ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЕ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ» (МИИТ)

В.А. НИКИТЕНКО,
А.П. ПРУНЦЕВ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ФИЗИКЕ

для довузовской подготовки

МОСКВА–2014

УДК 621.301 (075.8)
Н62

Авторы: Никитенко Владимир Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор;
Прунцев Александр Петрович, канд. тех. наук, профессор

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ФИЗИКЕ
ДЛЯ ДОВУЗОВСКОЙ ПОДГОТОВКИ**

*Рекомендовано решением кафедры “Физика” МИИТ
в качестве конспекта лекций для слушателей
факультета довузовской подготовки*

Предлагаемый конспект лекций представляет собой теоретический материал, прочитанный авторами на факультете довузовской подготовки МИИТ с целью овладения слушателями основными вопросами и понятиями школьного курса физики, необходимыми для ответа на теоретические вопросы и решения задач. Пособие будет полезно учащимся старших классов средних школ для подготовки к Государственной итоговой аттестации (ГИА) и единому государственному экзамену (ЕГЭ), а также студентам колледжей и студентам младших курсов технических вузов.

Каждая лекция имеет глоссарий и контрольные вопросы для повторения, что помогает быстрому усвоению прорабатываемого материала.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый краткий конспект лекций по физике для поступающих в вуз написан на основе лекционного материала, прочитанного авторами на факультете довузовской подготовки МИИТа и по своему объему примерно соответствует тому, что реально может записать учащийся на лекции. Учебное пособие не заменит живого общения с лектором, также как и подробные школьные учебники по физике, но может оказаться весьма полезным в виде компактного справочного руководства по основным физическим вопросам и понятиям, требующим усвоения перед практическими занятиями, направленными на приобретение навыков решения задач по физике.

Каждая лекция имеет глоссарий и контрольные вопросы для повторения, что, надеемся, поможет систематизации основных положений школьного курса физики. В качестве учебного пособия для практических занятий рекомендуем задачник: Ильин С.И., Никитенко В.А., Прунцев А.П. Сборник задач по физике для довузовской подготовки. – М., МИИТ, 2014.

Авторы признательны всем преподавателям кафедры «Физика» МИИТ за обсуждение отдельных разделов лекций. Отдавая себе отчет в том, что данное учебное пособие не лишено недостатков, мы с благодарностью примем все пожелания и замечания; просим направлять их по адресу: 101475, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, 9 стр.9. МИИТ, кафедра «Физика».

Авторы

Лекция №1

1.1. Введение

Физика представляет собой науку о простейших и вместе с тем наиболее общих формах движения материи и законах природы. В современном естествознании физика — одна из ведущих наук о природе, поскольку с помощью физики можно объяснить основные химические процессы, понять многие биологические закономерности и даже описать элементы самоорганизации в природе.

Слово “*физика*” происходит от греческого понятия “physis”, то есть природа. Во времена Аристотеля (384-322 гг. до нашей эры), патриарха физики, предметом исследования была совокупность всех природных явлений.

Развитие физики в современном понимании началось в XVII веке и, в первую очередь, связано с именами Г. Галилея (1564-1642 гг.) и И. Ньютона (1643-1727 гг.). Именно эти великие учёные заложили начала классической физики — механики (*классическая механика*), которая часто называется механикой Галилея-Ньютона. Её основополагающим отличием от учения Аристотеля является наличие математического описания движения и представление о том, что воздействие на исследуемое тело других объектов определяет не скорость (как считалось в учении Аристотеля), а ускорение тела.

Дальнейшее развитие физики показало, что классическая механика, описывающая движение только макроскопических тел со скоростями значительно меньшими, чем скорость света в вакууме ($c=3\cdot10^8$ м/с), является частным случаем релятивистской механики, когда скорости тела сравнимы со скоростью света. Эта новая механика основана на специальной теории относительности А. Эйнштейна.

Для рассмотрения движения микрочастиц необходимо введение квантовой механики, где используются совсем иные законы и понятия.

1.2. Система отсчёта. Язык кинематики

Классическая механика — раздел физики, в котором изучаются закономерности механического движения тел и причины, влияющие на это движение. При этом под механическим движением обычно понимается изменение взаимного расположения тел или их частей относительно друг друга с течением времени.

Физика, как и любая другая наука, использует при рассмотрении конкретных ситуаций довольно много весьма полезных приближений — абстракций. Например, при решении целого ряда задач, связанных с движением тела пренебрегают его деформацией, вводя понятие **абсолютно твёрдого тела**, у которого взаимное расположение его частиц не меняется при движении, или используют понятие **материальная точка**, под которой имеют в виду тело, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, а внутреннюю структуру не учитывать.

Механика обычно делится на три больших раздела: *кинематику, динамику и статику*.

Кинематика изучает движение тел без учёта причин, вызывающих и изменяющих движение. **Динамика** эти причины исследует, формируя законы движения. **Статика** рассматривает условия равновесия тел и, по сути, законы статики являются частным случаем законов динамики.

Наша первая лекция посвящена кинематике. Остановимся на основных понятиях этого раздела.

Механическое движение относительно. Говоря о движении какого-либо тела, необходимо указать относительно каких других тел перемещается рассматриваемый объект. Тело (или совокупность тел), которое условно считается неподвижным и по отношению к которому рассматривается движение других тел называется телом отсчёта. Движение тел рассматривают в **системе отсчёта**, представляющей собой тело отсчёта, жестко связанную с ним систему координат и выбранный способ измерения времени.

Пример. Пусть материальная точка переместилась за время Δt из позиции N в позицию M, которые мы фиксируем в прямоугольной (декартовой) системе координат, рис. 1.1.

В заданный момент времени положение точки по отношению к этой системе характеризуется тремя координатами x, y, z или радиусом-вектором **r**(t), проведённым из начала координат в данную точку.

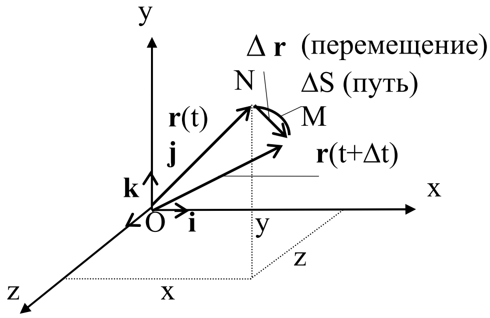


Рис. 1.1

Движение материальной точки определяется скалярными уравнениями

$$x=x(t);\ y=y(t);\ z=z(t), \qquad (1.1)$$

которым соответствует векторное уравнение

$$\mathbf{r}=\mathbf{r}(t), \qquad (1.2)$$

где $\mathbf{r}=x\mathbf{i}+y\mathbf{j}+z\mathbf{k}$. В данном обозначении **i**, **j** и **k** являются единичными векторами (ортами) координатных осей x, y и z.

Совокупность последовательных положений, которые занимает материальная точка при своём движении, называется **траекторией** (годограф вектора **r**(t)).

Путь — это неотрицательная скалярная величина, равная расстоянию, пройденному материальной точкой вдоль её траектории (s или в обозначении на рис. 1.1 — Δs).

Вектор Δ**r**, проведённый из начального положения движущейся точки (в момент времени t, см. рис. 1.1) в положение, занимаемое ей в данный момент времени (приращение радиуса-вектора точки за рассматриваемый промежуток времени Δt), называется **перемещением** (при этом $\mathbf{r}(t+\Delta t)=\mathbf{r}(t)+\Delta\mathbf{r}$).

При прямолинейном движении модуль перемещения $|\Delta\mathbf{r}|$ равен пройденному телом пути Δs, если движение происходило в неизменном направлении.

Векторную величину, характеризующую направление и быстроту перемещения материальной точки относительно тела отсчёта, называют **скоростью**. В нашем случае

$$\langle\mathbf{v}\rangle=\Delta\mathbf{r}/\Delta t \text{ [м/с]} \tag{1.3}$$

является вектором средней скорости, его направление совпадает с направлением $\Delta\mathbf{r}$ и зависит от Δt. При неограниченном уменьшении Δt средняя скорость $\langle\mathbf{v}\rangle$ стремится к предельному значению, которое получило название **мгновенной скорости** (начало дифференциального исчисления в математике):

$$\mathbf{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t}=\frac{d\mathbf{r}}{dt}\ . \tag{1.4}$$

Таким образом, **мгновенная скорость v** есть векторная величина, равная первой производной радиуса-вектора движущейся материальной точки по времени. В пределе (см. рис. 1.1) вектор $\mathbf{v}$ будет совпадать с касательной к траектории в направлении движения, путь Δs будет практически неотличим от $|\Delta\mathbf{r}|$, т.к. $\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{|\Delta\mathbf{r}|}{\Delta s}\to 1$, поэтому модуль мгновенной скорости можно представить в виде:

$$\upsilon=|\mathbf{v}|=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta\mathbf{r}|}{\Delta t}=\frac{ds}{dt}\ . \tag{1.5}$$

Часто приходится рассчитывать **среднюю путевую скорость** (скалярная величина)

$$\langle\upsilon\rangle_{п}=\frac{s}{t}, \tag{1.6}$$

которую на транспорте называют маршрутной скоростью (маршрутная скорость московского метро составляет около 40 км/ч).

Пример. Катер двигался по течению реки из пункта А в пункт Б со скоростью υ_1, а обратно со скоростью υ_2. Найти маршрутную скорость катера при движении.

Решение: $\langle \upsilon \rangle_{п} = \dfrac{2s}{\dfrac{s}{\upsilon_1} + \dfrac{s}{\upsilon_2}} = \dfrac{2\upsilon_1\upsilon_2}{\upsilon_1 + \upsilon_2}$.

Скорость тел при движении может изменяться. Физическую величину, характеризующую быстроту изменения скорости по модулю и направлению, назвали **ускорением**.

Средним ускорением является отношение

$$\langle \boldsymbol{a} \rangle = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta \mathrm{t}} \quad \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right], \tag{1.7}$$

мгновенным — первая производная скорости по времени

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \ . \tag{1.8}$$

В декартовой системе координат модуль мгновенного ускорения определяется как

$$a = \sqrt{a_{\mathrm{x}}^2 + a_{\mathrm{y}}^2 + a_{\mathrm{z}}^2} \ . \tag{1.9}$$

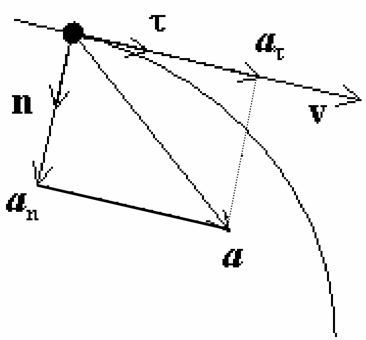


Рис. 1.2

Как показывает эксперимент, вектор ускорения при криволинейном движении направлен под произвольным углом к направлению вектора скорости (рис. 1.2, подробнее в динамике). Его можно разложить на две составляющих: $\boldsymbol{a}_\tau$ — касательное или тангенциальное ускорение и $\boldsymbol{a}_{\mathrm{n}}$ — нормальное или центростремительное ускорение, то есть

$$\boldsymbol{a}_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}\boldsymbol{\tau} \text{ и } \boldsymbol{a}_n = \frac{\upsilon^2}{R}\mathbf{n} \ , \tag{1.10}$$

при этом $\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}_\tau+\boldsymbol{a}_n$, $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$.

В данном случае $\boldsymbol{\tau}$ и $\mathbf{n}$ — единичные векторы в направлении соответственно вдоль и перпендикулярно вектору скорости, R — радиус кривизны траектории. Дело в том, что любой небольшой участок произвольно искривленной линии можно приближённо рассматривать как дугу окружности, которая будет сливаться с линией на бесконечно малом её участке. Радиус этой окружности и получил название радиуса кривизны траектории.

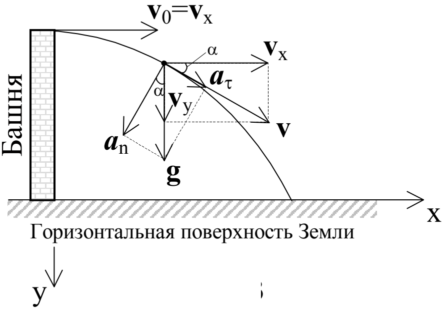


Рис. 1.3

Нормальное ускорение $\boldsymbol{a}_n$ характеризует быстроту изменения скорости по направлению, **касательное $\boldsymbol{a}_\tau$** – по модулю.

Пример. Баллистическое движение, рис. 1.3.

Примечание: для случая свободного падения (в вакууме) Галилей постулировал, что все тела будут падать с одинаковым постоянным ускорением **g**, его значение равно g≈9,8 м/с^2.

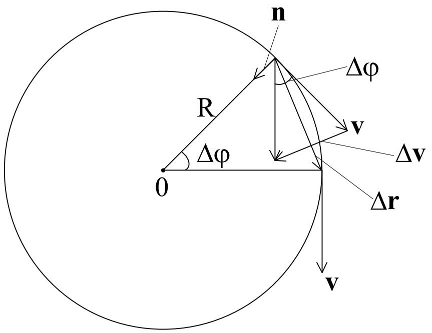


Рис. 1.4

Пример. Равномерное (|**v**|=const) движение точки по окружности, рис. 1.4.

Примечание: из подобия треугольников имеем

$$\frac{|\Delta \mathbf{v}|}{\upsilon} = \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{R} \text{ или } \frac{|\Delta \mathbf{v}|}{\upsilon \cdot \Delta t} = \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{R \cdot \Delta t},$$

откуда $a = \dfrac{\upsilon^2}{R}$; в пределе при

$\Delta t \to 0$, $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_n = \dfrac{\upsilon^2}{R}\mathbf{n}$.

1.3. <u>Виды движения</u>

1.3.1. Общие замечания

Реальное движение тел обычно носит сложный характер. Для упрощения задачи пользуются *законом независимости движений*, согласно которому любое сложное движение можно представить как результат наложения независимых простейших движений. Например, простейшими движениями являются **поступательное** и **вращательное**.

В первом, **поступательном** движении все точки тела движутся по траекториям одинаковой формы и при этом имеют одинаковые скорости и ускорения. В этом плане рассмотрение поступательного движения тела удобно свести к изучению движения материальной точки. По виду траектории поступательное движение можно разделить на два типа движений: **прямолинейное** движение (траектория — прямая линия) и **криволинейное**, где траектория представляет собой произвольную кривую.

Во втором, **вращательном** движении все точки абсолютно твёрдого тела движутся по окружностям, центры которых находятся на одной прямой, называемой осью вращения, при этом окружности лежат в плоскостях, перпендикулярных этой оси.

Примером сложного движения, которое можно разбить на поступательную и вращательную составляющие является движение колеса по дороге.

Если материальная точка участвует одновременно в нескольких движениях, то результирующее перемещение и результирующая скорость находятся по правилу сложения векторов.

1.3.2. Равномерное движение

Если материальная точка за равные, сколь угодно малые промежутки времени, проходит одинаковые пути, то такое её движение называется **равномерным** (υ=const).

В случае равномерного прямолинейного движения сохраняется и направление вектора скорости, то есть

$$\mathbf{v}=\text{const}\ . \tag{1.11}$$

Согласно (1.5) модуль вектора скорости можно представить как первую производную от пути по времени, откуда

$$s=\int_0^s ds=\int_0^t \upsilon dt=\upsilon t\ . \tag{1.12}$$

Пример. Материальная точка равномерно движется вдоль прямой.

Если ось координат x взять вдоль направления движения, то проекция скорости точки υ_x ,будет равна величине вектора скорости $\upsilon_x=\upsilon$, поэтому, опуская индекс x, запишем

$$\upsilon = \frac{x - x_0}{t} , \qquad (1.13)$$

где x_0 — координата материальной точки в момент времени t=0.

В результате имеем

$$x = x_0+\upsilon t . \qquad (1.14)$$

Если скорость направлена в направлении противоположном оси x, то часто записывают

$$x = x_0-\upsilon t , \qquad (1.15)$$

где под υ уже однозначно понимают модуль вектора скорости, или же в выражении (1.15) сохраняют знак плюс, в таком случае считая υ величиной вектора скорости.

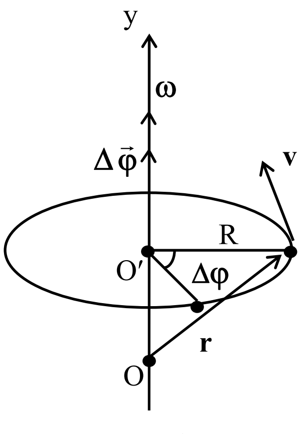


Рис. 1.5

Рассмотрим равномерное движение при вращении какого-либо тела, выделяя в нём конкретную точку, поворачивающуюся относительно, например, оси y на угол $\Delta\varphi$ или взяв в качестве примера обращение материальной точки относительно этой же оси, рис. 1.5 (точка 0 — начало координат, точка 0′ — центр окружности, ось y — ось вращения). При вращательном движении вводят понятие — **вектор угла поворота** $\Delta\vec{\varphi}$, который направлен вдоль оси вращения. Ориентация этого вектора определяется правилом буравчика (рукоятка буравчика вращается вслед за рассматриваемой точкой — рис. 1.5, а направление его поступательного движения задаёт направление вектора $\Delta\vec{\varphi}$). При векторной форме задания угла поворота, его величина считается небольшой.

Векторная величина **ω** (омега), характеризующая быстроту поворота точки, называется её **угловой скоростью**:

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} \text{ или лучше } \boldsymbol{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \ . \tag{1.16}$$

При равномерном вращении угловая скорость постоянна:

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{\varphi}{t} \ , \tag{1.17}$$

где φ — угол поворота за время t. Угол поворота измеряется в радианах (рад), угловая скорость (рад/с).

При равномерном вращении постоянен и модуль линейной скорости |**v**| (упрощённо просто υ). Исходя из того, что радиан соответствует расстоянию по окружности, равному её радиусу имеем:

$$\upsilon = \omega \cdot R \ . \tag{1.18}$$

В более общем плане **v** = [**ω**,**r**].

Равномерное вращение характеризуется периодом вращения T, под которым понимают промежуток времени за который рассматриваемая точка поворачивается на угол φ = 2π. В результате можем записать

$$T = \frac{2\pi R}{\upsilon} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{\nu} \ , \tag{1.19}$$

где ν — частота вращения, равная числу оборотов в единицу времени. Модуль угловой скорости ω часто называют круговой частотой.

1.3.3. Равнопеременное движение

Равнопеременное движение точки соответствует условию, когда касательное ускорение (в случае прямолинейного движения полное ускорение) постоянно. Важно понять, что движение с постоянным ускорением может и не быть прямолинейным, например, при невертикальном бросании тела с башни (рис. 1.3) полное ускорение **g** всегда направлено к центру Земли, если, конечно, отсутствует боковое усилие в процессе его полёта.

В качестве примера равнопеременного движения рассмотрим движение материальной точки в направлении оси x, рис. 1.6.

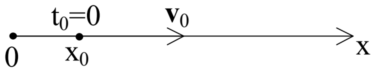


Рис. 1.6

Если при равнопеременном прямолинейном движении направление вектора ускорения $\boldsymbol{a}$ совпадает с направлением вектора начальной скорости $\mathbf{v}_0$, то такое движение называется **равномерно ускоренным** (обычно называют просто — *равноускоренным*), если — противоположно, то **равномерно замедленным** (*равнозамедленным*).

Из определения ускорения имеем:

$$\boldsymbol{a} = \frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}_0}{t - t_0}\ , \tag{1.20}$$

если для удобства анализа возьмём t_0=0, то получим

$$\mathbf{v}=\mathbf{v}_0+\boldsymbol{a}t\ . \tag{1.21}$$

В нашем примере (рис. 1.6) $\upsilon_0>0$, так как вектор $\mathbf{v}_0$ направлен вдоль положительного направления оси x. Если ускорение $\boldsymbol{a}$ совпадает с направлением вектора $\mathbf{v}_0$, то $a>0$, если не совпадает, то $a<0$. Следует иметь в виду, что при $a<0$ величина вектора скорости может оказаться и отрицательной. Можно внести знак плюс или минус в саму формулу (1.21), тогда

$$\upsilon=\upsilon_0\pm at\ , \tag{1.22}$$

в этом варианте υ — величина скорости материальной точки и a представляет собой модуль её ускорения.

С учётом (1.22) координата x может фиксироваться с помощью уравнения

$$x = x_0 + \langle\upsilon\rangle t = x_0 + \frac{\upsilon_0 + \upsilon}{2}t = x_0 + \upsilon_0 t \pm \frac{at^2}{2}. \tag{1.23}$$

Если направление вектора $\mathbf{v}_0$ по оси x имеет два варианта (вдоль и против положительного направления), то выражение (1.23) запишется как

$$x = x_0 \pm \upsilon_0 t \pm \frac{at^2}{2}\ , \tag{1.24}$$

где υ_0 — модуль вектора начальной скорости.

Если в системе уравнений (1.22), (1.23) исключить время, то получим весьма полезное при решении ряда задач уравнение (следует запомнить):

$$\upsilon^2 = \upsilon_0^2 \pm 2a(x - x_0)\ , \tag{1.25}$$

которое при движении в одном направлении имеет вид*

$$\upsilon^2 = \upsilon_0^2 \pm 2as \ . \qquad (1.26)$$

Мы рассмотрели движение материальной точки вдоль одной из осей координат. Это удобно, так как при прямолинейном движении декартову систему координат можно развернуть таким образом, чтобы движение происходило в направлении выбранной оси.

В общем случае, если мы имеем в пространстве векторы, характеризующие движение:

равномерное прямолинейное $\mathbf{v}$=const, $\mathbf{r}=\mathbf{r}_0+\mathbf{v}t$ (1.27)

равноускоренное движение

$$\mathbf{v}=\mathbf{v}_0+\boldsymbol{a}t,\ \boldsymbol{a}=\text{const},\ \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 t + \frac{\boldsymbol{a}t^2}{2}\ , \qquad (1.28)$$

то для построения графиков движения и проведения расчётов (векторную функцию нельзя изобразить в виде графика) осуществляют проекцию векторов на оси координат.

1.3.4. Графики движения

Возьмём за основу вариант движения, показанный на рис. 1.6. Зная аналитические выражения, характеризующие отдельные виды движений (п. 1.3.3) легко получить и их графические представления, рис. 1.7.

На графиках представлены путь s, координата x и проекции векторов **v** и ***a*** на ось x в зависимости от времени для равномерного и равнопеременного движений.

Следует иметь в виду, что площадь под кривой, описывающей зависимость модуля вектора скорости от времени, можно рассматривать как путь, пройденный телом за интервал времени t_2-t_1=Δt, так как

$$s = \int_{t_1}^{t_2} \upsilon(t)dt \ . \qquad (1.29)$$

* Вывод важных кинематических формул (1.22, 1.23, 1.26) значительно упрощается, если воспользоваться понятием производной и интеграла (рассмотрим на практических занятиях).

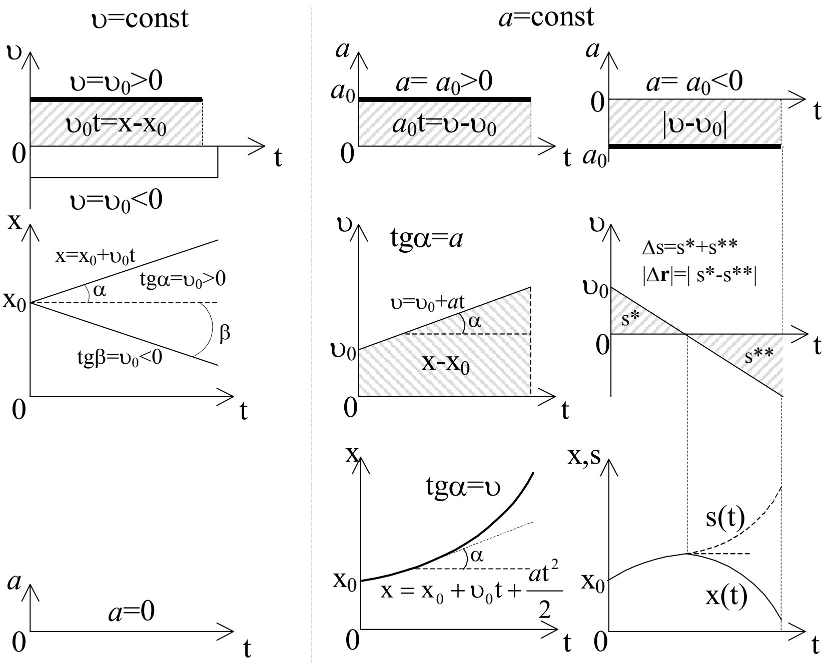


Рис. 1.7

1.4. <u>Кинематика в примерах</u>

Пример № 1. В чём неточность в определении равномерного прямолинейного движения?

… за равные промежутки времени тело совершает одинаковые перемещения вдоль прямой.

Дело в том, что за определённый промежуток времени, например за 1 час, тело может иметь и одинаковые перемещения, допустим 50 км (на автомобиле), но в первые 30 мин. можно проехать 20 км, а во вторые — 30 км, в целом будет 50 км, движение уже не будет равномерным.

Поэтому важно подчеркнуть, что тело за любые равные промежутки времени имеет одинаковые перемещения или за равные, сколько угодно малые промежутки времени, наблюдаются одинаковые перемещения, то есть $\mathbf{v}=\langle\mathbf{v}\rangle=\mathrm{const}$.

Пример № 2. Каков характер движения материальной точки, показанного на рис. 1.8?

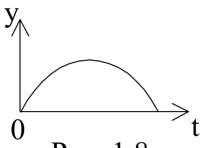


Рис. 1.8

Обычно отвечают, что это движение тела, брошенного под углом к горизонту. В этом случае путается зависимость координаты y=f(t) с уравнением траектории y=f(x). Зависимость, показанная на рис. 1.8 может соответствовать и телу, брошенному вертикально вверх вдоль оси y: $y = \upsilon_0 t - \dfrac{gt^2}{2}$.

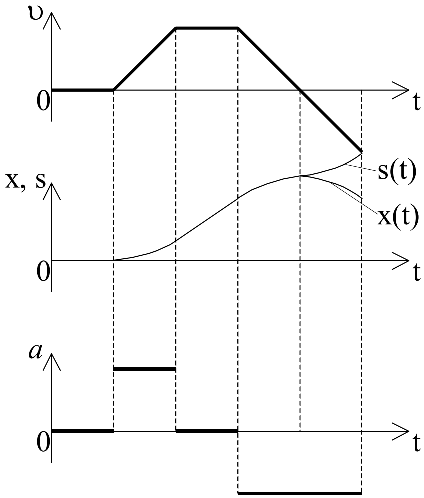


Рис. 1.9

Пример № 3. Дан график проекции скорости при движении вдоль оси x, рис. 1.9. Найти график координаты x(t), пути s(t) и проекции ускорения на ось x – *a*(t).

Примечание: путь — это скалярная, неотрицательная величина, которая не может уменьшаться.

Пример № 4. С моста высотой h, бросают одновременно два шарика: один — вертикально вверх со скоростью υ_{10}, а другой — вертикально вниз со скоростью υ_{20}, рис. 1.10. Найти промежуток времени Δt, отделяющий моменты их падения в воду.

а) $y = -\upsilon_{10} t_1 + \dfrac{gt_1^2}{2} = h \to t_1$; $y = \upsilon_{20} t_2 + \dfrac{gt_2^2}{2} = h \to t_2$;

$\Delta t = t_1 - t_2$.

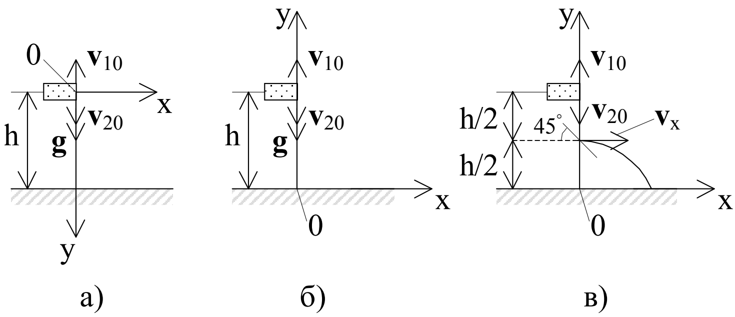


Рис. 1.10

б) $y = h + \upsilon_{10} t_1 - \dfrac{g t_1^2}{2} = 0$; $y = h - \upsilon_{20} t_2 - \dfrac{g t_2^2}{2} = 0$; $\Delta t = t_1 - t_2$.

в) На половине высоты моста происходит абсолютно упругий удар, и шарики отскакивают горизонтально.

Изменится ли t_1 и t_2 ?

Да, не будет скорости υ_y после отскока (задержка); $x=\upsilon_x \cdot t$.

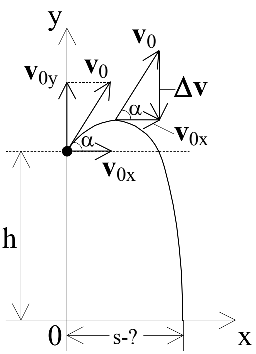


Рис. 1.11

Пример № 5. С моста высотой h под углом α к горизонту бросают мяч, рис. 1.11. Найти дальность полёта s, если начальная скорость υ_0.

$\upsilon_{0x}=\upsilon_0\cos\alpha$; $\upsilon_{0y}=\upsilon_0\sin\alpha$

x: $s= \upsilon_{0x}t$

y: $y = h + \upsilon_0 \sin\alpha \cdot t - \dfrac{g t^2}{2} = 0$

Чему равна υ_y в верхней точке подъёма?

Ответ: $\upsilon_y=0$.

А ускорение?

Ответ: **g** — везде одинаково.

Найти приращение вектора скорости точки за время от начала полёта до достижения наибольшей высоты подъёма?

$|\Delta\mathbf{v}|=\upsilon_0\sin\alpha$.

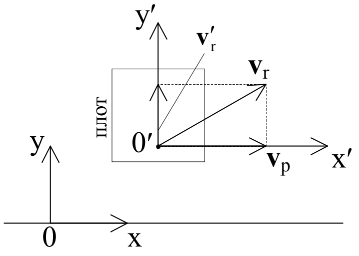


Рис. 1.12

Пример № 6. Человек идёт по плоту перпендикулярно берегу со скоростью $\mathbf{v}'_r$ относительно плота. Скорость течения реки относительно берега (ровные берега) — $\mathbf{v}_\text{р}$. Найти скорость человека относительно берега.

В данном случае работает закон сложения скоростей: скорость тела относительно неподвижной системы отсчёта равна векторной сумме скорости тела относительно подвижной системы отсчёта и скорости подвижной системы относительно неподвижной, рис. 1.12.

В результате $\upsilon_r = \sqrt{(\upsilon_p^2 + \upsilon_r')^2}$.

Пример № 7. Изобразить график зависимости центростремительного (нормального) ускорения a_n от радиуса окружности, по которой движется тело:

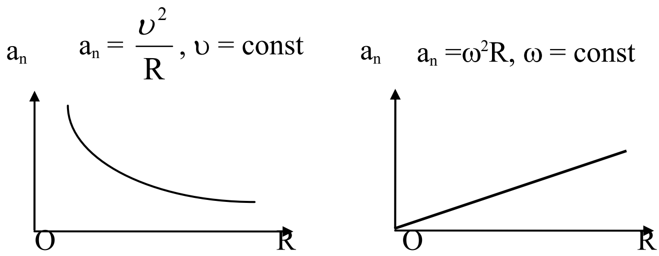


Рис. 1.13

В заключение, касаясь единиц измерения физических величин, заметим, что в кинематике (из семи используемых в системе СИ) вводятся: **метр** (м) — единица длины и **секунда** (с) — единица времени. Дополнительной единицей Международной системы является радиан — единица плоского угла.

Основными единицами измерения являются семь следующих: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела (свеча) и моль.

1.5. Глоссарий

Движение вращательное	–	движение, когда все точки тела движутся с одинаковой угловой скоростью по окружностям, центры которых находятся на одной прямой (ось вращения) и расположенных в плоскостях, перпендикулярных оси вращения.
Движение поступательное	–	движение, когда все точки тела движутся по траекториям одинаковой формы и при этом имеют одинаковые скорости и ускорения.
Кинематика	–	изучает движение тел, отвлекаясь от причин, вызвавших это движение.
Классическая механика	–	раздел физики, в котором изучается простейшая форма движения материи — перемещение тел или их частей относительно друг друга.
Материальная точка	–	тело, размерами которого можно пренебречь в условиях рассматриваемой задачи, а внутреннюю структуру не учитывать.
Перемещение	–	вектор, проведённый из начального положения тела в его конечное положение.
Период вращения	–	время, в течение которого материальная точка делает полный поворот относительно оси вращения.
Путь	–	между двумя точками пространства равен длине траектории между этими точками.
Система отсчёта	–	это система координат, жестко связанная с телом отсчёта, и выбранный способ измерения времени.
Скорость	–	векторная величина, характеризующая направление и быстроту перемещения материальной точки относительно тела отсчета.
Скорость мгновенная	–	первая производная перемещения по вре-

		мени. Вектор мгновенной скорости направлен по касательной к траектории в каждой её точке.
Скорость средняя	–	отношение перемещения материальной точки к отрезку времени, в течение которого реализовано это перемещение. Вектор средней скорости сонаправлен с вектором перемещения.
Скорость угловая	–	векторная величина, характеризующая быстроту поворота материальной точки.
Тело отсчёта	–	тело или группа тел, которые условно считают неподвижными и по отношению к которым рассматривается движение других тел.
Траектория	–	воображаемая линия, вдоль которой перемещается подвижный конец радиус-вектора.
Угол поворота	–	вектор, направленный вдоль оси вращения и характеризующий угловое перемещение тела.
Ускорение	–	векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости по абсолютной величине и направлению.
Ускорение касательное (тангенциальное)	–	составляющая ускорения, характеризующая изменение скорости по абсолютной величине.
Ускорение нормальное (центростремительное)	–	составляющая ускорения, характеризующая изменение скорости по направлению.
Физика	–	в современном естествознании — одна из ведущих наук о природе, исследующая простейшие свойства, общие для всех или многих явлений (академик С.И. Вавилов).

