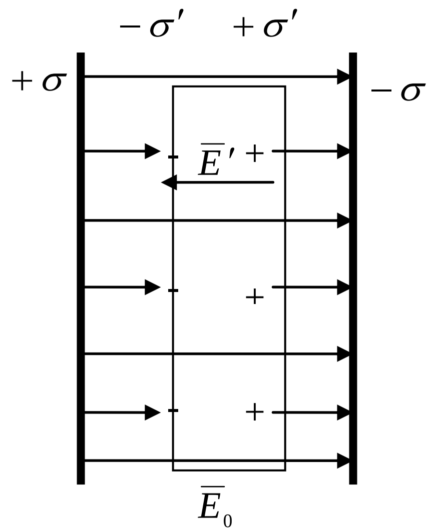


Рис. 6.6. Поляризация в диэлектрике

Таким образом, для напряженности поля в диэлектрике окончательно получим:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\varepsilon}. \tag{6.9}$$

где ε - **диэлектрическая проницаемость вещества** - величина, показывающая, во сколько раз электростатическое поле в диэлектрике меньше, чем в вакууме, связана с диэлектрической восприимчивостью вещества и зависит от рода вещества. Напряженность электрического поля $\vec{E}$ зависит от свойств среды.

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F} = \frac{E_0}{E}. \tag{6.10}$$

3. Проводники в электростатическом поле. Электроемкость. Конденсаторы

Если поместить проводник во внешнее электростатическое поле, то это поле будет действовать на свободные заряды проводника, в результате чего они начнут перемещаться – положительные вдоль поля, отрицательные – против поля (рис. 6.7, *а*). На одном конце проводника будет накапливаться избыток положительного заряда, на другом конце – избыток отрицательного заряда. Процесс происходит до тех пор, пока не установится равновесное распределение зарядов, при котором электростатическое поле внутри проводника обращается в нуль (рис. 6.7, *б*).

Отсутствие поля внутри проводника ($\overline{E} = -grad\varphi = 0$) означает, что потенциал во всех точках внутри проводника постоянен, т.е. поверхность проводника в электростатическом поле является эквипотенциальной. Отсюда же вытекает, что вектор $\overline{E}$ поля направлен по нормали к каждой

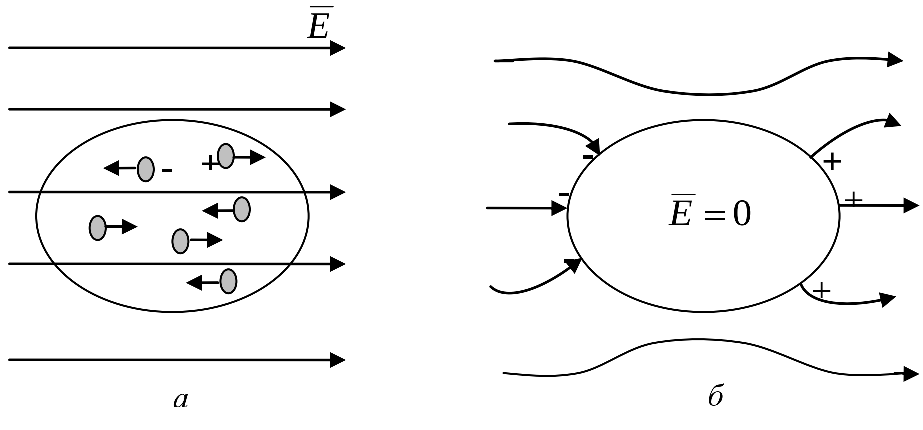


Рис. 6.7. Проводник в электростатическом поле

точке поверхности проводника. Таким образом, нейтральный проводник, внесенный в электростатическое поле, разрывает часть линий напряженности: они заканчиваются на отрицательных наведенных зарядах и вновь начинаются на положительных зарядах. Индуцированные заряды распределяются на внешней поверхности проводника. Явление перераспределения поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле называется *электростатической индукцией.*

Опыт показывает, что независимо от способа электризации тела, его заряд всегда пропорционален потенциалу.

$$q = C \cdot \varphi. \qquad (6.11)$$

Коэффициент пропорциональности между зарядом тела и его потенциалом называется электроемкостью (или просто емкостью) проводника.

Из 6.11 следует, что

$$C = \frac{q}{\varphi} \qquad (6.12)$$

Единица измерения емкости в системе СИ называется Фарадой. Фарада (Ф) - это емкость такого проводника, потенциал которого повышается на 1 Вольт при сообщении ему заряда в 1 Кулон. [Ф=$\frac{Кл}{В}$].

Для емкости сферы получим выражение

$$C = 4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot R. \qquad (6.13)$$

Из 6.13 следует, что емкость уединенного проводника зависит от его геометрических размеров, а также диэлектрических свойств среды.

Уединенные проводники имеют малые емкости и не используются на практике. Рассмотрим систему двух параллельных металлических пластин, расстояние между которыми значительно меньше их линейных размеров.

Зарядим пластины равными по абсолютному значению зарядами противоположного знака и поместим между ними диэлектрик. Такая система проводников называется плоским конденсатором. **Конденсатором называются два проводника, разделенных слоем диэлектрика, толщина которого во много раз меньше размеров проводника.** Каждая из пластин называется обкладками конденсатора. Электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора.

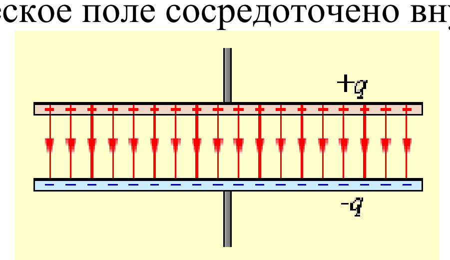


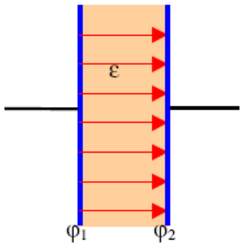
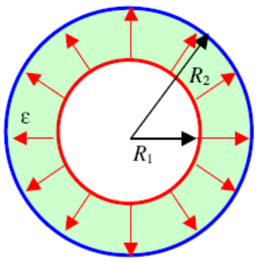
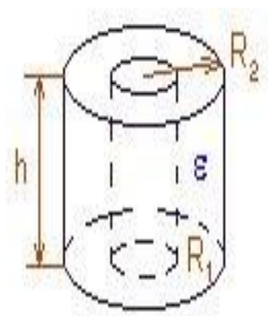
Рис. 6.8. Плоский конденсатор

Зарядом конденсатора называют модуль заряда одной из обкладок. Величина, измеряемая отношением заряда одной из пластин конденсатора к разности потенциалов между ними, называется **электроемкостью конденсатора:**

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}. \qquad (6.14)$$

Величина емкости конденсатора определяется его геометрическими размерами, а также диэлектрическими свойствами среды, заполняющей конденсатор. В зависимости от формы обкладок, конденсаторы бывают плоскими, сферическими и цилиндрическими.

Таблица 1 - Емкости конденсаторов

Тип конденсатора	Схематическое изображение	Формула для расчета емкости	Примечания
Плоский конденсатор		$C = \dfrac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 S}{d}$	S - площадь пластины; d - расстояние между пластинами
Сферический конденсатор		$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1 R_2/(R_2 - R_1)$	R_1 и R_2 - радиусы внешней и внутренней обкладок
Цилиндрический конденсатор		$C = \dfrac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 h}{\ln\left(\dfrac{R_2}{R_1}\right)}$	h – высота цилиндров

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 6.9), заряды всех конденсаторов равны: $q_1 = q_2 = \ldots = q_n = q$. Разность потенциалов между первым и **n- ным** конденсаторами $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \ldots + \Delta\varphi_n$

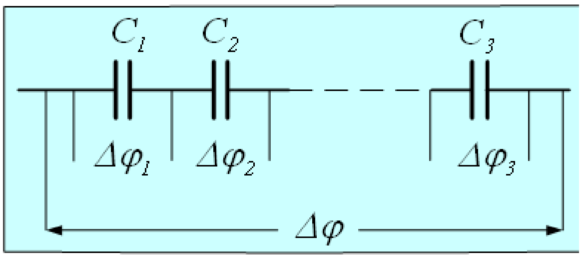


Рис. 6.9. Последовательное соединение конденсаторов

Из (6.14) следует $\Delta\varphi = \dfrac{q}{C}$

Тогда $\dfrac{q}{C} = \dfrac{q}{C_1} + \dfrac{q}{C_2} + \ldots + \dfrac{q}{C_n}$

или $\dfrac{1}{C} = \dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \ldots + \dfrac{1}{C_n}$. (6.15)

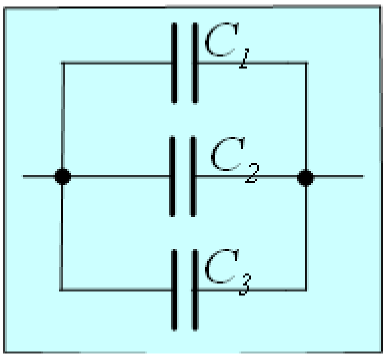


Рис. 6.10. Параллельное соединение конденсаторов

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 6.10), заряды конденсаторов складываются $q=q_1+q_2+\ldots+q_n$, а разности потенциалов равны $\Delta\varphi=\Delta\varphi_1=\Delta\varphi_2=\ldots=\Delta\varphi_n$. Из (6.14) следует, что $q=C\cdot\Delta\varphi$, тогда $C\cdot\Delta\varphi=C_1\cdot\Delta\varphi+C_2\cdot\Delta\varphi+\ldots+C_n\cdot\Delta\varphi$ или $C=C_1+C_2+\ldots+C_n=\sum_{i=1}^{n}C_i$.(6.16)

Итак, при параллельном соединении конденсаторов складываются их емкости, а при последовательном - складываются величины, обратные емкостям.

4. Энергия взаимодействия точечных зарядов. Энергия заряженных проводников

Как было показано выше, что электрический заряд, находящийся в электрическом поле, обладает потенциальной энергией, которую можно найти по формуле $W_1=k\frac{q_1\cdot q_2}{r}$.

Поэтому энергия системы двух точечных зарядов q_1 и q_2, расположенных на расстоянии *r* друг от друга может быть определена следующим образом. Пусть заряд q, находится в электрическом поле, создаваемым вторым зарядом. Тогда

$$W_1=q_1\cdot\varphi_{21}=k\frac{q_1\cdot q_2}{r}. \qquad (6.17)$$

Очевидно, справедливо и обратное утверждение: заряд q_2 в поле первого заряда будет обладать энергией

$$W_2=k\frac{q_1\cdot q_2}{r}. \qquad (6.18)$$

Из (6.17) и (6.18) следует, что $W_1 = W_2 = W$, и общую энергию системы двух точечных зарядов можно записать в виде:

$$W=\frac{1}{2}W_1+\frac{1}{2}W_2=\frac{1}{2}(q_1\cdot\varphi_{21}+q_2\cdot\varphi_{12}). \qquad (6.19)$$

Для системы, состоящей из N точечных зарядов выражение (6.19) запишется в виде:

$$W=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}q_i\varphi_{ki}, \qquad (6.20)$$

Где $i\neq k$.

Пусть заряд проводника равен q, его емкость C, а потенциал φ. Для увеличения заряда тела на величину dq нужно совершить работу dA

$= q\cdot d\varphi$. Дифференцируя данное выражение получим dq = $C\cdot d\varphi$ и тогда dA = $C\cdot\varphi\cdot d\varphi$.

Интегрируя полученное выражение, найдем, что

$$A=\frac{C\varphi^2}{2}+const. \qquad (6.21)$$

Так как работа равна изменению энергии, то можно говорить, что заряженный проводник обладает энергией

$$W=\frac{C\cdot\varphi^2}{2}=\frac{q\cdot\varphi}{2}=\frac{q^2}{2C}. \qquad (6.22)$$

Как и всякий заряженный проводник, конденсатор обладает энергией

$$W=\frac{C\cdot\Delta\varphi^2}{2}. \qquad (6.23)$$

В случае плоского конденсатора $C=\frac{\varepsilon\cdot\varepsilon_0\cdot S}{d}$, $\Delta\varphi=E\cdot d$ и тогда выражение 6.23 примет вид

$$W=\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2d}\cdot E^2\cdot d^2=\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2}\cdot d\cdot E^2. \qquad (6.24)$$

Введем величину, $w=\frac{W}{V}$ которую будем называть **объемной плотностью энергии.** Тогда для электрического поля в конденсаторе получим, что

$$w=\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}. \qquad (6.25)$$

С учетом того, что $D=\varepsilon\varepsilon_0 E$ выражение 6.25 примет вид

$$w=\frac{ED}{2}. \qquad (6.26)$$

Тот факт, что объемная плотность энергии выражается через характеристики электрического поля ($\vec{E}$ и $\vec{D}$), говорит о том, что само поле обладает энергией.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие вещества называют диэлектриками?
2. Что такое электрический диполь?
3. Что называется дипольным моментом (определение, формула).
4. Что такое плечо диполя (определение, формула).
5. В чем состоит явление поляризации диэлектрика?
6. Виды диэлектриков (определение, примеры).
7. Виды поляризации: деформационная; ориентационная; ионная.
8. Чему равен вектор поляризации?

9. Что характеризует электрическая емкость проводника, от чего она зависит?
10. Что представляет собой конденсатор? Из каких соображений выбирается геометрия его обкладок?
11. Как рассчитывается емкость батареи конденсаторов при их параллельном и последовательном соединениях?
12. Назовите условия равновесия зарядов в проводнике.
13. Чему равна емкость плоского конденсатора?
14. Чему равна емкость цилиндрического конденсатора?
15. Чему равна емкость сферического конденсатора?
16. Чему равна энергия плоского конденсатора?
17. Чему равна энергия заряженного проводника?
18. Что такое объемная плотность энергии?
19. Записать формулу объемная плотность энергии, выраженная через характеристики электрического поля (E и D).

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Сегнетоэлектрики. Пьезоэлектрический эффект.

Лекция №7
Тема: “Законы постоянного тока”

План лекции:

1. Электрический ток, сила и плотность тока.
2. Закон Ома для участка электрической цепи и замкнутой цепи, содержащей ЭДС. Дифференциальная форма закона Ома.
3. Последовательное и параллельное соединение проводников.
4. Причина появления электрического поля в проводнике. ЭДС источника тока и его смысл.

5.Первое и второе правила Кирхгофа.

7. Контактная разность потенциалов. Термоэлектрические явления.

