

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультет среднего профессионального образования

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ПУП.03 ФИЗИКА**

Специальность 21.02.05 Земельно-имущественные отношения

Форма обучения очная

Оренбург, 2022 г.

Лекция №1

Тема: «Основы кинематики»

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Механическое движение, его относительность.
- 1.2. Характеристики механического движения: перемещение, скорость, ускорение.
- 1.3. Виды движения (равномерное, равноускоренное) и их графическое описание.

2. Краткое содержание вопросов

Выделим среди великого множества процессов, происходящих в природе, круг явлений, которые изучает механика.

Первое, что бросается в глаза при наблюдении окружающего нас мира, - это его изменчивость. Мир не является застывшим, статичным. Изменения в нем весьма разнообразны. Но если спросить вас, какие изменения вы замечаете чаще всего, то ответ, пожалуй, будет однозначным: **меняется положение предметов (или тел, как говорят физики) относительно земли и относительно друг друга с течением времени**. Бежит ли собака или мчится автомобиль - с ними происходит один и тот же процесс: их положение относительно земли меняется с течением времени. Они перемещаются. То же самое происходит с листьями деревьев в ветреную погоду, падающими каплями дождя, плывущими в небе облаками.

Конечно, не любые изменения состоят в перемещении тел. Так, например, при охлаждении вода замерзает, превращаясь в лед. Но наиболее часто встречающиеся вокруг нас изменения - это изменения положений тел относительно друг друга. Изменение положения тела или частей тела в пространстве относительно других тел с течением времени называется **механическим движением**.

Определение механического движения выглядит просто, но простота эта обманчива. Прочтите определение еще раз и подумайте, все ли слова вам ясны: *пространство, время, относительно других тел*. Скорее всего, эти слова требуют пояснения.

Механика - наука об общих законах движения тел. Механическим движением называется перемещение тел или частей тел в пространстве относительно друг друга с течением времени.

Движение точки и тела

Приступим к изучению механического движения. Человечеству понадобилось около двух тысяч лет, чтобы встать на верный путь, который завершился открытием законов механического движения.

Попытки древних философов объяснить причины движения, в том числе и механического, были плодом чистой фантазии. Подобно тому, рассуждали они, как утомленный путник ускоряет шаги по мере приближения к дому, падающий камень начинает двигаться все быстрее и быстрее, приближаясь к матери-земле. Движения живых организмов, например кошки, казались в те времена гораздо более простыми и понятными, чем падение камня. Были, правда, и гениальные озарения. Так, греческий философ Анаксагор говорил, что Луна, если бы не двигалась, упала бы на Землю, как падает камень из пращи.

Однако подлинное развитие науки о механическом движении началось с трудов великого итальянского физика Г. Галилея. Он первым понял, что для открытия законов механического движения нужно сначала научиться описывать движение количественно (математически). Нельзя ограничиваться простым наблюдением за движущимися телами; нужно ставить опыты для того, чтобы выяснить, по каким правилам происходит движение

Кинематика - это раздел механики, изучающий способы описания движений и связь между величинами, характеризующими эти движения.

Описать движение тела - это значит указать способ определения его положения в пространстве в любой момент времени.

Уже на первый взгляд задача описания кажется очень сложной. В самом деле, взгляните на клубящиеся облака, колышущиеся листья на ветке дерева. Представьте себе, какое сложное движение совершают поршни автомобиля, мчащегося по шоссе. Как же приступить к описанию движения? Самое простое (а начинать всегда лучше с простого) - это научиться описывать движение точки. Под точкой можно понимать, например, маленькую отметку, нанесенную на движущийся предмет - футбольный мяч, колесо трактора и т. д. Если мы будем знать, как происходит движение каждой такой точки (каждого очень маленького участка) тела, то мы будем знать, как движется все тело.

Но вначале не надо гнаться за особо точным описанием движения. Давайте примем за точку очень маленький предмет - маленький по сравнению с тем расстоянием, которое он проходит. Например, когда вы говорите, что пробежали на лыжах 10 км, то никто не станет уточнять, какая именно часть вашего тела преодолела расстояние в 10 км, хотя вы отнюдь не точка. В данном случае это не имеет сколько-нибудь существенного значения.

Это очень важный момент. Когда мы пытаемся описать события, происходящие в мире, то всегда приходится прибегать к разного рода упрощениям действительности, т. е. к модели реальных явлений. Не имеет смысла претендовать на абсолютную точность описания. Во-первых, она практически не нужна, а во-вторых, все равно она недостижима во всей полноте.