Основные вопросы для повторения:

1. Что такое физика?
2. Дайте определение основных разделов классической механики.
3. Введите понятие системы отсчёта.
4. Дайте определение основных кинематических параметров: путь, перемещение, скорость и ускорение.
5. Что такое траектория?
6. Рассмотрите на примерах касательное и нормальное ускорение тел.
7. Какие виды движений Вы знаете?
8. Запишите основные уравнения равномерного и равнопеременного движений, дайте их графическое представление.
9. Введите основные параметры вращательного движения.

Лекция № 2

2.1. Динамика. Общие замечания

Движение тел возникает и изменяется в результате взаимодействия. Взаимодействие может осуществляться как между непосредственно соприкасающимися телами или частицами вещества, так и удаленными друг от друга через так называемое физическое поле. Под **физическим полем** понимают особую форму материи, которая связывает частицы вещества в единые системы и передает с конечной скоростью действие одних частиц на другие.

К настоящему времени известны четыре класса фундаментальных взаимодействий: гравитационное ($r \to \infty$), электромагнитное ($r \to \infty$), сильное ($r \approx 10^{-15}$м) и слабое ($r \approx 10^{-18}$м).

Мерой механического взаимодействия тел является векторная величина **F**, которая называется **силой**. Измерение силы можно проводить статическими и динамическими способами. Первый способ – статический, основан на уравновешивании измеряемой силы с помощью другой, откалиброванной. Второй (динамический) использует основной закон динамики ускоренно движущегося тела.

2.2. Законы Ньютона

В основе динамики лежат три закона Ньютона, сформулированные в 1687 г. в его знаменитой работе «Математические начала натуральной философии». Рассмотрим последовательно эти законы.

Системы координат можно связывать с различными телами. Особо важный класс тел представляют невзаимодействующие или свободные тела. Свободным называют тело, настолько удаленное от всех остальных, что их воздействие на движение данного тела пренебрежимо мало. Размерами свободных тел часто можно пренебречь, считая их материальными точками. Свяжем с группой одинаково движущихся свободных тел систему координат. В такой системе отсчета, как показывает опыт, все другие свободные тела движутся равномерно и прямолинейно. Таким образом, для свободных тел справедливо утверждение: *существуют системы отсчета, в каждой из которых невзаимодействующие тела могут двигаться равномерно и* *прямолинейно* (или, как частный случай такого движения, находиться в состоянии покоя). Это утверждение носит название **I закона Ньютона** или закона инерции (основные выводы получены еще Г. Галилеем). Системы отсчета, связанные со свободно движущимися телами называют **инерциальными системами отсчета**. При условии введения меры механического воздействия – силы, этот закон можно сформулировать следующим образом: **материальная точка сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на нее не действуют никакие силы или действие сил взаимно скомпенсировано**, то есть

$$\text{если } \sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_i = 0, \text{ то } \upsilon = 0 \text{ или } \mathbf{v} = \text{const}, \tag{2.1}$$

где $\sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_i$ – равнодействующая всех сил, приложенных к данной точке. Таким образом, сила не накапливается, а ее компенсация приводит к равномерному прямолинейному движению.

Взаимодействие тел, как показывает опыт, вызывает изменение их скоростей

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i(t). \tag{2.2}$$

и, как следствие, их импульсов. Импульсом тела называют динамическую характеристику его движения, равную

$$\mathbf{p} = m\,\mathbf{v}. \tag{2.3}$$

Это векторная величина, которая в каждый момент времени совпадает по направлению с вектором мгновенной скорости. Коэффициент пропорциональности в (2.3) характеризует объект движения и его называют массой тела (измеряется в системе единиц СИ в килограммах – кг).

Таким образом, в процессе воздействия на данную материальную точку других тел ее импульс изменяется. В этом плане в качестве меры взаимодействия тел выбирается физическая величина, которая выражается через скорость изменения импульса и которую в динамическом понимании назвали силой:

$$\frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta t} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_i \text{ или точнее } \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_i. \tag{2.4}$$

Представленное равенство (2.4) носит название **II закона Ньютона.** Это фундаментальный закон классической физики: **скорость изменения импульса материальной точки равна равнодействующей всех приложенных к ней сил**. Его можно записать и в другой форме

$$\sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_\mathrm{i} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = \frac{dm}{dt}\mathbf{v} + m\frac{d\mathbf{v}}{dt}. \qquad (2.5)$$

Если m=const, то

$$\sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_\mathrm{i} = m\frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a} \qquad (2.6)$$

или

$$\mathbf{a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_\mathrm{i}}{m}. \qquad (2.7)$$

Ускорение материальной точки пропорционально равнодействующей всех приложенных к ней сил, обратно пропорционально ее массе и сонаправлено с равнодействующей сил (II закон Ньютона). Согласно (2.7) сила измеряется в кг·м/с^2, эта единица измерения получила название ньютон (Н).

Выражение (2.7) позволяет конкретизировать понятие массы. Из этого уравнения видно, что при одинаковой величине силы, воздействующей на тело, ускорение материальной точки тем меньше, чем больше ее масса. Свойство тел сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется инертностью (**инерцией**). Таким образом, материальная точка, получившая меньшее ускорение, будет более инертной, т.е. масса, входящая в формулу II закона Ньютона, характеризует инерцию тела и ее называют инертной массой. Опыт показывает, что с массой также связана способность тел притягиваться друг к другу (гравитационная масса).

Примеры

1. На тело, падающее на поверхность Земли действуют две силы: сила притяжения **F** (гравитация) и сила сопротивления воздуха $\mathbf{F}_C$. Направляя координатную ось вертикально вниз, имеем в проекциях на эту ось уравнение движения (см. уравнение 2.7):

$$F - F_c = ma. \qquad (2.8)$$

2. Согласно II закону Ньютона (см. 2.4 и 2.5) даже при малой величине равнодействующей силы при длительном воздействии можно сдвинуть с места тела очень большой массы – $\mathbf{F}\,\Delta\,t = \Delta\,\mathbf{p}$ (автомобиль, стоящий на дороге или вагон, находящийся на ровном железнодорожном пути может сдвинуть один человек). Наоборот, при кратковременном ударе (гашении импульса) можно получить огромное силовое воздействие, часто приводящее даже к разрушению тел.

Рассматривая замкнутую систему из двух материальных точек можно убедиться, что **силы их взаимодействия одинаковы по модулю и направлены в противоположные стороны вдоль соединяющей эти точки прямой**

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}. \tag{2.9}$$

Это утверждение носит название **III закона Ньютона**. Силы $\mathbf{F}_{12}$ и $\mathbf{F}_{21}$ называют силами действия и противодействия.

Пример. Человек, передвигая объемную мебель по полу (шкаф, диван и т.д.) прикладывает к ней определенное усилие, и, в свою очередь, получает противодействие $-\mathbf{F}_{21}$, равное по модулю и направленное противоположно воздействию человека на данный объект. Передвижение человека возможно только из-за наличия третьего объекта взаимодействия – пола, от которого он отталкивается. Важно понять, что силы, возникающие при взаимодействии тел, не могут уравновесить друг друга, так как приложены к разным телам.

Любая система отсчета, движущаяся по отношению к инерциальной системе отсчета (и.с.о) поступательно, равномерно и прямолинейно, является также и.с.о. И.с.о – это абстракция, ибо всегда существуют параллельно элементы криволинейного движения (например, Земля вращается вокруг собственной оси и вокруг Солнца).

Для и.с.о работает **принцип относительности**, согласно которому все законы физики одинаковы во всех и.с.о. Его частным случаем является **принцип относительности Галилея**: *во всех инерциальных системах отсчета при одинаковых начальных условиях все механические явления протекают одинаково, по одинаковым законам.*

Если система отсчета движется с ускорением, то в ней не будет выполняться ни I, ни II законы Ньютона. Чтобы I и II законы Ньютона работали в неинерциальных системах отсчета, к телам прикладывают так называемые силы инерции (они не обусловлены взаимодействием тел, к ним не применим III закон Ньютона) – $\mathbf{F}_{\text{ИНЕРЦ.}} = -m\mathbf{a}$.

Обсуждая законы Ньютона, мы пользовались понятием материальной точки, хотя размерами тела пренебречь нельзя по сравнению с размерами других тел. Однако, модель материальной точки часто применима, так как тела движутся во многих случаях только поступательно.

2.3. Закон всемирного тяготения. Сила тяжести

Этот закон сформулирован И. Ньютоном в 1682 году: **две любые материальные точки притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению масс этих точек и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними,** то есть

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}, \tag{2.10}$$

где $G = 6{,}67\cdot10^{-11}$ Н·м^2/кг^2 – гравитационная постоянная; m_1 и m_2 – гравитационные массы, которые определяют интенсивность притяжения; r – расстояние между взаимодействующими точками.

Падение тел на Землю в пустоте называется **свободным падением**, в этом случае

$$m_и g = G\frac{m_г M_З}{R_З^2}, \tag{2.11}$$

где $m_и$ и $m_г$ – соответственно инертная и гравитационная масса, $R_З$ и $M_З$ – соответственно радиус и масса Земли.

Опыты Галилея, показывающие, что все тела в пустоте падают с одинаковым ускорением, позволяют считать $m_и = m_г$ (современные эксперименты подтверждают это с погрешностью до 10^{-12}), поэтому

$$g = G\frac{M_З}{R_З^2} \cong 9{,}8\,\frac{м}{с^2}. \tag{2.12}$$

Равенство для всех веществ инертной и гравитационной масс получило название **принципа эквивалентности**.

Силу mg, с которой Земля притягивает к себе тела называют **силой тяжести**, точку приложения этой силы – **центром тяжести тела**[1]**.**

Все силы, которые мы будем в дальнейшем показывать на чертежах, при отсутствии вращения тела, будут приложены к этой точке.

2.4. Силы упругости. Закон Гука

Изменение формы или размеров тела называют **деформацией**. Причина деформации кроется в различных ускорениях у отдельных частей тела.

Силы упругости – это силы, появляющиеся при деформации тела и направленные в сторону восстановления его прежних форм и размеров под прямым углом к деформируемой поверхности.

Упругими называются такие деформации, когда тело полностью восстанавливает свою форму и размеры после снятия внешнего усилия.

Закон Гука: *сила упругости, возникающая при действии на тело внешних сил, пропорциональна его деформации и направлена в сторону, противоположную направлению перемещения частиц тела при деформации.* В частности

$$F_x = -kx\,, \tag{2.13}$$

где F_x – проекция силы упругости на ось OX, направленную по вектору перемещения, x – деформация тела и k – коэффициент жесткости.

Силу упругости **N**, возникающую в результате деформации опоры при воздействии на нее внешних сил и действующую на тело, называют **силой реакции опоры** (рис. 2.1).

N

N N = mg+F **N** N = mg–F

[1] В однородном поле тяжести центр тяжести тела совпадает с его центром масс и находится как точка пересечения прямых, вдоль которых должны быть направлены силы, вызывающие только поступательное движение тела.

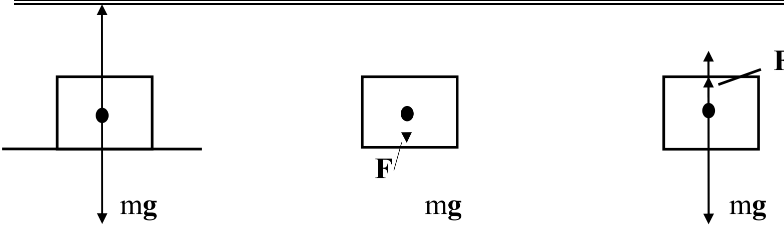


Рис. 2.1

2.5. Сила трения

Сила сопротивления, появляющаяся на границе раздела двух соприкасающихся тел при их относительном перемещении или попытке перемещения, называется **силой трения**.

Максимальное значение силы трения, когда еще не наблюдается скольжение одного тела относительно другого, называется силой трения покоя. После того, как начнется относительное перемещение тел, между ними действует так называемая сила трения скольжения, по величине несколько меньшая, чем сила трения покоя. Для инженерных расчетов можно считать силу трения покоя равной силе трения скольжения.

Если составляющая приложенной к телу силы, лежащая в плоскости соприкосновения двух тел не вызывает скольжение, то возникающую силу трения обычно называют неполной силой трения.

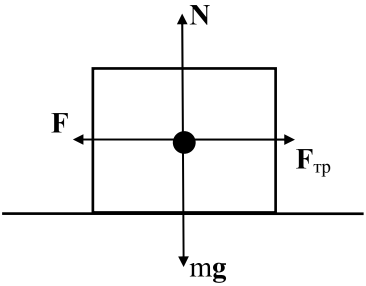
При качении одного тела по другому появляется так называемая сила трения качения (в данном курсе не рассматриваем).

Сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления одного тела на другое и приложена к поверхности соприкосновения тел. В соответствии с III законом Ньютона сила нормального давления равна силе реакции опоры N, при этом при скольжении тела

$$F_{тр} = \mu \cdot N, \qquad (2.14)$$

где μ – коэффициент трения скольжения, безразмерная табличная величина, характерная для каждой пары трущихся тел. Коэффициент трения скольжения может меняться в зависимости от свойств трущихся объектов и в первом приближении не зависит от силы N и скорости скольжения.

Пример: тело покоится или движется с постоянной скоростью (рис. 2.2).



$F_{тр} = F$; $N = mg$

Рис. 2.2

2.6. <u>Движение тела по окружности</u>

При равномерном движении тела по окружности, его ускорение равно центростремительному (нормальному) ускорению $a_n = \dfrac{\upsilon^2}{R}$, которое всегда направлено по радиусу к центру вращения. Силы, вызывающие вращательное движение тела те же самые, что и в случае прямолинейного движения. II закон Ньютона при этом имеет вид

$$m\,\mathbf{a}_n = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_i \qquad (2.15)$$

или

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = \sum_{i=1}^{n} F_i\ , \qquad (2.16)$$

где F_i – проекции сил, приложенных к телу на направление центростремительного ускорения.

В выражении (2.16) $\sum_{i=1}^{n} F_i$ называют **центростремительной силой**. Это не самостоятельная сила, приложенная к телу, наряду с прочими силами. Это есть равнодействующая всех сил, приложенных к телу, равномерно движущемуся по окружности.

Пример. Рассмотрим автомобиль, равномерно движущийся по выпуклому мосту, имеющему в рассматриваемый момент движения радиус кривизны R (рис. 2.3). В центре моста уравнение движения

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = mg - N. \qquad (2.17)$$

В положении автомобиля, которое составляет с вертикалью угол α запись II закона Ньютона имеет вид

$$\frac{m\upsilon^2}{R} = mg\cos\alpha - N. \qquad (2.18)$$

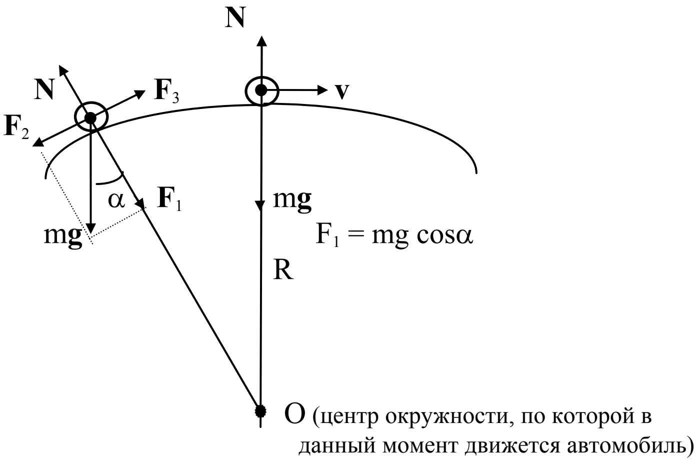


Рис. 2.3

2.7. <u>Вес тела и невесомость</u>

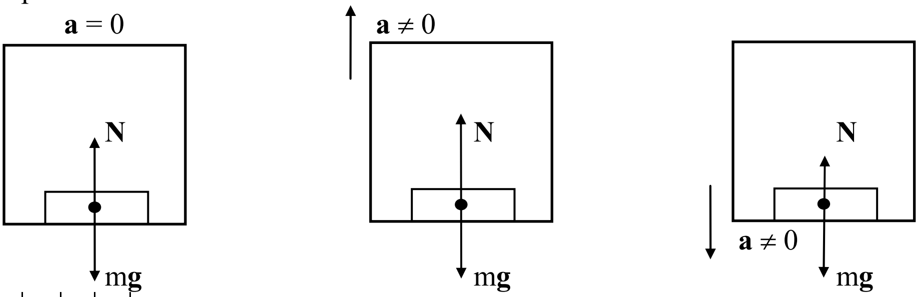
Весом тела называют силу, с которой тело вследствие притяжения Земли действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес*. В соответствии с III законом Ньютона модуль веса тела равен силе реакции опоры или силе натяжения связи.

---

* Классическое определение для тел, находящихся у поверхности Земли; в общем плане сила тяжести создается различными небесными телами, а кажущийся вес можно создать и путем, например, вращения тела вокруг оси, непроходящей через тело («мертвая петля» и т.д.).

Необходимо помнить, что вес тела и сила тяжести не одно и то же. Эти силы приложены к разным телам и различие их по абсолютной величине определяется многими причинами. Рассмотрим несколько **примеров**:

1. Тело находится в лифте, движущемся в вертикальном направлении



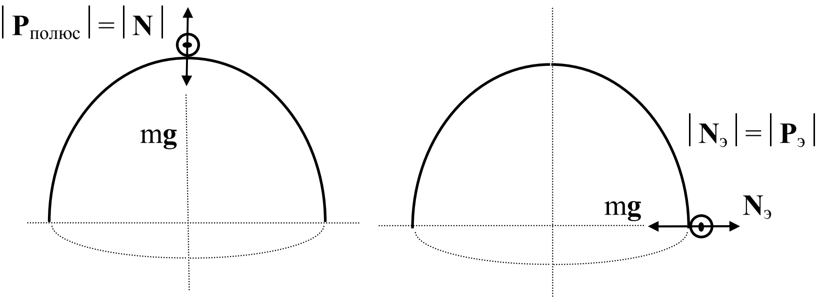
$|\mathbf{N}| = |\mathbf{P}|$, $P = mg$

$ma = N - mg$, $N = P = m(g+a)$

$ma = mg - N$, $N = P = m(g-a)$

Рис. 2.4

2. Тело находится на поверхности Земли в разных ее точках



На полюсе Земли тело находится на оси ее вращения. Вес тела в этом случае $P_п = mg$

Если тело находится на экваторе Земли, то с учетом ее вращения вес тела $N_э = P_э = mg - \dfrac{m\upsilon^2}{R_з}$

Рис. 2.5

Если тело не действует на опору или подвес, то говорят, что оно находится в состоянии *невесомости*. В этом случае на тело действует только сила земного притяжения (состояние свободного падения).

В деталях методика решения задач на законы Ньютона будет рассмотрена на практических занятиях. **Общая схема решения таких задач** выглядит следующим образом:

1. Начертить рисунок в соответствии с условиями задачи.
2. Выполнить анализ взаимодействий тел и на его основе создать чертеж сил, действующих на рассматриваемые тела.
3. Изобразить на рисунке систему отсчета (тело отсчета и связанную с ним систему координат).
4. Записать соотношения по II закону Ньютона для каждого из движущихся тел системы в векторной форме.
5. Записать эти же уравнения в проекциях на оси координат.
6. Решить полученную систему уравнений относительно неизвестных величин и проверить их размерность.

Пример. Определить ускорение, с которым движется тело по горизонтальной поверхности, если известен коэффициент трения μ между телом и поверхностью. К телу приложена внешняя сила **F**, направленная под углом α к горизонтальной поверхности. Масса тела – m (рис. 2.6).

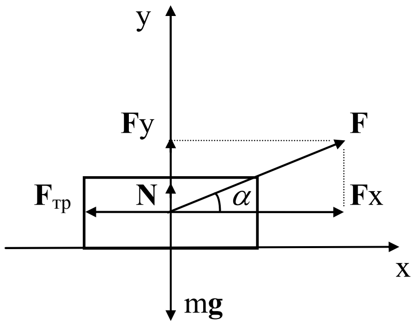


Рис. 2.6

__Решение__: $\mathbf{F} + m\mathbf{g} + \mathbf{N} + \mathbf{F}_{тр} = m\mathbf{a}$

OX: $ma = F\cos\alpha - F_{тр}$, где $F_{тр} = \mu N$

OY: $0 = N + F\sin\alpha - mg$

$N = mg - F\sin\alpha$

$F_{тр} = \mu(mg - F\sin\alpha)$

$$\boxed{a = \frac{F\cos\alpha - \mu(mg - F\sin\alpha)}{m}}$$

2.8. Глоссарий

Вес тела	– сила, с которой тело, находящееся в поле сил тяжести, действует на горизонтальную опору или подвес, препятствующие свободному падению тел.
Всемирного тяготения закон	– две произвольные материальные точки притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению масс этих материальных точек и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.
Гука закон	– сила упругости пропорциональна деформации тела и направлена в сторону, противоположную направлению перемещения частиц тела при деформации.
Инерциальная система отсчета	– это система отсчета, связанная со свободно движущимся телом, в ней выполняются законы Ньютона.
Масса (гравитационная)	– характеризует способность тел притягиваться друг к другу.
Масса (инертная)	– мера инертности тел.
Невесомость	– движение тела под действием лишь одной силы тяжести.
Ньютона законы	
I закон	– материальная точка сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на нее не действуют никакие силы или действие сил взаимно скомпенсировано.
II закон	– ускорение, с которым движется материальная точка, прямо пропорционально равнодействующей приложенных к ней сил, обратно пропорционально ее массе и сонаправлено с равнодействующей сил.
III закон	– две материальные точки взаимодейст-

		вуют с силами, одинаковыми по модулю и имеющими противоположное направление вдоль прямой, соединяющей эти точки.
Сила	–	мера взаимодействия тел, может быть выражена через скорость изменения импульса тела.
Сила трения покоя	–	максимальное значение силы трения, когда еще не наблюдается скольжение одного тела относительно другого.
Сила трения скольжения	–	сила, возникающая на границе соприкосновения тел при их относительном движении и направленная противоположно вектору скорости относительного перемещения.

Основные вопросы для повторения:

1. Сформулируйте законы Ньютона и запишите их в виде формул.
2. Что такое инерциальная система отсчета?
3. Что такое масса тела?
4. Сформулируйте принцип относительности Галилея.
5. Сформулируйте закон всемирного тяготения и запишите его в виде формулы.
6. Сформулируйте закон Гука. Дайте определение упругой силы.
7. Дайте определение силы трения покоя и силы трения скольжения.
8. Что такое центростремительная сила?
9. Дайте определение веса тела. В каких условиях реализуется состояние невесомости тел?

Лекция № 3

3.1. Законы сохранения. Общие замечания

Характерной особенностью многих процессов, происходящих в окружающем нас мире является неизменность с течением времени численных значений определенных физических величин. Поведение таких отдельных систем описывается законами сохранения, с помощью которых можно судить о характере динамических процессов, происходящих в исследуемой системе.

Важнейшими законами сохранения, которые выполняются для любых замкнутых систем*, являются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и электрического заряда. Это фундаментальные законы природы, которые выполняются как в микро-, так и в макро- и мегамире (заметим, что классический II закон Ньютона в мире микрочастиц не работает).

Идеи законов сохранения были заложены еще в философских учениях античного мира как догадка о наличии чего-то стабильного в окружающей нас Вселенной.

3.2. Закон сохранения импульса

Рассмотрим **замкнутую систему**, состоящую из n материальных точек (в механике – это система, на тела, входящие в которую не действуют внешние силы от тел вне данной системы, или когда геометрическая сумма воздействующих на систему внешних сил равна нулю).

Опытным путем установлено, что в такой системе взаимодействие материальных точек осуществляется так, что

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{m_i}\mathbf{v}_\mathrm{i} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{p}_\mathrm{i} = \mathrm{const}\,, \qquad (3.1)$$

где $\mathrm{m_i}\mathbf{v}_\mathrm{i}=\mathbf{p}_\mathrm{i}$ – импульс конкретной точки, а $\mathbf{P} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{p}_\mathrm{i}$ – полный импульс замкнутой системы материальных точек.

* В общем плане под замкнутыми системами понимаются системы, которые не обмениваются веществом, энергией и информацией с окружающей их средой.

Таким образом, *полный импульс замкнутой системы материальных точек не изменяется с течением времени*. Это утверждение носит название **закона сохранения импульса**.

Конечно, под действием внутренних сил (сил внутри замкнутой системы), которые согласно III закону Ньютона попарно скомпенсированы, может меняться импульс отдельных частиц замкнутой системы, но для всей системы в целом полный импульс сохраняется.

Закон сохранения импульса является прямым следствием законов Ньютона. Это удобно показать на примере замкнутой системы, состоящей из двух тел.

Пример. Пусть замкнутая система состоит из двух взаимодействующих материальных точек, у которых по III закону Ньютона внутренние силы равны $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$. Если время взаимодействия Δt, то $\mathbf{F}_{12}\Delta t = -\mathbf{F}_{21}\Delta t$. Согласно II закону Ньютона импульс силы $\mathbf{F}_{12}\Delta t$ равен приращению импульса второй точки ($\mathbf{p}_2' - \mathbf{p}_2$), а импульс силы $\mathbf{F}_{21}\Delta t$ – первой ($\mathbf{p}_1' - \mathbf{p}_1$), откуда

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_1' + \mathbf{p}_2' . \qquad (3.2)$$

Все тела, находящиеся на поверхности Земли всегда подвержены действию силы тяжести, но если ее воздействие скомпенсировано, то закон сохранения импульса выполняется. Он работает и в том случае, когда изменение импульса за счет внешней силы значительно меньше, чем за счет импульсной (например, при столкновениях, взрывах и т.д.).

Для проекций импульсов на оси координат условие (3.1) записывается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{n} p_{ix} = \text{const}, \ \sum_{i=1}^{n} p_{iy} = \text{const}, \ \sum_{i=1}^{n} p_{iz} = \text{const} . \qquad (3.3)$$

Пример. Два хоккеиста, движущиеся навстречу друг другу по гладкой горизонтальной поверхности, сталкиваются и далее перемещаются вместе (рис. 3.1). Первый хоккеист, масса которого $m_1 = 120$ кг двигался со скоростью $\upsilon_1 = 3$ м/с, а скорость второго при массе $m_2 = 80$ кг была равна $\upsilon_2 = 6$ м/с. В каком направлении и с какой скоростью υ они будут двигаться после столкновения?

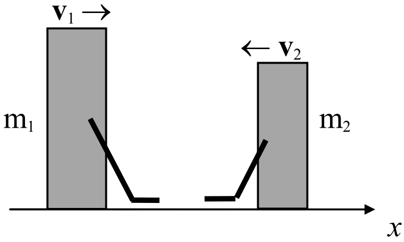


Рис. 3.1

Решение. Применим закон сохранения импульса, предположив, что направление движения первого хоккеиста совпадает с направлением оси *x*, и что горизонтальные силы практически отсутствуют. В проекции на эту ось закон запишется в виде

$$m_1\upsilon_1 - m_2\upsilon_2 = (m_1+m_2)\,\upsilon\,, \quad (3.4)$$

откуда $\upsilon = \dfrac{m_1\upsilon_1 - m_2\upsilon_2}{m_1 + m_2} = \dfrac{120\cdot 3 - 80\cdot 6}{200}\dfrac{м}{с} = -0{,}6\,\dfrac{м}{с}$

Знак «минус» показывает, что после столкновения хоккеисты будут двигаться в направлении движения второго хоккеиста.

Пример. Призма, масса которой M, а угол уклона α, находится на гладкой горизонтальной поверхности льда. На призме стоит человек, масса которого m (рис. 3.2). С какой скоростью u будет двигаться призма, если человек пойдет вверх по поверхности призмы со скоростью υ относительно нее? Трением между призмой и льдом пренебречь.

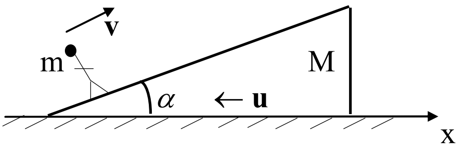


Рис. 3.2

Решение. Согласно закону сохранения импульса, записанному в проекции на горизонтально направленную ось координат *x* (рис. 3.2), имеем

$$m\,(\upsilon \cos\alpha + u) + M\cdot u = 0\,, \quad (3.5)$$

откуда

$$u = -\frac{m\upsilon\cos\alpha}{m+M}\,,$$

где u – проекция скорости призмы на ось *x*, знак которой раскрывается в ответе, или, как второй возможный вариант, считая υ и u – модулями соответствующих векторов, с учетом направления движения тел системы, запишем

$$m\,(\upsilon\cos\alpha - u) - M\cdot u = 0\,, \quad (3.6)$$

откуда получим значение модуля вектора u

$$u = \frac{m\upsilon cos\alpha}{m + M}.$$

Закон сохранения импульса объясняет такие явления, как реактивное движение, отдача при выстреле, движение лодки с помощью весел и т.д.

Реактивное движение – это движение тела (ракеты), которое возникает в результате выброса им вещества. Законы движения тел переменной массы (реактивное движение) были исследованы русскими учеными И.В. Мещерским (1859-1935 гг.) и К.Э. Циолковским (1857-1935 гг.).

3.3. Механическая работа. Мощность

Работа какой-либо силы является мерой ее действия, зависящей от величины и направления вектора силы, а также перемещения точки приложения силы.

Механическая работа, совершаемая постоянной силой – это скалярная величина, *равная произведению модуля силы, модуля перемещения и косинуса угла между направлениями силы и перемещения* (рис. 3.3):

$$A = F\,r\cos\alpha = \mathbf{F}\cdot\mathbf{r}. \tag{3.7}$$

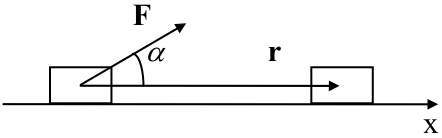


Рис. 3.3

Если направление силы совпадает с направлением перемещения тела (α=0), то работа положительна и равна A = F·r. Если угол α=90^0, то работа равна нулю (например, работа центростремительной силы при движении тела по окружности), и, наконец, если угол α – тупой (α>90^0), то работа имеет отрицательный знак, например, работа силы трения скольжения отрицательна.

Если сила – переменная, то можно выбрать элементарный участок перемещения d$\mathbf{r}_i$ в пределах которого сила $\mathbf{F}_i$ постоянна. Тогда говорят о работе силы на отдельном элементарном участке пути

$$dA = \mathbf{F}d\mathbf{r} = Fdr\cos\alpha. \tag{3.8}$$

Работа по всему перемещению от точки 1 к точке 2 будет равна в этом случае

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{F}(r)\, d\mathbf{r} = \int_1^2 F_s ds\,, \tag{3.9}$$

где F_s – проекция действующей силы на перемещение в соответствующей точке траектории, при этом элементарный участок пути $ds = |d\mathbf{r}|$.

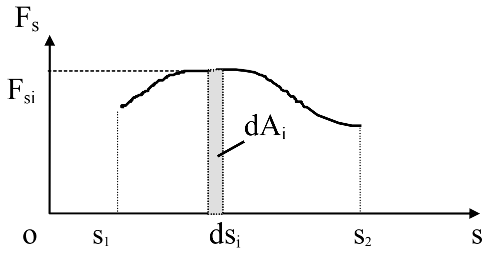


Рис. 3.4

На рис. 3.4 представлен один из возможных графиков зависимости F_s от S, где под S понимается пройденный путь в смысле координаты, которая определяет положение точки на траектории. Данный рисунок показывает, что элементарная работа dA_i на пути ds_i равна площади заштрихованного прямоугольника, а вся работа на пути $s_2 - s_1$ согласно (3.9) численно равна площади криволинейной трапеции, ограниченной графиком функции $F_s(s)$.

Единицей измерения работы в системе СИ является джоуль [Н·м=Дж].