8. Электрический ток в различных средах.

1. Электрический ток, сила и плотность тока

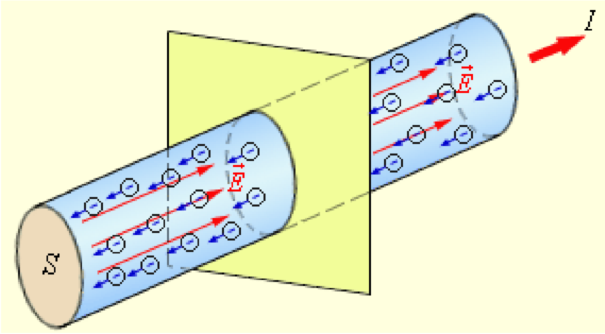


Рис. 7.1. Упорядоченное движение электронов в металлическом проводнике

Электрическим током ***называется упорядоченное движение электрических зарядов***. Носителями тока могут быть электроны, ионы, заряженные частицы.

Если в проводнике создать электрическое поле, то в нем свободные электрические заряды придут в движение – возникает ток, называемый **током проводимости.** Если в пространстве перемещается заряженное тело, то **ток называется конвекционным**.

Ток может течь в твердых телах (металлах), жидкостях (электролитах) и газах (газовый разряд обусловлен движением как положительных, так и отрицательных зарядов).

Носителями тока являются:

- в металлах – направленное движение электронов;
- в жидкостях – ионов;
- в газах – электронов и ионов.

За направление тока принято принимать направление движения положительных зарядов.

Для возникновения и существования тока необходимо:

1) наличие свободных заряженных частиц;
2) наличие электрического поля в проводнике.

Основной характеристикой тока является сила тока, ***которая равна величине заряда, прошедшего за 1 секунду через поперечное сечение проводника.***

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \qquad (7.1)$$

$$I = [\frac{Кл}{с} = А]$$

где Δq – величина заряда; Δt – время прохождения заряда.

Сила тока - величина скалярная. Ток, сила и направление которого не изменяются с течением времени, называются **постоянным**, в противном случае – **переменным.**

Электрический ток по поверхности проводника может быть распределен неравномерно, поэтому в некоторых случаях пользуются **понятием плотность тока** $\bar{j}$**.**

Средняя плотность тока равна отношению силы тока к площади поперечного сечения проводника.

$$< j > = \frac{\Delta I}{\Delta S}. \text{ – средняя плотность тока} \quad (7.2)$$

$$j = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta I}{\Delta S} = \frac{dI}{dS} \quad \left[\frac{A}{м^2}\right]. \text{ – мгновенная плотность тока} \quad (7.3)$$

где ΔI – изменение тока; ΔS – изменение площади.

Выразив силу и плотность тока через $<\upsilon>$ - среднюю скорость электронов в проводнике получим: $I = ne\langle\upsilon\rangle S$, где n – концентрация зарядов в проводнике.

$$j = n \cdot e\langle\upsilon\rangle$$

2. Закон Ома для участка электрической цепи и замкнутой цепи, содержащей ЭДС. Дифференциальная форма закона Ома

В 1826 г. немецкий физик Георг Ом экспериментально установил, что сила тока ***I*** в проводнике прямо пропорциональна напряжению *U* между его концами

$$I = k \cdot U, \quad (7.4)$$

где k – коэффициент пропорциональности, называемый электропроводностью или проводимостью; [k] = [См] (сименс).

Величина
$$R = \frac{1}{k}[Ом] \quad (7.5)$$

называется **электрическим сопротивлением проводника**.

С учетом электрического сопротивления проводника, получим следующее выражение:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (7.6)$$

Закон Ома для однородного участка цепи, не содержащей источника тока*: сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника.*

Выразим из этой формулы R

$$R = \frac{U}{I} \qquad \left[\frac{B}{A}\right] = [Ом] \quad (7.7)$$

Проводник, обладающий электрическим сопротивлением, называется **резистором.** В СИ единицей электрического сопротивления проводников служит Ом. Сопротивление в 1 Ом обладает такой участок цепи, в котором при напряжении 1 В возникает ток силой 1 А.

Электрическое сопротивление проводника зависит от формы, размеров и вещества проводника. **Сопротивление проводника** прямо пропорционально его длине *l* и обратно пропорционально площади поперечного сечения *S*.

$$R = \rho \frac{l}{S}, \tag{7.8}$$

где ρ – характеризует материал, из которого изготовлен проводник и называется **удельным сопротивлением проводника.**

Выразим ρ из формулы 7.8, получим:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \qquad \left[\frac{Ом \cdot м^2}{м} = Ом \cdot м \right], \tag{7.9}$$

где R_0 – сопротивление проводника при 0°C; t – температура, ^0C; α – температурный коэффициент сопротивления (для металла α≈0,04 град$^{-1}$).

Сопротивление проводника зависит от температуры. С увеличением температуры сопротивление увеличивается.

$$R = R_0(1 + \alpha t). \tag{7.10}$$

Формула справедлива и для удельного сопротивления

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \tag{7.11}$$

где ρ_0 – удельное сопротивление проводника при 0°C.

Однако наибольший интерес представляет удивительное **явление сверхпроводимости**, открытое датским физиком Х. Каммерлинг-Оннесом в 1911 году. При некоторой определенной температуре $\boldsymbol{T_{кр}}$, различной для разных веществ, удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля (сопротивление некоторых металлов: алюминий, свинец, цинк и др.): металл становится **абсолютным проводником.**

Подставим выражение 7.9 в 7.6 получим выражение:

$$I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{US}{\rho l}. \tag{7.12}$$

Перегруппируем члены выражения, получим:

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l}, \tag{7.13}$$

где $\frac{I}{S} = j$ – плотность тока;

$\frac{1}{\rho} = \gamma$ – удельная проводимость вещества проводника;

$\frac{U}{l} = E$ – напряженность электрического поля в проводнике.

Окончательно получим выражение:

$$j = \gamma \cdot E \tag{7.14}$$

закон Ома в дифференциальной форме.

Пусть замкнутая электрическая цепь состоит из источника тока с $\boldsymbol{\varepsilon}$, с внутренним сопротивлением $\boldsymbol{r}$ и внешним $\boldsymbol{R}$**.**

$$\varepsilon = U + \frac{A'}{q}, \tag{7.15}$$

где $U = \varphi_1 - \varphi_2$ – напряжение на внешнем сопротивлении; A′ – работа по перемещению заряда q внутри источника тока, т. е. работа на внутреннем сопротивлении. Тогда

$$A = IUR, \tag{7.16}$$

так как $U = Ir$, то

$$A' = I^2 rt, \tag{7.17}$$

перепишем выражение для ε, учтем что $q = It$, $\varepsilon = IR + \frac{I^2 rt}{It}$, сократим I

$$\varepsilon = IR + Ir. \qquad \text{Или} \qquad I = \frac{\varepsilon}{R + r} \tag{7.18}$$

Закон Ома для замкнутой электрической цепи: ***в замкнутой электрической цепи электродвижущая сила источника тока равна сумме падений напряжения на всех участках цепи.***

3.Последовательное и параллельное соединение проводников.

Электрическая цепь представляет собой совокупность различных проводников и источников тока. В общем случае цепь является разветвленной и содержит участки, где проводники могут соединяться последовательно и параллельно.

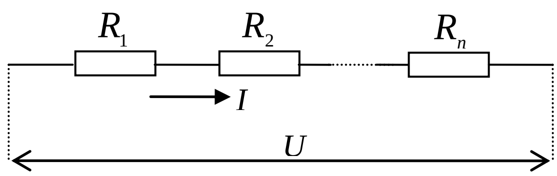


Рис.7.2. Последовательное соединение проводников

При последовательном соединении проводников (рис. 7.2):

а) сила тока во всех частях цепи одинакова ($I = const$);

б) напряжение на зажимах цепи равно сумме падений напряжений на отдельных участках ($U = \sum_{i=1}^{n} U_1$).

Учитывая эти положения и используя закон Ома для однородного участка, найдем общее (эквивалентное) сопротивление цепи:

$$IR_{общ} = IR_1 + IR_2 + \ldots + IR_n,$$

или

$$R_{общ} = \sum_{i=1}^{n} R_i. \tag{7.19}$$

Таким образом, **общее сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных проводников, равно сумме сопротивлений отдельных проводников.**

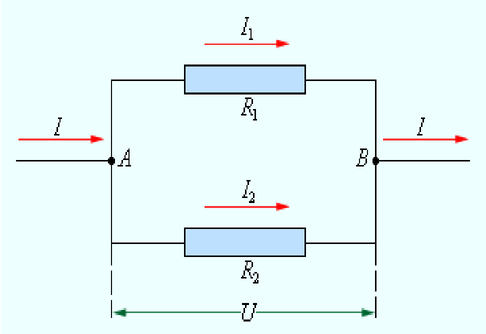


Рис.7.3. Последовательное соединение проводников

При параллельном соединении проводников (рис. 7.3):

а) сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов, протекающих в разветвленных участках цепи ($I = \sum_{i=1}^{n} I_i$);

б) падения напряжения в параллельно соединенных участках цепи одинаковы и равны напряжению на зажимах цепи

$$(U_1 = U_2 = \ldots = U_n = U).$$

С учетом этих положений и на основании закона Ома для однородного участка цепи найдем общее (эквивалентное) сопротивление цепи:

$$\frac{U}{R_{общ}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \ldots + \frac{U}{R_n},$$

или

$$\frac{1}{R_{общ}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}. \tag{7.20}$$

Таким образом, **при параллельном соединении проводников складываются величины, обратные сопротивлениям отдельных участков цепи (проводимости ветвей).**

4. Причина появления электрического тока в проводнике. ЭДС источника тока и его физический смысл.

Закон Ома показывает, что плотность тока прямо пропорциональна напряженности $\boldsymbol{E}$ электрического поля, действующего на свободные заряды и вызывающие их упорядоченное движение.

Что же представляет из себя электрическое поле в проводнике? Это электростатическое поле, создаваемое электронами и положительными ионами (поле кулоновских сил). Кулоновские силы приводят к такому перераспределению свободных зарядов, при котором электрическое поле в проводнике исчезает, а потенциалы во всех точках выравниваются. Поэтому кулоновские силы не могут явиться причиной возникновения постоянного электрического тока.

Для поддержания постоянного тока в цепи на свободные заряды должны действовать силы неэлектрического происхождения, называемые ***сторонними силами*. Сторонние силы** вызывают разделение разноименных зарядов и поддерживают разность потенциалов на концах проводника. Добавочное электрическое поле сторонних сил в проводнике создается источниками тока (гальваническими элементами, аккумуляторами, электрическими генераторами). Источник сторонних сил в цепи постоянного тока так же необходим, как насос в гидравлической системе.

За счет создаваемого сторонними силами поля электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля. Благодаря этому на концах внешней цепи поддерживается разность потенциалов и в цепи идет постоянный электрический ток. Сторонние силы совершают работу за счет энергии, затрачиваемой в источнике тока (механической, химической и т. д.).

Физическая величина, равная отношению работы $A_{ст}$ сторонних сил при перемещении заряда q от отрицательного полюса источника тока к положительному к величине этого заряда, называется электродвижущей силой источника (ЭДС):

$$\varepsilon = \frac{A}{q}. \tag{7.21}$$

Электродвижущая сила, как и разность потенциалов, измеряется в вольтах (В).

Цепь постоянного тока можно разбить на определенные участки. Те участки, на которых не действуют сторонние силы (т.е. участки, не содержащие источников тока), называются однородными. Участки, включающие источники тока, называются неоднородными.

5. Первое и второе правила Кирхгофа

На практике часто приходится рассчитывать сложные электрические цепи постоянного тока. Для упрощения расчетов сложных электрических цепей, содержащих неоднородные участки, используются **правила Кирхгофа,** которые являются обобщением закона Ома на случай разветвленных цепей.

В разветвленных цепях можно выделить **узловые точки (узлы)**, в которых сходятся не менее трех проводников (рис.7.4). Токи, втекающие в узел, принято считать положительными; токи, вытекающие из узла - отрицательными. В узлах цепи постоянного тока не может происходить накопление зарядов.

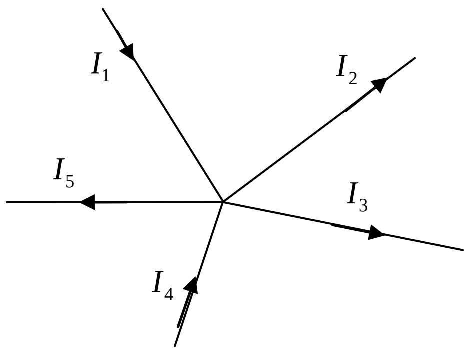


Рис. 7.4. Узел электрической цепи

Отсюда следует **первое правило Кирхгофа**: ***Алгебраическая сумма сил токов в узле разветвления электрической цепи равна нулю***

$$\sum_{i=1}^{n} I_i = 0 \tag{7.22}$$

Первое правило является условием постоянства тока в цепи. Для узла на рис. 7.4. первое правило Кирхгофа запишется:

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0.$$

Второе правило Кирхгофа является обобщением закона Ома на разветвленные электрические цепи. Оно звучит так: ***В любом замкнутом контуре разветвленной электрической цепи алгебраическая сумма произведений I_i на сопротивления R_i соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме приложенных в нем ЭДС ε_i***

$$\sum_{i=1}^{n} I_i \cdot R_i = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i . \qquad (7.23)$$

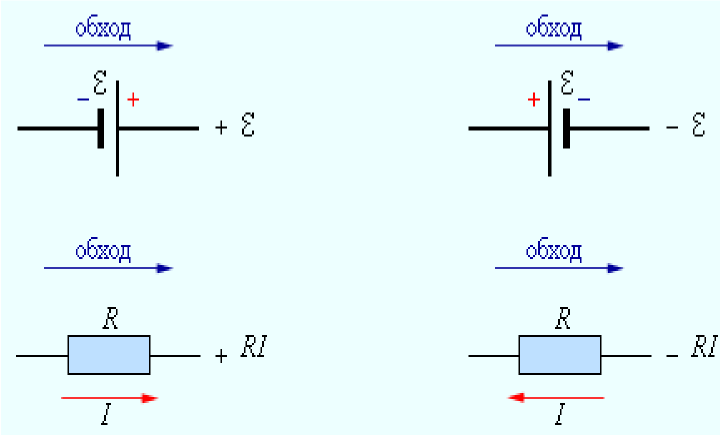


Рис. 7.5. «Правила знаков»

Для составления уравнения необходимо выбрать *направление обхода контура* (по часовой стрелке или против нее). *Все токи, совпадающие по направлению с обходом контура, считаются положительными.* ЭДС источников считаются положительными, если они создают ток, направленный в сторону обхода контура.