В дальнейшем, когда мы будем говорить о движении тела, то будем иметь в виду, что условия его движения таковы, что его можно считать точкой.

Движение тел, которые мы можем считать точками - первая модель движения реальных тел.

Материальная точка

Возьмите лист плотной бумаги и подбросьте его. Он начнет медленно опускаться, слегка раскачиваясь из стороны в сторону. Если тот же лист скомкать, то он будет падать без раскачивания и гораздо быстрее. Обыкновенный волчок, состоящий из диска, насаженного на тонкую палочку, способен кружиться, не падая набок, пока скорость вращения велика. Заставить же вести себя подобным образом диск и палочку по отдельности просто невозможно.

С помощью подобных простых наблюдений нетрудно убедиться, что движение тел сильно зависит от их размеров и форм. Чем сложнее форма тела, тем сложнее его движение. Трудно поэтому надеяться найти какие-то общие законы движения, которые были бы непосредственно справедливы для тел произвольной формы.

Основные законы механики Ньютона относятся не к произвольным телам, а к точке, обладающей массой, - материальной точке.

Но точек, обладающих массой, в природе нет. В чем же тогда смысл этого понятия? Во многих случаях размеры и форма тела не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на характер механического движения.

Вот в этих случаях мы и можем рассматривать тело как *материальную точку*, т. е. считать, что оно обладает массой, но не имеет геометрических размеров.

Причем одно и то же тело в одних случаях можно считать материальной точкой, а в других нет. Все зависит от условий, при которых происходит движение тела, и от того, что именно вас интересует. Например, при исследовании орбитального движения планет вокруг Солнца как планеты, так и Солнце можно считать материальными точками. Дело в том, что расстояние между ними много больше их собственных размеров, а при этих условиях взаимодействие между телами не зависит от формы тел. Но на движение искусственных спутников Земли форма нашей планеты уже оказывает заметное влияние.

Еще один важный пример. При поступательном движении твердого тела, например кубика, соскальзывающего с доски, все части кубика движутся совершенно одинаково. Кубик вполне можно рассматривать как точку с массой, равной массе кубика. Но если тот же кубик вращается, считать его точкой нельзя: его части будут иметь существенно различные скорости.

Как быть в тех многочисленных случаях, когда тело нельзя считать материальной точкой? Выход есть, и он совсем несложен. Тело можно мысленно разделить на столь малые элементы, что каждый из них допустимо считать материальной точкой.

В механике любое тело можно рассматривать как совокупность большого числа материальных точек. Зная законы движения точки, мы в принципе располагаем методом описания движения произвольного тела.

Положение точки в пространстве

Чтобы решить задачу о движении тела, прежде всего надо уметь определять, или, что одно и то же, задавать, положение его в пространстве. Как же определяют положение точки?

Наблюдая за любым телом, мы замечаем, что его положение в один и тот же момент времени относительно различных тел различно. Например, космический корабль, запущенный с космодрома Байконур, занимает совершенно различные положения относительно Земли, Луны и Солнца. Поэтому в данном случае обязательно надо указать *физическое тело, относительно которого задается положение данного тела или же данной точки*. Такое тело называют **телом отсчета**.

Тело отсчета можно выбрать произвольно. Им может быть космодром, самолет, в котором мы летим, космический корабль, Земля, Солнце, звезды и т. д. Но относительно различных точек тела отсчета положение любого другого тела или точки тоже различно. Если, например, за тело отсчета принять Землю, то положение спутника Земли относительно Москвы будет иным, нежели относительно космодрома Байконур. Строго говоря, мы должны указать, относительно какой точки выбранного тела отсчета задается положение данной точки или тела.

Если тело отсчета выбрано, то относительно него положение точки можно задать с помощью координат или *радиус-вектора*. Выбор системы отсчета и системы координат должен быть разумным, чтобы описание движения тела выглядело достаточно просто, но в то же время мы могли бы ответить на все вопросы задачи.

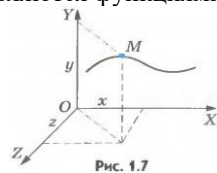
Положение точки в пространстве можно задавать с помощью координат или радиус-вектора, соединяющего начало координат и точку.

Способы описания движения. Система отсчета

Если тело можно считать точкой, то для описания его движения нужно научиться рассчитывать положение точки в любой момент времени относительно выбранного тела отсчета.

Существует несколько способов описания, или, что одно и то же, задания, движения точки. Рассмотрим два из них, которые наиболее часто применяются.