Важной характеристикой многих устройств, совершающих работу, является мощность. **Мощность** – *физическая величина, которая характеризует быстроту выполнения работы.*

Средняя мощность за время Δt определяется как

$$\langle N \rangle = \frac{\Delta A}{\Delta t}\left[\frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}\right] \tag{3.10}$$

и измеряется в ваттах [Вт]. Выражение для мгновенной мощности имеет вид

$$N = \frac{dA}{dt} \qquad \text{или} \tag{3.11}$$

$$N = \frac{\mathbf{F}d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = F \cdot \upsilon \cdot \cos\alpha \,. \qquad (3.12)$$

То есть, **мгновенная мощность** равна *скалярному произведению вектора силы на вектор скорости, с которой движется точка приложения силы.*

Пример. При одной и той же мощности двигателя увеличение силы тяги автомобиля сопровождается уменьшением скорости его движения (например, движение автомобиля по горной трассе).

3.4. Энергия. Закон сохранения механической энергии

Энергия – это общая количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи. **Закон сохранения энергии** гласит, что *энергия не возникает из ничего и не исчезает бесследно, она может только переходить из одной формы в другую в эквивалентных количествах.*

Различным формам движения материи соответствуют различные формы энергии: внутренняя, механическая, электромагнитная и т.д. Однако, это деление условно. Так, например, внутренняя энергия газа по сути представляет собой механическую и электромагнитную энергию отдельных молекул.

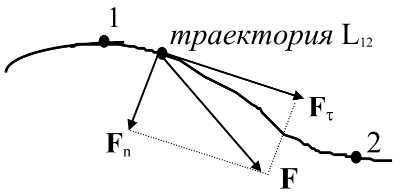


Рис. 3.5

Рассмотрим механическую систему. Пусть **F** – единственная сила, действующая на движущуюся материальную точку (рис. 3.5). В любой точке траектории ее можно представить в виде касательной и нормальной к траектории составляющих

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_\tau \,. \qquad (3.13)$$

Элементарная работа, совершенная силой **F** на каждом перемещении d**r**

$$dA = \mathbf{F}d\mathbf{r} = \mathbf{F}_n \cdot d\mathbf{r} + \mathbf{F}_\tau\, d\mathbf{r} = \mathbf{F}_\tau\, d\mathbf{r} \,, \qquad (3.14)$$

так как $\mathbf{F}_n\,d\mathbf{r} = F_n\,dr \cdot \cos\dfrac{\pi}{2} = 0$.

Сила $\mathbf{F}_\tau = m\mathbf{a}_\tau$ имеет такое же направление, как и касательное ускорение $\mathbf{a}_\tau$ и изменяет лишь абсолютную величину скорости $d\upsilon = a_\tau\,dt$, тогда

$$dA = \mathbf{F}_\tau\,d\mathbf{r} = F_\tau\,dr = ma_\tau\,dr = \frac{md\upsilon \cdot dr}{dt} = m\upsilon d\upsilon, \qquad (3.15)$$

или иначе

$$dA = d\left(\frac{m\upsilon^2}{2}\right) = dW_K. \qquad (3.16)$$

Таким образом, работа, совершаемая силой **F**, изменяет характеристику движения частицы, равную

$$W_K = \frac{m\upsilon^2}{2}, \qquad (3.17)$$

которую называют **кинетической энергией**. **Кинетическая энергия** – *это энергия, обусловленная движением тела.*

Очевидно, работа, совершаемая на участке траектории $L_{1\text{-}2}$ равна

$$A_{12} = \int_1^2 dA = \int_{\upsilon_1}^{\upsilon_2} d\left(\frac{m\upsilon^2}{2}\right) = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2}. \qquad (3.18)$$

Таким образом, при движении материальной точки в поле сил по траектории L_{12} совершается работа. Можно показать, что для многих распространенных в природе сил величина этой работы зависит только от начального и конечного положения траектории и не зависит от ее вида. Такие силы называются консервативными или потенциальными. Поля таких сил также называют потенциальными или консервативными. Для **консервативных сил** справедливо следующее утверждение: *работа консервативных сил по замкнутому пути равна нулю*.

В механике к числу консервативных сил относятся гравитационная сила, а также сила упругости.

Для потенциальных полей можно ввести понятие **потенциальной энергии**. **Потенциальная энергия** – это такая функция координат поля консервативных сил, разность значений которой в любых точках поля равна работе сил поля при перемещении тела между этими точками. Для элементарных перемещений имеем

$$dA = -dW_п . \tag{3.19}$$

Знак «минус» показывает, что работа потенциальной силы приводит к уменьшению потенциальной энергии тела.

Сила и скорость изменения потенциальной энергии в заданном направлении связаны между собой, так что

$$F_x = -\frac{dW_п}{dx}, \tag{3.20}$$

то есть проекция консервативной силы на заданное направление равна скорости изменения потенциальной энергии, взятой с обратным знаком. Знак «минус» означает, что сила направлена в сторону убывания потенциальной энергии.

Можно показать, что численное значение потенциальной энергии тела в гравитационном поле земного тяготения, поднятого над поверхностью Земли на высоту h

$$W_п = mgh ,$$

а потенциальная энергия упругих деформаций

$$W_п = \frac{kx^2}{2},$$

где k – жесткость системы.

В целом **потенциальная энергия** – *механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и видом сил взаимодействия между ними.*

При движении материальной точки в поле консервативных сил совершается работа, равная убыли потенциальной энергии

$$dA = -d\,W_п .$$

Одновременно работа сил поля приводит к изменению кинетической энергии частицы

$$dA = d\,W_к$$

Тогда

$$d\,W_к = -d\,W_п , \text{ или}$$

$$d\,(W_к + W_п) = 0$$

Введем полную механическую энергию частицы, равную сумме ее кинетической и потенциальной энергий

$$W = W_к + W_п \qquad (3.21)$$

В этом случае $dW = 0$ или

$$W = \text{const} \qquad (3.22)$$

Полученное соотношение представляет собой **закон сохранения механической энергии**, который в общем виде формулируется следующим образом: *полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих посредством консервативных сил, сохраняется неизменной.*

Если в системе существуют неконсервативные силы, то часть механической энергии может перейти в другие виды энергии. Энергия в системе единиц СИ измеряется в джоулях.

Пример № 1. Тело массой *m* свободно падает без начальной скорости с высоты *h* на Землю. Считая поверхность Земли за нулевой уровень отсчета потенциальной энергии закон сохранения энергии запишется в следующем виде (тело упало на Землю):

$$W_{п_1} + W_{к_1}\ (\text{начало движения}) = W_{п_2} + W_{к_2}\ (\text{при ударе о Землю})$$

$$mgh = \frac{m\upsilon^2}{2}\ , \qquad (3.23)$$

где по условию $W_{к_1} = 0,\ W_{п_2} = 0$.

Пример № 2. В примере № 1 тело толкнули вниз вдоль вертикали к поверхности Земли со скоростью υ_0. В момент падения тела на Землю имеем

$$mgh + \frac{m\upsilon_0^{\,2}}{2} = \frac{m\upsilon^2}{2}\,. \qquad (3.24)$$

Пример № 3. Пусть в предыдущем примере в некоторый момент времени тело оказалось в результате падения на высоте h_1. Тогда закон сохранения энергии для этого случая будет иметь другой вид:

$$mgh + \frac{m\upsilon_0^{\,2}}{2} = mgh_1 + \frac{m\upsilon^2}{2}\ . \qquad (3.25)$$

Пример № 4. В примере № 3 учесть наличие силы сопротивления воздуха. В этом варианте получим

$$mgh + \frac{m\upsilon_0^{\,2}}{2} = mgh_1 + \frac{m\upsilon^2}{2} + F_{сопр.} \cdot (h-h_1)\ . \qquad (3.26)$$

В заключение заметим, что все законы сохранения в механике вытекают из уравнений Лагранжа (более позднее обобщение законов Ньютона) и свойств симметрии при непрерывных преобразованиях пространства-времени.

3.5. <u>Глоссарий</u>

Законы сохранения		
импульса	–	полный импульс замкнутой системы материальных точек сохраняется;
механической энергии	–	полная энергия замкнутой системы материальных точек, взаимодействующих посредством консервативных сил сохраняется.
Замкнутая система	–	система тел, на которую не действуют внешние силы, или действие этих сил взаимноскомпенсировано.
Консервативные (потенциальные) силы (поля)	–	силы, работа которых не зависит от вида траектории, а определяется только начальным и конечным положением тела. Работа таких сил по замкнутому пути равна нулю.
Механическая работа	–	мера действия силы, зависящая от ее величины, направления, а также перемещения точки приложения силы (механическая работа, совершаемая постоянной силой, – это скалярная величина, равная произведению модуля силы, модуля перемещения и косинуса угла между направлениями силы и перемещения).
Мощность	–	работа, совершаемая в единицу време-

ни.

Энергия

кинетическая	–	характеристика движения, пропорциональная квадрату скорости тела;
потенциальная	–	механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и видом сил взаимодействия между ними;
полная механическая	–	сумма потенциальной и кинетической энергий тела.

Основные вопросы для повторения:

1. Какие системы материальных точек называют замкнутыми?
2. Сформулируйте закон сохранения импульса.
3. Дайте определение работы силы. Как называется единица измерения работы и энергии в СИ?
4. Что такое мощность (средняя, мгновенная)? В каких единицах измеряется?
5. Чему равна кинетическая энергия тела?
6. Какие силы называют консервативными?
7. Сформулируйте понятие потенциальной энергии.
8. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.

Лекция № 4

4.1. Статика. Общие замечания

Статика – раздел механики, изучающий условия равновесия материальных тел, находящихся под воздействием сил. Под равновесием понимается сохранение телом состояния покоя или равномерного прямолинейного движения. В первом случае говорят о статическом, во втором – о динамическом равновесии.

В основе статики лежат такие понятия, как протяженное твердое тело (до сих пор мы обычно пользовались понятием материальной точки), центр тяжести, сила и ее плечо, момент силы и т.д. При этом в статике изучаются условия равновесия систем, состоящих из абсолютно твердых (недеформируемых) тел. Остановимся кратко на основных представлениях и законах статики.

4.2. Равновесие тела в отсутствие вращения

Условием равновесия материальной точки является равенство нулю результирующей всех приложенных к ней сил:

$$\sum_{i=1}^{n} \mathbf{F}_i = 0 . \qquad (4.1)$$

В этом случае, согласно I закону Ньютона, материальная точка будет находиться в состоянии покоя ($\upsilon = 0$) или равномерного прямолинейного движения ($\mathbf{v}$=const).

Такое же условие соответствует равновесию тел в отсутствие вращения, когда тела можно представить как систему взаимно неподвижных материальных точек, способных двигаться только поступательно.

Любой вектор можно спроектировать на три взаимно перпендикулярные оси координат *x, y* и *z,* поэтому условие равновесия (4.1) можно записать в виде

$$\sum_{i=1}^{n} F_{xi} = 0,\ \sum_{i=1}^{n} F_{yi} = 0 \text{ и } \sum_{i=1}^{n} F_{zi} = 0 , \qquad (4.2)$$

где F_{xi}, F_{yi} и F_{zi} – проекции силы $\mathbf{F}_i$ на оси координат x, y и z. Таким образом, сумма проекций всех сил, действующих на тело (находящееся в состоянии равновесия в отсутствие вращения), на любую ось координат равна нулю. Для упрощения ситуации все силы, вызывающие только поступательное движение тела, удобно в данном случае прикладывать к центру тяжести тела (см. п. 2.3).

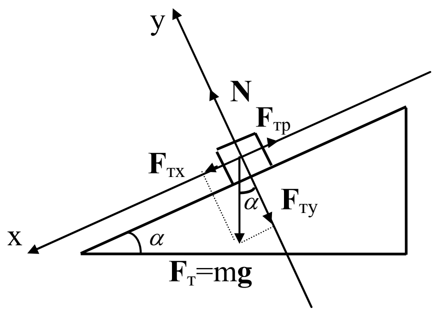


Рис. 4.1

Пример. Брусок покоится или равномерно скользит по наклонной плоскости, рис. 4.1. На тело в данном случае действуют три силы: сила тяжести $\mathbf{F}_т = m\mathbf{g}$, сила нормальной реакции опоры ***N*** и сила трения $\mathbf{F}_{тр}$.

Направление координатной оси x удобно выбрать вдоль плоскости, а оси y – перпендикулярно плоскости сколь-жения, например вверх (рис. 4.1). Тело покоится или движется равномерно и прямолинейно, поэтому сумма проекций всех сил, действующих на тело, на оси x и y равны нулю:

$$mg \sin \alpha - F_{тр} = 0 , \qquad (4.3)$$

$$N - mg \cos \alpha = 0 , \qquad (4.4)$$

где $F_{тх} = mg \sin\alpha$, а $= F_{ту} = mg \cos\alpha$ (см. рис. 4.1). Сила трения покоящегося тела будет равна $F_{тр} = mg \sin\alpha$, но при его скольжении с постоянной скоростью $F_{тр} = mg \sin\alpha = \mu\, mg \cos\alpha$, откуда коэффициент трения $\mu = \mathrm{tg}\alpha$.

4.3. <u>Момент силы. Условие равновесия тела, имеющего ось вращения</u>

Моментом силы называют величину, способную вызывать и изменять вращение тела. При этом выделяют момент силы относительно точки (центра) и относительно оси.

Момент силы **F** относительно неподвижной точки О представляет собой вектор $\mathbf{M}_o$, определяемый векторным произведением ридиуса-вектора **r**, проведенного из точки О в точку N приложения силы, на силу **F**, рис. 4.2:

$$\mathbf{M}_o = [\mathbf{r}, \mathbf{F}], \qquad (4.5)$$

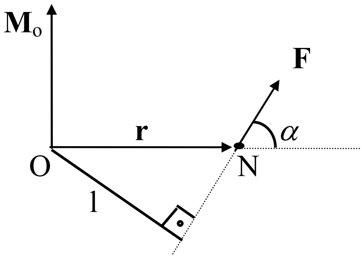


Рис. 4.2

где модуль момента силы $M = F\,r\,\sin\alpha = F \cdot l$ (l – плечо силы, то есть кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой O). Направлен вектор $\mathbf{M}_o$ перпендикулярно плоскости, проходящей через центр O и силу $\mathbf{F}$ в сторону, откуда поворот, вызываемый силой, виден против хода часовой стрелки.

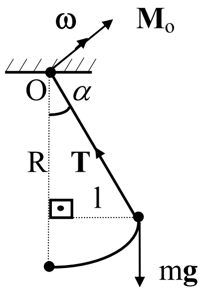


Рис. 4.3

Пример. Пусть точечный груз массой m, подвешенный на нерастяжимой и невесомой нити длиной R к гвоздю, вбитому в потолок, совершает колебания около положения равновесия, рис. 4.3.

Для рассматриваемого момента времени, когда груз возвращается в положение равновесия, вектор момента силы $\mathbf{M}_o$ совпадает по направлению с вектором угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$, его модуль равен $M_o = mgl = mgR\sin\alpha$; момент силы натяжения нити T всегда равен нулю, так как плечо этой силы равно нулю.

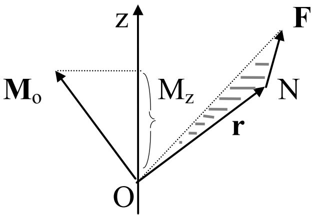


Рис. 4.4

Момент силы относительно неподвижной оси z является алгебраической величиной, равной проекции на эту ось вектора $\mathbf{M}_o$ момента силы, определенного относительно произвольной точки O на оси z, рис. 4.4.

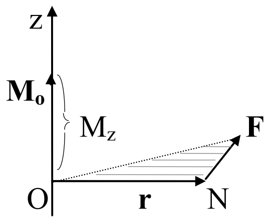


Рис. 4.5

Для решения обычных школьных задач достаточно рассмотрения момента силы относительно оси *z*, перпендикулярной плоскости, в которой лежат векторы **F** и **r**, рис. 4.5. Направление оси при этом выбирают таким образом, чтобы момент был положительным, если он вызывает вращение по часовой стрелке.

На любое тело могут действовать моменты различных сил, однако, для его равновесия, при наличии неподвижной оси вращения z*,* необходимо, чтобы *алгебраическая сумма моментов всех сил, действующих на тело, относительно этой оси была равна нулю*

$$\sum_{i=1}^{n} M_{zi} = 0 \qquad (4.6)$$

или, формулируя более простым языком, моменты всех сил M_z, вращающих тело по часовой стрелке, должны быть равны моментам всех сил, вращающих его против часовой стрелки. При этом тело будет либо покоиться, либо равномерно вращаться вокруг оси.

Если у тела отсутствует закрепленная ось вращения, для его равновесия необходимо и достаточно выполнение условий (4.1) и (4.6) относительно любой возможной оси.

Условия равновесия часто используются для измерения неизвестных сил путем их сравнения с известными силами. Например, величину различных сил (гравитационных, электростатических, магнитных) измеряют, сравнивая их с силой упругости. В частности силу тяжести, действующую на тело, можно определить по показаниям пружинного динамометра.

Важной задачей статики является определение центра тяжести тела или системы тел. **Центром тяжести** является *точка приложения равнодействующей всех сил тяжести, действующих на тело при любом его положении в пространстве* (обычно находится путем пересечения линий подвеса тела). Сумма моментов всех элементарных сил тяжести относительно любой оси, которая проходит через центр тяжести, равна нулю.

У однородного тела центр тяжести находится на оси симметрии и пересечении осей симметрии, при этом он может оказаться вне самого тела (например, у кольца).

Пример. Два человека, массой m_1 = 60 кг и m_2 = 100 кг находятся в равновесии на разных концах горизонтально расположенной однородной прямоугольной доски, длиной l = 3 м и массой m_3 = 30 кг, имеющей одинаковую толщину и расположенной на поваленном дереве, рис. 4.6. На каком расстоянии x от правого края доски находится центр тяжести системы, состоящей из доски и двух человек или, иными словами, точка касания доски с деревом?

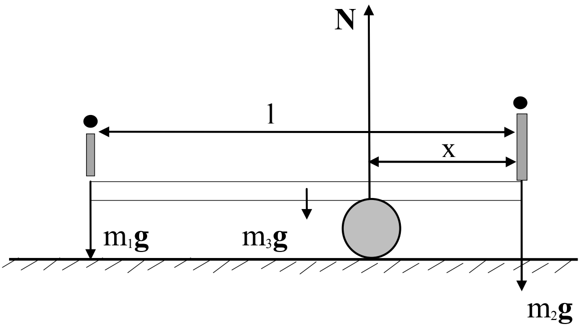


Рис. 4.6

Решение. Согласно условию (4.2) равнодействующая сил тяжести $m_1\mathbf{g}$, $m_2\mathbf{g}$ и $m_3\mathbf{g}$ по модулю равна модулю вектора **N**, т.е. $m_1g+m_2g+m_3g=N$. Данное выражение полезно для общих рассуждений и правильного построения рисунка, но для решения задачи вполне достаточно воспользоваться условием (4.6):

$$m_1g\,(l-x) + m_3g\left(\frac{l}{2} - x\right) = m_2g \cdot x\,, \qquad (4.7)$$

откуда $x = \dfrac{l(2m_1 + m_3)}{2(m_1 + m_2 + m_3)} = 0{,}79$ м.

Пример. Человек удерживает за один конец лестницу массой m так, что она образует с горизонтом угол α, рис. 4.7. С какой силой F, направленной перпендикулярно лестнице, он действует на нее в этом положении? Центр тяжести лестницы делит ее высоту пополам.

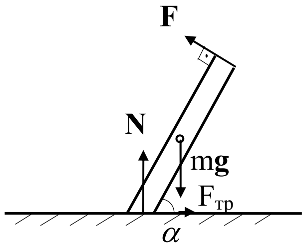


Рис. 4.7

Решение. Согласно условию (4.6)

$$F \cdot l = mg\,\frac{1}{2}\cos\alpha\,, \qquad (4.8)$$

где l – длина лестницы. В результате имеем

$$F = \frac{mg\cos\alpha}{2}\,.$$

4.4. <u>Гидро- и аэромеханика</u>

4.4.1. Давление

В гидро- и аэромеханике обычно изучаются распределенные силы, то есть силы, действующие на каждый элемент площади выделенного объема среды. Важным понятием гидро- и аэромеханики является давление. Если очертить в жидкости плоскую поверхность площадью S, задать направление нормали к ней и показать направление приложенной к этой поверхности силы **F**, то очень наглядно можно определить смысл понятия давления, рис. 4.8.

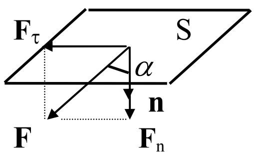


Рис. 4.8

Давление – это *скалярная величина, равная отношению модуля силы нормального давления к площади поверхности, на которую действует эта сила:*

$$p = \frac{F_n}{S} = \frac{F \cdot \cos\alpha}{S}\,, \qquad (4.9)$$

где $\mathbf{F}_n$ и $\mathbf{F}_\tau$ – нормальная и касательная составляющие силы **F** (рис. 4.8). У покоящихся жидкостей $F_\tau = 0$, и сила давления всегда перпендикулярна к поверхности. В газах давление возникает в результате толчков, которые испытывает реальная поверхность со стороны молекул, однако, как мы увидим в дальнейшем, при таких ударах на поверхность действуют силы, направленные только перпендикулярно к ней.

Единицей давления в СИ является паскаль (Па), где $1\text{Па}=1\dfrac{\text{Н}}{\text{м}^2}$. Иногда встречаются внесистемные единицы давления: 1атм=760 мм рт.ст.=$1{,}013\cdot10^5$ Па (атм – физическая атмосфера, мм рт. ст. – миллиметр ртутного столба).

4.4.2. Закон Паскаля

В 1663 году французский ученый Б. Паскаль установил следующий закон: *давление на поверхности жидкости, произведенное внешними силами, передается жидкостью одинаково по всем направлениям*. Закон выполняется и для газа и получил название **закона Паскаля**.

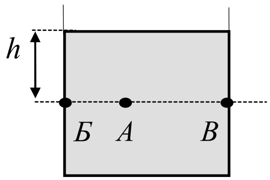


Рис. 4.9

Пример. Определим давление в точке А жидкости, налитой в цилиндрический сосуд и сообщающейся с атмосферой, рис. 4.9. Это давление будет определяться суммой атмосферного давления p_0 и давления столба жидкости над уровнем БВ, проходящим через точку *А*, которое равно

$$p_1 = \frac{mg}{S} = \frac{\rho ghS}{S} = \rho gh, \qquad (4.10)$$

где S – площадь основания сосуда, ρ – плотность жидкости, h – глубина погружения рассматриваемой точки А от поверхности. Давление p_1 получило название гидростатического, общее давление в т. А рассчитывается по формуле

$$p = p_0 + \rho gh\ , \qquad (4.11)$$

при этом по закону Паскаля давление на стенку сосуда в точках Б и В (рис. 4.9), находящихся на одном горизонтальном уровне с точкой А, одинаково и не зависит от формы сосуда.

Закон Паскаля лежит в основе работы гидравлического пресса (домкрата), который используется для получения больших сжимающих сил при малых перемещениях с целью прессования отдельных материалов, подъема тяжелых тел и т.д. Краткая схема устройства гидравлического пресса показана на рис. 4.10. Он состоит из двух цилиндров разного диаметра с поршнями, которые через заполненный маслом объем могут взаимодействовать между собой. Тело, которое надо сжать, помещают над большим поршнем в зазоре между его верхней поверхностью и неподвижной плоскостью жестко закрепленной опоры.

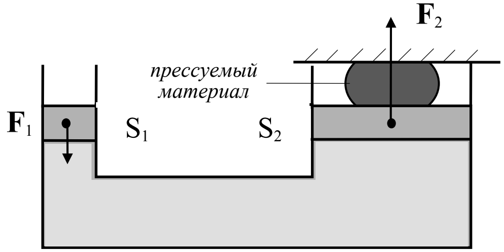


Рис. 4.10

Давление под малым поршнем площадью S_1 равно F_1/S_1 и передается на нижнюю поверхность большого поршня, в результате

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \text{ или } \frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1} \tag{4.12}$$

имеем выигрыш в силе, равный отношению площадей S_2 к S_1. В силу равенства совершенных работ во столько же раз перемещение большого поршня меньше перемещения малого поршня.

Если рассмотреть в общем случае сообщающиеся сосуды, в которых столбы жидкостей взаимно уравновешивают друг друга, то можно показать (практические занятия), что однородная жидкость устанавливается в сообщающихся сосудах на одном и том же уровне, в случае разнородных жидкостей высоты уравновешенных столбов в сообщающихся сосудах, обратно пропорциональны плотностям жидкостей (закон сообщающихся сосудов*).

* Подумайте и дайте объяснение устройства лейки для полива почвы, приведите другие примеры.

Атмосферное давление, как и давление в жидкости, передается одинаково по всем направлениям. Его можно измерить с помощью барометра, первый вариант которого (ртутный) был изобретен итальянским ученым Э. Торичелли. В его основе лежит опыт Торичелли (1643 г.). Если в длинную стеклянную трубку, закрытую с одного конца, залить ртуть и опустить свободным концом в чашку с ртутью, то ртуть не выливается, а при достаточной длине трубки над поверхностью ртути в трубке образуется пустота. Суть опыта заключается в том, что давление атмосферы, действующее на поверхность ртути в чашке, уравновешивается весом столба ртути в трубке (высота столба ртути на уровне моря составляет около 760 мм). Проградуировав трубку, можно измерять атмосферное давление.

4.4.3. Закон Архимеда

Закон Архимеда был открыт древнегреческим ученым (III в. до н.э.) и является фундаментом гидро- и аэростатики. Согласно этому **закону** *на тело, погруженное в жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (газа) выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа), направленная вертикально вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема.*

Наличие выталкивающей силы Архимеда связано с перепадом давлений на нижнюю и верхнюю поверхность погруженного в жидкость (газ) тела (вспомните формулу $p = \rho gh$). Если тело плотно лежит на дне, то давление жидкости только прижимает его ко дну, затрудняя всплытие.

Выталкивающая (архимедова) сила определяется формулой

$$F_{выт} = \rho_ж g V_ж , \tag{4.13}$$

где $\rho_ж$ – плотность жидкости (газа), $V_ж$ – в данном случае объем вытесненной жидкости (или газа). Условием плавания тела является (согласно I закону Ньютона) соотношение

$$\rho_ж g V_ж = mg , \tag{4.14}$$

где m – масса плавающего тела. Если учесть, что $m = \rho_т \cdot V_т$ и предположить, что тело полностью погружено в жидкость ($V_ж = V_т$), то условие 4.14 преобразуется в $\rho_ж = \rho_т$. Однако, будьте осторожны, соотношение (4.13) работает только для инерциальных систем отсчета, если сосуд с жидкостью, в которую погружено тело, движется с ускорением **a** вдоль вертикальной оси, то

$$F_{выт} = \rho_{ж}\,(g \pm a)\,V_{ж}\,, \qquad (4.15)$$

где знак (+) соответствует подъему вверх с ускорением **a**, (–) – опусканию. Дело в том, что выталкивающая сила равна весу вытесненной жидкости (газа), но не ее силе тяжести.

Тело находится в состоянии устойчивого равновесия, если его центр тяжести лежит ниже точки приложения выталкивающей силы, когда сила тяжести и выталкивающая сила направлены вдоль одной вертикальной прямой, рис. 4.11, а.

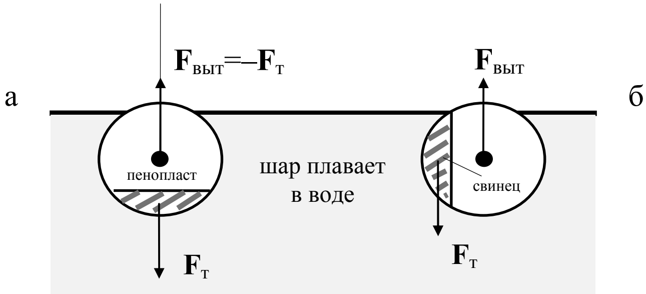


Рис. 4.11

При отклонении тела от положения равновесия возникает момент сил (имеются ввиду сила тяжести тела $F_т$ и выталкивающая сила $F_{выт}$), который стремится вернуть тело к положению равновесия, рис. 4.11, б.

Равнодействующая выталкивающей силы и силы тяжести тела при $F_{выт} > F_т$ называется подъемной силой – $\mathbf{F}_п$. При $\mathbf{F}_п = m\mathbf{a}$ тело всплывает ($\rho_ж V_ж g > \rho V g$, то есть $\rho_ж > \rho$), при $\mathbf{F}_п = 0$ – плавает ($\rho_ж V_ж g = \rho V g$, то есть $\rho_ж \geq \rho$ и $\rho_ж/\rho = V/V_ж$), и при $F_{выт} < F_т$ тело тонет с ускорением $a = \dfrac{F_т - F_{выт}}{m}$.

Наличие силы Архимеда сказывается на весе тела, особенно эти изменения заметны при погружении тела в жидкость*.

4.4.4. Закон Бернулли

Закон Д. Бернулли гласит: *давление в потоке жидкости (газа) выше в той его части, где меньше скорость.* Не вдаваясь в доказательство этого закона, отметим его некоторые любопытные проявления:

– если над трубой из печи дует ветер, то в трубе возникает тяга (аналог – пульверизатор для одеколона);

– парусная яхта может плыть против ветра, если поставить паруса таким образом, чтобы воздух в определенных объемах между ними ускорялся;

– профиль крыла самолета изготавливается таким образом, чтобы воздух над крылом протекал с большей скоростью, чем под ним. Перепад давлений при этом формирует аэродинамическую подъемную силу;

– норы животных для проветривания «помещения» должны иметь по крайней мере два входа, так как потоки воздуха у разных входов несколько отличаются, создавая перепад давлений и соответственно циркуляцию воздуха и т.д.

---

* Согласно историческим воспоминаниям Архимед открыл свой закон, лежа в ванне и размышляя над тем, как определить, чистое ли золото было использовано для изготовления новой короны царя. Подумайте, как, измерив вес короны в воздухе и в воде, пользуясь законом Архимеда, найти плотность материала короны?

4.5. Глоссарий

Архимеда закон	– на тело, погруженное в жидкость (или газ), действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа), направленная вертикально вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема.
Бернулли закон	– давление в потоке жидкости (газа) выше в той его части, где меньше скорость течения жидкости.
Давление	– физическая скалярная величина, равная отношению модуля силы, действующей на площадку, к величине этой площади, ориентированной перпендикулярно действию силы.
Момент силы	– физическая векторная величина, способная вызывать и изменять вращение тела.
Момент силы относительно неподвижной оси	– является алгебраической величиной и равен проекции на эту ось вектора момента силы, определенного относительно произвольной точки на данной оси.
Момент силы относительно точки	– представляет собой вектор, являющийся результатом векторного произведения радиус-вектора, проведенного из данной точки в точку приложения силы, и самой силы.
Паскаля закон	– давление на поверхности жидкости, произведенное внешними силами, передается жидкостью одинаково по всем направлениям.

Плечо силы – кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой, относительно которой определяется момент силы.

Статика – раздел механики, изучающий условия равновесия тел при воздействии на них внешних сил.

Основные вопросы для повторения:

1. Какие явления изучают в разделе статика?
2. Сформулируйте условия равновесия материальной точки, протяженного тела в отсутствие вращения.
3. Дайте определение момента силы относительно точки и относительно неподвижной оси.
4. Как направлен вектор момента силы относительно точки?
5. Дайте определение давления. В каких единицах измеряется его величина?
6. Сформулируйте закон Паскаля.
7. Что такое гидростатическое давление?
8. Поясните работу гидравлического пресса.
9. Опишите особенности поведения жидкости в сообщающихся сосудах.
10. Сформулируйте закон Архимеда и приведите математическое выражение для выталкивающей силы.
11. Запишите условия плавания тела в жидкости.
12. Чему равна подъемная сила, действующая на тело, помещенное в жидкость или газ?
13. Сформулируйте закон Бернулли.

Лекция № 5

5.1. <u>Молекулярная физика</u>

5.1.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории

Молекулярная физика изучает физические свойства систем, находящихся в различных агрегатных состояниях, с учетом их молекулярного строения.

Молекула – *мельчайшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства и состоящая из атомов, скрепленных друг с другом химической связью.*

Атом, со своей стороны, представляет собой *наименьшую часть химического элемента, являющуюся носителем его свойств.*

В зависимости от типа молекулы могут содержать от двух до сотен и тысяч атомов (например, витамины или белки).

Существование молекул подтверждается многочисленными опытами и наблюдениями: смешивание жидкостей, растворение в жидкостях твердых веществ, возможность дробления вещества, сжатие и расширение газов, диффузия и осмос, броуновское движение (беспорядочное движение мелких твердых частичек, взвешенных в жидкости, под действием хаотических ударов молекул и т.д.). С помощью современных электронных микроскопов можно получить фотографии отдельных молекул, с помощью туннельных – даже манипулировать ими (нанотехнологии).

Атомы (и молекулы) взаимодействуют между собой, что особенно проявляется при небольшом расстоянии между ними. Это взаимодействие обусловливают как силы притяжения, так и отталкивания. На малых расстояниях (меньших равновесного r_0) преобладают силы отталкивания, которые с увеличением расстояния убывают быстрее, чем силы притяжения, доминирующие на больших расстояниях. На равновесном расстоянии r_0 модули сил отталкивания и притяжения равны.