Для цепи, изображенной на рис. 7.6, система уравнений имеет вид:

$$I_1R_1 + I_2R_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2,$$
$$-I_2R_2 + I_3R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3,$$
$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

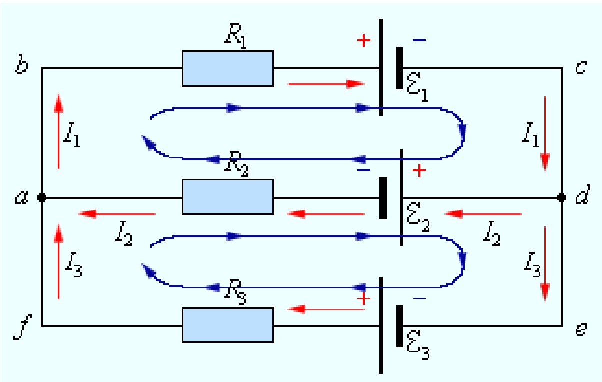


Рис. 7.6. Пример разветвленной электрической цепи

Таким образом, правила Кирхгофа сводят расчет разветвленной электрической цепи к решению системы линейных алгебраических уравнений. Это решение не вызывает принципиальных затруднений, однако, бывает весьма громоздким даже в случае достаточно простых цепей. Если в результате решения сила тока на каком-то участке оказывается отрицательной, то это означает, что ток на этом участке идет в направлении, противоположном выбранному положительному направлению.

6. Контактная разность потенциалов. Термоэлектрические явления

Электроны в металле находятся в беспорядочном тепловом движении. Электроны, обладающие наибольшей кинетической энергией, могут вылететь из металла в окружающее пространство. При этом они совершают работу против сил притяжения со стороны избыточного положительного заряда, возникающего в результате вылета электронов, образующих вокруг проводника “*электронное облако*”. Между электронным газом в металле и “электронным облаком” существует динамическое равновесие.

Работа выхода электрона – *это работа, которую нужно совершить для удаления электрона из металла в безвоздушное пространство.*

Недостаток электронов в проводнике и избыток в окружающем его пространстве проявляется в очень тонком слое по обе стороны поверхности проводника (несколько межатомных расстояний в металле). Следовательно, поверхность металла представляет собой двойной электрический слой, подобный очень тонкому конденсатору.

Разность потенциалов между обкладками конденсатора зависит от работы выхода электрона.

$$\Delta\varphi = \frac{A}{e}, \tag{7.24}$$

где e – заряд электрона; Δφ – контактная разность потенциалов между металлом и окружающей средой; A – работа выхода (электрон-вольт – Э-В).

Работа выхода зависит от химической природы металла и состояния его поверхности (загрязнение, влага).

Возникновение контактной разности потенциалов между соприкасающимися металлическими проводниками было открыто в конце XVIII в. итальянским физиком Алессандро Вольтом. Он экспериментально установил **два закона Вольта**:

1. При соединении двух проводников, изготовленных из различных металлов, между ними возникает контактная разность потенциалов, которая зависит только от химического состава и температуры.

2. Разность потенциалов между концами цепи, состоящей из последовательно соединенных металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, не зависит от химического состава промежуточных проводников. Она равна контактной разности потенциалов, возникающих при непосредственном соединении крайних проводников.

Термоэлектрические явления

Термоэлектрические явления в металлах широко используются для измерения температуры. Для этого используются **термоэлементы**

или термопары, ***представляющие собой две проволоки, изготовленные из различных металлов и сплавов***. Концы этих проволок спаяны. Один спай помещается в среду, температуру T_1 которой нужно измерить, а второй – в среду с постоянной известной температурой.

Термопары имеют ряд преимуществ перед обычными термометрами: позволяют измерять температуры в широком диапазоне от десятков до тысяч градусов абсолютной шкалы. Термопары обладают большой чувствительностью и поэтому дают возможность измерять очень малые разности температур (до 10^{-6} град.). С помощью термопары можно следить за изменением температуры во времени. Возможность установить гальванометр на значительном расстоянии позволяет применять термопары в автоматических устройствах. Для увеличения чувствительности термопар применяются их последовательные соединения, называемые термобатареями.

7. Электрический ток в различных средах

Электрический ток в газах

Газы в нормальных условиях являются **диэлектриками**, состоят их электрически нейтральных атомов и молекул. При ионизации газов возникают носители электрического тока (положительные заряды). **Ионизация газа** может происходить под влиянием внешних воздействий – сильного нагревания, ультрафиолетовых и рентгеновских лучей, радиоактивных излучений, при бомбардировке атомов (молекул) газов быстрыми электронами или ионами.

Мерой процесса ионизации является **интенсивность ионизации**, измеряемая числом пар противоположно заряженных частиц, возникающих в единичном объеме газа за единичный промежуток времени.

Ударной ионизацией ***называется отрыв от атома (молекулы) одного или нескольких электронов, вызванный соударением с атомами или молекулами газа электронов или ионов, разогнанных электрическим полем в разряде.***

Электрический ток в газах называется **газовым разрядом**. Для осуществления газового разряда к трубке с ионизированным газом должно быть электрическое или магнитное поле.

1. **Несамостоятельный газовый разряд** – это электропроводность газов, вызванная внешними ионизаторами.

2. **Самостоятельный газовый разряд** – разряд, который продолжается после прекращения действия внешнего ионизатора. Поддерживается и развивается за счет ударной ионизации.

Несамостоятельный газовый разряд переходит в самостоятельный при $U_з$ – напряжении зажигания. Процесс такого перехода называется **электрическим пробоем газа**.

В зависимости от давления газа и от напряжения различают: тлеющий разряд; коронный разряд; искровой разряд; дуговой разряд.

- ✓ **Тлеющий разряд** используется в газосветных трубках, газовых лазерах.
- ✓ **Коронный разряд** – применяется при обеззараживании семян сельскохозяйственных культур.
- ✓ **Искровой разряд** – молния (токи до нескольких тысяч Ампер, длина – несколько километров).
- ✓ **Дуговой разряд** (Т=3000 °С – при атмосферном давлении, температура газа равна 5000…6000 °С). Используется как источник света в мощных прожекторах, в проекционной аппаратуре.

Плазма – особое агрегатное состояние вещества, характеризующееся высокой степенью ионизации его частиц.

Плазма подразделяется на:

- слабо ионизированную (α – доли процента – верхние слои атмосферы, ионосфера);
- частично ионизированную (несколько %);
- полностью ионизированную (солнце, горячие звезды, некоторые межзвездные облака).

Искусственно созданная плазма используется в газоразрядных лампах, плазменных источниках электрической энергии, магнитодинамических генераторах.

Ток в жидкостях. Электролиз. Законы Фарадея

Наблюдения показали, что многие жидкости очень плохо проводят электрический ток (дистиллированная вода, глицерин, керосин и т. д.). Водные растворы солей, кислот и щелочей хорошо проводят электрический ток.

Электролиз – прохождение тока через жидкость, вызывающее выделение на электродах веществ, входящих в состав электролита. **Электролиты** – вещества, обладающие ионной проводимостью. **Ионная проводимость** – упорядоченное движение ионов под действием электрического поля.

Электрический ток в электролитах представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях. Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (катоду), отрицательные ионы - к положительному электроду (аноду). Возникновение ионов в электролитах объясняется **электрической диссоциацией** – *распадом молекул растворимого вещества на положительные и отрица-*

тельные ионы в результате взаимодействия с растворителем (Na^+Cl^-; H^+Cl^-; K^+I^-).

Например, хлорид меди $CuCl_2$ диссоциирует в водном растворе на ионы меди и хлора: $CuCl_2 \rightleftarrows Cu^{++} + 2Cl^-$.

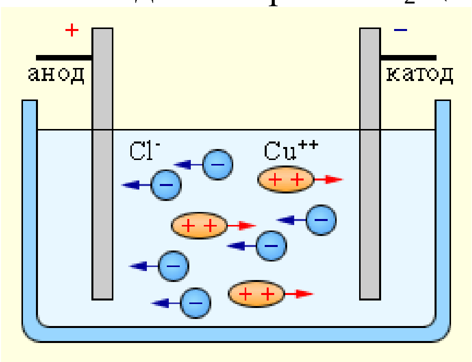


Рис. 7.7. Электролиз водного раствора хлорида меди

При подключении электродов к источнику тока ионы под действием электрического поля начинают упорядоченное движение: положительные ионы меди движутся к катоду, а отрицательно заряженные ионы хлора – к аноду (рис 7.7). Достигнув катода, ионы меди нейтрализуются избыточными электронами катода и превращаются в нейтральные атомы, оседающие на катоде. Ионы хлора, достигнув анода, отдают, но одному электрону. При подключении электродов к источнику тока ионы под действием электрического поля начинают упорядоченное движение: положительные ионы меди движутся к катоду, а отрицательно заряженные ионы хлора – к аноду (рис 7.7). Достигнув катода, ионы меди нейтрализуются избыточными электронами катода и превращаются в нейтральные атомы, оседающие на катоде. Ионы хлора, достигнув анода, отдают, но одному электрону. После этого нейтральные атомы хлора соединяются попарно и образуют молекулы хлора Cl_2. Хлор выделяется на аноде в виде пузырьков.

Степенью диссоциации α называется число молекул N', диссоциировавших на ионы, к общему числу молекул N

$$\alpha = \frac{N'}{N}. \qquad (7.25)$$

При тепловом движении ионов, происходит и обратный процесс воссоединения ионов, называемый **рекомбинацией**.

Законы электролиза были экспериментально установлены английским физиком М. Фарадеем в 1834 г.

1. ***Масса вещества, выделяющегося на электроде, прямо пропорциональна электрическому заряду q, прошедшему через электролит.***

$$m = k \cdot q \quad \text{или} \quad m = kIt, \qquad (7.26)$$

где **k** – электрохимический эквивалент вещества; равен массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит единицы количества электричества. $q = I \cdot t$,

I – постоянный ток, проходящий через электролит.

2. ***Электрохимические эквиваленты веществ, прямо пропорциональны отношениям их атомных (молярных) масс к валентности n.***

$$k = C\frac{A}{n} = \frac{1}{F}\cdot\frac{A}{n}, \qquad (7.27)$$

где A – атомная масса; n – валентность; $F = \frac{1}{C}$ - постоянная Фарадея; C – универсальная постоянная для всех элементов. F = 9,648 · 10^4 Кл/моль. Физический смысл следует из объединенного закона электролиза Фарадея

$$m = \frac{1}{F}\frac{A}{n}It \text{ или } \quad m = \frac{1}{F}\frac{A}{n}q. \qquad (7.28)$$

Физический смысл: постоянная Фарадея (F) равна количеству электричества, которое необходимо пропустить через электролит для выделения на электроде 1 грамм-эквивалента вещества.

Из объединенного закона электролиза определяется электрический заряд q любого иона $$q = \pm\frac{nF}{N_A}, \qquad (7.29)$$

где N_A – число Авогадро, N_A = 6,022 · 10^{23} моль$^{-1}$.

Заряд 1-валентного иона равен элементарному заряду q = e = 1,602 · 10^{-19} Кл. Любой электрический заряд кратен элементарному заряду.

Вопросы для самоконтроля

3. Что называется электрическим током?
4. Назовите 2 условия существования электрического тока.
5. Сила тока (определение, формула, ед. измерения).
6. Плотность тока (определение, формула, ед. измерения).
7. Что являются носителями тока: в металлах, в жидкостях, в газах.
8. Зависимость электрического сопротивления от формы и размеров проводника (формула, ед. измерения) .
9. Формула удельного сопротивления.
10. Зависимость электрического сопротивления и удельного сопротивления от температуры (формулы).
11. Закон Ома для участка цепи.
12. Закон Ома для замкнутой цепи, содержащей ЭДС.
13. Дифференциальная форма закона Ома.
14. Параллельное соединение проводников (схема). Чему равны ток, напряжение, сопротивление?
15. Что называется узлом электрической цепи?
16. Первое правило Кирхгофа.
17. Второе правило Кирхгофа.

18. Сторонние силы.
19. Удельное сопротивление (определение, формула, ед. измерения).
20. Зависимость удельного сопротивления от температуры (формула).
21. Последовательное соединение проводников (схема) Чему равны ток, напряжение, сопротивление?
22. Определение работа выхода электрона.
23. Законы Вольта.
24. Что называется термопарой?
25. Какой разряд называется несамостоятельным, самостоятельным?
26. Что такое электрический пробой?
27. Дайте определение электролиза, ионной проводимости, электрической диссоциации?
28. Законы Фарадея.
29. Степень диссоциации.

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Работа и мощность постоянного тока.
2. Закон Джоуля-Ленца. Дифференциальная форма закона Джоуля-Ленца.
3. Измерительные мосты постоянного тока.
4. Электрический ток в твердых телах.

Лекция №8
Тема: "Магнитное поле"

План лекции:
1. Магнитное поле и его характеристики.
2. Закон Био-Савара-Лапласа.
3. Сила Ампера. Сила Лоренца.
4. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для магнитного поля в вакууме.
5. Диамагнитные, парамагнитные, ферромагнитные вещества. Магнитная проницаемость.
6. Взаимная индукция. Трансформатор, физический принцип его действия.
7. Явление самоиндукции. Индуктивность.
8. Энергия магнитного поля.
9. Взаимосвязь электрических и магнитных величин

1.Магнитное поле и его характеристики

Магнитные явления были известны ещё в древнем мире. Компас был изобретен более 4500 лет тому назад. Он появился в Европе приблизительно в XII веке новой эры. Однако только в XIX веке была обнаружена связь между электричеством и магнетизмом, и возникло представление о **магнитном поле**.

В XVIII веке было обращено внимание на намагничивание железных предметов и перемагничивание компаса вблизи грозового разряда. Это наводило на мысль о связи магнитных явлений с электрическими. Это подтвердил датский физик Х.К. Эрстред (1820 г.). Он установил, что электрический ток воздействует на расположенную поблизости магнитную стрелку, ориентируя её перпендикулярно проводу. В том же году французский физик Ампер экспериментально обнаружил магнитное взаимодействие двух проводников с током.

По современным представлениям, проводники с током оказывают силовое действие друг на друга не непосредственно, а через окружающие их магнитные поля.