Координатный способ. Будем задавать положение точки с помощью координат (*рис. 1.7*). Если точка движется, то ее координаты изменяются с течением времени. Так как координаты точки зависят от времени, то можно сказать, что они являются функциями времени.



Математически это принято записывать в виде

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ z = z(t), \end{cases} \quad (1.1)$$

Уравнения (1.1) называют **кинематическими уравнениями движения точки**, записанными в координатной форме. Если они известны, то для каждого момента времени мы сможем рассчитать координаты точки, а следовательно, и ее положение относительно выбранного тела отсчета. Вид уравнений (1.1) для каждого конкретного движения будет вполне определенным.

Линия, по которой движется точка в пространстве, называется траекторией.

В зависимости от формы траектории все движения точки делятся на прямолинейные и криволинейные. Если траекторией является прямая линия, движение точки называется *прямолинейным*, а если кривая - *криволинейным*.

Векторный способ. Положение точки можно задать, как известно, и с помощью радиус-вектора. При движении материальной точки радиус-вектор, определяющий ее положение, с течением времени изменяется (поворачивается и меняет длину; рис. 1.8), т. е. является функцией времени:

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \quad (1.2)$$

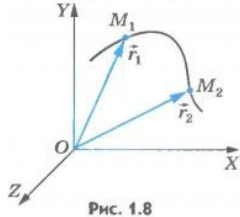


Рис. 1.8

Последнее уравнение есть закон движения точки, записанный в векторной форме. Если он известен, то мы можем для любого момента времени рассчитать радиус-вектор точки, а значит, определить ее положение. Таким образом, задание трех скалярных уравнений (1.1) равносильно заданию одного векторного уравнения (1.2).

Система отсчета. Движение любого тела есть движение относительное. Это значит, что движение данного тела может быть совершенно различным по отношению к другим телам.

Так, если для наблюдателя, находящегося на палубе плывущего теплохода, какой-нибудь лежащий на ней предмет неподвижен, для наблюдателя, находящегося на берегу, он движется.

В безветренную погоду капли дождя падают относительно земли по вертикальным линиям. Но относительно вагона, движущегося равномерно и прямолинейно, эти же капли движутся по прямым, наклонным к вертикали. Если какое-либо тело находится в покое по отношению к Земле, то оно движется по отношению к Солнцу. Таким образом, изучая движение интересующего нас тела, мы обязательно должны указать, относительно какого тела это движение рассматривается.

Тело, относительно которого рассматривается движение, называется **телом отсчета**.

Чтобы рассчитать положение точки (тела) относительно выбранного тела отсчета в зависимости от времени, надо не только связать с ним систему координат, но и суметь измерить время. Время измеряют с помощью часов. Современные часы - это сложные устройства. Они позволяют измерять время в секундах с точностью до тринадцатого знака после запятой. Естественно, ни одни механические часы такой точности обеспечить не могут. Так, самые точные в мире механические часы, циферблат которых мы можем каждый день видеть на телеэкране, в десять тысяч раз менее точны, чем Государственный эталон времени. Если эталонные часы не корректировать, то на одну секунду они убегут или отстанут за триста тысяч лет. Понятно, что в быту нет необходимости измерять время с очень большой точностью. Но для физических исследований, космонавтики, геодезии, радиоастрономии, управления воздушным транспортом высокая точность в измерении времени просто необходима. От точности измерения времени зависит точность, с которой мы сумеем рассчитать положение тела в какой-либо момент времени.

Совокупность тела отсчета, связанной с ним системы координат и часов называют **системой отсчета**. Кинематические уравнения движения, записанные в координатной или векторной форме, позволяют определить положение точки в любой момент времени.

Перемещение

Пусть в какой-то момент времени движущееся тело (точка) занимает положение M_1 (рис. 1.10, а). Как найти его положение спустя некоторый промежуток времени после этого момента?

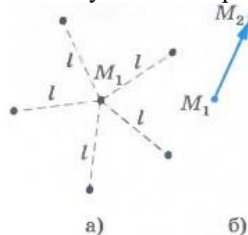


Рис. 1.10

Допустим, известно, что тело находится на расстоянии l относительно своего начального положения. Сможем ли мы в этом случае однозначно определить новое положение тела? Очевидно, нет, поскольку есть бесчисленное

множество точек, которые удалены от точки M_1 на расстояние l . Чтобы однозначно определить новое положение тела, надо еще знать, в каком направлении от точки M_1 следует отложить отрезок длиной l .