При рассмотрении **молекулярно-кинетической теории** вещества важно выделить следующее:

– все вещества состоят из молекул (атомов) и имеют дискретное строение;

– молекулы постоянно участвуют в хаотическом движении;

– между молекулами существуют силы взаимодействия.

Размеры молекул растут с увеличением числа атомов в них и лежат в пределах $10^{-10} \div 10^{-7}$м.

За **единицу измерения атомных масс** принимается $1/12$ массы атома изотопа углерода ^{12}C, которая называется атомной единицей массы (а.е.м.), 1 а.е.м. = $1{,}66057 \cdot 10^{-27}$ кг ($m_{ед}$). **Относительной молекулярной массой** M_o является безразмерная величина, равная отношению массы m_o молекулы данного вещества к $m_{ед}$. Масса молекулы определяется как $m_o = M_o \cdot m_{ед}$.

Единицей количества вещества является **моль**. **Моль** равен *количеству вещества, в котором содержится столько молекул или атомов, сколько атомов находится в 0,012 кг углерода* ^{12}C. **Молярной массой** M (или часто μ) называется масса вещества в количестве 1 моль.

В одном моле любого вещества (вне зависимости от его агрегатного состояния) содержится одинаковое число молекул или атомов ($N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$), которое называется **постоянной Авогадро.** Таким образом, массу молекулы можно определить как $m_o = \dfrac{M}{N_A}$.

5.1.2. Агрегатные состояния вещества

Почти все вещества могут находиться в трех агрегатных состояниях – **газообразном, жидком** и **твердом**. Определяющей данное разделение величиной обычно является отношение α средней потенциальной энергии взаимодействия молекул к их среднекинетической энергии: для газов $\alpha \ll 1$, для жидкости $\alpha \approx 1$ и для твердых тел $\alpha \gg 1$. В результате больших расстояний между молекулами в газах и, как следствие, слабых сил межмолекулярного взаимодействия (многокомпонентные силы электрической природы, характеризующие притяжение и отталкивание молекул), молекулы движутся в них почти свободно, заполняя весь объем.

В жидкостях межмолекулярное взаимодействие сказывается более сильно, поэтому тепловое движение молекул (атомов) проявляется в их малых колебаниях около положения равновесия и частых перескоках из одного положения в другое. Таким образом, жидкость имеет только ближний порядок в расположении частиц и характерную текучесть.

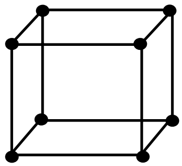


Рис. 5.1

Основные виды твердого состояния вещества – *аморфное* и *кристаллическое*. Аморфное состояние (стекло), как и жидкость, имеет согласованность в расположении ближайших частиц, но малую вероятность их перескоков (по сути переохлажденная жидкость с повышенной вязкостью). В кристаллах атомы совершают только колебания вблизи узлов трехмерной кристаллической решетки, при этом их структура имеет высокую степень упорядоченности. Порядок, свойственный расположению атомов в кристалле, часто приводит к симметрии его наружной формы. В кристаллической структуре выделяют мельчайшие «строительные блоки» (элементарные ячейки), путем переноса которых в трех направлениях (трансляции) можно построить весь кристалл. Элементарные ячейки разнообразны: простая кубическая решетка (рис. 5.1), объемно-центрированная кубическая структура и т.д.

В кристаллах возможен *полиморфизм*: способность некоторых веществ существовать в состояниях с различной кристаллической структурой. Например, углерод может иметь структуру алмаза (сочетание двух гранецентрированных кубических подрешеток, вставленных друг в друга) и гексагональную структуру (графит). В 1985 году в университете Райса обнаружена возможность атомов углерода соединяться в оболочки с 60 гранями (напоминают футбольный мяч). За открытие и исследование «нового углерода», обладающего уникальными свойствами, ученым Г. Крото, Р. Смолли и Р. Керлу присуждена Нобелевская премия 1996 года.

Встречаются и кристаллические решетки, состоящие из молекул, удерживаемых слабыми межмолекулярными силами (лед, твердые простые вещества, образованные многоатомными молекулами, кристаллы многих полимеров, например, белков и нуклеиновых кислот и т.д.). Кристаллы с подобными решетками назвали *молекулярными.*

Особым состоянием некоторых органических веществ являются *жидкие кристаллы*, которые обладают свойством жидкости – текучестью, но сохраняют определенную упорядоченность в расположении молекул и анизотропию ряда свойств.

Четвертым агрегатным состоянием вещества часто считают **плазму**, представляющую собой газ заряженных частиц (ионов, электронов и т.д.), которые электрически взаимодействуют друг с другом на больших расстояниях. В чистом виде ее можно получить при нагреве газа до колоссальной температуры $T=10^6$K. Плазма является наиболее распространенным состоянием вещества во Вселенной.

5.1.3. Температура

Со средней кинетической энергией молекул связана важная характеристика состояния вещества, называемая **температурой**. Температура, измеряемая в системе СИ в кельвинах, вводится как величина, пропорциональная средней кинетической энергии молекул:

$$T = \frac{2}{ik}\left\langle W_к \right\rangle. \tag{5.1}$$

В этом выражении i – число степеней свободы молекулы, а $k=1{,}38\cdot10^{-23}$Дж/К – постоянная Больцмана. Из (5.1) при i=1 следует, что на одну степень свободы приходится энергия

$$\left\langle W_{к1} \right\rangle = k\frac{T}{2}. \tag{5.2}$$

В принципе, можно измерять температуру в единицах энергии – джоулях, но тогда ее непосредственное измерение было бы затруднено, кроме того, средняя кинетическая энергия молекул – очень малая величина. Поэтому значительно удобней измерять температуру косвенным образом (например, в ртутном термометре фиксируется увеличение объема ртути при нагревании).

Согласно решению XI Генеральной конференции по мерам и весам (1960 г.) в настоящее время применяют только две температурные шкалы – термодинамическую (абсолютную) и Международную практическую, градуированные соответственно в кельвинах (К) и в градусах Цельсия (^{0}С).

В Международной практической шкале температур реперными (опорными) точками являются температура таяния льда 0^0С и кипения воды 100^0С при нормальном атмосферном давлении $1{,}013\cdot10^5$Па. В термодинамической шкале температура таяния льда равна 273,15К (при том же давлении), поэтому абсолютная температура по термодинамической шкале Т и температура t по Международной практической шкале связаны соотношением $T=273{,}15+t^*$. По размеру один градус Кельвина и градус Цельсия равны (1^0С=1К).

Достичь абсолютного нуля температуры Т=0К практически невозможно (противоречит законам квантовой механики), молекулы всегда участвуют в движении, но приблизиться к нему удается довольно близко $\approx10^{-6}$К.

5.1.4. Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов

При рассмотрении газообразного вещества часто применяют **модель идеального газа**, в которой не учитывают:

– собственный объем молекул газа по сравнению с объемом резервуара;

– пренебрегают энергией взаимодействия молекул;

– считают столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругими.

Для изучения свойств газа его обычно ограничивают сосудом с заданным объемом V. Газ в таком сосуде оказывает давление на стенки р (малые силы отдельных ударов молекул складываются в практически постоянную силу давления на стенку), которое, как показывает опыт, прямо пропорционально концентрации молекул, т.е. их количеству в единице объема и средней кинетической энергии поступательного движения молекул $\langle W_к \rangle$. Точный анализ приводит к следующему соотношению

$$p=\frac{2}{3}\,n\cdot\frac{m\langle \upsilon^2\rangle}{2}, \qquad (5.3)$$

где m – масса молекулы, или

* При более точном рассмотрении опорной точкой для обеих шкал является температура, при которой вода находится одновременно в трех состояниях (твердом, жидком и газообразном), то есть $t = 0{,}01^0$С.

$$p = \frac{1}{3}nm\left\langle \upsilon^2 \right\rangle = \frac{1}{3}\rho\left\langle \upsilon^2 \right\rangle. \qquad (5.4)$$

Выражение (5.3) или (5.4) носит название **основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа**. Это уравнение связывает макроскопический параметр (давление) с микроскопическими параметрами молекул газа. В частности мы встречаемся с $\left\langle \upsilon^2 \right\rangle$ – средним значением квадрата скорости молекул. Усреднение необходимо, так как молекулы газа движутся хаотично. Как показывает опыт скорость их движения имеет определенное распределение, установленное Дж. Максвеллом в 1859 году и носящее его имя.

Перепишем уравнение (5.2) для средней кинетической энергии поступательного (i=3) движения молекул в виде

$$\left\langle W_K \right\rangle = \frac{3}{2}kT, \qquad (5.5)$$

тогда с учетом (5.3) имеем

$$p = nkT. \qquad (5.6)$$

Так как для смеси идеальных газов $n_1+n_2+...+n_n=n$, то

$$p=p_1+p_2+...p_n. \qquad (5.7)$$

В результате получим так называемый **закон Дальтона**: *давление смеси идеальных газов на стенки сосуда равно сумме давлений ее отдельных компонент (парциальных давлений).*

Следствием основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов (5.4) является уравнение Клапейрона-Менделеева:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \qquad (5.8)$$

где p – давление газа, m – его масса, V – объем, M – молярная масса, T – абсолютная температура (К) и R – газовая постоянная.

На основании **закона Авогадро** можно показать, что один моль любого газа при нормальных условиях ($p_0=1,013\cdot10^5$Па, $T_0=273,15$К) занимает одинаковый объем $V_м=22,41\cdot10^{-3}$м^3/моль. Таким образом, имеем

$$R = \frac{p_0 V_M}{T_0} = 8,31\frac{Дж}{моль\cdot К}.$$

Частными случаями уравнения Клапейрона-Менделеева являются известные законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля.

Закон Бойля-Мариотта

Процесс при неизменной температуре (T=const) называют изотермическим. В этом случае давление определенной массы газа изменяется обратно пропорционально его объему

$$pV = const_1 \text{ или } p = \frac{const_1}{V}. \qquad (5.9)$$

Отмеченную закономерность называют **законом Бойля-Мариотта**, этот закон явным образом вытекает из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$p = \frac{mR}{MV}T, \qquad (5.10)$$

т.к. $\frac{mRT}{M} = const_1$.

Графическое представление закона Бойля-Мариотта показано на рис. 5.2.

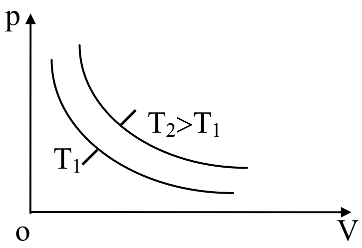


Рис. 5.2

Закон Бойля-Мариотта объясняется молекулярно-кинетической теорией газа, так как, например, с уменьшением объема в несколько раз во столько же раз увеличивается концентрация молекул и соответственно число ударов о стенки сосуда (T=const), в конечном итоге давление.

Закон Гей-Люссака

При изобарическом процессе (p=const) уравнение Клапейрона-Менделеева можно записать в виде

$$V = \frac{mR}{M \cdot p} T = const_2 T = \frac{V_0}{273{,}15} T = V_0 \alpha T\,, \qquad (5.11)$$

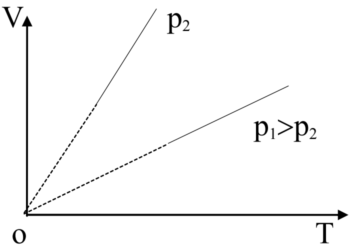


Рис. 5.3

где V_0 – объем газа при 273,15К, а $\alpha = \frac{1}{273{,}15K}$ – коэффициент объемного расширения газа. Это и есть **закон Гей-Люссака** (*объем некоторой массы идеального газа при постоянном давлении прямо пропорционален его термодинамической температуре*, рис. 5.3).

Закон Шарля

Закон Шарля описывает изохорический процесс (V=const):

$$p = \frac{mR}{MV} T = const_3 T = \frac{p_0}{273{,}15} T = p_0 \alpha T\,, \qquad (5.12)$$

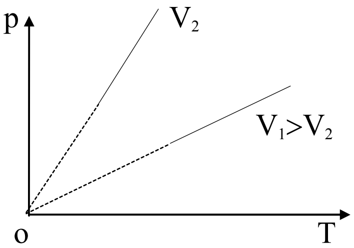


Рис. 5.4

где p_0 – давление газа при 273,15К, а $\alpha = \frac{1}{273{,}15}$ – температурный коэффициент давления газа. Его смысл заключается в том, что *давление некоторой массы газа при постоянном объеме прямо пропорционально его термодинамической температуре*, рис. 5.4.

В общем плане из уравнения Клапейрона-Менделеева следует и так называемый объединенный газовый закон

$$\frac{pV}{T} = const\,, \qquad (5.13)$$

согласно которому для данной массы газа произведение давления на объем, деленное на термодинамическую температуру, есть величина постоянная.

5.2. Тепловые явления

5.2.1. Внутренняя энергия системы. Первое начало термодинамики

Любая система обладает **внутренней энергией**, которая в общем случае складывается из кинетической энергии теплового движения молекул, потенциальной энергии их взаимодействия и внутримолекулярной энергии, вызванной движением и взаимодействием атомов, ионов, ядер и т.д.

Раздел физики, в которой изучаются явления, связанные с взаимным превращением механической и внутренней энергий и передачей внутренней энергии от одной системы к другой называется **термодинамикой**. В термодинамике не рассматривают внутримолекулярную энергию молекул (можно пренебречь), поэтому под внутренней энергией системы в термодинамике понимают сумму кинетической энергии молекул и потенциальной энергии их взаимодействия. В идеальном газе, как известно, пренебрегают и потенциальной энергией взаимодействия молекул.

Из закона сохранения энергии следует, что если система является **замкнутой** (т.е. она не обменивается веществом и энергией с другими системами), то ее внутренняя энергия сохраняется. В этом плане внутренняя энергия U – функция состояния системы.

Если рассмотреть идеальный газ, то средняя кинетическая энергия отдельных молекул, согласно (5.1), определяется как

$$\left\langle W_K \right\rangle = \frac{i}{2} kT, \tag{5.14}$$

тогда внутренняя энергия одного моля идеального газа будет равна

$$\left\langle W_K(\text{моля}) \right\rangle = \frac{i}{2} kN_A T = \frac{i}{2} RT, \tag{5.15}$$

где $R = kN_A$ – газовая постоянная, входящая в уравнение Клапейрона-Менделеева.

В целом внутренняя энергия произвольной массы m идеального газа задается выражением

$$U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}RT\,. \tag{5.16}$$

Внутренняя энергия системы может изменяться за счет совершения над ней работы (например, сжатие или растяжение тела) или за счет теплопередачи. **Теплопередача** (передача внутренней энергии от одного тела другому без совершения при этом телами работы) происходит на молекулярном уровне и связана с передачей энергии от молекул более нагретого тела к молекулам менее нагретых тел. Эта передача может осуществляться путем конвекции, теплопроводности и излучения.

Количество энергии, передаваемое от тела к телу путем теплопередачи, называется **количеством тепла** Q.

Обобщением закона сохранения энергии на тепловые явления является **первое начало термодинамики**: *количество тепла* Q*, сообщенного системе, затрачивается на приращение внутренней энергии системы* ΔU *и на совершение системой работы* A *над внешними телами,* то есть

$$Q = \Delta U + A\,. \tag{5.17}$$

Этот закон показывает невозможность создания вечного двигателя первого рода, который бы совершал работу в количестве большем, чем получаемая извне энергия.

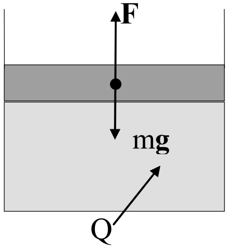


Рис. 5.5

При изобарических процессах, например при нагревании газа в цилиндре, находящегося под подвижным тяжелым поршнем (рис. 5.5), работа расширяющегося газа будет равна

$$A = F \cdot l = psl = p\,\Delta V, \tag{5.18}$$

где F – сила давления газа на поршень, l – перемещение поршня при постоянном давлении, s – площадь поршня и ΔV – изменение объема газа.

При **изохорических** процессах уравнение (5.18) имеет вид

$$Q = \Delta U , \qquad (5.19)$$

при **изотермических**, согласно (5.16), имеем

$$Q = A . \qquad (5.20)$$

Наконец, возможен так называемый **адиабатный** процесс (когда Q=0), то есть процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой (в реальной ситуации – очень быстрые процессы: выстрел пробки из бутылки с шампанским, распространение звука в среде и т.д.).

5.2.2. Теплоемкость. Изменение агрегатных состояний вещества

Физическая величина С, равная количеству тепла, которое необходимо сообщить телу, чтобы повысить его температуру на один градус, называется **теплоемкостью тела**. В системе единиц СИ теплоемкость выражается в Дж/К.

Удельной теплоемкостью с называют теплоемкость тела, масса которого равна единице. Она измеряется в Дж/кг·К.

Очевидно, что

$$C=cm , \qquad (5.21)$$

а выражение

$$Q = cm\,(t_2 – t_1) \qquad (5.22)$$

соответствует количеству тепла, которое необходимо сообщить телу массы m для нагревания его от температуры t_1 до температуры t_2 (при остывании этого тела от температуры t_2 до t_1 такое количество тепла выделяется).

Нагревание газа может происходить в разных условиях, например при постоянном объеме или при постоянном давлении. При этом теплоемкости отличаются: $c_p > c_v$, так как газ, который нагревается при постоянном давлении, расширяется, и часть сообщаемого ему количества тепла расходуется на работу расширения.

Вещество может гореть. **Удельной теплотой сгорания** топлива называют количество тепла q, которое выделяется при полном сгорании единицы массы топлива (измеряется в Дж/кг). Горение – это яркий пример необратимого процесса, рассеянное тепло, полученное при горении вещества невозможно собрать обратно.

Вещество может переходить из одного агрегатного состояния в другое (переход из одной фазы в другую). Примером фазовых переходов является плавление твердого тела и отвердевание жидкости или испарение и конденсация пара. Переход вещества из одной фазы в другую при заданном давлении обычно происходит при строго определенной температуре.

Плавление – это переход вещества из твердого состояния в жидкое. Температуру, при которой плавится кристаллическое тело при постоянном давлении называют **температурой плавления**. Аморфные тела (стекло, парафин и т.д.) размягчаются постепенно и не имеют определенной температуры плавления.

Количество тепла, необходимое для плавления единицы массы твердого кристаллического вещества при температуре плавления и постоянном давлении называют **удельной теплотой плавления** λ (изменяется в Дж/кг). При обратном процессе (отвердевании жидкости) выделяется эквивалентное количество тепла.

Парообразование может происходить путем испарения и кипения. Испарение наблюдается с поверхности жидкости при любой температуре и тем интенсивнее, чем выше температура жидкости, меньше внешнее давление и силы сцепления молекул, быстрее удаление образовавшихся над жидкостью паров. При кипении парообразование происходит одновременно внутри и с поверхности жидкости. Кипение при постоянном давлении имеет место при определенной температуре, называемой **точкой кипения** (очевидно, что при уменьшении внешнего давления температура кипения понижается).

Количество тепла r, необходимое для превращения единицы массы жидкости в пар при температуре кипения, называется **удельной теплотой парообразования** (измеряется в Дж/кг). При конденсации пара выделяется такое же количество тепла, которое было затрачено на испарение жидкости.

5.2.3. Тепловая машина

Тепловой машиной называют периодически действующее устройство, которое совершает работу за счет получаемого извне количества теплоты. Любая тепловая машина состоит из нагревателя, рабочего тела и холодильника (например, окружающая машину среда), при этом в ней происходит многократное повторение одного и того же рабочего цикла.

Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины находится по формуле

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \qquad (5.23)$$

где Q_1 – количество теплоты, передаваемое нагревателем рабочему телу, Q_2 – количество теплоты, передаваемое рабочим телом холодильнику, A – работа, совершаемая тепловой машиной за один цикл.

Максимальный КПД (η_{max}) характерен для идеализированного обратимого **цикла Карно** (две изотермы и две адиабаты):

$$\eta_{max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \qquad (5.24)$$

где T_1 – термодинамическая температура нагревателя и T_2 – термодинамическая температура холодильника. КПД реальной тепловой машины обычно не превышает 50%.

5.2.4. Температурные коэффициенты линейного и объемного расширения

Большинство тел при нагревании увеличивает свой объем. Для твердых тел, сохраняющих свою форму при изменении температуры, вводят коэффициенты линейного и объемного расширения.

Коэффициентом линейного расширения называют параметр α, показывающий на какую долю первоначальной длины удлиняется тело, имеющее температуру 0^0С, при нагревании его на один градус:

$$\alpha = \frac{l_t - l_o}{l_o t}, \qquad (5.25)$$

где l_o и l_t – соответственно длина тела при температуре 0^0С и t^0С. Отсюда выражаем

$$l_t = l_o\,(1+\alpha t)\,. \qquad (5.26)$$

Коэффициентом объемного расширения называют параметр β, показывающий на какую долю первоначального объема увеличивается объем тела, имеющего температуру 0^0С, при нагревании его на один градус:

$$\beta = \frac{V_t - V_o}{V_o t}, \qquad (5.27)$$

где V_o и V_t – соответственно объем тела при температуре 0^0С и t^0С. Из (5.27) находим

$$V_t = V_o\,(1+\beta t)\,. \qquad (5.28)$$

5.2.5. Насыщенные и ненасыщенные пары. Влажность воздуха

С увеличением числа молекул над жидкостью, появляющихся в процессе испарения, увеличивается вероятность их возвращения обратно в жидкость. При достаточно высокой плотности молекул над поверхностью жидкости число вылетающих и возвращающихся назад молекул сравнивается, наступает насыщение, которому соответствует предельная концентрация пара при данной температуре.

Пар называется **насыщенным**, если он *находится в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.*

При понижении температуры воздуха ненасыщенный пар может превратиться в насыщенный. Температура, при которой пар, находящийся в воздухе, превращается в насыщенный, называется **точкой росы** воздуха данной влажности.

Абсолютной влажностью воздуха называется масса водяного пара, который содержится в единице объема воздуха (плотность водяного пара в воздухе):

$$f = \rho = \frac{m}{V}\,. \qquad (5.29)$$

Относительной влажностью воздуха называют отношение плотности водяного пара, содержащегося в воздухе к плотности насыщенного пара при той же температуре (обычно выражается в процентах):

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_{\text{íàñ}}} 100\% \qquad (5.30)$$

или согласно уравнению Клапейрона-Менделеева можно записать как

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{íàñ}}} 100\% \qquad (5.31)$$

5.3. Поверхностное натяжения. Капиллярные явления

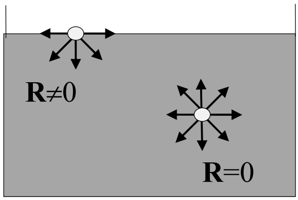


Рис. 5.7

Результирующая сил **R**, действующих на некоторую молекулу, находящуюся внутри объема жидкости, со стороны окружающих молекул равна нулю (рис. 5.7). Если же молекула расположена на поверхностном слое жидкости, то на эту молекулу должна действовать сила **R**≠0, стремящаяся переместить молекулу внутрь жидкости. Это приводит к тому, что жидкость принимает форму, при которой на ее поверхности располагается минимальное число молекул, т.е. поверхность жидкости становится наименьшей при отсутствии внешних сил. Такому условию отвечает шарообразная форма. Таким образом, поверхностный слой жидкости находится в состоянии натяжения и обладает запасом потенциальной энергии.

Коэффициентом поверхностного натяжения называют *величину, численно равную силе* F, *действующей на единицу длины линии* l, *ограничивающей поверхностный слой*

$$\sigma = \frac{F}{l}\left[\frac{Н}{м}\right]. \qquad (5.32)$$

Иногда коэффициент поверхностного натяжения рассчитывают как *отношение потенциальной энергии поверхностного слоя к величине этой поверхности.*

$$\sigma = \frac{W}{S} \quad . \tag{5.33}$$

Итак, поверхностное натяжение определяет форму жидкости, на границе раздела жидкость-среда. В зависимости от рода вещества, с которым граничит жидкость форма ее поверхности (мениск) может быть выпуклой и вогнутой (рис. 5.8).

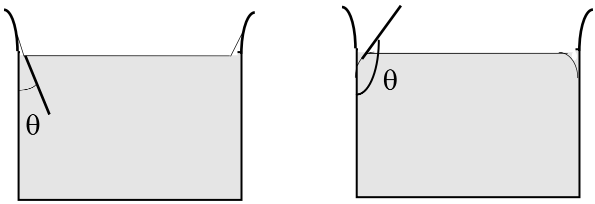


Рис. 5.8

При этом, если угол $\theta<90^0$, то жидкость называется **смачивающей**. Если же $\theta>90^0$, то жидкость называется **несмачивающей**.

Выпуклый поверхностный слой давит на нижние слои жидкости, а вогнутый – растягивает. Тем самым на жидкость со стороны изогнутого поверхностного слоя радиусом R оказывается избыточное давление, величина которого может быть рассчитана как

$$p = \pm \frac{2\sigma}{R} \tag{5.34}$$

Знак «+» соответствует выпуклому мениску, а «–» – вогнутому мениску.

Избыточное давление вызывает заметное поднятие или опускание уровня жидкости в узких трубках (капиллярах). Высоту подъема жидкости в капиллярной трубке при полном смачивании ее стенок можно определить из соотношения

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} , \tag{5.35}$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения $\left[\text{Н}/_{\text{м}}\right]$;

ρ – плотность жидкости $\left[\text{кг}/\text{м}^3 \right]$;

R – радиус капиллярной трубки [м];

g – ускорение свободного падения $\left[\text{м}/\text{с}^2 \right]$.

5.4. Молекулярная физика и тепловые явления в примерах

Пример № 1. Найти количество вещества, концентрацию молекул и плотность газообразного кислорода, находящегося в объеме $V=100\text{м}^3$. Молярная масса кислорода $M=0{,}032\,\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$. Масса кислорода $m=2$ кг.

Решение. В международной системе единиц количество вещества ν выражается в молях, следовательно $\nu=\frac{m}{M}=62{,}5$ моль. Общее число молекул кислорода равно $N=N_A\nu$ (здесь N_A – постоянная Авогадро), откуда концентрация молекул определяется как $n=\frac{N_A \cdot \nu}{V}=3{,}76\cdot10^{23}\text{м}^{-3}$.

Плотность газообразного кислорода $\rho=\frac{m}{V}=0{,}02\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Пример № 2. Газообразный кислород, находящийся под давлением $p_1=2\cdot10^5$ Па при температуре $T_1=283$К, после нагревания при постоянном давлении занял объем $V_2=0{,}01\text{м}^3$. Определить изменение объема, плотности и температуры газа. Молярная масса кислорода $M=0{,}032\,\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$, газовая постоянная $R=8{,}31\,\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$. Масса кислорода $m=0{,}01$ кг.

Решение. Запишем уравнение состояния идеального газа до расширения

$$p_1V_1=\frac{m}{M}RT_1,$$

откуда $V_1=\dfrac{mRT_1}{Mp_1}$=3,67·10^{-3}м^3 и $\Delta V=V_2-V_1$=6,33·10^{-3}м^3. Плотность до расширения $\rho_1=\dfrac{m}{V_1}=2{,}72\,\dfrac{кг}{м^3}$, плотность после расширения $\rho_2=\dfrac{m}{V_2}=1\,\dfrac{кг}{м^3}$, поэтому $\Delta\rho=\rho_1-\rho_2=1{,}72\,\dfrac{кг}{м^3}$. Согласно изобарическому процессу $\dfrac{V_1}{V_2}=\dfrac{T_1}{T_2}$, в результате $T_2=\dfrac{V_2T_1}{V_1}$=771К и $\Delta T=T_2-T_1$=488К.

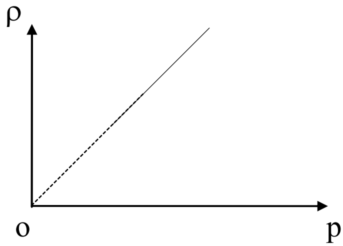


Рис. 5.6

Пример № 3. Какому изопроцессу соответствует график зависимости плотности идеального газа ρ от давления р, показанный на рис. 5.6.

Решение. Согласно уравнению Клапейрона-Менделеева имеем $\rho=\dfrac{m}{V}=\dfrac{pM}{RT}$, тогда линейная зависимость $\rho=f(p)$ будет наблюдаться только при изотермическом процессе.

Пример № 4. Воду, имеющую температуру T_1=283К, помещают в холодильник. Найти отношение времени превращения воды в лед ко времени охлаждения воды до T_2=273К. Удельная теплоемкость воды с=4,2 кДж/кг·К, удельная теплота плавления льда $\lambda=3{,}34\cdot10^5\,\dfrac{Дж}{кг}$.

Решение. Количество тепла Q, которое отбирает холодильник в единицу времени (его мощность) у воды в процессе ее охлаждения и замерзания одинаково, поэтому

$$Q=\frac{cm(T_1-T_2)}{\tau_1}=\frac{\lambda m}{\tau_2},$$

где m – масса воды, τ_1 – время охлаждения воды до температуры T_2, τ_2 – время превращения воды в лед.

В результате имеем

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{\lambda}{c(T_1 - T_2)} = 7{,}95.$$

Пример № 5. Температура воздуха T_1=293K, точка росы T_2=281K. Определить абсолютную и относительную влажность воздуха a и φ, если давление насыщенных паров воды при T_1 равно p_{H1}=2,33кПа и при T_2 оно равно p_{H2}=1,07кПа.

Решение. Абсолютная влажность воздуха равна количеству насыщенного пара в 1 м^3 при температуре точки росы. Воспользовавшись уравнением Менделеева-Клапейрона, получаем

$$a = \frac{m}{V} = \frac{p_{H2} \cdot M}{RT_2} = 8{,}2 \cdot 10^{-3}\, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

где M – молярная масса паров воды ($0{,}018\,\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$).

Давление насыщенных паров воды в точке росы равно парциальному давлению водяного пара при температуре T_1, поэтому

$$\varphi = \frac{p_{H2}}{p_{H1}} 100\% = 46\%.$$

Пример № 6. КПД тепловоза η = 40%. Определить расход мазута в нем на совершение работы A = 1кВт·час. Удельная теплота сгорания топлива $q = 4{,}61 \cdot 10^7\,\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Решение. КПД тепловоза

$$\eta = \frac{A}{Q},$$

где A – полезная работа, совершаемая двигателем тепловоза, Q – количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива. При этом Q=q·m, тогда $\eta = \frac{A}{qm}$ или $m = \frac{A}{q\eta} = \frac{10^3 \cdot 3{,}6 \cdot 10^3}{4{,}61 \cdot 10^7 \cdot 0{,}4}$ кг = 0,196 кг.

5.5. Глоссарий

Атом	–	наименьшая часть химического элемента, являющаяся носителем его свойств.
Влажность:		
абсолютная	–	масса водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха;
относительная	–	отношение плотности водяного пара, содержащегося в воздухе, к плотности насыщенного пара при той же температуре.
Внутренняя энергия	–	энергия системы, состоящая из кинетической энергии (теплового движения) отдельных молекул системы, потенциальной энергии их взаимодействия и внутримолекулярной энергии.
Закон		
Авогадро	–	в равных объемах разных газов при одинаковых давлениях и температуре содержится одинаковое число молекул;
Бойля-Мариотта	–	давление определенной массы идеального газа при неизменной температуре обратно пропорционально его объему;
Гей-Люссака	–	объем некоторой массы идеального газа при постоянном давлении прямо пропорционален его термодинамической температуре;
Дальтона	–	давление смеси газов на стенки сосуда равно сумме давлений компонент смеси (парциальных давлений)
Шарля	–	давление некоторой массы идеального газа при неизменном объеме прямо пропорционально его термодинамической температуре.
Идеальный газ	–	газ, состоящий из точечных частиц конечной массы, между которыми отсутствует взаимодействие на расстоянии и которые взаимодействуют между собой и стенками сосуда по законам упругого соударения.

Молекула – мельчайшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства и состоящая из атомов, скрепленных друг с другом химической связью.

Моль – количество вещества, в котором содержится столько молекул или атомов, сколько атомов находится в 0,012 кг углерода.

Молярная масса – масса вещества, содержащаяся в одном моле.

Насыщенный пар – пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.

Парообразование – процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное.

Плавление – процесс перехода вещества из твердого состояния в жидкое.

Теплоемкость

тела – количество теплоты, необходимое для нагревания данного тела на один градус;

удельная – количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы этого вещества на один градус.

Тепловая машина – периодически действующее устройство, совершающее работу за счет получаемого извне количества теплоты.

Теплота – энергия, передаваемая от тела к телу путем теплопередачи.

Термодинамика – раздел физики, в котором изучаются явления, связанные с взаимным превращением механической и внутренней энергий и передачей внутренней энергии от одной системы к другой.

<u>Основные вопросы для повторения:</u>

1. Дайте определение молекулы и атома.
2. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории вещества.