Источниками магнитного поля являются **движущиеся электрические заряды** (токи). Магнитное поле возникает в пространстве, окружающем проводники с током, подобно тому, как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле. Магнитное поле постоянных магнитов также создается электрическими микротоками, циркулирующими внутри молекул вещества - **гипотеза Ампера**.

Ученые XIX века пытались создать теорию магнитного поля по аналогии с электростатикой, вводя в рассмотрение так называемые магнитные заряды двух знаков (например, северный N и южный S полюса магнитной стрелки). Однако опыт показывает, что изолированных магнитных зарядов не существует. Магнитное поле, в отличие от электрического, оказывает силовое действие только на движущиеся заряды (токи).

Для описания магнитного поля введем силовую характеристику поля, аналогичную вектору напряженности электрического поля. Такой характеристикой является **вектор магнитной индукции**. **Магнитная индукция** в данной точке однородного поля определяется отношением максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с магнитным моментом, равном единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна к направлению поля (аналог $E = \frac{E}{q_0}$).

$$B = \frac{M_{max}}{p_m}, \qquad [B]=Тл \qquad (8.1)$$

За положительное **направление вектора** принимается направление от южного полюса S к северному полюсу N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле. Магнитное поле является силовым полем, его можно изобразить силовыми линиями. Таким образом, исследуя магнитное поле, создаваемое током или постоянным магнитом, с помощью маленькой магнитной стрелки, можно в каждой точке пространства определить направление вектора.

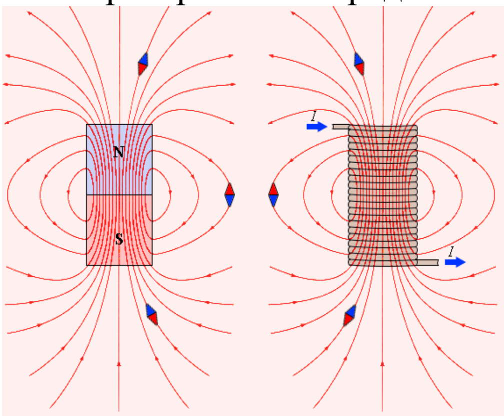


Рис. 8.1. Линии магнитной индукции полей постоянного магнита и катушки током

Аналогично силовым линиям в электростатике можно построить **линии магнитной индукции** – линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением $\vec{B}$. Пример линий магнитной индукции полей постоянного магнита и катушки с током приведен на рис.8.1. Линии магнитной индукции всегда замкнуты (они не имеют ни начала, ни конца), они нигде не обрываются.

Это означает, что магнитное поле не имеет источников – магнитных зарядов. Картину магнитной индукции можно наблюдать с помощью мелких железных опилок, которые в магнитном поле намагничиваются и, подобно маленьким магнитным стрелкам, ориентируются вдоль линий индукции.

Направление силовых линий магнитного поля определяется **правилом буравчика**: *рукоятка буравчика, ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении магнитных силовых линий.* Правило буравчика часто называют **правилом правого винта**.

Наряду с индукцией $\vec{B}$ используется понятие напряжённости магнитного поля $\vec{H}$, как меры воздействия на проводники с током и магнитную стрелку (размерность её - *А/м*). Напряженность $\vec{H}$ характеризует магнитное поле, создаваемое макроскопическими токами и поэтому определяется их величинами, конфигурацией в пространстве и не зависит от свойств среды. Для однородной изотропной среды связь между векторами индукции $\vec{B}$ и напряженности $\vec{H}$ определяется выражением

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \quad [\text{Тл}] \qquad (8.2)$$

Аналогично $\vec{D} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{E}$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *Гн/м* – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость среды (безразмерная величина), показывающая, во сколько раз магнитное поле макротоков усиливается за счет поля микротоков данной среды.

Магнитное поле можно изображать с помощью линий напряженности магнитного поля. ***Непрерывная линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором напряженности магнитного поля, называется линией напряженности магнитного поля.*** Линии напряженности магнитного поля всегда замкнуты.

$$dH = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dF}{I_0 \cdot dl_0} \tag{8.3}$$

Физический смысл:

Напряжённость магнитного поля направлена по касательной к силовой линии поля, а по модулю равна отношению силы, с которой поле действует на единичный элемент тока (расположенный перпендикулярно полю в вакууме), к магнитной постоянной.

Для вычисления полной напряжённости H магнитного поля надо геометрически суммировать элементарные напряжённости dH. Если проводник расположен в одной плоскости, напряжённость вычислим по формуле (из формулы 8.3)

$$H = \int_l dH = \frac{1}{4\pi} \int_l \frac{I \cdot \sin\alpha}{r^2} \cdot dl \quad . \tag{8.4}$$

Единица напряженности магнитного поля – *ампер на метр*: *1 А/м* - напряженность такого поля, магнитная индукция которого в вакууме равна $4\pi \cdot 10^{-7}$ *Тл.*

Магнитное поле называется **однородным**, если во всех его точках вектор магнитной индукции $\vec{B}$ имеет одно и то же значение. В противном случае магнитное поле называется **неоднородным**.

Для магнитного поля, как и для электрического, справедлив **принцип суперпозиции**: **магнитное поле $\vec{B}$, создаваемое несколькими источниками, равно векторной сумме полей $\vec{B}_i$, порождаемых каждым источником в отдельности:**

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{n} \vec{B}_i . \tag{8.5}$$

3. Закон Био-Савара-Лапласа

В 1820 году магнитное поле постоянных токов изучалось на опыте Био и Саваром. Результаты опытов были математически обработаны Лапласом и поэтому, закон получил название закона Био-Савара-Лапласа.

Для элемента тока они получили формулу: $dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \sin\alpha}{r^2}$, (8.6)

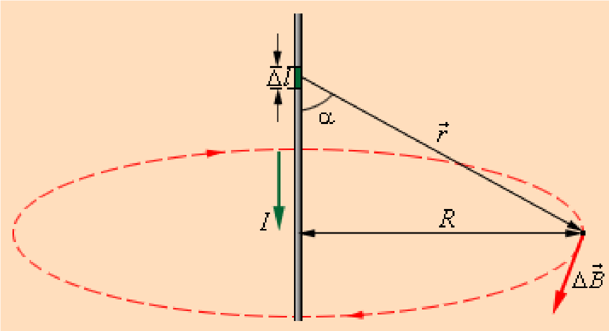


Рис. 8.2. Иллюстрация закона Био-Савара

где ***r*** - расстояние от элемента тока до рассматриваемой точки, α - угол между направлением тока и направлением на рассматриваемую точку. Рис.8.2. иллюстрирует закон Био–Савара на примере магнитного поля прямолинейного проводника с током.

Если просуммировать (проинтегрировать) вклады в магнитное поле всех отдельных участков прямолинейного проводника с током, то получится формула для магнитной индукции поля прямого тока:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{r}. \qquad (8.7)$$

4. Сила Ампера. Сила Лоренца

Ампер (1820) на опыте установил, что на проводник с током **в магнитном поле действует сила**

$$\vec{F} = I[\vec{l}\vec{B}], \qquad (8.8)$$

модуль, которой определяется по формуле:

$$F = I \cdot B \cdot \ell \cdot \sin\alpha \qquad (8.9)$$

а направление, по правилу правого винта или **правилу левой руки**:

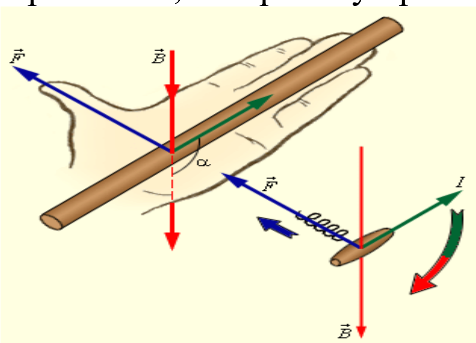


Рис. 8.3. Правило левой руки и правило буравчика

если расположить левую руку так, чтобы линии индукции магнитного поля входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис.8.3).

Возникновение этой силы связано с тем, что магнитное поле действует на заряженные частицы, движущиеся в проводнике с некоторой скоростью $\vec{v}$. Сила, действующая на заряд в этом случае, называется **силой Лоренца** и определяется по формуле:

$$\vec{F} = q[\vec{\upsilon}\vec{B}], \qquad (8.10)$$

а ее **модуль** $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin\alpha$ (8.11) где α – угол между направлениями скорости частицы и вектора магнитной индукции.

Магнитное поле не действует на покоящийся заряд и в этом состоит существенное отличие магнитного поля от электрического. ***Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости частицы (ее перемещению) и поэтому работы не совершает, а, следовательно, не изменяет кинетическую энергию частицы.*** Выражение для силы Лоренца (8.10) позволяет определить характер движения заряженной частицы в магнитном поле. При $\alpha = 90°$ частица движется по окружности радиуса $R = \dfrac{mv}{qB}$. Если угол α удовлетворяет условию $0 < \alpha < 90°$, то частица движется по спирали с радиусом R и шагом h. Если скорость частицы $\vec{v}$ составляет угол α с вектором магнитной индукции $\vec{B}$ неоднородного магнитного поля, индукция которого возрастает в направлении движения частицы, то R и h уменьшаются. На этом основано явление фокусировки заряженных частиц в магнитном поле.

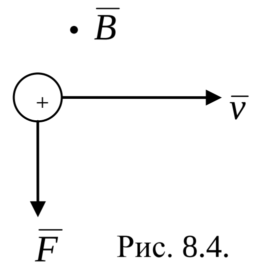


Рис. 8.4.

Направление силы Лоренца определяется **правилом левой руки**: *если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входили линии индукции магнитного поля, а четыре вытянутых пальца направить вдоль вектора $\bar{v}$, то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на положительный заряд* (рис. 8.4). На отрицательный заряд сила со стороны магнитного поля действует в противоположном направлении.

5. Поток вектора магнитной индукции. Теорема Гаусса для магнитного поля в вакууме

Пусть площадку dS пронизывает магнитное поле с индукцией B, так что направление вектора B образует угол α с направлением нормали к площадке.

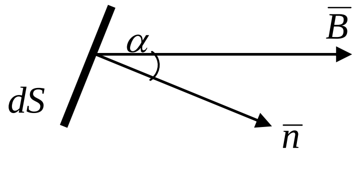


Рис. 8.5.

Потоком вектора магнитной индукции или магнитным потоком через площадку dS называется скалярная физическая величина, равная

$$d\Phi = B \cdot dS \cdot \cos\alpha \qquad (8.12)$$

Поток вектора магнитной индукции через произвольную поверхность площадью S определяется по формуле

$$\Phi = \int_S B_n \cdot dS \qquad (8.13)$$

где $B_n = B\cos\alpha$ - проекция вектора $\overline{B}$ на направление нормали к площадке dS (рис. 8.5).

Если плоская поверхность расположена перпендикулярно вектору $\overline{B}$, то угол $\alpha = 0$ и

$$\Phi_B = BS. \qquad (8.14)$$

Отсюда определяется единица магнитного потока *вебер* (Вб): *1 Вб* – это магнитный поток, проходящий сквозь плоскую поверхность площадью *1 м²*, расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна *1 Тл*.

Знак потока определяется направлением положительной нормали к контуру. Как правило, поток вектора В связывают с контуром, по которому течет ток.

Теорема Гаусса для магнитного поля: *поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность всегда равен нулю, т.е.*

$$\Phi = \oint_S B \cdot dS = 0\,. \qquad (8.15)$$

Это связано с тем, что линии магнитной индукции замкнуты и поэтому число линий входящих в поверхность с одной стороны, равно числу линий выходящих с другой стороны.

5.Диамагнитные, парамагнитные, ферромагнитные вещества. Магнитная проницаемость

Магнетики подразделяются на *слабомагнитные* и *сильномагнитные вещества.* К слабомагнитным относятся парамагнетики и диамагнетики, к сильномагнитным – ферромагнетики.

Не все вещества одинаково проводят силовые линии магнитного поля. Так, например, через железо магнитные силовые линии проходят во много раз легче, чем через воздух. Другими словами способность железа проводить магнитный поток больше, чем окружающего воздуха, поэтому индукция магнитного поля в железе больше, чем в воздухе.

Величина, характеризующая магнитные свойства среды, в которой действует магнитное поле, называется **магнитной проницаемостью** (μ). Она показывает, во сколько раз магнитная индукция *B* в однородной изотропной среде больше (или меньше), чем в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \qquad (8.16)$$

Для вакуума $\mu = 1$.

Диамагнитные свойства наблюдаются у веществ атомы, которых имеют магнитный момент $\vec{p}_i$; равный нулю (неполярные диэлектрики), например, Bi,Ag,Cu, большинство органических соединений, углекислый газ.

Электрон, движущийся по круговой орбите, подобен волчку. Под действием магнитного поля, индукция B которого составляет угол α с осью орбиты электрона, возникает прецессия электронной орбиты, при которой вектор магнитного момента атома $\vec{p}_i$, сохраняя постоянным угол α, вращается вокруг направления вектора магнитной индукции с некоторой частотой $\omega = \dfrac{e \cdot B}{2 \cdot m}$ называемой **Ларморовой частотой**. Она не зависит от угла наклона α и одинакова для всех электронов. Это движение электрона эквивалентно круговому току. Поскольку этот ток индуцирован магнитным полем, то по правилу Ленца, у атома появляется составляющая магнитного поля, направленная против внешнего магнитного поля. Эта составляющая существует у всех атомов и обуславливает собственное магнитное поле вещества, ослабляющее внешнее магнитное поле, поэтому у диамагнетиков $\chi_m < 0$ и $\mu < 1$.

Парамагнитные свойства наблюдаются у веществ, атомы которых имеют отличный от нуля магнитный момент $\vec{p}_i$ (полярные диэлектрики). В отсутствии внешнего магнитного поля, вследствие теплового движения, магнитные моменты атомов разориентированы и поэтому магнитный момент вещества равен нулю. При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле магнитные моменты атомов ориентируются по полю (полной ориентации препятствует хаотическое тепловое движение). Таким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, направленное по внешнему полю и усиливает его и, следовательно, $\chi_m > 0, \mu > 1$.

В парамагнетиках наблюдается и диамагнитный эффект, но он значительно слабее парамагнитного и им можно пренебречь.

Обобщая выше сказанное можно сказать, что в случае, когда магнитный момент атома велик, то преобладают парамагнитные свойства, если мал, то диамагнитные.