3. Что называют атомной единицей массы? относительной молекулярной массой?
4. Дайте определение моля вещества.
5. Перечислите агрегатные состояния, в которых может находиться вещество, в чем их принципиальное различие?
6. Сформулируйте понятие температуры. Назовите принятые единицы измерения температуры в различных температурных шкалах.
7. Дайте определение идеального газа.
8. Запишите в виде формулы основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа.
9. Сформулируйте закон Авогадро и Дальтона.
10. Запишите в виде формулы уравнение Клапейрона-Менделеева и поясните физический смысл входящих в него величин.
11. Сформулируйте законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Шарля.
12. Что изучает термодинамика?
13. Что называют внутренней энергией вещества?
14. Какой процесс называют теплопередачей?
15. Что такое теплота?
16. Сформулируйте I начало термодинамики для различных процессов.
17. Что называют теплоемкостью тела, удельной теплоемкостью?
18. Какие процессы сопровождают переход вещества из одного агрегатного состояния в другое?
19. Что называют удельной теплотой плавления, удельной теплотой парообразования, удельной теплотой сгорания?
20. Что называют тепловой машиной? Чему равен КПД идеальной тепловой машины?
21. Дайте определение насыщенных паров, абсолютной и относительной влажности.
22. Что называют коэффициентом поверхностного натяжения?
23. Дайте определение смачивающей (несмачивающей) жидкости.
24. Чему равна высота подъема жидкости в капиллярной трубке?

Лекция № 6

6.1. Основы электродинамики. Электростатика. Общие понятия

Одним из важных представлений электродинамики является понятие электрического заряда. **Электрический заряд** – *материальный источник электромагнитного поля, это – внутренняя характеристика элементарных частиц, определяющая их электромагнитное взаимодействие (скалярная физическая величина)*.

Согласно полевой модели взаимодействия частиц (в дальнейшем рассмотрим и квантово-механическую) заряженная частица так возмущает окружающее пространство, что любая другая заряженная частица, помещенная в область этого пространства, будет испытывать действие силы. Говорят, что на частицу действует электромагнитное поле. **Электрическая** составляющая такого поля связана с самим фактом присутствия заряженной частицы (источника) в рассматриваемой области пространства, **магнитная** – с ее движением. Любое заряженное тело можно представить как совокупность заряженных частиц, создающих общее электромагнитное поле.

Электростатика – раздел электродинамики, в котором рассматривается взаимодействие неподвижных электрических зарядов (через электростатическое поле). Конечно, такой подход является некоторым приближением, так как заряды – неподвижные относительно одной системы отсчета, всегда движутся относительно какой-либо другой (достаточно вспомнить, что Земля вращается). Однако, такой подход удобен тем, что можно не учитывать магнитное поле.

Различают два типа электрических зарядов, условно названные *положительными* и *отрицательными*. Носителями электрических зарядов являются элементарные частицы, в частности частицы, которые входят в состав атомов: электрон (отрицательный заряд) и протон (положительный заряд). Электрону и протону присущи наименьшие неделимые заряды, их называют элементарными (+e – для протона, –e – для электрона). Единицей измерения заряда в СИ является кулон ($1Кл=6.25\cdot10^{18}e$). Элементарный заряд e по модулю равен $(1,6021892\pm0,0000046)\cdot10^{-19}$Кл или приближенно $1,6\cdot10^{-19}$Кл. Тело будет заряженным, если имеет неодинаковое число положительных и отрицательных элементарных зарядов. Тем не менее, обратите внимание на **закон сохранения электрического заряда**, который гласит, *в электрически изолированной системе (отсутствует обмен электрически заряженными частицами с окружающей средой) алгебраическая сумма электрических зарядов остается постоянной.*

Установлено, что взаимодействие одноименно заряженных частиц (тел) имеет характер отталкивания, а заряженных разноименно – притяжения.

6.2. Закон Кулона. Напряженность и потенциал электрического поля. Силовые линии

Взаимодействие заряженных тел регламентирует **закон Кулона**, установленный французским физиком Ш. Кулоном опытным путем с помощью изобретенных им крутильных весов в 1785 году: *в вакууме сила взаимодействия между двумя точечными неподвижными зарядами пропорциональна произведению этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды, то есть*

$$F = k\cdot\frac{q_1 q_2}{r^2}\ , \qquad (6.1)$$

где в СИ коэффициент пропорциональности $k=9\cdot10^9\,\frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$

Окружающая среда влияет на взаимодействие зарядов: *величина, которая показывает, во сколько раз сила взаимодействия между электрическими зарядами в данной среде меньше, чем в вакууме, называется* **диэлектрической проницаемостью среды** (ε), например, для воздуха ε=1,0006, для воды ε=81 и т.д. (существуют специальные таблицы).

Закон Кулона для точечных зарядов, погруженных в жидкий и газообразный диэлектрик, имеет вид

$$F = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}\ , \qquad (6.2)$$

Знак силы в уравнениях (6.1, 6.2) показывает ее направление относительно взаимодействующих зарядов, минус – заряды притягиваются, плюс – отталкиваются. Обычно рассчитывают модуль силы взаимодействия, в этом случае соотношение (6.2) переписывается в виде:

$$F = k\frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2}\ , \tag{6.3}$$

Во многих задачах используют рационализированную форму записи закона Кулона

$$F = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}\ , \tag{6.4}$$

где $\varepsilon_0 = \dfrac{1}{4\pi \cdot k} = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\dfrac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\dfrac{\text{ф}}{\text{м}}$ и называется электрической постоянной.

Если взаимодействуют заряженные тела, размерами которых нельзя пренебречь по сравнению с расстоянием между ними (неточечные), то для нахождения силы их взаимодействия, эти тела мысленно разбивают на малые заряженные элементы (которые можно считать точечными) и рассчитывают кулоновские силы взаимодействия каждой пары зарядов, затем проводят векторное сложение этих сил.

Количественной характеристикой силового действия электрического поля на заряженные объекты служит векторная величина **E** – **напряженность электрического поля**, которая равна *силе, действующей на единичный положительный точечный заряд, помещенный в данную точку поля и которая направлена в сторону действия результирующей сил, приложенных к заряду.* Если на точечный заряд q+ (положительный) в некоторой точке поля действует сила **F**, то напряженность электрического поля в этой точке

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q^+}\ . \tag{6.5}$$

Единицей измерения напряженности электрического поля в СИ является Н/Кл, или, как увидим в дальнейшем В/м, общепринятой является вольт на метр.

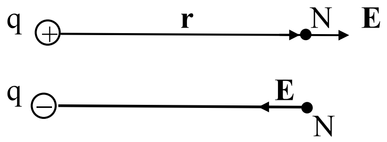


Рис. 6.1.

В случае создания электрического поля точечным зарядом q, его напряженность в точке N (см. рис. 6.1) определяется согласно (6.2), как

$$\mathbf{E} = k\frac{q}{\varepsilon r^3}\mathbf{r}\,, \qquad (6.6)$$

где $\boldsymbol{r}$ – радиус-вектор, проведенный в рассматриваемую точку N из точки, где находится заряд q, создающий поле.

Модуль вектора напряженности поля точечного заряда рассчитывается по формуле

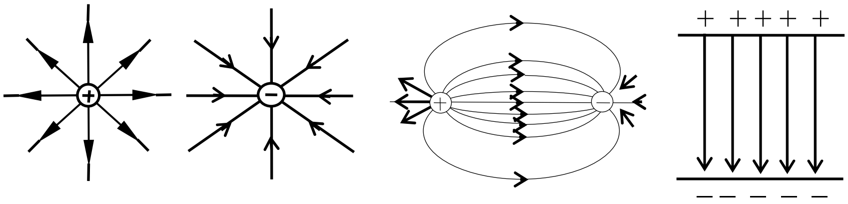
$$E = k\frac{|q|}{\varepsilon r^2} = \frac{|q|}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}\,. \qquad (6.7)$$

Если электрическое поле создают несколько точечных источников (n), то его результирующая напряженность рассчитывается *по принципу суперпозиции полей*:

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^{n}\mathbf{E}_i\,. \qquad (6.8)$$

Электрическое поле принято изображать с помощью **линий напряженности**. Это линии, *касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора* ***E*** *в данной точке, а их густота пропорциональна модулю вектора* ***E*** *в данном месте поля.*

Примеры (рис. 6.2):



а) б) в) г)

Рис. 6.2.

Электрическое поле, *напряженность которого во всех точках одинакова по модулю и направлению*, называется **однородным**. Его, например, могут создать две разноименно заряженные плоские пластины (рис. 6.2, г).

Из соображений симметрии понятно, что равномерно заряженная сфера вне себя создает электрическое поле, аналогичное полю точечного заряда той же величины, что и заряд сферы *q,* если этот заряд поместить в центр сферы (рис. 6.3).

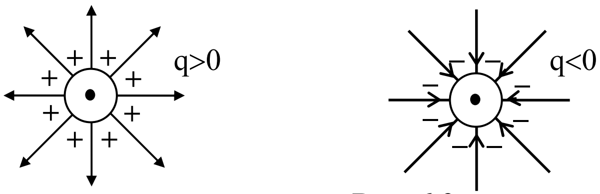


Рис. 6.3.

Таким образом, формула (6.7) позволяет вычислить модуль вектора напряженности $|\mathbf{E}|$ в любой точке вне равномерно заряженной сферы.

Силы электростатического поля являются **консервативными**. Как известно, тело, помещенное в консервативное поле сил, обладает потенциальной энергией, которая определяется с точностью до определенной постоянной величины.

Энергия вносимого в поле заряда отсчитывается от бесконечности, то есть за границей действия электростатического поля, где принимается равной нулю. Энергетической характеристикой электростатического поля является потенциал.

Потенциалом электростатического поля φ называют *скалярную величину, численно равную потенциальной энергии, которой обладает в данной точке поля единичный положительный заряд. Если в данной точке поля точечный положительный заряд q+ имеет потенциальную энергию* $W_п$, *то*

$$\varphi = \frac{W_п}{q+}. \tag{6.9}$$

Единица потенциала – вольт (В), то есть потенциал такой точки поля, в которой заряд в 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж.

Потенциал поля, созданного точечным зарядом *q*, равен

$$\varphi = k\frac{q}{\varepsilon r} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}. \tag{6.10}$$

При r = ∞, φ = 0. Таким образом, **потенциал –** это физическая величина, *определяемая работой сил электростатического поля по перемещению единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность.*

Если поле создается несколькими зарядами (n), то **потенциал поля системы зарядов** будет *равен алгебраической сумме потенциалов отдельных полей всех образующих систему зарядов:*

$$\varphi = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i, \tag{6.11}$$

считаем среду однородной по всем направлениям (ε = const). При этом знак «+» приписывается потенциалу поля, созданного положительным зарядом, знак «–» – отрицательным.

Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении заряда Q из точки 1 в точку 2, будет равна (см. соотношение 6.9):

$$A_{12} = W_{п_1} - W_{п_2} = Q\,(\varphi_1 - \varphi_2), \tag{6.12}$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов двух точек 1 и 2 в электростатическом поле (она задается работой, совершаемой силами поля, при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2).

Поскольку поле электростатических сил имеет консервативный характер, работа этих сил при переносе заряда по замкнутому контуру равна нулю.

Если мы обозначим через d расстояние между двумя очень близкими точками поля, принадлежащими одной силовой линии, то модуль вектора напряженности E определяется как

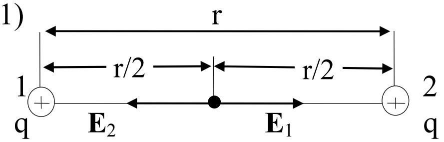
$$E = \frac{|\varphi_1 - \varphi_2|}{d} \left[\frac{\text{В}}{\text{м}}\right], \tag{6.13}$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов между рассматриваемыми точками 1 и 2.

В однородном поле напряженность остается всегда постоянной, поэтому соотношение (6.13) справедливо для любых расстояний d между двумя точками одной и той же силовой линии. Если точки 1 и 2 принадлежат разным силовым линиям однородного электрического поля, то под d понимается проекция отрезка, соединяющего точки 1 и 2, на направление линий напряженности электрического поля.

Примеры (рис. 6.4):

1)



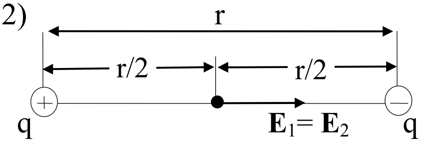
E – ?

φ – ? $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2,\ E = E_1 - E_2 = k\frac{q}{\left(r/2\right)^2} - k\frac{q}{\left(r/2\right)^2} = 0$$

$$\varphi = k\frac{q}{\left(r/2\right)} + k\frac{q}{\left(r/2\right)} = 2k\frac{q}{\left(r/2\right)}.$$

2)



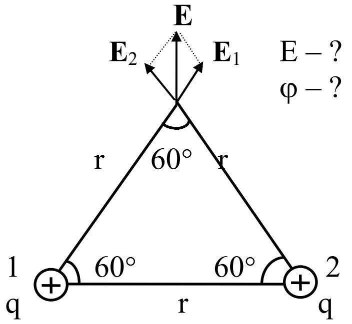
E – ?

φ – ? $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2,\ E = E_1 + E_2 = 2k\frac{q}{\left(r/2\right)^2}$$

$$\varphi = k\frac{q}{\left(r/2\right)} - k\frac{q}{\left(r/2\right)} = 0.$$

3)



$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$, $E = E_1 \cos 30° + E_2 \cos 30° = 2k\dfrac{q}{r^2} \cos 30°$.

$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 2k\dfrac{q}{r}$.

В данных примерах q – модуль соответствующего заряда.

Рис. 6.4.

6.3. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Если в электрическое поле внести проводник (металл, электролит, плазму), то в нем произойдет перераспределение свободных зарядов, которое называется **электрической индукцией.** Разделившиеся положительные и отрицательные заряды в проводниках создают собственное электрическое поле, которое искажает внешнее поле и компенсирует его внутри проводника.

Отсутствие электрического поля в пространстве, охваченном проводником, используют для *электростатической защиты*.

Обратите внимание, что если напряженность электростатического поля внутри заряженного проводника равна нулю, то это не означает, что потенциал в любой точке внутри проводника будет равен нулю. Если вспомнить определение потенциала, то становится понятным, что потенциал внутри заряженного проводника во всех точках одинаков и равен потенциалу на поверхности проводника. При этом во всех точках поверхности заряженного проводника потенциал одинаков (электростатика, в стационарном состоянии отсутствует движение зарядов), то есть *поверхность заряженного проводника является эквипотенциальной*. Силовые линии поля (линии напряженности) всегда перпендикулярны к этой поверхности (надо учитывать при изображении линий напряженности электрического поля).

В диэлектриках наличием свободных носителей заряда можно пренебречь, поэтому при помещении диэлектриков в электрическое поле существенное значение приобретает его воздействие на связанные заряды, имеющиеся в атомах и молекулах, которые в электрическом поле обычно моделируют в форме диполя. Диполь – это совокупность двух равных по модулю разноименных точечных зарядов q, находящихся на небольшом расстоянии l друг от друга, которое называется плечом диполя. Основной характеристикой диполя является вектор электрического момента **p** = ql**n**, где **n** – единичный вектор, направленный от отрицательного к положительному заряду. В полярных молекулах типа H_2O диполи существуют изначально. Однако, в отсутствие внешнего поля они ориентированы хаотично и суммарный электрический момент диэлектрика равен нулю. В неполярных молекулах, имеющих симметричное строение (N_2, H_2, O_2 и т.д.), электрические моменты появляются только за счет действий внешнего электрического поля, приводящего к смещению друг относительно друга положительных и отрицательных зарядов.

Процесс ориентации диполей или их появление под действием электрического поля получил название *поляризации диэлектрика*. В ионных кристаллах типа NaCl поляризация заключается в смещении положительно и отрицательно заряженных ионных подрешеток относительно друг друга.

6.4. Электрическая емкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля

Электрической емкостью (электроемкостью) уединенного проводника называют физическую величину, *равную отношению заряда проводника к его потенциалу*

$$C = \frac{q}{\varphi}. \tag{6.14}$$

Важно усвоить, что электроемкость не зависит от q и φ (чем больше q, тем больше φ), так как $C = \dfrac{q_1}{\varphi_1} = \dfrac{q_2}{\varphi_2} = \ldots = \dfrac{q_n}{\varphi_n}$.

Электроемкость уединенного проводника определяется только его формой и размерами, а также электрическими свойствами окружающей диэлектрической среды, она измеряется в фарадах (1Ф=1Кл/1В).

Используя соотношение (6.10) получим выражение для электроемкости шара:

$$C = \frac{q \cdot 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon R}{q} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R\,. \tag{6.15}$$

Емкость уединенного проводника 1Ф – нереальная величина, такой емкостью обладает проводящий шар радиусом около 9 миллионов километров. На практике обычно используют: 1мкФ=10^{-6}Ф, 1пФ=10^{-12}Ф.

Из соотношения (6.15) следует, что ε_0 измеряется в Ф/м.

Существуют устройства, способные накапливать (конденсировать) большие заряды, они представляют собой систему двух близко расположенных проводников, разделенных диэлектриком. Эти устройства называют **конденсаторами**. Проводящие поверхности конденсатора (обкладки) бывают плоскими (две близко расположенных пластины), а также могут иметь форму коаксиальных цилиндрических поверхностей или концентрических сфер.

На обкладках заряженного плоского конденсатора сосредоточены равные по модулю и противоположные по знаку заряды, однородное электрическое поле находится внутри конденсатора.

Электроемкостью конденсатора C называют отношение сообщенного обкладкам конденсатора заряда q к возникающей на них в результате этого разности потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}, \tag{6.16}$$

где U – сокращенное обозначение разности потенциалов.

Электроемкость плоского конденсатора зависит от его размеров:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \tag{6.17}$$

где S – площадь обкладки, d – зазор между обкладками.

Электрическое поле обладает энергией и можно показать, что в диэлектрике с проницаемостью ε плотность энергии электрического поля (т.е. энергии поля, приходящейся на единичный объем пространства) определяется выражением

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} . \qquad (6.18)$$

Умножив ω на объем конденсатора можно в конечном итоге получить формулы, определяющие энергию заряженного конденсатора

$$W_к = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} . \qquad (6.19)$$

Соединение конденсаторов в батареи

1. *Параллельное соединение конденсаторов.* При параллельном соединении конденсаторов (рис. 6.5), когда положительно заряженные обкладки объединяются в одну группу, а отрицательно заряженные – в другую, разность потенциалов между обкладками на каждом конденсаторе одинакова $(\varphi_1 - \varphi_2) = U$.

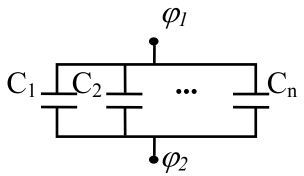


Рис. 6.5.

Общий заряд конденсаторов определяется как

$$q = q_1+q_2+...+q_n = (C_1+C_2+...+C_n)\cdot U . \qquad (6.20)$$

Отсюда с учетом (6.16) получим выражение для расчета емкости батареи параллельно соединенных конденсаторов:

$$C = \frac{q}{U} = C_1+C_2+...+C_n . \qquad (6.21)$$

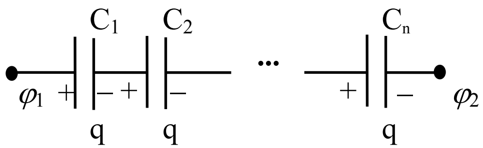


Рис. 6.6.

2. *Последовательное соединение конденсаторов.* При последовательном соединении (рис. 6.6) конденсаторы соединяются разноименно заряженными пластинами. В этом случае заряды на всех обкладках равны по модулю, суммарный заряд соединенных обкладок равен нулю. Заряды же конденсаторов равны:

$$q_1 = q_2 = ... = q_n = q . \qquad (6.22)$$

Разность потенциалов между крайними обкладками равна:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = U = U_1 + U_2 + ... + U_n = q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n}\right). \qquad (6.23)$$

Емкость батареи конденсаторов с учетом (6.22 и 6.23) определяется как

$$C = \frac{q}{U} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n}\right)^{-1}, \qquad (6.24)$$

в результате имеем

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ... + \frac{1}{C_n}. \qquad (6.25)$$

6.5. Глоссарий

Диполь электрический	–	совокупность двух равных по модулю разноименных точечных зарядов, находящихся на некотором (обычно небольшом) расстоянии друг от друга.
Диэлектрическая проницаемость среды	–	величина ε, характеризующая поляризацию диэлектрика под действием электрического поля; в законе Кулона показывает во сколько раз сила взаимодействия двух свободных зарядов в диэлектрике меньше, чем в вакууме.
Заряд электрический	–	материальный источник электромагнитного поля; внутренняя скалярная характеристика элементарных частиц, определяющая их электромагнитное взаимодействие.
Конденсатор	–	система двух близко расположенных заряженных проводников, помещенных в вакуум или диэлектрик.
Кулона закон	–	сила взаимодействия между двумя точечными неподвижными зарядами пропорциональна произведению этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату рас-

	стояния между ними и направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды.
Напряженность электрического поля –	векторная величина, равная силе, действующей на единичный положительный точечный заряд, помещенный в данную точку электрического поля, и направленная в сторону действия силы.
Потенциал электростатического поля –	скалярная величина, численно равная потенциальной энергии, которой обладает в данной точке поля единичный положительный точечный заряд.
Силовая линия электрического поля (линия напряженности) –	линия, касательная к которой в каждой точке пространства совпадает по направлению с вектором напряженности электрического поля.
Сохранения электрического заряда закон –	в электрически изолированной системе алгебраическая сумма электрических зарядов всегда постоянна.
Суперпозиции принцип –	напряженность электрического поля, созданного совокупностью электрических зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, созданных в данной точке поля всеми зарядами в отдельности.
Электрическое поле –	частная форма проявления электромагнитного поля, определяющая действие на электрический заряд силы поля, не зависящей от скорости движения заряда.
Электрическая постоянная –	физическая постоянная ε_0, входящая в уравнения законов электрического поля (например, в закон Кулона).
Электроемкость уединенного проводника –	физическая величина, равная отношению заряда проводника к его потенциалу.

Основные вопросы для повторения

1. Что такое электрический заряд? Опишите его свойства и количественные характеристики.
2. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
3. Сформулируйте закон Кулона. Поясните физический смысл величин, входящих в него.
4. Дайте определение напряженности электрического поля.
5. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
6. Дайте определение линий напряженности электрического поля.
7. Дайте определение потенциала электростатического поля. Что такое разность потенциалов между двумя точками поля?
8. Какая существует связь между напряженностью электростатического поля и потенциалом?
9. Что такое эквипотенциальная поверхность?
10. Каковы особенности поведения проводников во внешнем электрическом поле?
11. В чем заключается поляризация диэлектриков? Каковы основные механизмы поляризации?
12. Дайте определение электрической емкости. От чего зависит электроемкость проводника?
13. Что называется конденсатором? Запишите в виде формулы выражение для емкости плоского конденсатора.
14. Как рассчитывается энергия электрического поля заряженного проводника?
15. Как рассчитывается общая емкость батареи конденсаторов, соединенных последовательно и параллельно?

Лекция № 7

7.1. Электрический ток. Электродвижущая сила. Напряжение

Под **электрическим током** понимают *направленное движение электрически заряженных частиц (например, ток проводимости, связанный с движением заряженных частиц в какой-либо среде) или заряженных макроскопических тел (конвекционный ток, в частности, падение заряженных капель дождя)*. Носителями тока в металлах являются электроны (отрицательно заряженные элементарные частицы), в жидкостях – ионы, в газах – ионы и различные заряженные частицы, в полупроводниках электрический ток могут создавать электроны и дырки.

Количественными характеристиками электрического тока являются: скалярная величина, которая называется **сила тока** J и векторная величина, называемая **плотностью электрического тока j**.

Сила тока J – это *величина, численно равная заряду, который проходит через рассматриваемую поверхность в единицу времени*. Если за время Δt через поверхность пройдет заряд Δq, то усредненная сила тока определяется как

$$\langle J \rangle = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \tag{7.1}$$

Мгновенное значение силы тока запишется в виде

$$J = \frac{dq}{dt}, \tag{7.2}$$

а постоянный ток (сила и направление вектора скорости носителей заряда которого постоянны во времени) характеризуется выражением

$$J = \frac{q}{t}. \tag{7.3}$$

Единицей измерения электрического тока в СИ является ампер (А = $\frac{\text{Кл}}{\text{с}}$).

Величина **вектора плотности тока j** в интересующей нас точке пространства численно равна *силе тока, проходящего через расположенную в данной точке единичную площадку, ориентированную перпендикулярно к направлению движения носителей заряда.*

Если силу тока, протекающего через поперечное сечение проводника, обозначим как J, а площадь сечения – $S_\perp$, то

$$j = \frac{J}{S_\perp}\left[\frac{A}{м^2}\right]. \quad (7.4)$$

Исторически принято, что направление вектора **j** (направление тока) совпадает с направлением упорядоченного движения положительных носителей заряда.

Исходя из определения плотности тока легко получить, что

$$j = qn\,\langle \upsilon \rangle, \quad (7.5)$$

где q – заряд носителя тока, n и $\langle \upsilon \rangle$ – соответственно концентрация носителей в проводнике и $\langle \upsilon \rangle$ их средняя скорость упорядоченного движения.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо присутствие свободных носителей заряда и силы, обеспечивающей их упорядоченное движение. Эта сила обычно появляется за счет действия электрического поля, которое определяется электрическим напряжением на концах проводника.

Электрическое напряжение. Электрический ток в проводнике создается разностью потенциалов, например $\varphi_1–\varphi_2$ (см. рис. 7.1), вспоминая прошлую лекцию, разностью потенциальных энергий, которыми обладает носитель заряда в разных точках электрического поля внутри проводника. В данном случае можно провести аналогию с наличием перепада высот на различных участках реки, чем больше перепад, тем сильнее поток воды в реке.

В случае реки перепад высот и круговорот воды создает природа, в случае электрического тока также необходим какой-либо источник (обозначим Е), который бы осуществил круговорот зарядов (рис. 7.2).

Данный источник играет роль своеобразного насоса, который от конца проводника с меньшим потенциалом (т. 2) перебрасывает проводимые током заряды к концу с большим потенциалом (т. 1). Перемещение положительных носителей тока (на самом деле в металлическом проводнике, конечно, движутся электроны) на участке 2→1 происходит против сил электростатического поля и возможно только при приложении сил неэлектростатического происхождения, называемых **сторонними силами**. Эти силы могут быть обусловлены механическими, химическими, световыми и другими процессами. Величина, равная *работе сторонних сил над единичным положительным зарядом,* называется **электродвижущей силой** (э.д.с., термин не очень удачен) Е, действующей на участке (например, участок 2→1) или в замкнутой цепи (рис. 7.2).

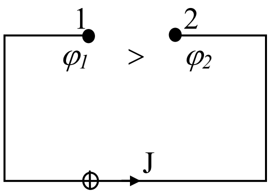


Рис. 7.1.

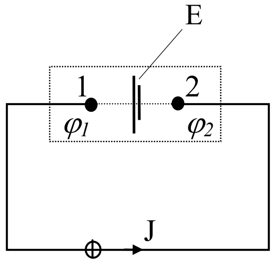
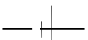


Рис. 7.2

Если работа сторонних сил над зарядом q равна $A_{\text{ст.}}$, то

$$E = \frac{A_{\text{ст.}}}{q}. \tag{7.6}$$

Из выражения (7.6) видно, что размерность э.д.с. совпадает с размерностью потенциала (вольт).

Устройства, которые обеспечивают действие сторонних сил, получили название источников электрического тока и обозначаются в схемах как  , где длинная вертикальная черта соответствует положительному полюсу источника. Сторонние силы внутри источника тока действуют от отрицательного полюса к положительному, это направление часто называют *направлением действия э.д.с.*

Если на некотором участке электрической цепи, например 1-2, (рис. 7.3) действуют одновременно электростатические и сторонние силы с электродвижущей силой E_{12} (*неоднородный участок цепи*), то величина, *численно равная работе, совершаемой электростатическими (кулоновскими) и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда из т. 1 в т. 2*, получила название

напряжения *U* на выделенном участке электрической цепи (можно и падение напряжения):

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) + E_{12}\,. \qquad (7.7)$$

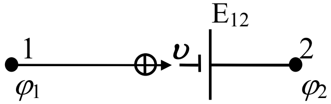


Рис. 7.3

Знак ε_{12} в общем случае зависит от направления действия электродвижущей силы.

Если на рассматриваемом участке цепи 1–2 отсутствуют сторонние силы (E_{12}=0, *однородный участок*), то

$$U = \varphi_1 - \varphi_2\,, \qquad (7.8)$$

поэтому в формуле электрической емкости $C = \dfrac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$ мы писали

$C = \dfrac{q}{U}$.

7.2. Закон Ома. Сопротивление проводников

Немецкий физик Георг Симон Ом экспериментально установил следующий закон (скорее правило, так как оно применимо лишь к некоторым типам материалов): *сила тока, текущего в металлическом проводнике, прямо пропорциональна напряжению на этом проводнике и обратно пропорциональна его сопротивлению* R

$$J = \frac{U}{R}\,. \qquad (7.9)$$

Берега и дно реки создают сопротивление потоку воды, точно так же электроны тормозятся в результате взаимодействия с ионами металла. Величина сопротивления зависит от свойств материала и определяется формой и размерами проводника. Для однородного цилиндрического проводника эта зависимость имеет вид:

$$R = \rho\,\frac{l}{S}\,, \qquad (7.10)$$

где l – длина проводника, S – площадь его поперечного сечения, ρ – удельное электрическое сопротивление (определяется свойствами материала).

Единицей измерения электрического сопротивления в СИ является ом (Ом), таким образом удельное сопротивление измеряется в Ом·м. Величина, равная $\sigma = \dfrac{1}{\rho}$, называется удельной проводимостью проводника.

Удельное сопротивление вещества зависит от температуры. Как правило, удельное сопротивление металлов ρ возрастает с температурой по закону

$$\rho = \rho_0\,(1+\alpha\,t)\,, \tag{7.11}$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при $t_0 = 0^0$C, ρ – при t^0C, α – температурный коэффициент сопротивления. Рост ρ с повышением температуры металлов объясняется увеличением размаха колебаний ионов кристаллической решетки, препятствующих движению электронов. В полупроводниках (рассмотрение полупроводников выносится на практические занятия) с увеличением температуры обычно растет число свободных носителей заряда, сопротивление полупроводника при этом уменьшается.

Закон Ома в форме (7.9) имеет общий характер, для однородного участка электрической цепи (E = 0) он преобразуется к виду

$$\mathrm{J} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{\mathrm{R}}, \tag{7.12}$$

для неоднородного участка с учетом (7.7) может быть записан как

$$\mathrm{J} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathrm{E}}{\mathrm{R}}. \tag{7.13}$$

При замыкании концов рассматриваемого участка цепи (φ_1=φ_2) получаем закон Ома для замкнутой электрической цепи (контура):

$$\mathrm{J} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R}}, \tag{7.14}$$

Сопротивление *R* в формулах (7.13) и (7.14) равно сумме внутреннего сопротивления источника тока r и внешнего сопротивления цепи вне источника $R_{внеш.}$: $R=r+R_{внеш.}$ Для того, чтобы выделить указанные компоненты в законе Ома, он традиционно записывается в виде

$$J = \frac{E}{r+R}, \qquad (7.15)$$

где под R понимается только внешнее сопротивление неоднородной цепи. Схема рассматриваемой замкнутой цепи представлена на рис. 7.4.

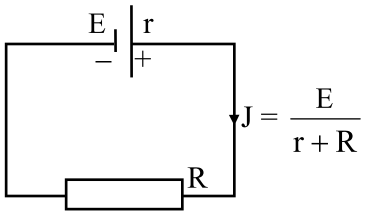


Рис. 7.4

Выражение (7.15) можно преобразовать к виду

$$JR + Jr = E, \qquad (7.16)$$

откуда с учетом $U = JR$ (для однородного участка контура) имеем

$$U = E - Jr, \qquad (7.17)$$

где Jr – падение напряжения внутри источника тока. Таким образом, когда сила тока во внешней цепи отсутствует, напряжение на клеммах источника тока U равно э.д.с. ($U = E$). Если же через источник течет ток, то напряжение на его клеммах уменьшается на величину Jr. Например, свет от фар автомобиля тускнеет в момент запуска двигателя. Это обстоятельство связано с тем, что стартер потребляет от аккумулятора очень большой ток, и напряжение на аккумуляторе резко падает.

7.3. Соединение проводников и источников тока

Последовательным называется такое соединение проводников, при котором конец предыдущего проводника соединяется с началом последующего (рис. 7.5). Сила тока в этом случае на любом участке цепи одинакова

$$J = J_1 = J_2 = ... = J_n = const. \qquad (7.18)$$

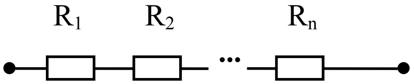


Рис. 7.5

Используя закон Ома легко показать, что при последовательном соединении сопротивлений их эквивалентное (общее) сопротивление определяется равенством

$$R = R_1 + R_2 + ... + R_n = \sum_{i=1}^{n} R_i . \qquad (7.19)$$

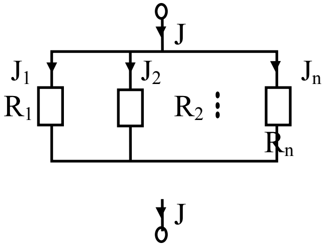


Рис. 7.6

Параллельное соединение имеет место, когда одни концы всех проводников образуют один узел, а другие – второй (рис. 7.6).

В этом варианте J + J_1 + J_2 + ... + J_n, а общее сопротивление разветвленной цепи *R* определяется по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}. \tag{7.20}$$

Параллельное и последовательное соединение источников тока. Рассмотрим на примерах последовательное (рис. 7.7) и параллельное (рис. 7.8) соединение одинаковых источников тока.

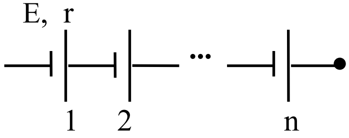


Рис. 7.7.

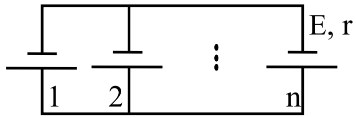


Рис. 7.8

В данном случае при последовательном соединении сопротивлений имеем:

$$E_{\text{общее}} = n\,E,\ r_{\text{общее}} = nr, \tag{7.21}$$

при параллельном

$$E_{\text{общее}} = E,\ r_{\text{общее}} = \frac{r}{n}, \tag{7.22}$$

Если э.д.с. и внутренние сопротивления источников тока отличаются, то при последовательном соединении

$$E_{\text{общее}} = E_1 + E_2 + \ldots + E_n,\ r_{\text{общее}} = r_1 + r_2 + \ldots + r_n, \tag{7.23}$$

при параллельном – ситуация требует специального рассмотрения, которое выходит за рамки школьной программы.

7.4. Закон Джоуля-Ленца. Мощность тока

Мы уже указывали, что при переносе заряда q вдоль проводника, имеющего на концах разность потенциалов $U = \varphi_1 - \varphi_2$, сила электрического поля совершает над зарядом работу $A = qU$. За время t, таким образом, силы поля совершают работу

$$A = qU = JUt\ . \tag{7.24}$$

С учетом закона Ома (7.9) имеем

$$A = JUt = J^2Rt = \frac{U^2}{R}t\ . \tag{7.25}$$

Мощность $N = \frac{A}{t}$, развиваемая током на участке цепи с сопротивлением R, в данном случае определяется как

$$N = JU = J^2R = \frac{U^2}{R}\ . \tag{7.26}$$

КПД электрогенератора в обычной замкнутой цепи, содержащей только сопротивления рассчитывается из соотношений

$$\eta = \frac{N_{\text{пол.}}}{N_{\text{затр.}}} = \frac{J^2R}{J^2(R+r)} = \frac{R}{R+r} = \frac{JU}{JE} = \frac{U}{E}\ . \tag{7.27}$$

Если постоянный электрический ток течет по цепи, которая состоит из неподвижных металлических проводников, то работа тока полностью расходуется на нагревание проводников. Отсюда, с учетом (7.25), получаем **закон Джоуля-Ленца** для участка цепи постоянного тока: *количество теплоты, выделяемое постоянным электрическим током в участке цепи, равно произведению квадрата силы тока на время его прохождения и электрическое сопротивление рассматриваемого участка цепи.*

7.5. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов. Закон электролиза

Растворы некоторых химических соединений в воде либо в других растворителях, а также расплавы, проводящие электрический ток, получили название **электролитов**. К электролитам можно отнести растворы многих солей, кислот, щелочей, а также расплавы солей и окислов металлов.

Проводимость электролитов является ионной. Это связано с диссоциацией молекул в среде с высокой диэлектрической проницаемостью на составляющие их положительные и отрицательные ионы.

Например: $CuSO_4 \leftrightarrow Cu^{2+} + SO_4^{2-}$, $NaCl \leftrightarrow Na^{+}Cl^{-}$ и т.д. (7.28)

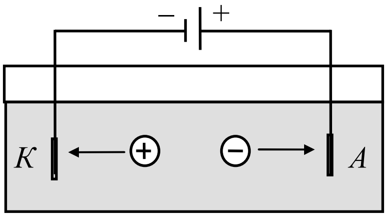


Рис. 7.9

Процесс выделения составных частей химических соединений на электродах при прохождении электрического тока через электролит называется **электролизом** (рис. 7.9).

Катионы (положительные ионы) и анионы (отрицательные ионы) на поверхности соответственно катода К и анода А нейтрализуются.

Регламентирует электролиз **закон Фарадея**, который определяет массу вещества, выделяемую на электродах при электролизе: *масса вещества m, выделившегося на электроде при электролизе, прямо пропорциональна заряду q, прошедшему через электролит,* то есть

$$m = kq = kJt\,, \tag{7.29}$$

где k – электрохимический эквивалент вещества.

7.6. Электродинамика в примерах

Пример № 1. При электролизе по схеме (рис. 7.9) за время t=20 мин на катоде выделилось m=0,6 г меди (электрохимический эквивалент меди $k = 3{,}3 \cdot 10^{-7}$ кг/Кл). С учетом, что э.д.с. источника тока Е = 150 В, а его внутреннее сопротивление r = 20 Ом, рассчитать напряжение U на клеммах источника тока.

Решение. Из закона Фарадея для электролиза находим силу тока в цепи

$$J = \frac{m}{kt}.$$

Согласно закону Ома (7.17) имеем

$$U = E - Jr = E - \frac{mr}{kt} = 120 \text{ В}.$$

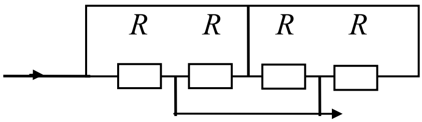


Рис. 7.10

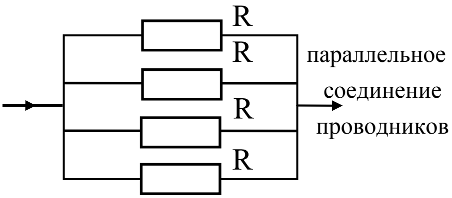


Рис. 7.11

Пример № 2. Найти общее сопротивление цепи, изображенной на рис. 7.10.

Решение. Точки с одинаковым потенциалом можно соединить непосредственно, убрав длинные провода, сопротивлением которых пренебрегаем. В результате имеем рис. 7.11, откуда $R_{об} = \frac{R}{4}$.

Пример № 3. Параллельно амперметру, имеющему сопротивление R_A=1 Ом, включен медный провод (шунт) длиной l = 20 см и диаметром d = 1 мм. Определить величину тока в цепи, если амперметр показывает силу тока J_A= 0,2 А. Удельное сопротивление меди ρ = 0,017 мкОм·м.

Решение. Падение напряжения на шунте и амперметре равны, т.е. $J_A R_A = J_1 \rho l/S$.

Ток шунта $J_1 = J_A \cdot R_A \cdot \pi d^2/(4\rho l)$ и ток в цепи

$$J = J_A + J_1 = J_A + J_A R_A \pi d^2/(4\rho l) = 46{,}4 \text{ А}.$$

7.7. Глоссарий

Джоуля-Ленца закон	– количество теплоты, выделяемое в проводнике электрическим током пропорционально квадрату силы тока, электрическому сопротивлению проводника и времени протекания тока в проводнике.
Ома закон	– для **однородного** участка цепи сила тока пропорциональна разности потенциалов на концах этого участка и обратно пропорциональна его электрическому сопротивлению; для **замкнутой** цепи, содержащей источник тока, сила тока прямопропорциональна э.д.с. источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.
Плотность тока	– векторная величина, модуль которой равен силе тока, протекающего через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно к направлению движения носителей заряда, а направление совпадает с направлением вектора скорости упорядоченного движения положительных носителей заряда.
Сила тока	– скалярная величина, численно равная заряду, переносимому через рассматриваемую поверхность в единицу времени.
Фарадея закон	– масса вещества, выделившегося на электродах в процессе электролиза, прямо пропорциональна заряду, прошедшему через электролит.

Электрический ток	–	упорядоченное движение носителей заряда или заряженных макроскопических тел.
Электрическое напряжение	–	величина, численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда на выделенном участке электрической цепи.
Электродвижущая сила	–	величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда.
Электролиз	–	процесс выделения составных частей химических соединений на электродах при прохождении электрического тока через электролит.

Основные вопросы для повторения:

1. Что называют электрическим током?
2. Сформулируйте понятия сила тока и плотность электрического тока. Запишите для них выражения в виде формулы. В каких единицах измеряются эти величины в СИ?
3. Что такое сторонние силы? Дайте определение электродвижущей силы и напряжения.
4. Запишите закон Ома для однородного участка электрической цепи и замкнутой цепи, содержащей э.д.с.
5. Запишите закон Ома для неоднородного участка электрической цепи.
6. Запишите формулы для расчета электрического сопротивления при параллельном и последовательном соединении проводников.
7. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца для теплового действия тока.
8. Как рассчитывается КПД источника тока?
9. В чем заключается электролиз?
10. Сформулируйте закон Фарадея для электролиза.

Лекция № 8

8.1. Магнитное поле. Сила Лоренца. Магнитная индукция. Сила Ампера

Согласно классической теории электромагнетизма заряженная частица так возмущает окружающее пространство, что любая другая заряженная частица, помещенная в эту область испытывает действие силы. Говорят, что на частицу действует **электромагнитное поле. Электрическая** составляющая такого поля связана с самим фактом присутствия заряженной частицы (источника поля) в рассматриваемой области пространства, **магнитная** – с ее движением.

Источником макроскопического магнитного поля являются проводники с током, намагниченные тела и движущиеся электрически заряженные тела. Однако, природа магнитного поля едина, оно возникает в результате движения заряженных микрочастиц.

Переменное магнитное поле появляется также при изменении во времени электрического поля, и наоборот, при изменении во времени магнитного поля возникает электрическое поле (см. теорию Дж. Максвелла).

Количественной характеристикой силового действия электрического поля на заряженные объекты служит векторная величина **E** – *напряженность электрического поля. Магнитное поле* характеризуется *вектором индукции* **B**, который определяет *силу, действующую в данной точке поля на движущийся электрический заряд.* Эту силу называют **силой Лоренца** (Х. Лоренц – нидерландский физик-теоретик). Экспериментально для модуля этой силы установлена следующая зависимость (в СИ):

$$F_л = B|q|\upsilon \sin\alpha, \tag{8.1}$$

где $|q|$ – модуль заряда, который двигается в магнитном поле со скоростью υ под углом α к направлению магнитного поля.

Таким образом, **магнитная индукция** B численно равна *силе* $F_л$*, действующей на единичный заряд, движущийся с единичной скоростью в направлении, перпендикулярном полю.*

Сила Лоренца $\mathbf{F}_л$ перпендикулярна векторам **B** (направление поля) и **v**, при этом направление этой силы совпадает с направлением, которое определяется по **правилу левой руки.** Согласно этому правилу, если левую руку расположить так, что четыре вытянутых пальца совпадают по направлению с вектором скорости положительного заряда **v** (если q<0, то пальцы левой руки направляют в противоположную сторону или пользуются правой рукой), а составляющая вектора магнитной индукции **B**, перпендикулярная скорости заряда, входит в ладонь перпендикулярно к ней, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы Лоренца, рис. 8,1.

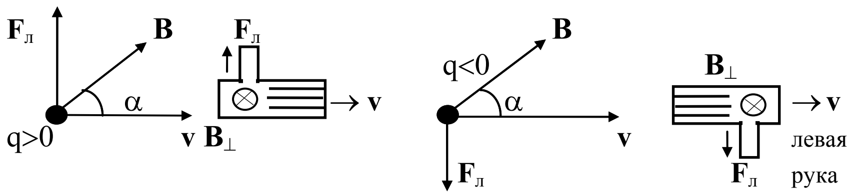


Рис. 8.1

В целом, выражение для вектора силы Лоренца записывается через векторное произведение векторов **v** и **B**:

$$\mathbf{F}_л = q\,[\mathbf{v}, \mathbf{B}]\ . \qquad (8.2)$$

При движении заряженной частицы перпендикулярно к направлению магнитного поля ($\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$) сила Лоренца играет роль центростремительной силы, при этом траекторией движения частицы является окружность.

Если векторы **v** и **B** направлены одинаково, то $\mathbf{F}_л = 0$. В общем случае, когда $0<\alpha<90°$, в результате одновременного движения по окружности и по прямой заряженная частица будет двигаться по винтовой линии, «навиваясь» на линии магнитной индукции.

При наличии электромагнитного поля формула Лоренца имеет вид

$$\mathbf{F}_л = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}, \mathbf{B}]. \qquad (8.3)$$

Если магнитное поле создают несколько источников (n), то его магнитная индукция согласно принципу суперпозиции рассчитывается как

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{B}_{\mathrm{i}} \,. \tag{8.4.}$$

Если в магнитное поле поместить проводник с током, то на каждый носитель тока, движущийся по проводнику со скоростью **v**, будет действовать сила Лоренца. Действие этой силы от отдельных носителей передается всему проводнику. В результате, на каждый прямолинейный участок проводника длиной Δl (малый элемент длиной Δl), по которому течет ток J, в магнитном поле будет действовать так называемая **сила Ампера** $\mathbf{F}_{\mathrm{A}}$ (**закон Ампера,** в честь известного французского ученого, открывшего этот закон, Андре Ампера):

$$\mathbf{F}_{\mathrm{A}} = \mathrm{J}\,[\Delta\mathbf{l}, \mathbf{B}], \tag{8.5}$$

где $\Delta\mathbf{l}$ – вектор, направление которого совпадает с направлением тока в проводнике, а модуль этого вектора равен длине участка Δl.

Направление этой силы определяется по **правилу левой руки**: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора магнитной индукции **B** входила в ладонь перпендикулярно к ней, а направление средних пальцев совпадало с направлением тока, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление действующей на проводник силы Ампера $\mathbf{F}_{\mathrm{A}}$, рис. 9.2.

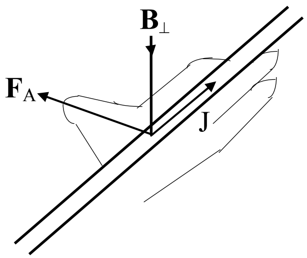


Рис. 8.2

Таким образом, величина магнитной индукции магнитного поля определяется как

$$\mathrm{B} = \frac{\mathrm{F_A}}{\mathrm{J}\Delta\mathrm{l}\sin\alpha}, \tag{8.6}$$

где α – угол между направлением тока и вектора магнитной индукции (магнитного поля).

Однородным постоянным магнитным полем называется магнитное поле, вектор **B** у которого одинаков во всех точках пространства и не меняется со временем.

В соответствии с законом Ампера (8.6) **магнитная индукция** *– это величина, численно равная силе, действующей на прямолинейный проводник единичной длины, по которому течет ток единичной силы и который расположен перпендикулярно направлению магнитного поля.* Единица магнитной индукции получила название тесла (Тл): $1Тл=1\dfrac{Н}{А \cdot м}$ (в честь сербского ученого Никола Тесла). Индукция магнитного поля Земли около ее поверхности составляет примерно $5 \cdot 10^{-5}$Тл.

Следствием существования силы Ампера является появление момента сил, действующего на рамку с током, помещенную в однородное магнитное поле, и приводящего к ее возможному вращению.

В данном случае *модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального момента сил* M_{max}, *действующего со стороны магнитного поля на контур с током, к произведению силы тока* J *в контуре на его площадь* S:

$$B = \frac{M_{max}}{JS}. \tag{8.7}$$

При этом, величина, модуль которой $P_m=J \cdot S$, называется **магнитным моментом контура**.

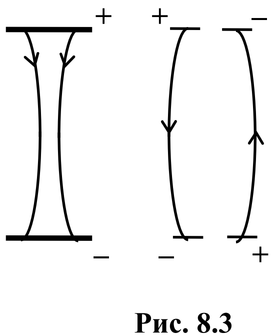


Рис. 8.3

Ампер экспериментально обнаружил, что два параллельных проводника взаимодействуют друг с другом. При этом, если токи в проводниках направлены в одну сторону, то взаимодействие имеет характер притяжения, если в противоположные – отталкивания (рис. 8.3).

Ясно, что взаимодействие проводников является результатом действия магнитного поля одного тока на другой.

Для *взаимодействующих параллельных тонких проводников (бесконечной длины) с током* Ампером был установлен следующий закон: *отнесенная к единице длины проводника сила* F_1, *с которой эти проводники действуют друг на друга, определяется по формуле*

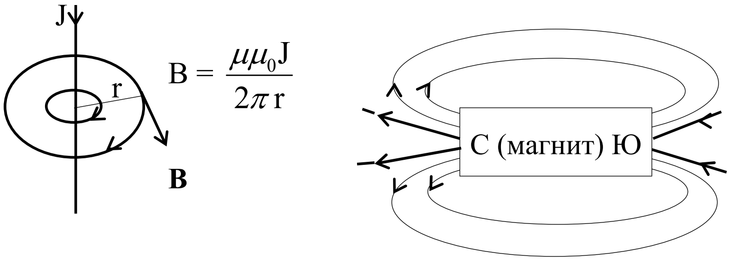
$$F_1 = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2J_1 J_2}{r}, \tag{8.8}$$

где J_1 и J_2 – силы токов в проводниках, r – расстояние между проводниками, μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7} \ \frac{Н}{А^2} \left[\frac{Гн}{м}\right]$, μ – магнитная проницаемость среды, показывающая во сколько раз индукция магнитного поля в данной среде отличается от магнитной индукции в вакууме.

С законом Ампера связано определение **единицы силы тока** в СИ: *один Ампер равен силе постоянного тока, который при прохождении по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии* 1 *м друг от друга, вызывает на каждом участке проводника длиной* 1 *м силу взаимодействия, равную* $2 \cdot 10^{-7}$Н.

Магнитное поле изображается с помощью линий индукции, касательные к которым в каждой точке соответствуют вектору **B**, рис. 8.4. Для бесконечно длинного проводника с током они имеют вид концентрических окружностей, в центре которых находится проводник.

Пример:



$$B = \frac{\mu\mu_0 J}{2\pi r}$$

Рис. 8.4

8.2. Магнитный поток. Электромагнитная индукция. Правило Ленца. Явление самоиндукции. Энергия магнитного поля. Электродвигатели и генераторы тока. Трансформатор

Если в однородном поле с индукцией **B** находится площадка S (площадь), ориентированная так, что единичная нормаль **n** к поверхности образует с направлением вектора **B** угол α, то **магнитным потоком** через рассматриваемую поверхность S называют скалярную величину (рис. 8.5)

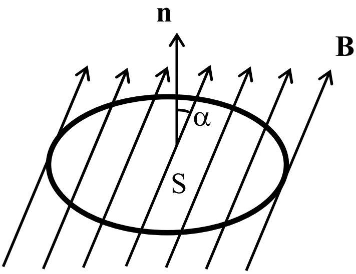


Рис. 8.5

$$\Phi = BS\cos\alpha . \qquad (8.9)$$

Введя вектор $\mathbf{S} = S\mathbf{n}$, имеем

$$\Phi = \mathbf{B}\cdot\mathbf{S}. \qquad (8.10)$$

Модуль **потока вектора магнитной индукции** через площадку S численно равен количеству линий магнитной индукции, пересекающих данную площадку.

Единицей магнитного потока служит вебер (Вб):1Вб=1Тл·1м^2 (Вильгельм Вебер – немецкий физик).

Явление электромагнитной индукции заключается *в возникновении электрического тока в замкнутом проводнике при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим проводником*. Этот ток получил название **индукционного**. Появление индукционного тока связано с возникновением в рассматриваемых условиях в контуре электродвижущей силы, называемой **э.д.с. индукции** $E_{инд.}$. Э.д.с. индукции появляется и в незамкнутом проводнике при его движении в магнитном поле, при котором проводник пересекает линии магнитного поля.

Явление электромагнитной индукции подтверждает фундаментальный вывод о том, что при всяком изменении со временем магнитного поля в пространстве его окружающем возникает вихревое электрическое поле, которое существует независимо от того, имеется ли в магнитном поле проводящий контур или нет. Помещенный контур позволяет только обнаружить вихревое электрическое поле по вызванному им индукционному току.

Если проводник движется в постоянном магнитном поле, то на свободные заряды, находящиеся в нем, действуют силы Лоренца. Под действием этих сил происходит разделение зарядов – возникает **э.д.с. индукции** (рис. 8.6), которая определяется как

$$E_{инд.} = Bl\upsilon\sin\alpha \,, \qquad (8.11)$$

где l – длина прямолинейного проводника, движущегося с постоянной скоростью **v** в однородном магнитном поле с индукцией **B**, α – угол между осью проводника и вектором скорости **v**. Это другая разновидность электромагнитной индукции, связанная с движением проводников (в общем плане материальных сред) в магнитном поле.

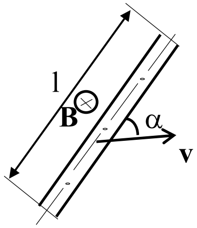


Рис. 8.6

Если в магнитном поле расположен контур, то *э.д.с. индукции, возникающая в нем, прямо пропорциональна взятой с обратным знаком скорости изменения во времени магнитного потока* Ф *через поверхность* S*, ограниченную контуром* (**закон Фарадея-Ленца**):

$$E_{инд.} = -k\,\frac{d\Phi}{dt}\,, \qquad (8.12)$$

где коэффициент пропорциональности k в СИ равен 1. Знак минус в правой части уравнения (8.12) определяет направление индукционного тока. В соответствии с правилом Ленца, индукционный ток всегда имеет такое направление, чтобы своим магнитным полем противодействовать причине его вызывающей (Майкл Фарадей – английский физик, Эмилий Ленц – ученый из России).

Пример (рис. 8.7.):

Рис. 8.7

Явление самоиндукции. Частным случаем электромагнитной индукции является **самоиндукция. Самоиндукцией** называется *явление возникновения э.д.с. индукции в проводящем контуре при изменении в нем собственного магнитного потока.*

Действительно, электрический ток, текущий в замкнутом контуре, создает вокруг себя магнитное поле, поток которого, сцепленный с контуром, прямо пропорционален силе тока J в контуре:

$$\Phi = LJ, \tag{8.13}$$

где L – коэффициент пропорциональности, получивший название **индуктивности контура**. В общем случае индуктивность проводника зависит от его геометрической формы и размеров, а также от магнитной проницаемости окружающей проводник среды.

Тогда при изменении силы тока в контуре dJ будет меняться поток магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром $d\Phi = LdJ$, в результате чего в нем появляется э.д.с. самоиндукции. Направление тока самоиндукции подчиняется правилу Ленца, то есть при увеличении силы тока в цепи ток самоиндукции препятствует его росту, при уменьшении силы тока – его убыванию.

Э.д.с. самоиндукции, таким образом, пропорциональна скорости изменения силы тока J и индуктивности L контура (см. также 8.12):

$$E_c = -L\,\frac{dJ}{dt}\,. \tag{8.14}$$

Из выражения (8.13) определяется единица индуктивности генри[*] (Гн): 1Гн – это индуктивность такого контура, магнитный поток самоиндукции которого при токе в 1А равен 1Вб (1Гн=1Вб/А или из выражения (8.14) имеем 1Гн=1$\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{А}}$).

Энергия магнитного поля

Магнитное поле, как и электрическое, обладает энергией. Если предположить, что энергия магнитного поля равна работе, которая затрачивается током на создание этого поля, то можно получить соотношение, описывающее **энергию магнитного поля**, связанного с контуром

$$W = \frac{LJ^2}{2}. \tag{8.15}$$

Технические применения

Экспериментальный факт, отраженный в уравнениях (8.2, 8.5 и 8.12), служит основой для создания многочисленных технических устройств, предназначенных для преобразования электрической энергии в механическую (например, электродвигатель – рис. 8.8) или, наоборот, механической энергии в электрическую (электрический генератор или динамо-машина, рис. 8.9).

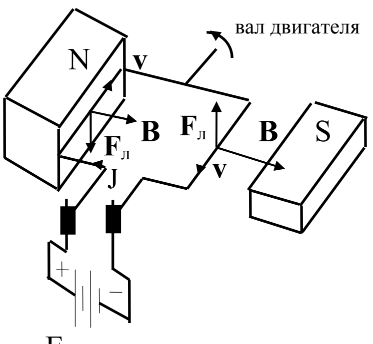


Рис. 8.8

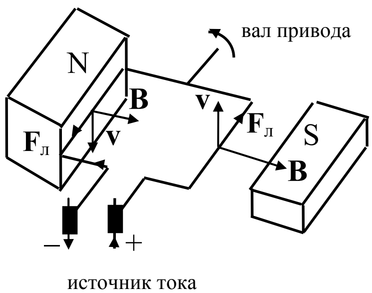


Рис. 8.9

[*] Джозеф Генри – американский физик.

Устройство, показанное на рис. 8.9, является генератором постоянного по знаку пульсирующего тока. В данном случае концы витка заканчиваются изолированными друг от друга полукольцами, по которым скользят щетки концов внешней цепи. Для сглаживания пульсаций тока вращающаяся обмотка группируется в отдельные секции.

Для формирования генератора переменного тока концы витка соединяют с внешней цепью с помощью двух изолированных друг от друга колец, по которым скользят щетки концов внешней цепи. В реальной ситуации в таком генераторе вращается большое число последовательно соединенных витков проволоки.

Так как магнитный поток, пронизывающий вращающуюся рамку генератора (рис. 8.9), определяется выражением (см. уравнение 8.9):

$$\Phi(t) = Bs\cos\omega t\,, \tag{8.16}$$

где ω – угловая скорость вращения витка, время t отсчитывается от момента, когда виток находился в вертикальном положении, то э.д.с. индукции и индукционный ток в генераторе переменного тока равны (в соответствии с 8.12)

$$E = E_0\sin\omega t \text{ и } J = J_0\sin\omega t\,, \tag{8.17}$$

где E_0 и J – амплитудные (максимальные) значения э.д.с. и силы тока. Такой ток называют *синусоидальным*, а колебания, которые происходят по синусоидальному закону – *гармоническими* (см. следующую лекцию).

Трансформатор

Трансформатором является устройство, *служащее для повышения или понижения напряжения переменного тока*. Он обычно состоит из двух катушек изолированной проволоки, имеющих общий сердечник, изготовленный из отдельных пластин магнитно-мягкого железа, рис. 8.10.

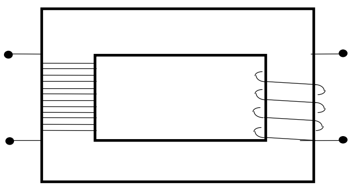


Рис. 8.10

По одной из обмоток, которая называется первичной, пропускается преобразуемый переменный ток (получаемый, например, от генератора переменного тока). Этот ток создает в железном сердечнике переменный магнитный поток, пронизывающий обе обмотки. В итоге в каждом витке первичной обмотки возникает э.д.с. самоиндукции $(-\frac{d\Phi}{dt})$, в каждом витке вторичной обмотки такая же э.д.с. индукции.

Индуцируемые в обмотках э.д.с. относятся как числа витков в них

$$E_1/E_2 = \frac{n_1}{n_2} = k\,, \qquad (8.18)$$

где k – коэффициент трансформации.

В режиме холостого хода (отсутствует нагрузка во вторичной обмотке), когда ток первичной обмотки очень мал и падением напряжения в первичной катушке можно пренебречь, имеем $E_1 \approx U_1$ и $E_2 \approx U_2$, откуда

$$k = \frac{U_1}{U_2}\,. \qquad (8.19)$$

Коэффициентом трансформации трансформатора называют отношение напряжения на зажимах первичной обмотки к напряжению на зажимах вторичной обмотки трансформатора при его работе в режиме холостого хода.

К.П.Д. современных трансформаторов составляет 95÷99% (отношение мощности на зажимах вторичной обмотки к мощности, потребляемой первичной обмоткой), поэтому можно считать, что при нагрузке трансформатора

$$J_1 E_1 \approx J_2 E_2\,, \qquad (8.20)$$

то есть

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{J_2}{J_1}\,. \qquad (8.21)$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотки с учетом падения напряжения на сопротивлении обмотки R_2, рассчитывается как

$$U_2 = E_2 - J_2 R_2\,, \qquad (8.22)$$

по аналогии в случае первичной обмотки

$$U_1 \approx E_1 + J_1 R_1. \qquad (8.23)$$

Трансформатор был изобретен в 1876 г. П.Н. Яблочковым, который применил его для питания «свечей», требующих различного напряжения. Потери энергии в трансформаторе, в первую очередь, связаны с расходом энергии на нагревание обмоток, на токи Фуко и на перемагничевание железа.

8.3. Глоссарий

Ампера сила	– сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле. Направление силы Ампера определяется с помощью правила левой руки.
Индуктивность	– параметр электрической цепи, определяющий э.д.с. самоиндукции, наводимой в цепи при изменении протекающего по ней тока (зависит от формы и размеров контура, а также магнитной проницаемости окружающей среды).
Лоренца сила	– сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле. Направление силы определяется по правилу левой руки.
Магнитная индукция	– силовая характеристика магнитного поля.
Магнитное поле	– силовое поле, создаваемое движущимися зарядами (токами) и действующее на движущиеся электрические заряды и тела, обладающие магнитным моментом.
Правило Ленца	– индукционный ток в контуре направлен так, чтобы собственным магнитным полем препятствовать изменению потока через поверхность, ограниченную контуром.
Самоиндукция	– наведение вихревых электрических полей в проводящих телах при изменении токов в этих же телах (как знакомый нам случай, явление возникновения э.д.с. индукции в контуре при изменении в нем силы тока).
Электромагнитная индукция	– возникновение электрического поля, электрического тока или электрической поляризации при изменении во времени магнитного поля или при движении материальных сред в магнитном поле (например, возникновение э.д.с. индукции в проводящем контуре, находящимся в изменяющемся магнитном поле).

Основные вопросы для повторения:

1. Что такое магнитное поле? Как оно создается? Что является его количественной характеристикой?
2. Что называют силой Лоренца? Напишите выражение для силы Лоренца в векторной и скалярной форме. Как найти направление силы Лоренца?
3. Дайте определение силы Ампера. Как найти ее направление?
4. Запишите закон Ампера для параллельных проводников с токами.
5. Дайте определение единицы силы тока в СИ, используя закон Ампера.
6. Дайте определение магнитного потока. В каких единицах измеряется в СИ магнитный поток?
7. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
8. Сформулируйте правило Ленца.
9. В чем заключается явление самоиндукции?
10. Что называют индуктивностью проводника? От чего зависит индуктивность, в каких единицах в системе СИ измеряется?
11. Как рассчитывать энергию магнитного поля, создаваемого проводником с током?
12. Опишите работу генератора переменного тока.
13. Объясните принцип работы трансформатора. Как рассчитывать коэффициент трансформации?

Лекция № 9

9.1. Гармонические колебания. Маятники и колебательный контур. Затухающие и вынужденные колебания. Резонанс

Колебаниями называются *движения или процессы, в той или иной степени повторяющиеся во времени*. Можно сказать, что весь мир пронизан колебательными процессами: пульсирует излучение звезд, вращаются планеты Солнечной системы и электроны в атоме, колеблются разнообразные маятники, ритмичные колебания происходят в живых организмах и т.д.

Большое значение имеют периодические колебания (процессы, повторяющиеся через равные промежутки времени, минимальный из которых назван **периодом** Т), которые можно представить в виде суммы простых **гармонических** колебаний (периодические колебания, происходящие по закону синуса или косинуса) с циклическими частотами, кратными основной частоте $\omega=\dfrac{2\pi}{T}$ (гармонический анализ).

Колебания являются **свободными (собственными)**, если они совершаются за счет первоначально полученной энергии при отсутствии последующих воздействий на колебательную систему. Частоту свободных колебаний называют **собственной частотой**.

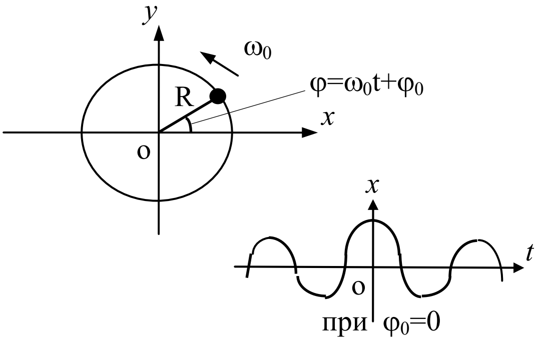


Рис. 9.1

Характерным примером гармонических колебаний является проекция точки, движущейся равномерно по окружности (ω_0=const), на линию, лежащую в плоскости движения точки, рис. 9.1.

Такая система описывается уравнением типа

$$x = A\cos(\omega_0 t+\varphi_0)\,, \quad (9.1)$$

где А – амплитуда (*модуль*

наибольшей величины отклонения системы от положения равновесия, в нашем случае A = R), ω_0 – собственная круговая частота, $(\omega_0 t+\varphi_0)$ и φ_0 – соответственно **фаза** и **начальная фаза** колебаний (в начальный момент, когда t=0). Графическое представление уравнения (9.1) показано на рис. 9.1.

Первая и вторая производные по времени от *x* также изменяются по гармоническому закону:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t+\varphi_0) , \tag{9.2}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t+\varphi_0) = -\omega_0^2 x . \tag{9.3}$$

Таким образом, x удовлетворяет уравнению

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 , \tag{9.4}$$

которое называется *дифференциальным уравнением гармонических колебаний.*

Частота колебаний ν (число колебаний, совершаемых за одну секунду) связана с круговой частотой ω соотношением

$$\omega = 2\pi\nu . \tag{9.5}$$

По смыслу $\nu = \frac{1}{T}$, единицей частоты колебаний является герц (Гц) : $1Гц=1c^{-1}$.