Ферромагнетики помимо способности сильно намагничиваться обладают еще и другими свойствами, существенно отличающими их от диа - и парамагнетиков. Наряду с этим свойством, для ферромагнетиков характерно: 1) кристаллическое строение; 2) большие положительные значения магнитной проницаемости (до сотен тысяч: для железа – 5000, для сплава супермаллоя – 800000), а также *нелинейная* её зависимость от напряженности *H* магнитного поля и температуры; 3) способность намагничиваться до насыщения при обычных температурах уже в слабых полях; 4) *гистерезис* – зависимость магнитных свойств от предшествующего магнитного состояния ("магнитной истории"); 5) *точка Кюри*, т. е. температура, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства, превращаясь в обычный парамагнетик.

На рис. 8.6 показана зависимость индукции магнитного поля B от напряженности H, намагниченности J и магнитной проницаемости μ от H для мягкого железа.

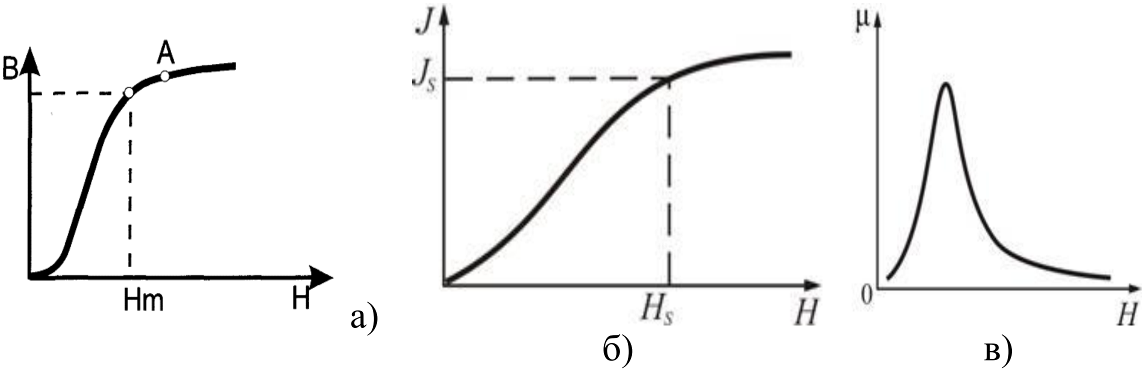


Рис. 8.6. Зависимость а) индукции магнитного поля B от напряженности H, б) намагниченности J от напряженности H; в) магнитной проницаемости μ от напряженности H для мягкого железа.

На рисунке видно, что B и J растут вначале быстро с увеличением напряженности намагничивающего поля, затем их рост замедляется, а, начиная с некоторого значения $H_{нас}$,намагниченность достигает практически предельного значения $J_{нас}$. Это состояние Столетов назвал магнитным *насыщением*. Индукция $B = \mu_0 H + J$ после достижения магнитного насыщения растет пропорционально H.

В связи с неоднозначностью зависимости B от H понятие магнитной проницаемости применяется лишь к основной кривой намагничения. Для некоторой точки кривой $B = f(H)$ (рис. 8.6) магнитная проницаемость μ определяется как тангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат к рассматриваемой точке кривой, т. е. $\mu = B/(\mu_0 H)$. Как следует из рис. 8.6, при увеличении H угол наклона (а значит и μ) сначала растет, в точке C (прямая OC является касательной к кривой $B = f(H)$) достигает максимума, а затем убывает.

При циклическом перемагничении кривая намагничения образует гистерезисную петлю (рис. 8.7).

Если довести намагничение до насыщения (точка 2 на рис. 8.7), а затем уменьшать магнитное поле, то индукция B следует не по первоначальной кривой 1-2, а изменяется в соответствии с кривой 2-3.

В результате, когда напряженность внешнего поля станет равной нулю (точка 3), намагничение не исчезает и характеризуется величиной $B_{ост}$ которая называется ***остаточной индукцией.***

Её можно изменить, создав внешнее поле H, имеющее направление, противоположное полю, вызвавшему намагничение. Поле напряженностью H_c, при которой остаточная индукция исчезает, называется *коэрцитивной* силой.

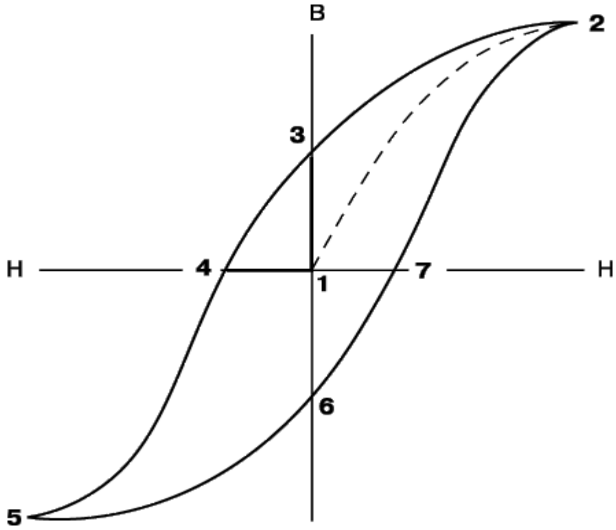


Рис. 8.7. Петля гистерезиса

При дальнейшем увеличении противоположно направленного поля ферромагнетик намагничивается до насыщения (кривая 4-5). Затем ферромагнетик можно снова размагнитить (кривая 5-6-7) и снова намагнитить до насыщения. Гистерезис приводит к тому, что намагничение ферромагнетика не является однозначной функцией напряженности $\vec{H}$, т.е. одному и тому же значению $\vec{H}$ соответствуют различные значения намагничения $\vec{J}$.

Ферромагнетики с малой (до 1-2 $\mathrm{A/см}$) коэрцитивной силой (узкой петлей гистерезиса) называются **магнитомягкими,** а с большой (до нескольких тысяч $\mathrm{A/см}$) – **магнитотвердыми.** Величины H_C, $B_{ост}$, $\mu_{\max}$ определяют область применения ферромагнетиков.

Процесс намагничения ферромагнетика приводит к изменению его линейных размеров и объема. Это явление получило название *магнитострикции*. В настоящее время большое значение приобрели полупроводниковые ферромагнетики – ***ферриты,*** химические соединения типа $\mathrm{Me \cdot Fe_2O_3}$, где Me – ион двухвалентного металла. Они отличаются заметными ферромагнитными свойствами и большим удельным сопротивлением (в миллиарды раз больше, чем у металлов). Ферриты применяются для изготовления постоянных магнитов, сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, ферритовых антенн и т.д.

6.Взаимная индукция. Трансформатор, физический принцип его действия

Рассмотрим два неподвижных контура I и II, расположенные достаточно близко друг к другу (рис. 8.8).

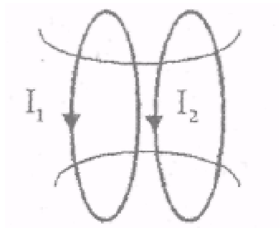


Рис. 8.8. Взаимная индукция

Если по контуру I протекает ток I_1, то второй контур будет пронизывать магнитный поток

$$\Phi_{21} = L_{21} \cdot I_1 \tag{8.17}$$

где L_{21}- коэффициент пропорциональности. Если ток I_1 изменяется, то магнитный поток, пронизывающий второй контур, будет изменяться, и в контуре будет возникать ЭДС индукции

$$E_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21}\frac{dI_1}{dt} \tag{8.18}$$

Аналогично можно утверждать, что при протекании по второму контуру изменяющегося тока I_2 , в первом контуре будет возникать ЭДС индукции

$$E_1 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12}\frac{dI_2}{dt}. \tag{8.19}$$

Явление возникновения ЭДС индукции в одном из контуров при изменении тока в другом, называется **взаимной индукцией.** Коэффициенты пропорциональности L_{12}, L_{21} называются **взаимной индуктивностью контуров** и зависят от геометрической формы, размеров, взаимного расположения контуров и магнитной проницаемости среды, окружающей контура. В нашем случае $L_{12} = L_{21}$.

Явление взаимной индукции лежит в основе работы трансформатора, применяемого для изменения напряжения переменного тока. Трансформатор был изобретен П.И. Яблочковым и усовершенствован И.Ф. Усагиным.

Первичная и вторичная обмотки трансформатора, имеющие соответственно число витков n_1, и n_2, закреплены на замкнутом ферромагнитном сердечнике (рис. 8. 9).

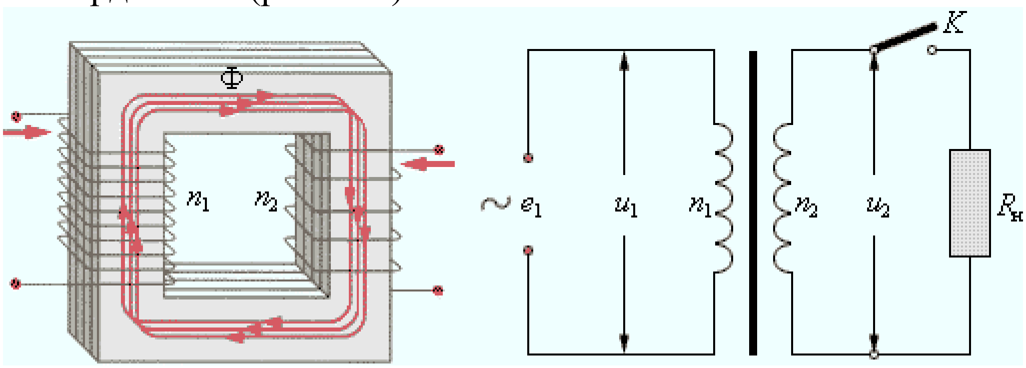


Рис. 8.9. Трансформатор

Магнитный поток, создаваемый переменным током, текущим в первичной обмотке, полностью локализован в сердечнике и, поэтому, он будет пронизывать обе обмотки. Изменение магнитного потока вызывает появление ЭДС индукции во вторичной обмотке и ЭДС самоиндукции в первичной. По закону Ома ток в первичной обмотке определяется суммой внешней ЭДС и ЭДС самоиндукции

$$I_1R_1 = E_1 - n_1\frac{d\Phi}{dt} \quad (8.20)$$

Так как сопротивление первичной обмотки мало, то $I_1\,R_1 \ll E_1$ и поэтому

$$E_1 = n_1\frac{d\Phi}{dt} \quad (8.21)$$

ЭДС индукции, возникающая во вторичной обмотке

$$E_2 = -n_2\frac{d\Phi}{dt} \quad (8.22)$$

Разделив 8.21 на 8.22, получим

$$\frac{E_1}{E_2} = -\frac{n_1}{n_2} = k\,.$$

Знак минус говорит о том, что ЭДС в обмотках противоположны по фазе, ***k*** **- <u>коэффициент трансформации</u>.** При k > 1 - **трансформатор понижающий**, при k < 1 - **повышающий**.

Пренебрегая потерями энергии на выделение джоулева тепла (КПД трансформатора мало отличается от единицы) и, применяя закон сохранения энергии можно получить

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (8.23)$$

т.е. повышение напряжения приводит к уменьшению силы тока и наоборот.

Трансформатор, состоящий из одной обмотки, называется **автотрансформатором.** В этом случае напряжение подается на всю обмотку, а снимается с части ее в понижающем трансформаторе. Повышающий трансформатор работает в обратном направлении.

7.Явление самоиндукции. Индуктивность

Явление электромагнитной индукции наблюдается во всех случаях, когда изменяется магнитный поток, пронизывающий контур. В частности, этот переменный магнитный поток может создаваться током, текущим в самом контуре. Поэтому *при всяком изменении силы тока в каком-либо контуре, в нем возникает ЭДС индукции, которая вызывает дополнительный ток в контуре. Это* **явление получило название самоиндукции**.

Согласно закону Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля пропорциональна силе тока, вызывающего поле. Следовательно, ток в контуре и созданный им магнитный поток будут связаны между собой, и мы можем написать:

$$\Phi = L \cdot I \quad (8.24)$$

где L - коэффициент пропорциональности, получивший название **индуктивности контура**. Индуктивность контура зависит от геометрических размеров и формы контура, а также от магнитных свойств среды окружающей проводник.

Определим индуктивность катушки. Так как магнитный поток, пронизывающий катушку $\Phi = N \cdot B \cdot S,\ B = \mu \cdot \mu_0 \cdot n \cdot I$,то

$$\Phi = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S \cdot I = \mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot V \cdot I. \qquad (8.25)$$

Сравнивая 8.24 и 8.25 , найдем, что

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot n^2 \cdot V.$$

Применяя к явлению самоиндукции закон Фарадея, получим для ЭДС самоиндукции

$$E_S = -L\frac{dI}{dt}. \qquad (8.26)$$

Коэффициент пропорциональности L в этой формуле называется **коэффициентом самоиндукции или индуктивностью катушки**. Единица индуктивности в СИ называется Генри (Гн). Индуктивность контура или катушки равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А собственный поток равен 1 Вб: 1 Гн = 1 Вб/1А.

8.Энергия магнитного поля

Магнитное поле неразрывно связано с током, оно появляется и исчезает вместе с появлением и исчезновением тока. Следовательно, часть энергии электрического поля идёт на создание магнитного поля.

Магнитное поле должно обладать энергией, равной работе, затрачиваемой током на создание этого поля, или на создание потока магнитной индукции, связанного с током.

Явление электромагнитной индукции основано на взаимных превращениях энергий электрического тока и магнитного поля.

Энергия магнитного поля пропорциональна квадрату его напряжённости и объёму охваченного пространства.

$$W = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot H^2}{2} \cdot V \qquad (8.27)$$

Так как $\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$, то окончательно будем иметь $W = \frac{BH}{2} \cdot V$ (8.28)

Выражение энергии магнитного поля через характеристики магнитного поля B и H убедительно свидетельствует о том, что энергией обладает само магнитное поле.

Объемной плотностью энергии магнитного поля называется отношение энергии магнитного поля к занимаемому им объему:

$$\omega_м = \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot H^2}{2} = \frac{BH}{2} \qquad [\text{Дж/м}^2] \qquad (8.29)$$

Тот факт, что объемная плотность энергии выражается через основные характеристики магнитного поля, говорит о том, что само магнитное поле обладает энергией.

9.Существование электромагнитных волн

Существование электромагнитных волн было теоретически предсказано
английским физиком Дж. Максвеллом в 1864 году. Максвелл ввел в физику понятие вихревого электрического поля и предложил новую трактовку закона электромагнитной индукции, открытой Фарадеем в 1831 г.:

Всякое изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты. И высказал гипотезу о существовании и обратного процесса:

Изменяющееся во времени электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле.