Система, совершающая колебания по закону (9.4), получила название гармонического осциллятора. Примером таких систем могут служить некоторые маятники и колебательный контур. Рассмотрим их в случае пренебрежимо малых потерь энергии.

Пружинный маятник – *это груз массой* m*, подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы* F = –kx, где k – жесткость пружины, рис. 9.2.

Согласно второму закону Ньютона уравнение движения груза в этом случае имеет вид:

$$m\ddot{x} = -kx \tag{9.6}$$

или

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0. \tag{9.7}$$

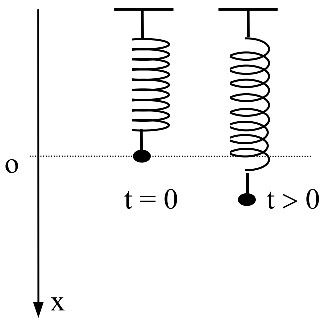


Рис. 9.2

Сопоставляя уравнения (9.4) и (9.7) получаем, что пружинный маятник совершает гармонические колебания по закону $x=A\cos(\omega_0 t+\varphi_0)$ с круговой (циклической) частотой $\omega_0=\sqrt{k/m}$ и периодом

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}\,. \qquad (9.8)$$

При незатухающих колебаниях справедлив закон сохранения механической энергии (в данном случае упругая сила консервативна), который для пружинного маятника имеет следующий вид:

$$W_K + W_П = \frac{m\upsilon^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \text{const}.$$

В местах наибольшего отклонения от положения равновесия пружинный маятник имеет максимальную потенциальную энергию, в момент прохождения им положения равновесия она полностью превращается в кинетическую.

Математический маятник – *это материальная точка массой* m*, подвешенная на нерастяжимой невесомой нити и совершающая колебания под действием силы тяжести*. Некоторым приближением математического маятника является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити, рис. 9.3.

Смещение маятника x вдоль дуги равно $x = l\cdot\alpha$, где α – небольшой угол отклонения нити от вертикали ($\alpha \ll 1$ и измеряется в радианах), l – расстояние от точки подвеса до центра масс шарика.

Если возвращающая сила пропорциональна x или α, то колебания будут гармоническими.

На шарик действуют сила упругости $\mathbf{F}_н$ и сила тяжести $m\mathbf{g}$, в результате он движется по окружности радиуса l с ускорением $\mathbf{a}$:

$$m\mathbf{g} + \mathbf{F}_н = m\mathbf{a}\,. \qquad (9.9)$$

Ускорение **a** имеет две составляющих: нормальную $\mathbf{a}_n$ и касательную $\mathbf{a}_к$ (результирующая сила и ускорение направлены внутрь окружности). Проекция векторного соотношения (9.9) на прямую, касательную к окружности, дает уравнение $F_1 = m\,a_к = -mg\sin\alpha$, где F_1 – возвращающая сила.

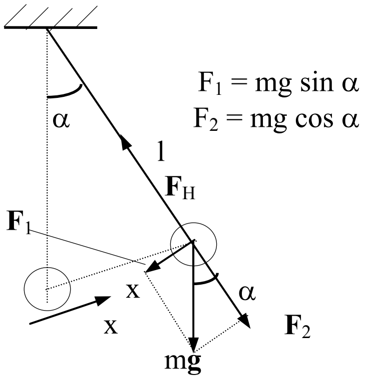


Рис. 9.3

При малых углах ($\alpha \le 15°$) $\sin\alpha \approx \alpha$ и колебания можно считать гармоническими:

$$F_1 \approx -mg\,\alpha = -mg\frac{x}{l}. \quad (9.10)$$

Таким образом, с учетом второго закона Ньютона $m\ddot{x} = \frac{-mg}{l}x$ и уравнения (9.4) имеем формулу для расчета периода колебаний математического маятника:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (9.11)$$

Обратите внимание на то, что период колебаний математического маятника не зависит от его массы, от амплитуды и очень чувствителен к ускорению свободного падения.

Колебательный контур представляет собой *замкнутую электрическую цепь, состоящую из конденсатора емкости* C, *катушки с индуктивностью* L *и электрического сопротивления* R. Гармонические колебания будут наблюдаться в идеализированном контуре без активного сопротивления (R=0) в отсутствии потерь на электромагнитное излучение.

В таком колебательном контуре происходит взаимное превращение энергий электрического и магнитного полей, рис. 9.4. На этом же рисунке на примере пружинного маятника показана механическая аналогия процессов, происходящих в контуре, причем электрической энергии конденсатора соответствует потенциальная энергия деформированной пружины, а магнитной энергии катушки с током – кинетическая энергия груза.

Мгновенной перезарядке конденсатора препятствует появление э.д.с. самоиндукции в катушке при изменении в ней силы тока.

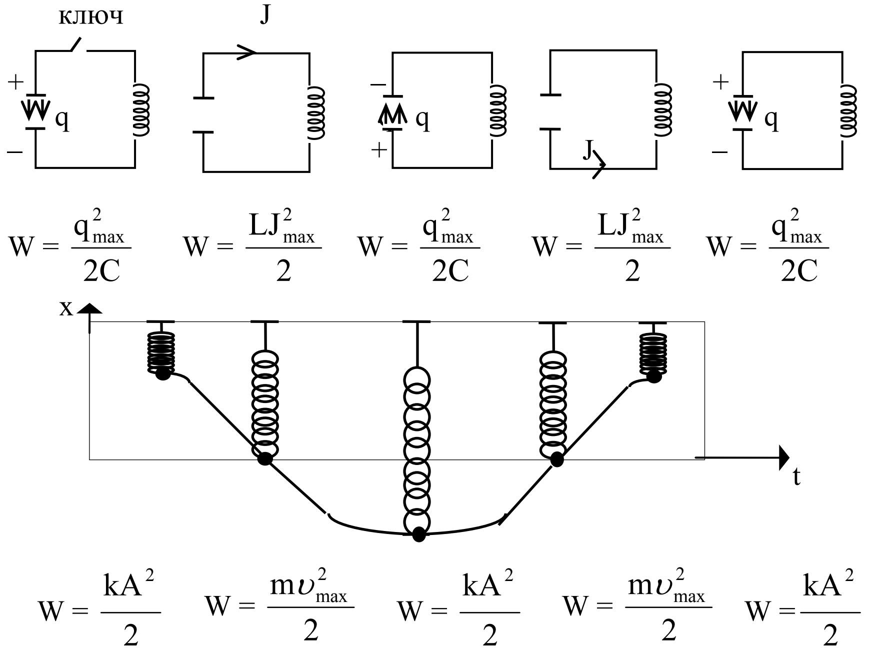


Рис. 9.4

Заряд на обкладках конденсатора в рассматриваемом контуре изменяется по гармоническому закону:

$$q = q_{max} \cos(\omega_0 t+\varphi_0) . \tag{9.12}$$

Период собственных колебаний контура зависит от индуктивности и емкости контура и определяется по формуле Томсона

$$T = 2\pi \sqrt{LC} . \tag{9.13}$$

Колебания реальных классических систем всегда затухают (выделение тепла и другое). Для компенсации потерь энергии в линейной колебательной системе и получения устойчивых колебаний на нее оказывают периодическое внешнее воздействие. В результате в системе возникают **вынужденные** колебания с частотой этого воздействия ω_1 и амплитудой, которая при определенной частоте $\omega_р$ проходит через максимум (**резонанс**). В зависимости от исследуемого параметра колебательной системы резонансная частота $\omega_р$ может совпадать с ее собственной частотой ω_0 или приближается к ней по мере уменьшения потерь энергии в реальной системе.

Примером полезного и вредного проявления резонанса (все относительно) является: настройка радиоприемника на нужную волну с помощью колебательного контура, разрушение строительных конструкций под действием внешнего периодического воздействия (солдатам, марширующим по мосту, подается команда «сбить ногу»), тошнота от инфразвука и укачивание в автомобилях и др.

9.2. Волны

Прямым следствием колебаний являются **волны**, под которыми понимают *изменения некоторой совокупности физических величин (полей), способные перемещаться, удаляясь от места их возникновения, или совершать колебания в ограниченной области пространства.*

Волны не обязательно связаны с наличием вещества. Например, электромагнитные волны в вакууме представляют собой взаимосвязанные изменения электрических и магнитных полей.

Если в качестве примера колеблющееся тело поместить в упругую среду, то оно будет воздействовать на соседние частицы среды и приводить их в колебательное движение. Общее колебание распространяется в среде с некоторой скоростью υ. Процесс распространения колебаний в упругой среде и называется волной.

Волны, образованные внешним воздействием, приложенным к открытой среде, то есть среде, не имеющей внешних границ, называются **бегущими**. Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе называется **волновой поверхностью**. Простейшие формы волновой поверхности – это плоскость или сфера, соответственно волна называется **плоской** или **сферической**.

Классические плоские бегущие волны от гармонического источника колебаний описываются уравнением (рассмотрим на практических занятиях подробней)*

$$\Psi\,(\mathbf{r}, t) = A\cos\,(\omega t - \mathbf{kr})\,, \tag{9.14}$$

* для волн, распространяющихся в упругой среде, $\Psi(\mathbf{r}, t)$ представляет собой смещение колеблющейся частицы в зависимости от координат и времени.

где **r** – радиус-вектор, характеризующий положение колеблющейся точки волны относительно начала координат, **k** – волновой вектор, перпендикулярный плоскому фронту волны и равный $k=\frac{2\pi}{\lambda}=2\pi\nu/\upsilon=\frac{\omega}{\upsilon}$. В данном случае υ – фазовая скорость распространения волны (скорость перемещения фиксированного значения фазы колебаний), λ – **длина волны**, это ее пространственный период, то есть *расстояние между двумя ближайшими точками волны, имеющими одинаковую фазу колебаний.*

Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t, называется **волновым фронтом**. У плоских волн он имеет вид плоскости, у сферических – сферы.

Волны бывают **поперечными** и **продольными**. В *поперечных* волнах колебания происходят в направлении перпендикулярном к направлению распространения волны (волны в натянутой веревке, электромагнитные волны и т.д.), в *продольных* – в направлении распространения волны (звуковые волны, волны в сжатой и затем отпущенной пружине и т.д.).

В течение одного периода колебательный процесс распространяется на расстояние, равное длине волны, поэтому

$$\lambda = \upsilon T = \frac{\upsilon}{\nu}. \tag{9.15}$$

Пример. На рис. 9.5 показана качественная картина распространения поперечной бегущей волны вдоль веревки с небольшими шарами (вдоль оси x), возникающей в результате гармонических колебаний первого шара.

Уравнение волны, согласно (9.14), в данном случае имеет вид $y = A\sin\omega\left(t - \frac{x}{\upsilon}\right)$, так как колебания шаров в точке x отстают во времени на $\frac{x}{\upsilon}$ от колебаний первого шара в т. x=0.

Механические поперечные волны возникают только в среде, обладающей сопротивлением сдвигу. Шары, которые отстоят друг от друга на расстоянии $\lambda = \upsilon T$ колеблются в одинаковой фазе, это расстояние называется длиной волны.

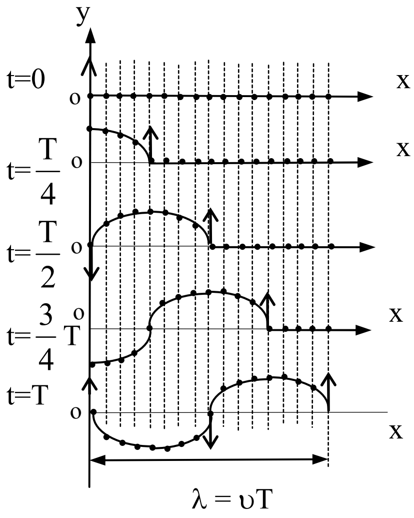


Рис. 9.5

Распространение бегущих волн происходит с переносом энергии и импульса. Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме $c=3\cdot 10^8 \dfrac{м}{с}$, в среде $\upsilon = \dfrac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}$,

где ε,μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

На рис. 9.6 показан пример распространения электромагнитной волны (распространение электромагнитных колебаний в пространстве с конечной скоростью υ).

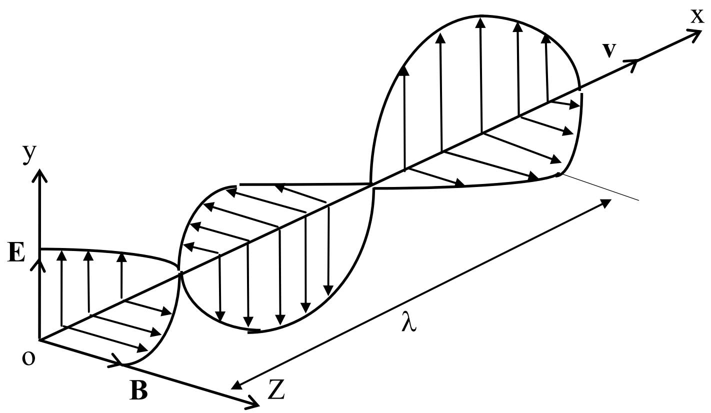


Рис. 9.6

Шкала электромагнитных волн в зависимости от длины волны условно делится на диапазоны:

радиоволны $\to \lambda$ = 30 км – 1 мм
инфракрасные волны $\to \lambda$ = 1 мм – 750 нм
световые волны $\to \lambda$ = 750 нм – 400 нм
(видимый диапазон)
ультрафиолетовые волны $\to \lambda$ = 400 нм – 5 нм
рентгеновское излучение $\to \lambda$ = 5 нм – 4 пм
гамма-излучение $\to \lambda \le 4$ пм

9.3. Колебания и волны в примерах

Пример № 1. На длинном нерастяжимом невесомом стержне длиной l подвешен шар массой M, который может совершать колебания вокруг положения равновесия. В неподвижный шар попадает пуля, скорость которой υ=500 м/с и масса m=M/n (n=1000), и застревает в нем. Попадание пули приводит к отклонению шара от положения равновесия на угол $\alpha=10°$. Найти частоту колебаний шара. Размерами шара, трением в подвесе и сопротивлением воздуха пренебречь.

Решение. При ударе пули о шар выполняется закон сохранения импульса: $m\upsilon=(M+m)u$, где u – скорость шара. Откуда $\upsilon=u(n+1)$. Удар пули о шар приводит к изменению высоты шара на величину h, которую можно найти из закона сохранения энергии,

$$\frac{(m+M)u^2}{2} = (m+M)gh\ .$$

Используя оба закона, получаем $h=\upsilon^2/((n+1)^2 2g)$. Из геометрии следует, что длина стержня $l=h/(1-\cos\alpha)=\upsilon^2/((n+1)^2(1-\cos\alpha)2g)$. Считая шар со стержнем математическим маятником, находим частоту колебаний:

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} = \frac{g(n+1)\sqrt{1-\cos\alpha}}{\pi\upsilon\sqrt{2}} = 0{,}5 \text{ Гц}$$

Пример № 2. Монохроматическая поперечная волна с длиной λ = 18 м распространяется в направлении оси x. Период колебаний частиц в волне T=1c, амплитуда A=4 см. При x=0 и t=0 фаза волны и перемещение точки равны нулю. Найти скорость распространения волны, фазу и перемещение точки, отстоящей на x=40м от источника колебаний, в момент времени t=3с.

Решение. Уравнение монохроматической волны, распространяющейся вдоль оси x имеет вид

$$y = A\sin\omega\,(t - \frac{x}{\upsilon}).$$

Скорость волны $\upsilon = \frac{\lambda}{T} = 18\frac{м}{с}$, а фаза

$$\varphi = \omega\,(t - x/\upsilon) = 2\pi\,(t - x/\upsilon)\,/\,T = 4{,}88 \text{ рад}$$

Перемещение заданной точки $y = 4\cdot10^{-2}\sin 4{,}88 = -3{,}94\cdot10^{-2}$м.

Пример № 3. К батарее с напряжением U=250 В присоединен конденсатор емкостью C=600 пф, затем его мгновенно отсоединяют и подключают к катушке с индуктивностью L=75мГн. Найти начальный заряд конденсатора, максимальную силу тока в контуре, частоту и период колебаний, полную энергию колебаний.

Решение. Начальный заряд конденсатора $q_0 = CU = 1{,}5\cdot10^{-7}$Кл. При подключении конденсатора к катушке заряд на нем меняется с течением времени по закону $q = q_0\cos\omega t$.

Сила тока также совершает гармонические колебания:

$$J = \dot{q} = -\omega q_0 \sin\omega t = J_0\cos(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

поэтому максимальное значение силы тока

$$J_0 = \omega q_0 = q_0/\sqrt{LC} = 22{,}4 \text{ мА}.$$

Согласно формуле Томсона период колебаний $T = 2\pi\sqrt{LC} = 42{,}1$ мкс, а частота колебаний $\nu = \frac{1}{T} = 23{,}7$ кГц.

Полная энергия колебаний соответствует максимальной энергии электрического поля, сосредоточенного внутри конденсатора:

$$W_C = \frac{CU^2}{2} = 1{,}875\cdot10^{-5}\text{Дж}.$$

9.4. <u>Глоссарий</u>

Амплитуда	–	модуль наибольшей величины отклонения системы от положения равновесия.
Волны	–	изменения некоторой совокупности физических величин (полей), способные перемещаться, удаляясь от места их возникновения, или совершать колебания в ограниченной области пространства.
Длина волны	–	расстояние между двумя ближайшими точками волны, имеющими одинаковую фазу колебаний.
Колебания	–	движения или процессы, повторяющиеся во времени.
Контур колебательный	–	замкнутая электрическая цепь, состоящая из конденсатора, катушки и электрического сопротивления.
Маятник математический	–	материальная точка массой m, подвешенная на нерастяжимой невесомой нити и совершающая колебания под действием силы тяжести.
Маятник пружинный	–	груз массой m, подвешенный на абсолютно упругой пружине и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы.
Период колебаний	–	минимальный промежуток времени, через который повторяется одно и то же состояние колеблющейся системы.

Основные вопросы для повторения:

1. Дайте определение колебаний. Какие параметры характеризуют колебания?
2. Приведите примеры гармонических колебаний и дайте их графическое представление. Каким уравнением они описываются?
3. Введите понятие «пружинный маятник». Запишите формулу для расчета периода колебаний пружинного маятника.
4. Что собой представляет математический маятник? Запишите формулу для расчета периода его колебаний.

5. Рассмотрите основные процессы, происходящие в идеальном электрическом колебательном контуре.
6. Что такое резонанс?
7. Дайте определение волны. Какие волны вы знаете? Запишите уравнение плоской волны.
8. Что такое длина волны?
9. С какой скоростью распространяются электромагнитные волны?
10. Рассмотрите шкалу электромагнитных волн.

Лекция № 10

10.1. Геометрическая оптика

10.1.1. Скорость света. Законы геометрической оптики

Как мы уже упоминали, скорость распространения электромагнитных волн (в частности, света) в вакууме равна $c=3\cdot10^8$м/с. В среде скорость волн уменьшается

$$\upsilon = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{n}, \qquad (10.1)$$

где знаменатель $n=\sqrt{\varepsilon\mu}$ получил название *абсолютный показатель преломления данной среды.*

Таким образом, **абсолютный показатель преломления** показывает, во сколько раз скорость электромагнитных волн в среде меньше, чем в вакууме.

Так как частота волны не зависит от среды, в которой волна распространяется (она равна частоте колебаний источника), то длина волны в среде связана с длиной волны в вакууме выражением

$$\lambda = \upsilon/\nu = \upsilon\cdot T = \frac{c}{n}T = \frac{\lambda_0}{n}, \qquad (10.2)$$

т.е. длина волны в среде уменьшается в n раз.

В основе геометрической оптики лежат следующие законы: *закон прямолинейного распространения света, закон независимости световых лучей; закон отражения света и закон преломления света.*

Закон прямолинейного распространения указывает, что *в однородной среде свет распространяется прямолинейно* (прямая, показывающая направление распространения света, называется световым лучом).

Закон независимости световых лучей утверждает, что *лучи при пересечении не влияют друг на друга.*

Закон отражения света устанавливает, что *падающий луч, отраженный луч и нормаль, восстановленная в точке падения луча на отражающую поверхность, лежат в одной плоскости, при этом угол падения* α *равен углу отражения* β, рис. 10.1.

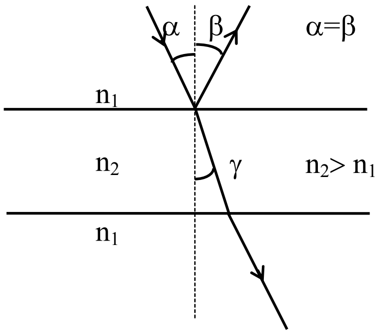


Рис. 10.1

Закон преломления света гласит, что *падающий луч, преломленный луч и нормаль, восстановленная в точке падения луча на преломляющую поверхность, лежат в одной плоскости, при этом отношение синуса угла падения* α *к синусу угла преломления* γ *есть величина постоянная для данных двух сред* n_{21} *и называется относительным показателем преломления второй среды относительно первой* (рис. 10.1).

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2}. \qquad (10.3)$$

Из формулы (10.3) следует, что *относительный показатель преломления* двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:

$$n_{21} = n_2 / n_1 . \qquad (10.4)$$

При отражении и преломлении света имеет место закон обратимости световых лучей, поэтому

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}. \qquad (10.5)$$

Абсолютный показатель преломления воздуха мало отличается от единицы (он равен 1,0003), абсолютного показателя преломления вакуума. Чем выше абсолютный показатель преломления, тем среда считается оптически более плотной.

Изображение светящейся точки в зеркале (или в линзе) находится на пересечении световых лучей или продолжений световых лучей, идущих из этой точки и попадающих в глаз наблюдателя.

Если попадающие в глаз лучи от светящейся точки сами не пересекаются, а пересекаются их продолжения, то изображение называется **мнимым**.

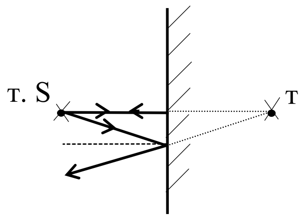


Рис. 10.2

На рис. 10.2 построено изображение светящейся точки S в плоском зеркале.

Если показатель преломления n_1 среды 1 больше показателя преломления n_2 среды 2 (см. рис. 10.1), то при угле $\alpha_{пр.}$ (предельный угол) преломленный луч скользит по поверхности раздела (γ=90°, рис. 10.3). При дальнейшем увеличении угла падения α световой пучок не преломляется, а только отражается от поверхности раздела внутрь оптически более плотной среды. Это явление называется **полным внутренним отражением** (используется для канализации света), а угол падения $\alpha_{пр.}$ – предельным углом полного внутреннего отражения, при этом

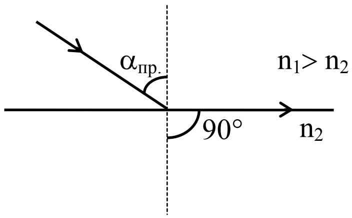


Рис. 10.3

$$\sin \alpha_{пр.} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}\,. \qquad (10.6)$$

Если среда 2 – вакуум или воздух, то

$$\sin \alpha_{пр.} = \frac{1}{n_1}\,. \qquad (10.7)$$

10.1.2. Собирающие и рассеивающие линзы

Линза – прозрачное для света отшлифованное тело, ограниченное с двух сторон кривыми поверхностями (одна из поверхностей может быть плоской).

Сферическими называются линзы, ограниченные с двух или с одной стороны сферическими поверхностями, цилиндрическими – ограниченные таким же образом цилиндрическими поверхностями.

Выпуклые линзы, превращающие падающий на них пучок параллельных лучей в пучок сходящихся лучей, называются **собирающими**, рис. 10.4, а.

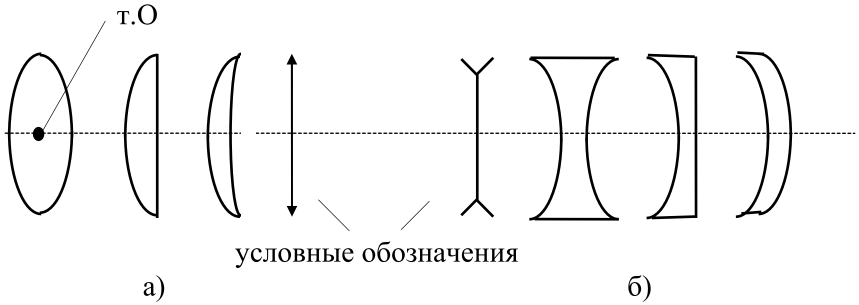


Рис. 10.4

Вогнутые линзы, превращающие пучок параллельных лучей в пучок расходящихся лучей, называются **рассеивающими**, рис. 10.4, б.

Прямая, проходящая через центры сферических поверхностей линзы, называется **главной оптической осью**, рис. 10.4. Точка О, расположенная в линзе на ее оптической оси, через которую луч света проходит, не меняя своего направления, получила название **оптического центра линзы**, рис. 10.4. Любая прямая, проходящая через оптический центр линзы под углом к главной оптической оси, называется **побочной оптической осью**.

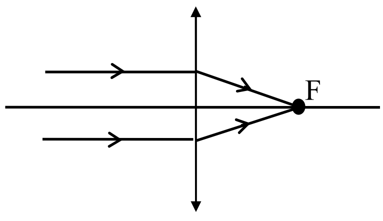


Рис. 10.5

Точка F на главной оптической оси собирающей линзы, в которой собираются лучи, падающие на линзу параллельно ее главной оптической оси, называется **главным фокусом**, рис. 10.5.

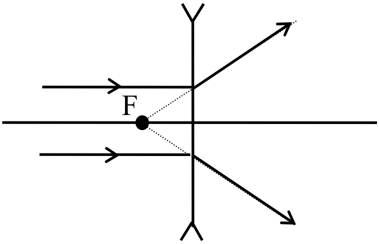


Рис. 10.6

Точка F на главной оптической оси рассеивающей линзы, в которой пересекаются продолжения преломленных в линзе расходящихся лучей, падающих на нее параллельно главной оптической оси, называется **мнимым фокусом линзы**, рис. 10.6.

Расстояние от центра линзы до главного фокуса называется **фокусным расстоянием линзы**. Фокусное расстояние собирающей линзы положительно, рассеивающей – отрицательно. Плоскости, проведенные через фокусы линзы перпендикулярно к главной оптической оси, называются **фокальными плоскостями**.

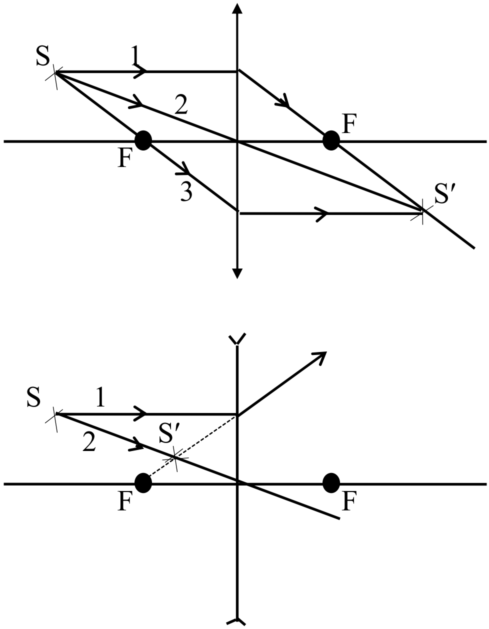


Рис. 10.7

Чтобы определить изображение светящейся точки, в линзе находят точку пересечения двух преломленных лучей. Обычно для построения выбирают два луча, показанные на рис. 10.7. Луч 1 – падающий луч, параллельный главной оптической оси (преломляясь, он идет через фокус собирающей линзы или так отклоняется в рассеивающей линзе, чтобы его продолжение проходило через фокус); луч 2 – падающий луч, проходящий через оптический центр линзы и не изменяющий свое направление; луч 3 – через главный фокус и далее после собирающей линзы, идущий параллельно главной оптической оси.

При построении изображения линза считается очень тонкой.

Формула линзы имеет вид

$$\pm\frac{1}{d}\pm\frac{1}{|f|}=\pm\frac{1}{|F|}, \tag{10.8}$$

где d – кратчайшее расстояние от светящейся точки до плоскости, проходящей через оптический центр линзы перпендикулярно ее главной оптической оси (знак минус в случае падения сходящегося светового пучка, источник света – мнимый), f – кратчайшее расстояние от изображения светящейся точки до той же плоскости, проходящей через оптический центр линзы перпендикулярно главной оптической оси (минус, когда изображение мнимое), F – фокусное расстояние линзы (минус для рассеивающей линзы).

Величина, обратная фокусному расстоянию линзы (в метрах), называется **оптической силой линзы** и выражается в диоптриях (дптр):

$$D=\frac{1}{F}. \tag{10.9}$$

Оптическая сила линзы определяется по формуле

$$D=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right), \tag{10.10}$$

где n – показатель преломления вещества линзы относительно окружающей среды, R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы (отрицательные для вогнутых линз).

Примеры построения изображений в наиболее типичных ситуациях показаны на рис. 10.8.

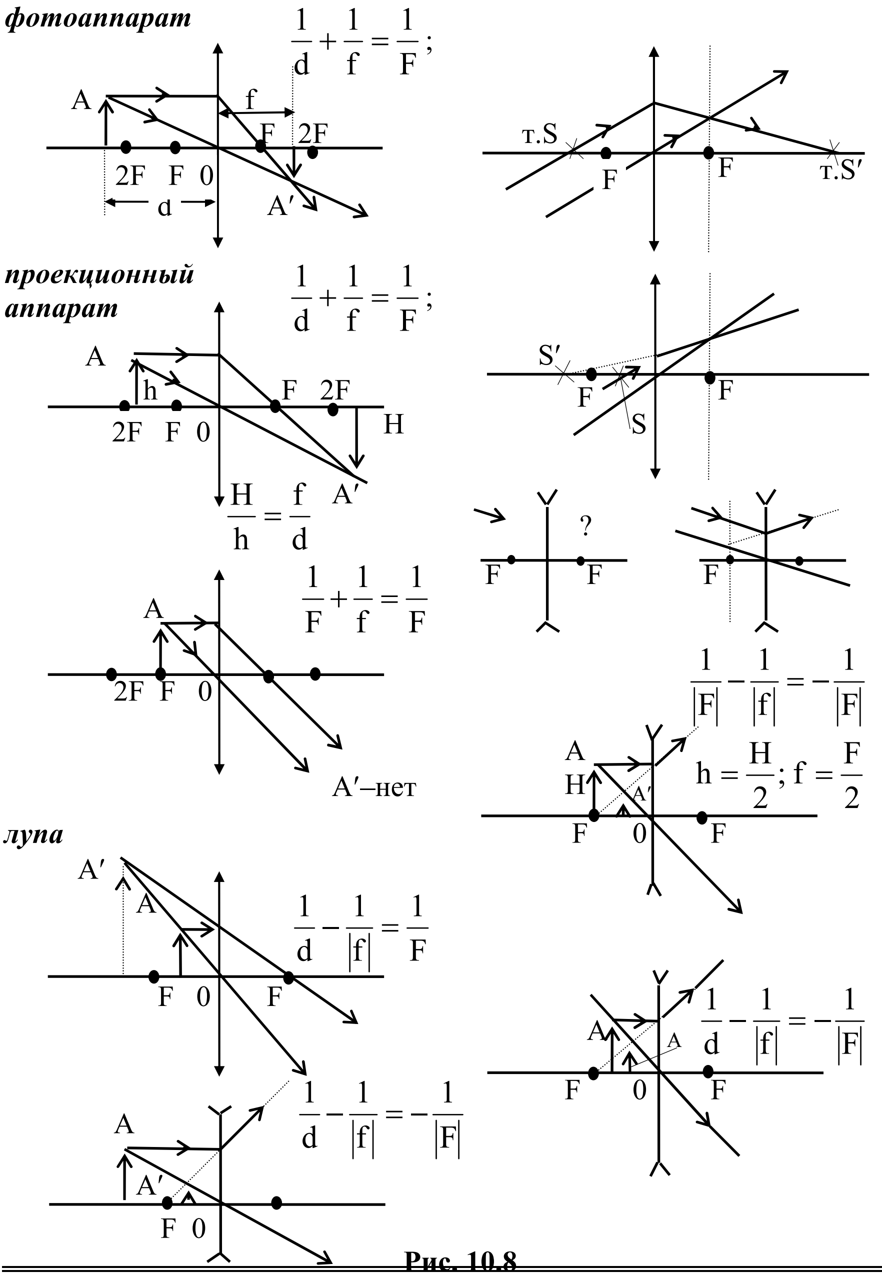

фотоаппарат
$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}$;
A
f
F 2F
2F F 0
d
A′
т.S
F
F
т.S′
проекционный аппарат
$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}$;
A
h
F 2F
2F F 0
H
A′
$\frac{H}{h}=\frac{f}{d}$
S′
F
S
F
?
F
F
F
$\frac{1}{F}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F}$
A
2F F 0
A′–нет
$\frac{1}{|F|}-\frac{1}{|f|}=-\frac{1}{|F|}$
A
H
A′
$h=\frac{H}{2}$; $f=\frac{F}{2}$
F 0 F
лупа
A′
A
$\frac{1}{d}-\frac{1}{|f|}=\frac{1}{F}$
F 0 F
$\frac{1}{d}-\frac{1}{|f|}=-\frac{1}{|F|}$
A
A
F 0 F
A
A′
$\frac{1}{d}-\frac{1}{|f|}=-\frac{1}{|F|}$
F 0

Рис. 10.8

Из подобия треугольников, зная отношение $\left|\frac{f}{d}\right|$, можно рассчитать отношение линейных размеров изображения предмета к его истинным линейным размерам, рис. 10.8.