Гипотеза Максвелла была лишь теоретическим предположением, не имеющим экспериментального подтверждения, однако на ее основе Максвеллу удалось записать непротиворечивую систему уравнений, описывающих взаимные превращения электрического и магнитного полей, т.е. систему уравнений электромагнитного поля (уравнений Максвелла). Из теории Максвелла вытекает ряд важных выводов:

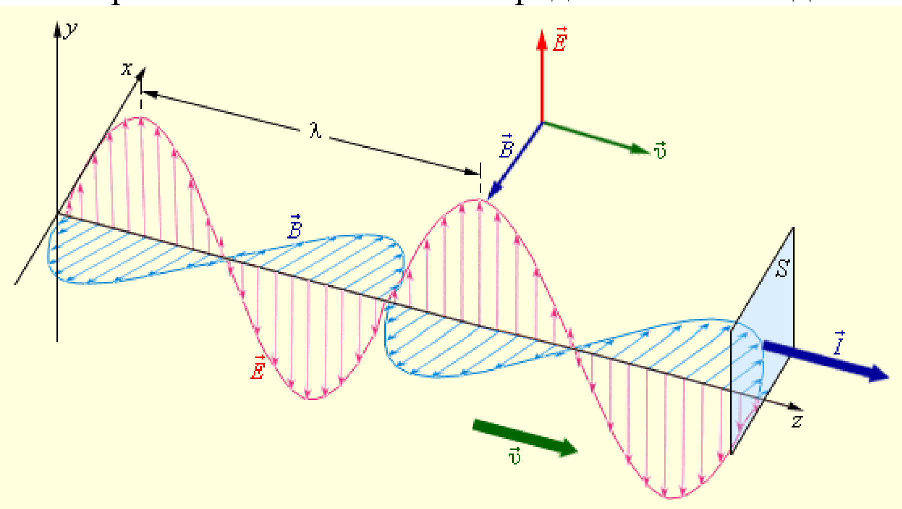


Рис. 8.10. Электромагнитная волна

Векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{\upsilon}$ взаимно перпендикулярны

1. Существуют электромагнитные волны, то есть распространяющееся в пространстве и во времени электромагнитное поле. Электромагнитные волны **поперечны** - векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (рис.8.10).
2. Электромагнитные волны распространяются в веществе с **конечной скоростью**

$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0 \mu\mu_0}} = \frac{3\cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Здесь ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные:

ε_0 =8,85419·10^{-12} Ф/м, μ_0 =1,25664·10^{-6} Гн/м.

Скорость электромагнитных волн в вакууме (ε=μ=1):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2{,}99792458\cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Простейшей системой, эквивалентной переменному току, является электрический диполь. Электромагнитное поле диполя имеет основные черты.

1. Напряжённость E колеблется в плоскости оси диполя перпендикулярное направлению электромагнитного излучения.
2. Напряжённость H магнитного поля колеблется перпендикулярно напряжённости E электрического поля.
3. Колебания E и H совершаются в одной фазе.
4. Электромагнитное излучение максимально в направлении перпендикуляра оси диполя и равно нулю в направлении оси диполя.
5. Электромагнитное поле распространяется в виде поперечной электромагнитной волны, состоящей из 2-х совпадающих по фазе волн - электрической (т.е волны напряжённости электрического поля) и магнитной (волны напряжённости магнитного поля).

Вопросы для самоконтроля

1. Что представляет собой магнитное поле, какими свойствами оно обладает?
2. Что называют индукцией магнитного поля? Как определяют направление вектора магнитной индукции?
3. Как читается правило буравчика?
4. Линии напряженности магнитного поля (определение).
5. Как связаны векторы напряженности и индукции магнитного поля?
6. Запишите закон Био-Савара-Лапласа.
7. Назовите единицы магнитной индукции и напряженности магнитного поля, дайте их определения.
8. Сформулируйте закон Ампера.
9. Правило левой руки.
10. Какая сила действует со стороны магнитного поля на движущийся заряд? Чему она равна?
11. Что называют потоком вектора магнитной индукции?
12. Сформулируйте теорему Гаусса для магнитного поля, объясните

ее физический смысл.
13. Что такое магнитная проницаемость?
14. Какие вещества называют диамагнетиками, парамагнетиками, ферромагнетиками? Каков механизм намагничивания ферромагнетиков?
15. Что называют явлением электромагнитной индукции? Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
16. В чем заключаются явления самоиндукции и взаимоиндукции?
17. Что такое индуктивность контура? От чего она зависит, каков ее физический смысл?
18. Расскажите принцип работы трансформатора.
19. Чему равна энергия магнитного поля?
20. Что такое объемная плотность энергии?
21. Закон электромагнитной индукции.
22. Теория Максвелла (выводы).

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Расчет магнитных полей с помощью закона Био-Савара-Лапласа.
2. Циркуляция вектора магнитной индукции по замкнутому контуру.
3. Закон полного тока.
4. Вихревой характер магнитного поля.
5. Расчет магнитного поля на оси тороида и соленоида.
6. Закон Кюри.
7. Эффект Баркгаузена.
8. Магнитострикция.
9. Коэрцитивная сила. Остаточная индукция.
10. Гистерезисные потери энергии.
11. Антиферромагнетики. Ферриты.
12. Уравнения Максвелла.
13. Электромагнитные колебания.

РАЗДЕЛ №4 ОПТИКА И СТРОЕНИЕ АТОМА.

Лекция №9

Тема: «Геометрическая и волновая оптика»

План:

1. Законы геометрической оптики.
2. Тонкие линзы. Изображение предметов с помощью линз.
3. Интерференция света.
4. Дифракция света.
5. Поляризация света.

1. Законы геометрической оптики

Основные законы геометрической оптики были известны задолго до установления физической природы света. К основным законам распространения света относятся: ***закон прямолинейного распространения света, законы отражения и преломления света, закон независимости световых пучков.***

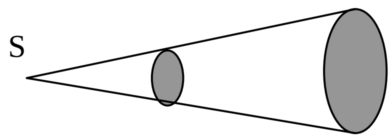


Рис. 9.1. Образование тени за непрозрачным предметом

Закон прямолинейного распространения света: ***в однородной среде свет распространяется прямолинейно.***

Доказательством этого закона служит образование тени с резкими границами от непрозрачных предметов при освещении их источниками света малых размеров (рис.9.1).

Закон независимости световых пучков: ***эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены.***

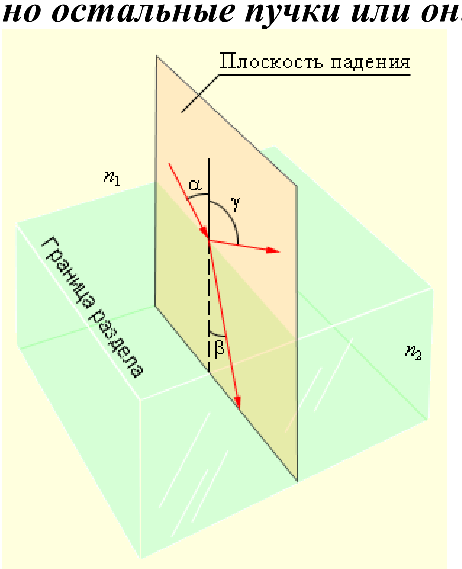


Рис. 9.2. Закон отражения и преломления света

Закон отражения света: ***отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенном к границе раздела двух сред в точке падения луча. Угол падения*** α ***равен углу отражения*** β (рис. 9.2).

Закон преломления света: ***луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред:***

$$\frac{\sin\alpha}{\sin i} = n_{21}, \quad (9.1)$$

где n_{21} – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (9.2)$$

Абсолютный показатель преломления показывает во сколько раз скорость света в среде меньше чем в вакууме, т.е.

$$n = \frac{c}{v},$$

где c – скорость света в вакууме, v – скорость света в данной среде.

Учитывая 9.2 закон преломления можно записать в виде:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin i} = \frac{n_2}{n_1}. \qquad (9.3)$$

Из симметрии этого выражения вытекает **обратимость световых пучков.** Если обратить преломленный луч, заставив его падать на границу раздела под углом i, то преломленный луч в первой среде будет распространяться вдоль падающего луча.

Из закона преломления следует, что при распространении света из оптически менее плотной среды, в более плотную $(n_2 > n_1)$, отношение $\frac{\sin\alpha}{\sin i} > 1$ и, следовательно, угол падения α больше угла преломления **i** (рис. 9.3.а).

Если же луч света переходит из оптически более плотной среды, в менее плотную $(n_2 < n_1)$, то отношение $\frac{\sin\alpha}{\sin i} < 1$ и, следовательно, $\alpha < i$ (рис. 9.3.б).

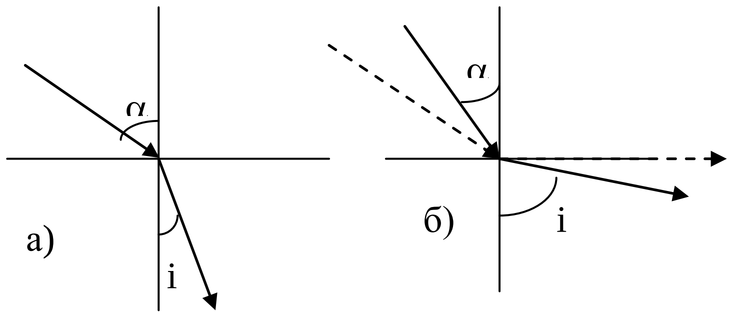


Рис. 9.3. Преломление света: а) при переходе из оптически менее плотной среды, в более плотную; б) при переходе из более плотной среды в менее плотную

С увеличением угла падения увеличивается и угол преломления, и при некотором значении угла падения α_0 угол преломления окажется равным $90°$. Одновременно с этим интенсивность преломленного луча уменьшается, а интенсивность отраженного луча увеличивается и при угле падения равном α_0 интенсивность преломленного луча становится равной нулю. При этом интенсивность отраженного луча становится равной интенсивности падающего луча. Поэтому это **явление** получило название **полного отражения**. **Угол падения** α_0 **получил название**

предельного угла полного отражения. При углах падения больших α_0 весь падающий свет отражается в первую среду. Из закона преломления света (9.3) если учесть, что $i = 90°$ и $n_2 = 1$, можно получить выражение:

$$\sin\alpha_0 = \frac{1}{n}. \qquad (9.4)$$

Явление полного отражения нашло широкое практическое применение в призмах полного отражения. Такие призмы применяются в биноклях, перископах, телескопах, а также в ***рефрактометрах,*** позволяющих определять показатель преломления вещества. Явление полного отражения используется в ***световодах***. Световод представляет собой кварцевую нить, окруженную стеклянным волокном, показатель преломления которого меньше, чем у нити. Свет, падающий на торец световода, претерпевает на границе раздела нить – волокно полное отражение и может распространяться только по нити.

2. Тонкие линзы. Изображение предметов с помощью линз

Раздел оптики, в котором законы распространения света рассматриваются на основе представления о световых пучках, называется **геометрической оптикой**. Под **световыми пучками** понимают нормальные к волновым поверхностям линии, вдоль которых распространяется поток световой энергии.

Линзы представляют собой прозрачные тела, ограниченные двумя поверхностями (одна из них обычно сферическая, иногда цилиндрическая, а вторая – сферическая или плоская), преломляющими световыми лучи, способные формировать оптические изображения предметов. Материалом для линз служат стекло, кварц, кристаллы, пластмассы и т.п. По внешней форме линзы делятся на: двояковыпуклые, плосковыпуклые, двояковогнутые, плосковогнутые, выпукло-вогнутые, вогнуто-выпуклые. По оптическим свойствам линзы делятся на **собирающие и рассеивающие.**

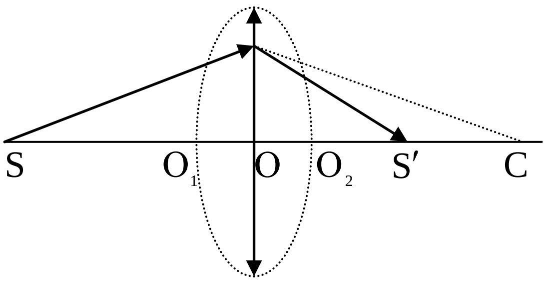


Рис. 9.4. Преломление света в линзе

Линза называется **тонкой**, если ее вершины можно считать совпадающими, т.е. если толщина линзы мала по сравнению с радиусами кривизны ограничивающих поверхностей (рис. 8.4). Прямая проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется **главной оптической осью**. В дальнейших расчетах будем считать, что точки O_1 и O_2 сливаются в одну точку O. Все расстояния будем отсчитывать от этой точки. Точка O получила название **оптического центра линзы**.

Преломление на первой сферической поверхности создало бы без второй преломляющей поверхности в сплошном стекле с показателем преломления n_2, изображение на расстоянии $OC = a$ от оптического центра, так что,

$$\frac{n_1}{d} + \frac{n_2}{a} = \frac{n_1 - n_2}{R_1}. \tag{9.5}$$

Для второй сферической поверхности точка C является мнимым источником света. Построение изображения этой точки на второй преломляющей поверхности дает точку S' на расстоянии $f = OS'$ от оптического центра, так что

$$-\frac{n_2}{a} + \frac{n_1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{R_2}. \tag{9.6}$$

Суммируя выражения 9.5 и 9.6 получим:

$$n_1\left(\frac{1}{d} + \frac{1}{f}\right) = \left(n_2 - n_1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{9.7}$$

Вводя относительный показатель преломления $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$, окончательно получим общую формулу линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \left(n_{21} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{9.8}$$

Общая формула линзы пригодна для любой линзы при произвольном положении источника света. Нужно только принять во внимание знаки d, f, R. Расстояние от предмета до линзы d считаем положительным для действительного источника (на линзу падает расходящийся пучок лучей). Для мнимого источника это расстояние считается отрицательным (на линзу падает сходящийся пучок лучей). Расстояние от линзы до изображения f считается положительным для действительного изображения источника света и отрицательным – для мнимого изображения. Для выпуклой поверхности радиус кривизны считается положительным, для вогнутой поверхности – отрицательным.