Оптическая сила составной оптической системы, включающей несколько прилегающих одна к другой линз, имеющих общую оптическую ось, равна сумме оптических сил всех линз оптической системы.

10.2. Явления интерференции, дифракции и дисперсии в оптике

Важными и интересными оптическими явлениями, имеющими разнообразные проявления в природе, являются *интерференция, дифракция* и *дисперсия света.*

Поскольку на вступительных экзаменах в технические университеты этим темам в силу их сложности уделяется мало внимания (вопросы требуют скорее ответа описательного характера), мы остановимся кратко только на характеристике упомянутых явлений, отсылая за деталями к рекомендованной литературе.

При сложении в пространстве двух (или нескольких) волн может наблюдаться явление **интерференции**, при котором в отдельных его точках наблюдается усиление или ослабление амплитуды суммарных колебаний. При интерференции волн работает принцип суперпозиции, то есть результирующее колебание в каждой точке является геометрической суммой отдельных колебаний, вызванных каждой из складывающихся волн. Интерференция волн наблюдается, если они – **когерентны** (разность их фаз постоянна во времени). Распространенным примером является: интерференция встречных одинаковых волн, приводящая к образованию стоячей волны (колебания струны, закрепленной с двух концов) или интерференция света в тонких пленках, голография.

Другое важное свойство волн – **дифракция**, то есть отклонение при их распространении от законов геометрической оптики (смотрите принцип Гюйгенса-Френеля). Типичным знакомым примером служит дифракционная решетка. Когда через нее пропускают белый свет (постоянная решетки сравнима с длиной волны), то различные его составляющие отклоняются под разными углами (сильнее всего длинноволновое излучение) и образуют красивый радужный спектр. Во многом из-за дифракции мы слышим звуки в городе, имеющем много препятствий.

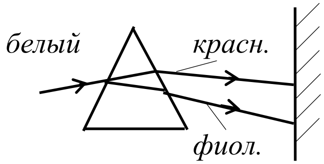


Рис. 10.9

Еще одной, знакомой нам, особенностью волн является **дисперсия** – зависимость фазовой скорости $\upsilon_ф$ гармонической волны от ее частоты. Дисперсия волн в основном вызвана их взаимодействием с колеблющимися частицами среды и не наблюдается, например, при распространении электромагнитных волн в вакууме. Типичным проявлением дисперсии является радуга (преломление солнечного света в капельках дождя) или разложение в спектр пучка белого света при его прохождении сквозь стеклянную призму (опыт И. Ньютона, рис. 10.9). Дисперсия в данном случае объясняется *зависимостью показателя преломления света* n *от частоты*, так как $n=c/\upsilon_ф$, а $\upsilon_ф=f(\nu)$. Чем больше дисперсия, тем заметней игра цветов – «огонь», составляющий главную прелесть многих драгоценных камней.

10.3. <u>Элементы теории относительности</u>

В основе специальной теории относительности (СТО) лежат два постулата, которые А. Эйнштейн сформулировал следующим образом:

1. *Все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой.*

2. *Скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от движения источников и приемников света.*

В СТО преобразования Галилея заменяются на более общие преобразования Лоренца:

$$x' = \frac{x - \upsilon t}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}},\ y'=y,\ z'=z,\ t'= \frac{t - \frac{\upsilon}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}; \tag{10.11}$$

$$x = \frac{x' + \upsilon t'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}},\ y=y',\ z=z',\ t= \frac{t' + \frac{\upsilon}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}; \tag{10.12}$$

показывающие связь между координатами движущейся (x', y', z') и неподвижной (x, y, z) систем отсчета (υ – относительная скорость систем вдоль оси x).

Механику, в которой необходимо учитывать наличие предельной скорости c, называют **релятивистской**.

Важные следствия СТО: *относительность одновременности событий в разных системах отсчета, изменение длины тел в различных инерциальных системах, замедление хода движущихся часов рассмотрим на практических занятиях.*

Релятивистские энергия и импульс

Из соображений размерности и инвариантности по отношению к преобразованиям Лоренца были найдены выражения для релятивистской энергии

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}} \tag{10.13}$$

и импульса частицы

$$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}}, \tag{10.14}$$

В предельном случае при $\upsilon \ll c$, из (10.14) следует классическое выражение $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$. При $\upsilon \ll c$ соотношение (10.13) можно привести к виду

$$E \approx mc^2 + \frac{m\upsilon^2}{2}\ , \qquad (10.15)$$

а при $\upsilon = 0$ из (10.13) и (10.15) вытекает, что

$$E_0 = mc^2 \qquad (10.16)$$

Таким образом, свободная частица обладает в состоянии покоя запасом энергии $E_0 = mc^2$, эту величину часто называют энергией покоя.

В релятивистском случае также имеет место выполнение законов сохранения энергии и импульса.

В отдельных случаях релятивистский импульс (10.14) записывают в виде $p=m(\upsilon)\cdot\upsilon$, где

$$m(\upsilon) = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{c^2}}} \ – \ \textit{релятивистская масса}. \qquad (10.17)$$

10.4. <u>Глоссарий</u>

Дисперсия волн – зависимость фазовой скорости гармонической волны от ее частоты.

Дисперсия света – зависимость показателя преломления вещества от частоты (длина волны) света.

Дифракция волн – отклонение при распространении волн от законов геометрической оптики.

Интерференция – сложение в пространстве волн, в результате которого в разных его точках получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны.

Линза	–	прозрачное тело, ограниченное двумя поверхностями, преломляющими световые лучи, способное формировать оптические изображения светящихся объектов.
Оптическая ось сферической линзы (главная)	–	прямая, проходящая через центры сферических поверхностей линзы.
(побочная)	–	любая прямая, проходящая через оптический центр линзы под углом к главной оптической оси.
Оптическая сила линзы	–	величина, обратная фокусному расстоянию линзы.
Показатель преломления среды (абсолютный)	–	коэффициент, который показывает во сколько раз скорость электромагнитных волн в среде меньше, чем в вакууме;
(относительный)	–	отношение абсолютных показателей преломления двух сред.
Фокус	–	точка, в которой в результате прохождения параллельным пучком лучей оптической системы пересекаются лучи пучка или их продолжения, если система превращает параллельный пучок в расходящийся.
Фокус главный линзы	–	точка на главной оптической оси линзы, в которой собираются лучи (или их продолжения), падающие на линзу параллельно ее главной оптической оси.
Фокальная плоскость	–	плоскость, проведенная через фокус линзы перпендикулярно к главной оптической оси.
Фокусное расстояние	–	расстояние от центра линзы до главного фокуса.

Основные вопросы для повторения:

1. Введите понятие абсолютного и относительного показателя преломления.
2. Сформулируйте законы прямолинейного распространения света, независимости световых лучей, преломления и отражения света.
3. Покажите приемы нахождения изображения в плоском зеркале.
4. Что представляет собой линза? Каково ее назначение?
5. Дайте определение главной и побочной оптической оси, центра линзы и ее оптической силы.
6. Что такое главный фокус и фокусное расстояние линзы, фокальная плоскость?
7. Запишите формулу линзы.
8. Приведите примеры построения изображений в линзах.
9. Дайте определение явлениям интерференции, дифракции и дисперсии света.
10. Сформулируйте постулаты специальной теории относительности.
11. Что такое релятивистская энергия и импульс?

Лекция № 11

11.1. Элементы квантовой теории. Строение атома

Ряд уже рассмотренных явлений и, в частности, явления интерференции и дифракции света хорошо описываются методами классической физики, исходя из представлений о волновой природе электромагнитного излучения и света в том числе. Однако, ряд подтвержденных опытом фактов объяснить, используя волновую теорию, затруднительно. Например, исследование спектров излучения паров и газов при низких давлениях показало, что они имеют *линейчатый* (дискретный) характер и состоят из относительно узких частотных интервалов, где интенсивность излучения значительна. Так, водород в видимой части спектра дает пять линий, натрий – одну. Эти результаты становятся понятными, если электромагнитное излучение рассматривать не только как волну, но и как систему, состоящую из определенных частиц (корпускул). Для объяснения закономерности распределений линий в спектре и причин их появления необходимо было создать модель атома, пригодную для описания спектров и одновременно для объяснения видов химических связей и периодичности химических свойств элементов, собранных в систему Д.И. Менделеева. Первая модель атома была создана Дж. Томсоном. По его гипотезе атом – это положительно и непрерывно заряженный шар, внутри которого распределены отрицательные заряды – электроны (атом в целом электронейтрален). При этом полагалось, что электроны могут совершать гармонические колебания и соответственно излучать электромагнитные световые волны. Однако, спектр, рассчитанный по теории Томсона, значительно отличался от частот реального спектра.

Следующим этапом построения атома была ядерная (планетарная) модель английского физика Э. Резерфорда, показавшего результатами ряда опытов, что атом состоит из массивной центральной части – ядра ($r \approx 10^{-15}$м), имеющего положительный заряд. Вокруг ядра по замкнутым орбитам движутся электроны, заполняя сферический объем радиусом $R \approx 10^{-10}$м (радиус атома). Электроны движутся ускоренно и должны непрерывно излучать электромагнитную энергию, вследствие чего их расстояние до ядра будет непрерывно уменьшаться. Довольно скоро электроны упадут на ядро, спектр излучения атома при этом должен быть непрерывным. Линейчатый спектр атома и наблюдаемая его стабильность показывают ошибочность и этой модели, построенной, по существу, в рамках классической физики.

Постулаты Бора. Спектр водорода

Более совершенную **модель атома** предложил Нильс Бор. Он оставил по сути неизменной модель атома Резерфорда, но ввел ряд положений, противоречащих классической физике, которые были названы **постулатами** Бора.

1. *В атоме существуют устойчивые (стационарные) состояния, характеризующиеся определенными значениями энергий* E_1, E_2, ... E_n, *находясь в которых атом не рождает и не поглощает электромагнитное излучение.*

2. *При переходе из одного стационарного состояния в другое (самопроизвольно или вынужденно) атом излучает или поглощает порцию (квант) электромагнитной энергии, величина которой равна*

$$\left| E_n - E_m \right| = h\nu, \tag{11.1}$$

где $n>m$ соответствует излучению, $n<m$ – поглощению; $h = 6{,}62\cdot10^{-34}$ Дж·с называется постоянной Планка; ν – частота излучаемой (поглощае-мой) электромагнитной энергии.

Произведение $E = h\nu$ представляет собой энергию кванта электромагнитного излучения. Энергию кванта можно выразить и через длину волны излучения.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \tag{11.2}$$

где c – скорость света в вакууме.

Кроме указанных двух утверждений Н. Бор ввел следующее соотношение для кругового движения электрона вокруг ядра атома

$$m_e \upsilon R = n\,\frac{h}{2\pi}\ , \tag{11.3}$$

где m_e – масса электрона, υ – его скорость, R – радиус орбиты электрона при его вращении вокруг ядра атома, когда он находится в одном из стационарных состояний, h – постоянная Планка, n – целое число (1, 2, 3...).

Теория Бора позволяет определить энергию и радиус вращения электрона вокруг ядра водородоподобного атома (рассматривается конкретный электрон без учета остальных) для различных стационарных состояний:

$$E_n = -\frac{z^2 e^4 m_e}{8\varepsilon_0^2 h^2}\cdot\frac{1}{n^2}, \qquad (11.4)$$

где z – атомный номер элемента.

Стационарное состояние с наименьшей энергией (n=1) называют основным состоянием атома. Состояния атома с большей энергией (n>1) носят название возбужденных состояний.

Таким образом, состояния атома характеризуются дискретным набором энергий, т.е. энергия атома квантуется.

Для радиусов вращения электронов в стационарных состояниях можно получить следующее выражение

$$R_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2 z} n^2 . \qquad (11.5)$$

При z=1 (атом водорода) и n=1 получается первый боровский радиус орбиты, наименьший из всех возможных. Подстановка констант в выражение 11.5 дает следующее значение первого боровского радиуса $R_1=5{,}28\cdot10^{-11}$м.

Частоту электромагнитного излучения атома можно подсчитать по формуле

$$\nu = R\left(\frac{1}{n_i^2}-\frac{1}{n_j^2}\right), \qquad (11.6)$$

где n_i – число, соответствующее стационарному состоянию, в которое переходит атом после излучения; n_j – число, соответствующее состоянию атома до излучения; R – постоянная Ридберга ($R=3{,}29\cdot10^{15}c^{-1}$).

По теории Бора линейчатый спектр атома водорода представляет собой спектральные линии, соответствующие переходу атома из различных стационарных состояний с более высокими энергиями (n_j) в определенное стационарное состояние с меньшей энергией (n_i). Так, серия линий, соответствующих в выражении 11.6 n_i=1 (n_j = 2, 3...) носит название серии Лаймана в ультрафиолетовой части спектра. Если n_i=2 (n_j=3, 4...), спектральные линии лежат в видимой части спектра и носят название серии Бальмера.

Далее (n_i=3) находится серия Пашена в инфракрасной области и т.д. (рис. 11.1).

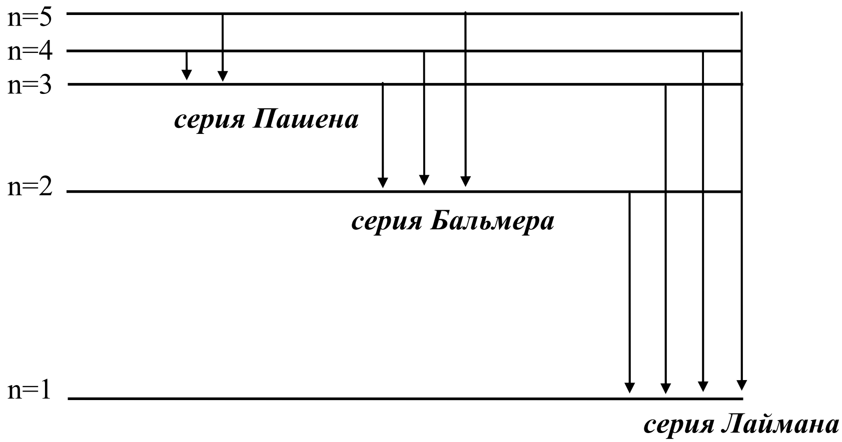


Рис. 11.1

Спектр поглощения атома водорода также является линейчатым, но содержит только серию Лаймана (свободные атомы водорода обычно находятся в состоянии с n=1).

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие заключения:

1. Свет излучается и поглощается атомами в виде отдельных порций – **квантов**.

2. Квант электромагнитного излучения можно рассматривать как элементарную частицу (корпускулу) с энергией E = hν.

11.2. <u>Внешний фотоэффект</u>

Корпускулярная теория электромагнитного излучения получила подтверждение при объяснении явления, которое называют **внешним фотоэффектом. Внешний фотоэлектрический эффект** – это *явление вырывания электронов с поверхности твердых тел и жидкостей при воздействии на них электромагнитного излучения, в частности, света.* Для изучения фотоэлектрического эффекта обычно используют схему, изображенную на рис. 11.2.

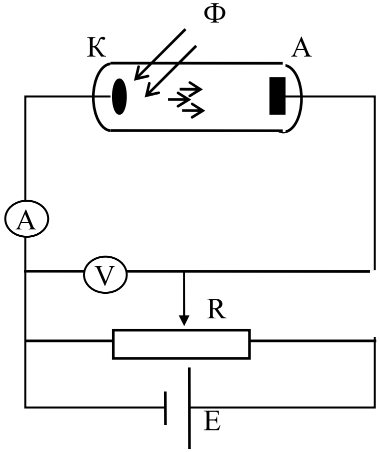


Рис. 11.2

Фотоэлемент представляет собой прозрачную колбу, в которой создан вакуум. Внутри колбы имеются два электрода: катод (К) и анод (А).

Катод облучается световым потоком Ф от источника монохроматического света.

Между анодом и катодом создают электрическое поле с помощью внешнего источника тока Е. Разность потенциалов между электродами регулируется потенциометром R. Амперметр и вольтметр, включенные в цепь фотоэлемента, необходимы для измерений фототока и разности потенциалов между анодом и катодом.

Основным показателем работы фотоэлемента является вольт-амперная характеристика, под которой понимают зависимость фототока J от разности потенциалов U в пространстве анод-катод, т.е. J=f(U). Для неизменного светового потока и заданной частоты света ν вольт-амперная характеристика имеет вид, представленный на рис. 11.3.

Получаемая характеристика позволяет сделать следующие выводы.

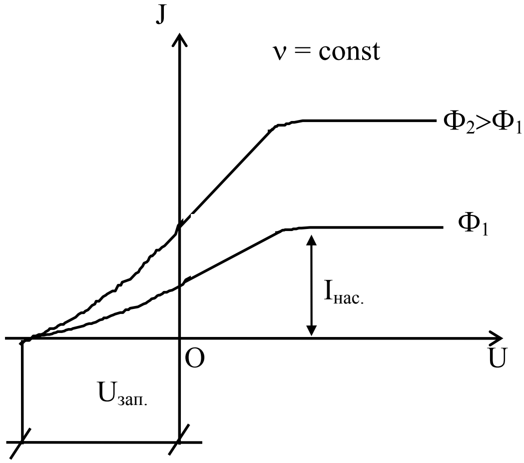


Рис. 11.3

С поверхности катода под действием света испускаются электроны, обладающие некоторой начальной скоростью υ_0 и способные достигнуть анода даже при нулевой разности потенциалов между анодом и катодом. Для того, чтобы полностью затормозить электроны, между анодом и катодом необходимо создать тормозящее электроны электрическое поле, подавая на анод отрицательный по отношению к катоду потенциал $U_{зап.}$. Увеличение светового потока не влияет на величину начальной скорости электронов, а, следовательно, и их кинетическую энергию. Запирающий потенциал также остается неизменным в силу закона сохранения энергии

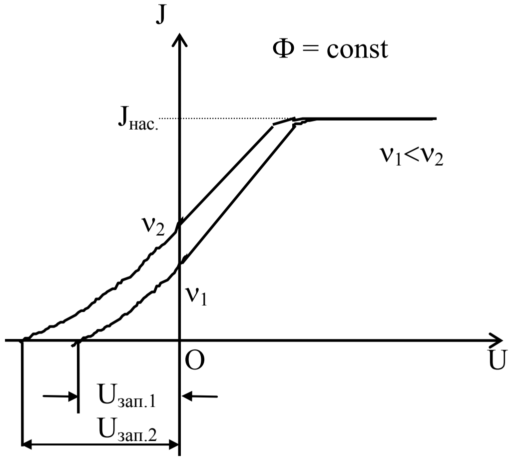


Рис. 11.4

$$\frac{m\upsilon_0^2}{2} = e\,U_{зап.}\,, \quad (11.7)$$

где e – заряд электрона.

Ток насыщения фотоэлемента $J_{нас.}$ не зависит от приложенной разности потенциалов. Это говорит о том, что число электронов, вырываемых в единицу времени определяется только величиной светового потока.

Если световой поток оставить неизменным, а изменять частоту света, то вольт-амперная характеристика примет следующий вид (рис. 11.4).

Из этой характеристики отчетливо видно, что начальная скорость вырванных с поверхности катода электронов не зависит от величины светового потока, а некоторым образом определяется частотой света.

Связь между током насыщения и величиной светового потока была изучена А.Г. Столетовым, установившим простой закон (закон Столетова):

$$J_н = const \cdot Ф \,. \tag{11.8}$$

При некоторой частоте ν_{min}, характерной для данного материала, фотоэффект исчезает. Экспериментально установленная зависимость запирающего напряжения от частоты света выглядит как показано на рис. 11.5.

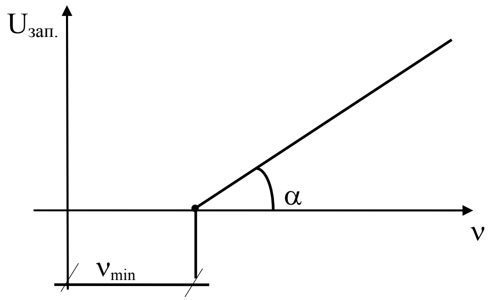


Рис. 11.5

При этом тангенс угла наклона α соответствует отношению $\frac{h}{e}$, то есть

$$tg\alpha \to \frac{h}{e} \,. \tag{11.9}$$

С точки зрения классической физики может быть объяснен лишь закон Столетова. Все остальные опытные факты, установленные при исследовании фотоэффекта классическая физика, основанная лишь на представлениях о волновой природе света, не объясняет.

Правильную, совпадающую с опытом, теорию фотоэффекта впервые сформулировал А. Эйнштейн. Он предложил рассматривать свет как поток отдельных порций излучения – квантов, названных фотонами. Каждый фотон имеет энергию E = hν, импульс $p=\frac{E}{c}$ и массу $\frac{h\nu}{c^2}$.

При этом каждый отдельный фотон взаимодействует с конкретным электроном, отдавая последнему свою энергию. Этой энергии может быть достаточно для совершения работы по преодолению сил электрического поля и выходу электрона на поверхность освещаемого вещества. Эта работа называется работой выхода $A_{вых}$ электрона из, например, металла. Иногда энергии фотона достаточно не только для совершения работы выхода, но и сообщения электрону дополнительной кинетической энергии. В соответствии с законом сохранения энергии этот процесс можно описать соотношением, которое было названо **уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта**

$$h\nu = A_{вых} + \frac{m\upsilon_0^2}{2}\ . \qquad (11.10)$$

Учитывая, что

$$\frac{m\upsilon_0^2}{2} = eU_{зап.}\ ,$$

выражение (11.10) можно записать иначе

$$h\nu = A_{вых} + eU_{зап.}\ . \qquad (11.11)$$

Минимальная частота (максимальная длина волны) света, при которой еще возможен фотоэффект называется **красной границей фотоэффекта**. При этом фотон обладает энергией, достаточной лишь для совершения работы выхода. Уравнение Эйнштейна для этого случая записывается следующим образом

$$h\nu_{кр} = A_{вых}\ . \qquad (11.12)$$

Объяснение закона Столетова по теории Эйнштейна заключается в том, что ток насыщения, а, следовательно, и количество электронов, испускаемых веществом пропорционально числу падающих на его поверхность фотонов, определяющих в свою очередь величину светового потока.

11.3. Атомное ядро. Дефект массы. Энергия связи. Основы ядерной энергетики. Радиоактивность

Ядро атома – это его центральная массивная часть. Установлено, что ядро состоит из протонов и нейтронов, имеющих общее название – нуклоны. **Протон** обладает положительным элементарным зарядом ($e=+1{,}6\cdot10^{-19}$Кл), его масса составляет 1836 m_e масс электрона ($m_e=9{,}1\cdot10^{-31}$кг). **Нейтрон** электрически нейтрален (отсюда его название), его масса несколько больше массы протона и равна 1838,5 m_e. Общее число нуклонов в ядре соответствует массовому числу A элемента в таблице Менделеева. Порядковый номер элемента Z равен числу протонов в ядре. Тогда число нейтронов легко подсчитать как N=A–Z. Ядра атомов, содержащие одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, называются изотопами.

Нуклоны в ядре связаны друг с другом ядерными силами, и для того, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны, необходимо совершить работу, равную энергии связи нуклонов в ядре. Из этого следует, что сумма масс покоя нуклонов, входящих в состав ядра больше, чем масса самого ядра на величину, которую называют дефектом массы:

$$Zm_p + (A-Z)\,m_n - M_я = \Delta m, \qquad (11.13)$$

где m_p – масса протона; m_n – масса нейтрона, $M_я$ – масса ядра, Δm – дефект массы.

При этом энергия связи

$$\Delta W = \Delta m\cdot c^2 = c^2\,[Zm_p+(A-Z)\,m_n - M_я]. \qquad (11.14)$$

Энергию связи можно определить как *наименьшую энергию, которую необходимо затратить для разделения ядра на отдельные нуклоны.* Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, называется **удельной энергией связи**:

$$\omega = \frac{\Delta W}{A}. \qquad (11.15)$$

Зависимость удельной энергии связи от массового числа представлена на рис. 11.6.

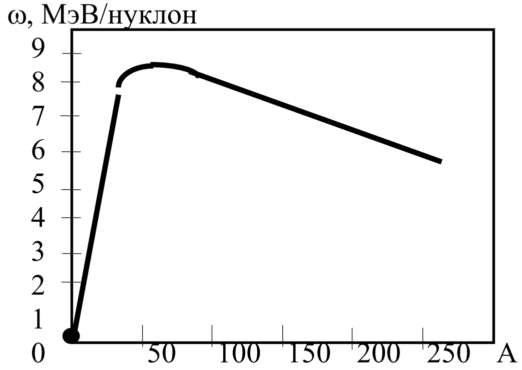


Рис. 11.6

Значение удельной энергии связи в средней части периодической таблицы (40<A<120) имеет почти постоянное значение $\omega \approx 8{,}6$МэВ/нуклон, максимальная величина 8,7 МэВ у элементов с A=50÷60. Для тяжелых и легких элементов удельная энергия связи уменьшается. Отсюда возникают две возможности выделения ядерной энергии:

1. Синтез легких ядер. Может быть осуществлен в будущем, например, на установках типа «ТОКАМАК» (тороидальные камеры с магнитными катушками).

2. Деление тяжелых ядер. Проводится в ядерных реакторах, составляющих основу сегодняшней ядерной энергетики.

При всех превращениях атомных ядер выполняется ряд законов сохранения, а именно

– закон сохранения массы (или энергии)

– закон сохранения электрического заряда

– закон сохранения импульса

– закон сохранения спина (вне школьной программы).

В общем виде, с учетом сказанного, ядерную реакцию можно записать таким образом

$$^{A_1}_{Z_1}X + ^{A_2}_{Z_2}X \to ^{A_3}_{Z_3}X + ^{A_4}_{Z_4}X$$

при этом $A_1+A_2=A_3+A_4$

$Z_1+Z_2=Z_3+Z_4$.

В качестве примера реакции деления ядер можно привести реакцию деления ядер урана

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \to ^{140}_{55}Cs + ^{94}_{37}Rb + 2^{1}_{0}n\,;$$

$$^{239}_{92}U \to ^{0}_{-1}e + ^{239}_{93}Np;\quad ^{239}_{93}Np \to ^{0}_{-1}e + ^{239}_{94}Pu\,.$$

При этом освобождается значительная энергия.

Синтез более тяжелых ядер из более легких также приводит к высвобождению энергии. Например,

$$^{3}_{1}H + ^{2}_{1}H \to ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n\,,$$

при этом высвобождается энергия 17,5 МэВ.

Или

$$^{7}_{3}Li + ^{2}_{1}H \to 2\cdot ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n\,,$$

при этом выделяется энергия 15,1 МэВ.

Радиоактивность

Процесс самопроизвольного превращения ядер одного вещества в ядра другого вещества называется **радиоактивностью**. Различают естественную и искусственную радиоактивность.

Процесс распада ядер является статистическим процессом, подчиняющимся следующему закону

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (11.16)$$

где N_0 – число нераспавшихся ядер в начальный момент времени $t=0$; N – число нераспавшихся ядер к моменту времени t; λ – постоянная распада.

Время, в течение которого распадается половина ядер, участвующих в реакции распада, называют периодом полураспада

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \qquad (11.17)$$

В качестве примера радиоактивного распада можно записать реакцию α-распада, в результате которой рождается ядро гелия ${}_{2}^{4}He$ (α – частица):

$${}_{Z}^{A}X \to {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_{2}^{4}He\,.$$

11.4. <u>Глоссарий</u>

Бора постулаты	–	в атоме существуют стационарные состояния, характеризующиеся определенными значениями энергий, находясь в которых атом не излучает и не поглощает энергии.
	–	при переходе из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_m атом излучает или поглощает квант электромагнитной энергии, равный разности энергий стационарных состояний $h\nu = \mid E_n - E_m \mid$.
Дефект массы	–	разность масс покоя составляющих ядро атома изолированных нуклонов и массы ядра.
Красная граница фотоэффекта	–	наименьшая частота (наибольшая длина волны), при которой еще возможен фотоэффект.
Нуклоны	–	частицы (протоны и нейтроны), из которых состоят ядра атомов.
Период полураспада	–	время, в течение которого распадается половина радиоактивных ядер.
Радиоактивность	–	процесс (естественный или искусственный) самопроизвольного превращения ядер одного элемента в ядра другого элемента.
Столетова закон	–	фототок пропорционален падающему на вещество световому потоку.
Удельная энергия связи	–	энергия связи, приходящаяся на один нуклон.

Фотон	–	элементарная частица с нулевой массой покоя, представляющая собой квант электромагнитного излучения.
Фотоэлектрический эффект (внешний)	–	явление вырывания электронов с поверхности вещества под действием света.
Эйнштейна уравнение	–	соотношение, устанавливающее связь между энергией фотонов, падающих на конденсированную среду, работой выхода электронов из нее и кинетической энергией фотоэлектронов.
Энергия связи	–	минимальная энергия, которую необходимо затратить для разделения ядра атома на составляющие его нуклоны.
Ядро атома	–	центральная массивная часть атома, состоящая из нуклонов (протонов и нейтронов).

Основные вопросы для повторения

1. Опишите модели атома Томсона и Резерфорда.
2. Сформулируйте постулаты Бора. Получите выражение для энергий стационарных состояний атома водорода и радиусов орбит электронов, соответствующих этим состояниям.
3. Запишите формулу для расчета частот электромагнитного излучения атома водорода.
4. В чем заключается явление внешнего фотоэлектрического эффекта? Изобразите вольт-амперные характеристики фотоэлемента для различных частот электромагнитного излучения и различных световых потоков.
5. Что такое напряжение запирания фотоэлемента?
6. Сформулируйте закон Столетова и объясните его с квантовой точки зрения.
7. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
8. Что называют красной границей фотоэффекта?
9. Из каких частиц состоит ядро атома? Как рассчитать число нуклонов, протонов и нейтронов в ядре?

10. Напишите выражение для дефекта массы ядра. Сформулируйте понятие энергии связи нуклонов в ядре.
11. Какие существуют возможности выделения ядерной энергии?
12. Запишите закон радиоактивного распада ядер.
13. Какие законы выполняются при протекании ядерных реакций?
14. Что такое период полураспада?

Литература

1. Шахмаев Н.М., Шахмаев С.Н., Шодиев Д.Ш. Физика: Учебник для 9-11 классов. – М.: Просвещение, 1991-1998.
2. Кикоин И.К., Кикоин А.К. Физика: Учебник для 9-11 классов средней школы. – М.: Просвещение, 1990-1998.
3. Денисов Ф.П., Ильин С.И., Никитенко В.А., Прунцев А.П. Теория и решение задач по физике. – М.: МИИТ, 1993.
4. Гурский И.П. Элементарная физика с примерами решения задач. – М.: Наука, 1989-1998.
5. Саенко П.Г. Физика: Учебник для средней школы. – М.: Просвещение, 1990-1998.
6. Кабардин О.Ф. Физика. Справочные материалы. – М.: Просвещение, 1991.
7. Элементарный учебник физики / Под редакцией академика Ландсберга Г.С. – М.: Наука, 1993-1997.
8. Роуэлл Г., Герберт С. Физика. – М.: Просвещение, 1994.
9. Джанколли Д. Физика. Т. 1, 2. – М.: Мир, 1989.
10. Уокер Д. Физический фейерверк. – М.: Мир, 1989.
11. Никитенко В.А., Прунцев А.П. Концепции современного естествознания. – М.: МИИТ, 1997.
12. Бесчетнов В.М. Физика. Курс лекций для учащихся 7-11 классов. Т. 1, 2. – М.: Демиург, 1995-1996.
13. Павленко Ю.Г. Начала физики. – М.: МГУ. 1988.
14. Физический энциклопедический словарь / Под редакцией академика Прохорова А.М. – М.: Советская энциклопедия, 1984.
15. Физическая энциклопедия / Под редакцией академика Прохорова А.М. – Т. 1-5. – М.: Советская энциклопедия, 1988-1998.

16. Храмов Ю.А. Физики. Биографический справочник. – М.: Наука, 1983.
17. Кокин С.М., Селезнев В.А. Физика на железнодорожном транспорте. – М.: МИИТ, 1995.

СОДЕРЖАНИЕ

В.А. НИКИТЕНКО
А.П. ПРУНЦЕВ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ФИЗИКЕ
для довузовской подготовки

Подписано в печать 10.04.02	Формат 60х84/16.	Цена договорная
Тираж 500 экз.	Усл.печ.л. – 10,125	

Подписано в печать 30.10.13.
Формат 60х84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Заказ № 1595.2. Тираж 500.

КнигоГрад — издательство, типография.
426034, г. Ижевск, ул. Коммунаров, 244.