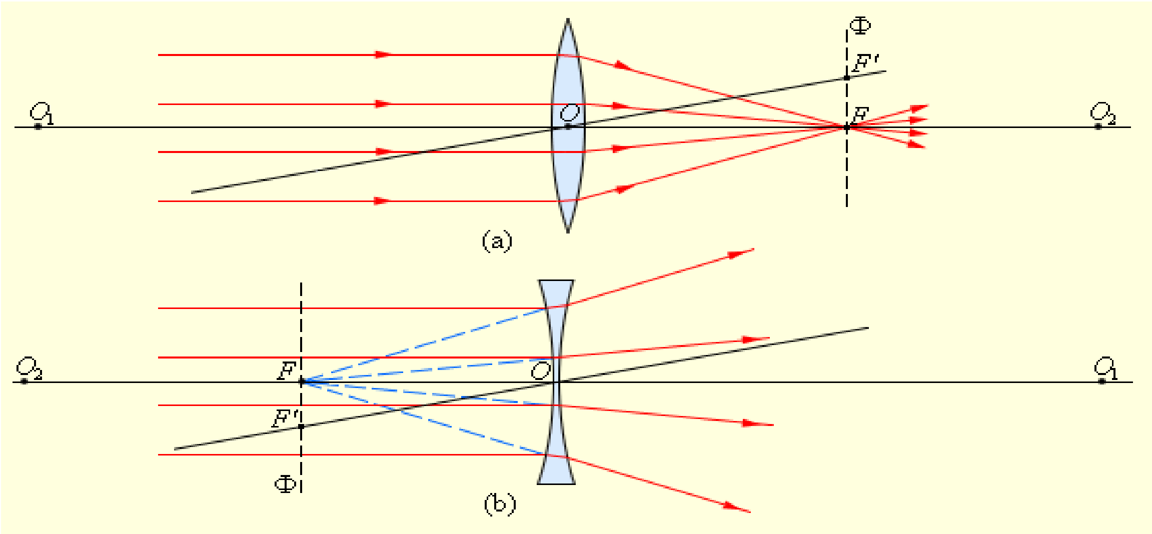


Рис. 9.5. Преломление параллельного пучка лучей в собирающей (a) и рассеивающей (b) линзах. Точки *O*1 и *O*2 – центры сферических поверхностей, *O*1*O*2 – главная оптическая ось, *O* – оптический центр, *F* – главный фокус, *F'* – побочный фокус, *OF'* – побочная оптическая ось, Ф – фокальная плоскость

Если светящаяся точка, лежащая на главной оптической оси, удаляется от линзы, то изображение ее перемещается. Положение изображения, когда источник удален в бесконечность, носит название **главного фокуса линзы**. Другими словами, это есть точка, в которой пересекаются лучи (или их продолжения) падающие на линзу параллельно главной оптической оси (рис. 9.5). Расстояние от линзы до фокуса называется **фокусным расстоянием F**. Для определения фокусного расстояния линзы мы имеем:

$$\text{при } d \Rightarrow \infty \qquad \frac{1}{F} = (n_{21} - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{9.9}$$

Из выражения 9.9 следует, что фокусное расстояние линзы зависит только от относительного показателя преломления материала линзы и радиусов кривизны ограничивающих поверхностей.

Вводя фокусное расстояние линзы F выражение 9.9, может быть записано в виде:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \tag{9.10}$$

Величина $D = \frac{1}{F}$ называется **оптической силой линзы**. Единица измерения $м^{-1}$ = диоптрия.

Линзы с положительной оптической силой называются собирающими, а с отрицательной – рассеивающими. Построение изображения в собирающей и рассеивающей линзах (рис. 9.6).

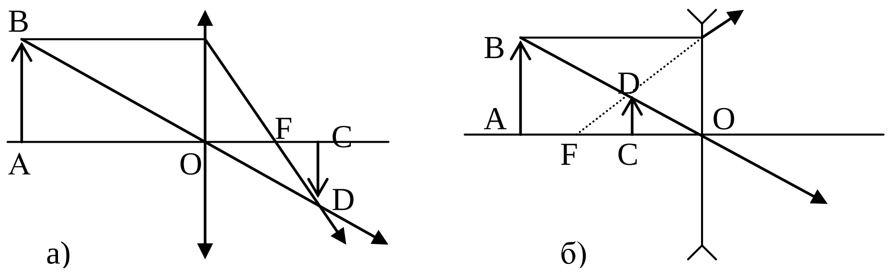


Рис. 9. 6. Построение изображения в линзах.
а) собирающая линза; б) рассеивающая линза

Отношение линейных размеров изображения и предмета называется **линейным увеличением.**

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}. \qquad (9.11)$$

3.Интерференция света

Интерференция света – пространственное перераспределение светового потока при наложении двух (или нескольких) когерентных световых волн, в результате чего в одних местах возникают максимумы, в других – минимумы интенсивности.

Когерентность – согласованное протекание во времени и пространстве колебательных процессов. Этому условию удовлетворяют **монохроматические волны** – волны постоянной частоты.

Для описания световой волны можно воспользоваться уравнением гармонических колебаний $x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$, где под x понимают напряженность электрического $\vec{E}$ или магнитного $\vec{H}$ полей волны. Тогда интерференцию света можно объяснить, рассматривая сложение колебаний. Для двух гармонических колебаний одного периода, происходящих по одному направлению, результирующая амплитуда ***A*** и интенсивность волны ***I*** (при $I \sim A^2$):

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \text{ и } I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \qquad (9.12)$$

Отсюда следует, что в тех точках пространства где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$, то $I > I_1 + I_2$, а там где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$, то $I < I_1 + I_2$. В частности, при $I_1 = I_2$ будем иметь $I = 4I_1$ при $(\varphi_2 - \varphi_1) = 0, \ldots 2\pi m$ и $I = 0$ при $(\varphi_2 - \varphi_1) = \pi \ldots (2m+1)\pi$.

Для получения когерентных $(\varphi_2 - \varphi_1 = const)$ световых волн применяют метод разделения волны, излучаемой одним источником, на две части, которые после прохождения разных ***оптических путей*** накладываются друг на друга, и наблюдается интерференционная картина.

Анализ хода лучей от двух когерентных источников позволяет установить связь между возникшей разностью фаз $(\varphi_2 - \varphi_1)$ в точке M и ***оптической разностью хода*** $\Delta = L_2 - L_1 = l_2 n_2 - l_1 n_1$. При распространении лучей в однородной среде показатели преломления $n_2 = n_1$, а например, в воздухе принимают $n = c/\upsilon = 1$. Тогда

$$(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta$$

Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн в вакууме

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \qquad (m = 0,1,2,\ldots), \qquad (9.12)$$

т.е. колебания, возбуждаемые в точке M обеими волнами, будут происходить в одинаковой фазе. Следовательно (9.12) является ***условием интерференционного максимума.*** Если

$$\Delta = \pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2}, \qquad (m = 0,1,2,\ldots), \qquad (9.13)$$

т.е. колебания, возбуждаемые в точке M обеими волнами, будут происходить в противофазе. Следовательно (9.13) является ***условием интерференционного минимума.***

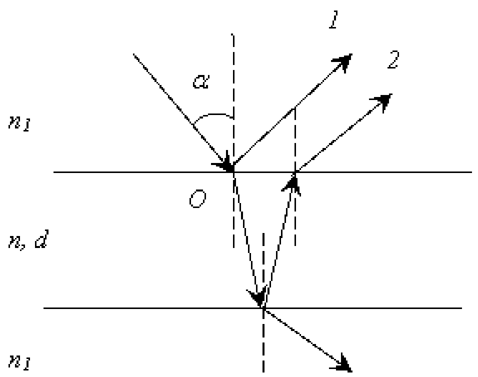


Рис. 9.7. Интерференция света в тонких пленках

Условия максимумов и минимумов при интерференции света, отражённого от верхней и нижней поверхностей тонкой плоскопараллельной плёнки (рис. 9.7), находящейся в воздухе ($n_0 = 1$) могут быть вычислены соответственно по выражениям:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \lambda_0/2 = m\lambda_0$$

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \lambda_0/2 = (2m+1)\lambda_0/2$$

Просветление оптики состоит в том, что на поверхность линзы наносится тонкая плёнка с показателем преломления меньшим, чем у материала линзы. Если оптическая толщина плёнки удовлетворяет условию $d = \lambda_0/(4n)$, то отражённые лучи от линзы и от плёнки дают интерференционный минимум. А это, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности света, проходящего сквозь линзу без потерь.

Существуют различные способы наблюдения двулучевой интерференции света на экране, осуществляемой делением волнового фронта и в которых создаётся оптическая разность хода Δ: от двух щелей в опыте Юнга (рис. 9.8), от зеркал и бипризмы Френеля (рис. 9.9), от зеркала Ллойда и т.п.

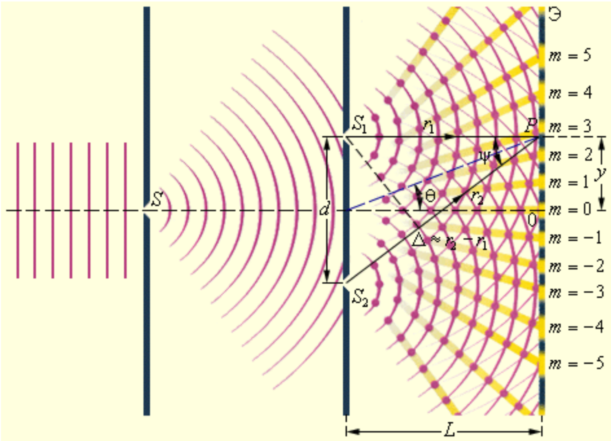


Рис. 9.8. Схема интерференционного опыта Юнга

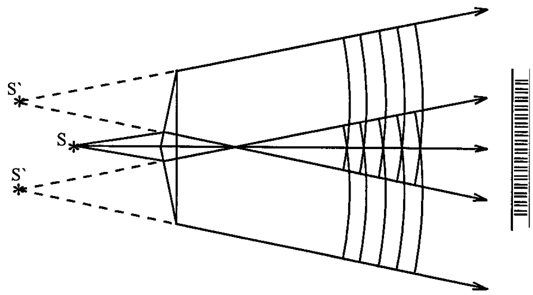


Рис. 9.9. Ход лучей в бипризме Френеля

4.Дифракция света

Дифракция - совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде вблизи непрозрачных тел, сквозь малые отверстия и т.д. и связанных с отклонениями от геометрической оптики.

Распространение волн объясняется с помощью ***принципа Гюйгенса***, согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн задаёт положение волнового фронта в следующий момент времени. Френель дополнил принцип Гюйгенса физическим содержанием, добавив в него идею *об интерференции вторичных волн, создаваемых фиктивными источниками.* Согласно принципу Гюйгенса – Френеля, световая волна, возбуждаемая каким-либо источником, может быть представлена как *результат суперпозиции вторичных волн, излучаемых когерентными фиктивными источниками.*

Френелем был предложен более простой способ нахождения амплитуды результирующих колебаний *для симметричных случаев дифракции, когда размер отверстия значительно больше длины волны.*

В спектральных приборах высокого класса применяются **дифракционные решетки**. Решетки представляют собой периодические структуры, выгравированные специальной делительной машиной на поверхности стеклянной или металлической пластинки (рис. 16.7). У хороших решеток параллельные друг другу штрихи имеют длину порядка 10 см, а на каждый миллиметр приходится до 2000 штрихов. При этом общая длина решетки достигает 10–15 см. Изготовление таких решеток требует применения самых высоких технологий.

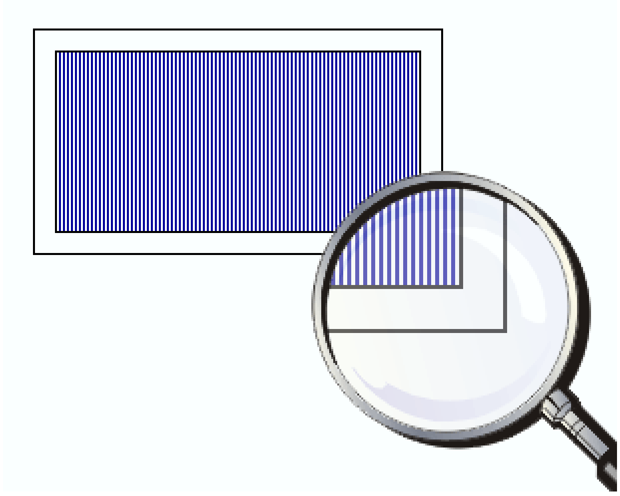


Рис. 9.10. Дифракционная решетка

Простейшая дифракционная решетка состоит из прозрачных участков (щелей), разделенных непрозрачными промежутками. На решетку с помощью коллиматора направляется параллельный пучок исследуемого света. Наблюдение ведется в фокальной плоскости линзы, установленной за решеткой (рис. 16.8). Полная дифракционная картина для двух щелей определяется следующими условиями:

$$a \cdot \sin\varphi = \pm m\lambda \quad (m = 1,2,3,...)$$ -главные минимумы (9.14)

$$d \cdot \sin\varphi = \pm m \cdot \lambda$$ - главные максимумы (9.15)

$$d \cdot \sin\varphi = (2m+1) \cdot \lambda/2$$ - дополнительные минимумы (9.16)

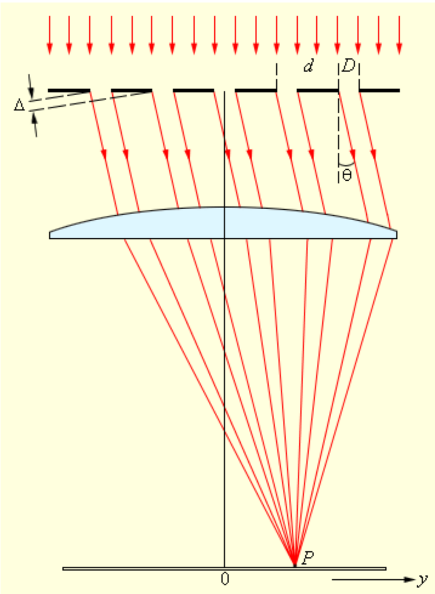


Рис. 9.11. Дифракция света на решетке

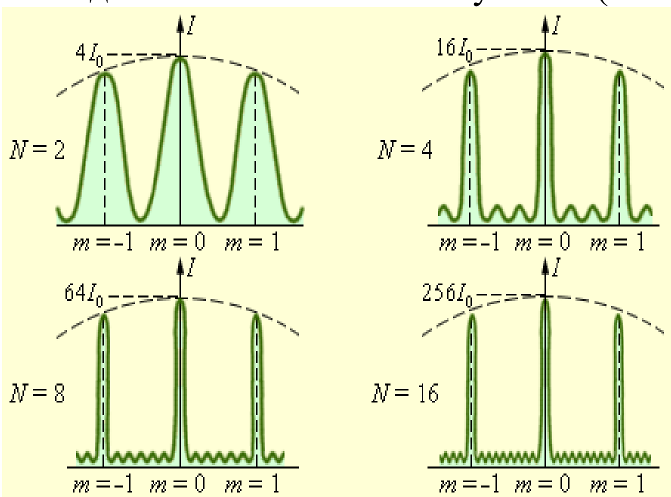


Рис. 9.12. Распределение интенсивности при дифракции монохроматического света на решетках с различным числом щелей. I_0- интенсивность колебаний при дифракции света на одной щели

На рисунке 16.9 показано распределение интенсивности света в дифракционной картине получаемой от двух щелей. Можно показать, что при N щелях между двумя главными максимумами будет располагаться (N -1) дополнительных минимума, разделенных вторичными максимумами, создающими весьма слабый фон. Чем больше щелей, тем больше энергии проходит через дифракционную решетку, тем больше минимумов образуется между главными максимумами, тем более интенсивными и более острыми будут сами максимумы.

Основными характеристиками дифракционной решётки являются *дисперсия* и *разрешающая сила*. **Дисперсия** определяет угловое расстояние между двумя спектральными линиями, отличающимися, по длине волны на единицу. **Разрешающая сила** определяет минимальную разность длин волн $\delta\lambda$, при которой две линии воспринимаются в спектре раздельно: $D = \dfrac{\partial\varphi}{\partial\lambda}$ и $R = \dfrac{\lambda}{\partial\lambda}$

5.Поляризация света

Свет представляет собой поперечные электромагнитные волны, в которых векторы E и H колеблются во взаимно перпендикулярных направлениях и перпендикулярны вектору скорости распространения волны v. Поэтому для полного описания состояния поляризации светового пучка достаточно знать поведение одного из этих векторов. Обычно рассматривается поведение вектора E (**световой вектор**). Это связано с тем, что взаимодействие света с веществом обусловлено именно электрической составляющей электромагнитной волны. Плоскость, в которой колеблется световой вектор, называется **плоскостью поляризации.**

Световая волна, излучаемая источником, представляет собой излучение огромного числа атомов, каждый из которых излучает свет независимо от других атомов. Поэтому в световой волне присутствуют колебания всевозможных направлений. Свет со всевозможными и равновероятными направлениями колебаний светового вектора получил название **естественного света**.

Свет, в котором колебания светового вектора, каким либо образом упорядочены (в результате внешнего воздействия) называется поляризованным.

Если колебания светового вектора происходят в одной плоскости, то такой свет называется плоско поляризованным.

За меру поляризации света принимается величина называемая **степенью поляризации**

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{I}_{max} - \mathrm{I}_{min}}{\mathrm{I}_{max} + \mathrm{I}_{min}} \ , \qquad (9.17)$$

где I_{max}, I_{min} - интенсивность колебания в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В частности для естественного света P = 0, так как $\mathrm{I}_{max} = \mathrm{I}_{min}$, а для плоско поляризованного света P = 1, так как $\mathrm{I}_{min} = 0$.

Естественный свет можно преобразовать в плоско поляризованный, используя для этого так называемые **поляризаторы,** пропускающие колебания только одного направления, например, кристаллы турмалина.

Если на пути светового луча поставить пластинку, определенным образом вырезанную из кристалла турмалина, то при вращении пластинки вокруг направления распространения луча, не наблюдается ни каких изменений в интенсивности луча, прошедшего через пластинку. Таким образом, световая волна, падающая на турмалин от обычного источника, не обнаруживает асимметрии по отношению к направлению распространения. Иначе будет обстоять дело, если на пути луча, вышедшего из первой пластинки установить вторую такую же пластинку (рис. 7.8). В зависимости от того, как ориентированы эти пластинки интенсивность света, вышедшего из второй пластинки, меняется от максимальной (пластинки параллельны) до нуля (полное гашение) (пластинки взаимно перпендикулярны). **Малюс** на опыте установил, что **интенсивность света, прошедшего вторую пластинку изменяется по закону**

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi \qquad (9.18)$$

где I_0- интенсивность света, падающего на вторую пластинку.

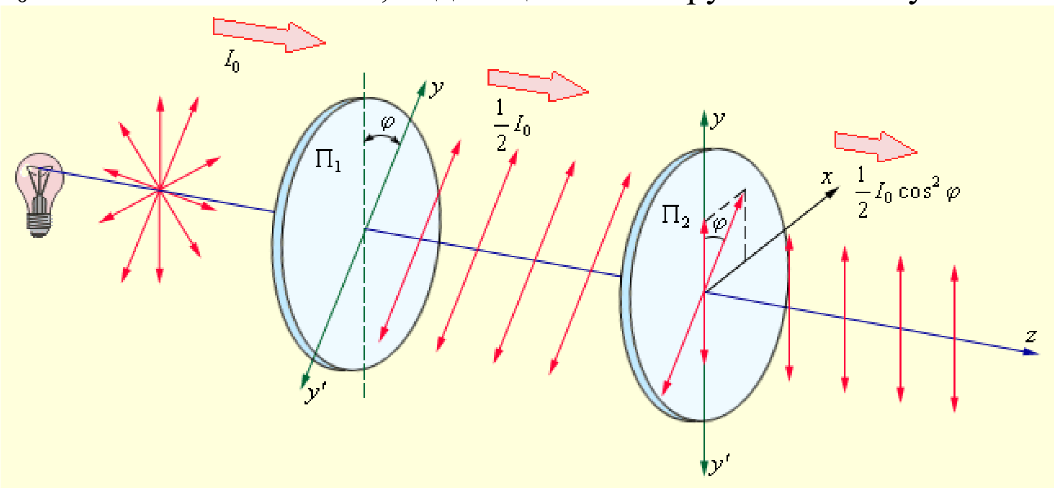


Рис.9.13. Прохождение естественного света через два идеальных поляроида

Результаты этого опыта можно объяснить следующим образом. Первая пластинка, пропуская свет только одного направления, преобразует естественный свет в плоско поляризованный и поэтому называется **поляризатором**. Вторая пластинка служит для определения степени поляризации света и называется **анализатором.** Если оптические оси поляризатора и анализатора параллельны, то свет проходит через анализатор без изменения. Если оптическая ось анализатора перпендикулярна оптической оси поляризатора, то анализатор не пропускает колебаний и интенсивность света, проходящего через вторую пластинку, будет равна нулю.

Если естественный свет с интенсивностью $I_{ест}$ пропустить через две пластинки, то интенсивность света, вышедшего из первой пластинки и падающего на вторую пластинку, будет $I_0 = \frac{1}{2} \cdot I_{ест}$ и тогда **закон Малюса** будет иметь вид:

$$I = \frac{1}{2} \cdot I_{ест} \cdot \cos^2 \varphi \tag{9.19}$$

Примеры применения поляризации:

Ячейка Керра (кювета заполненная жидкостью и два электрода) служит идеальным световым затвором и широко применяется в исследовании быстропеременных процессов(фото и киносъемка, запись и воспроизведение звука, оптоволоконная связь и др.). Если на электроды подать напряжение, то жидкость становится анизотропной и, свет будет проходить через систему. При изменении напряжения на электродах будет изменяться и интенсивность света, проходящего через систему.

Основано на эффекте Керра – оптической анизотропии вещества под действием электрического поля. Это явление практически безинерционно, т.е. переход из одного состояния в другое происходит за время порядка 10^{-10} с.

Некоторые вещества в твердом и жидком состоянии обладают способностью вращать плоскость поляризации света. Такие вещества получили название оптически активных веществ.

Мы уже указывали на то, что свет не проходит через скрещенные поляроиды и поле зрения будет темным. Если же между анализатором и поляризатором поместить кювету с оптически активным веществом, то поле зрения просветляется. Чтобы снова его сделать темным, анализатор надо повернуть на некоторый угол φ . Это и есть тот угол, на который поворачивает плоскость поляризации оптически активное вещество.

Это явление широко применяется для определения концентрации вещества (например, сахара в крови человека).

Вопросы для самоконтроля.

2. Закон прямолинейного распространения света.
3. Закон независимости световых пучков.
4. Закон отражения света.
5. Закон преломления света.
6. Абсолютный и относительный показатели преломления (определения).
7. Явление полного внутреннего отражения.
8. Что такое линза? Какие бывают линзы.
9. Фокус линзы. Фокусное расстояние. Главная оптическая ось, побочная оптическая ось.
10. Формула линзы.
11. Что такое оптическая сила линзы?
12. Что такое интерференция света?
13. Что такое когерентность?
14. Знать условие интерференционного максимума.
15. Знать условие интерференционного минимума.

16. Что такое дифракция света?
17. Принцип Гюйгенса.
18. Принцип Гюйгенса-Френеля.
19. Что такое дисперсия света?
20. Что такое поляризация света?
21. Какой свет называется естественным, поляризованным, плоско поляризованным?
22. Что такое степень поляризации?
23. Закон Малюса.
24. Что такое поляризатор и анализатор?

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Глаз. Очки. Оптические приборы.
2. Интерферометры.
3. Дифракция Фраунгофера от щели и многих щелей. Формула Вульфа-Бреггов.
4. Основы теории относительности
5. Тепловое излучение.
6. Квантовые явления в оптике.
7. Теория Бора. Элементы квантовой механики.
8. Уравнение Шредингера.
9. Физика атомного ядра.

Литература:

а) основная:

1. **ЭБС «Университетская библиотека ONLINE»:** Пронин, Б. В. Физика: учебник. - М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2012. – 445 с.
2. **ЭБС «Университетская библиотека ONLINE»:** Никеров, В. А. Физика. Современный курс: учебник. - М.: Дашков и Ко, 2012. – 452 с.
3. **ЭБС «Университетская библиотека ONLINE»:** Курбачев, Ю. Ф. Физика: учеб. пособие. - М.: Евразийский открытый институт, 2011. – 216 с.
4. **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. - 17-е изд., стер. - М. : Академия, 2008. - 560 с.
5. **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова ; Т. И. Трофимова. - 18-е изд., стер. - М. : Академия, 2010. - 560 с. - (Высшее профессиональное образование. Гр.).
6. **Трофимова, Т. И.** Физика: учебник для студентов вузов по техн. направлениям подготовки / Т. И. Трофимова ; Т. И. Трофимова. - М. : Академия, 2012. - 320 с. - (Высшее профессиональное образование. Бакалавриат).
7. **Грабовский, Р. И.** Курс физики : учеб. пособие для студентов вузов по естественнонауч. и техн. направлениям и специальностям / Р. И. Грабовский ; Р. И. Грабовский. - 12-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2012. - 608 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература. Гр.).
8. **Практикум по механике и молекулярной физике** : учеб. пособие для студентов вузов / С. И. Любая [и др.] ; С. И. Любая [и др.] ; СтГАУ. - Ставрополь, 2010. - 56 с.

б) дополнительная:

1. **Трофимова, Т.И.** Курс физики. Задачи и решения: учеб. пособие для студентов вузов по техн. направлениям и специальностям /Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов. – 4-е изд., испр. – М.: Академия, 2011. – 592 с.
2. **Практикум по электричеству и магнетизму** : учеб. пособие для студентов вузов по специальностям: 1100201.65 "Агрономия", 110203.65 "Защита растений", 250203.65 "Садово-парковое и ландшафтное стр-во" и направлениям: 110200.62 "Агрономия (бакалавр с.х.)", 020800.62 "Экология и природопользование (бакалавр с.х.)", 110110.62 "Агрохимия и агропочвоведение (бакалавр

с.х.)", 020700.62 "Почвоведение (бакалавр)" / О. С. Копылова [и др.] ; О. С. Копылова [и др.]; СтГАУ. - Ставрополь, 2011. - 54 с.

3. **Практикум по оптике** : учеб. пособие для студентов вузов по направлениям: 110400.62 "Агрономия", 260100.62 "Продукты питания из растит. сырья", 022000.62 "Экология и природопользование", 250700.62 "Ландшафтная архитектура", 110110.62 "Агрохимия и агропочвоведение", 020700.62 "Почвоведение" / В. И. Хайновский [и др.] ; В. И. Хайновский [и др.] ; СтГАУ . - Ставрополь, 2011. - 32 с.
4. **Ковалева, Г. Е.** Механика и молекулярная физика : учеб. пособие для студентов вузов по направлению 080800 "Прикладная информатика (по отраслям)" и другим экон. специальностям / Г. Е. Ковалева, Г. П. Стародубцева ; Г. Е. Ковалева, Г. П. Стародубцева ; СтГАУ. - Ставрополь, 2011. - 186 с. - (Гр. УМО).
5. **Стародубцева, Г. П.** Методическое пособие по общей физике : учеб. пособие для студентов вузов агроинженерных направлений и специальностей. Ч. 3 : Оптика и атомная физика / Г. П. Стародубцева, Е. И. Рубцова, И. А. Боголюбова ; Г. П. Стародубцева, Е. И. Рубцова, И. А. Боголюбова ; СтГАУ. - Ставрополь, 2011. - 124 с. - (Гр. УМО).
6. **Крахоткин, В. И.** Электричество и магнетизм : учеб. пособие для студентов вузов по спо направлению 110300 - Агроинженерия / В. И. Крахоткин ; СтГАУ. - Ставрополь : АГРУС, 2006. - 220 с. - (Гр. МСХ РФ).
7. **Крахоткин, В. И.** Механика и молекулярная физика : учеб. пособие для студентов вузов по направлению 110300 - Агроинженерия / В. И. Крахоткин ; СтГАУ. - Ставрополь : АГРУС, 2006. - 208 с. - (Гр. МСХ РФ).
8. **Стародубцева, Г. П.** Оптика и строение атома : учеб. пособие для студентов вузов по направлению 110300 - "Агроинженерия" / Г. П. Стародубцева, В. И. Крахоткин ; СтГАУ. - Ставрополь : АГРУС, 2007. - 172 с. - (Гр. МСХ РФ).

Интернет-ресурсы:

http:class-fizika.narod.ru/snakom 1.htm	http://www.virtulab.net/
http://interfizika.narod.ru	http://physics.ru/
http://urok 1.edusite.ru	http://www.all-fizika.com/
http://markx.narod.ru/pic/	

На информационном сайте вуза, сайте кафедры в личном кабинете преподавателей размещены электронные конспекты лекций, экзаменационные вопросы, лабораторные практикумы и рабочие тетради, применяемые для познавательной деятельности студентов.