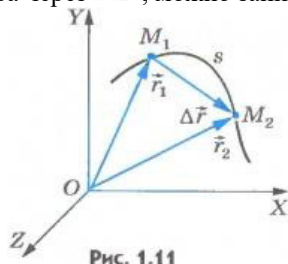
Таким образом, если известно положение тела в какой-то момент времени, то найти его новое положение можно с помощью направленного отрезка определенной длины, который следует отложить от начального положения тела. Конец этого отрезка и будет задавать новое положение тела (рис. 1.10, б).

Направленный отрезок, проведенный из начального положения тела в его конечное положение, называется **вектором перемещения** или просто **перемещением** тела.

Поскольку перемещение - величина векторная, то перемещение, показанное на рисунке 1.10, б, можно обозначить $\overrightarrow{M_1M_2}$.

Покажем, что при векторном способе задания движения перемещение можно рассматривать как изменение радиус-вектора движущегося тела.

Пусть радиус-вектор $\vec{r}_1$ задает положение тела в момент времени t_1 , а радиус-вектор $\vec{r}_2$ - в момент времени t_2 (рис. 1.11). Чтобы найти изменение радиус-вектора за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$, надо из конечного его значения $\vec{r}_2$ вычесть начальное значение $\vec{r}_1$. Из рисунка 1.11 видно, что перемещение, совершенное телом за промежуток времени Δt , есть изменение его радиус-вектора за это время. Следовательно, обозначив изменение радиус-вектора через $\Delta \vec{r}$, можно записать: $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$.



Модуль перемещения может быть не равен длине пути, пройденного точкой. Например, на рисунке 1.11 длина линии, соединяющей точки M_1 и M_2 больше модуля перемещения: . Путь равен перемещению только в случае прямолинейного однонаправленного движения.

Перемещение тела $|\Delta \vec{r}|$ - вектор, длина пути - скаляр, $|\Delta \vec{r}| \leq s$.

Скорость равномерного прямолинейного движения

На уроках физики вы довольно подробно изучали равномерное движение. Как вам известно, движение тела (точки) называется **равномерным**, если оно за любые равные промежутки времени проходит одинаковые пути.

Равномерное движение может быть как криволинейным, так и прямолинейным. Равномерное прямолинейное движение - самый простой вид движения. С него мы и начнем изучение движения в кинематике.

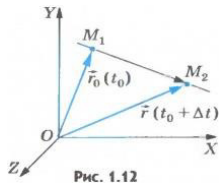
Важной величиной, характеризующей движение тела, является его скорость. Некоторое представление о скорости каждый из нас имел и до начала изучения физики. Черепаха перемещается с малой скоростью, человек движется с большей скоростью, автомобиль движется быстрее человека, а самолет - еще быстрее. Самой большой скорости относительно Земли человек достигает с помощью космических ракет.

Несмотря на то, что слово «скорость» давно стало для нас привычным, определить строго, что же такое скорость неравномерного движения тела, не так просто. Гораздо проще выяснить, что понимают под скоростью равномерного прямолинейного движения.

В механике рассматривают скорость как векторную величину. А это означает, что скорость можно считать известной (заданной) лишь в том случае, если известны ее модуль и направление.

Дадим определение скорости равномерного прямолинейного движения точки. Пусть тело, двигаясь равномерно и прямолинейно в течение промежутка времени Δt , переходит из положения M_1 в положение M_2 (рис. 1.12), совершив при этом перемещение $\Delta \vec{r}$. Поделим перемещение $\Delta \vec{r}$ на промежуток времени Δt , в течение которого это перемещение произошло. В результате получим вектор. (При делении вектора на число получаем вектор.) Этот вектор называют скоростью равномерного прямолинейного движения точки и обозначают буквой $\vec{v}$. Следовательно, можно записать:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.3)$$



Скоростью равномерного прямолинейного движения тела называется величина, равная отношению его перемещения к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло.

Так как промежуток времени Δt - величина положительная, то скорость $\vec{v}$ направлена так же, как и перемещение $\Delta \vec{r}$.

Выясним смысл модуля скорости

$$v = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t}.$$

Модуль перемещения $|\Delta \vec{r}|$ есть расстояние, пройденное телом за время Δt . А так как тело движется равномерно, то модуль отношения, а значит, и модуль скорости v , есть величина, численно равная расстоянию, пройденному телом за единицу времени.

Таким образом, если скорость равномерного прямолинейного движения тела задана как вектор, то мы знаем его перемещение за единицу времени.

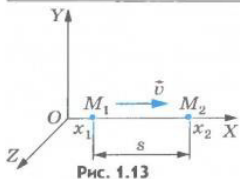
Уравнение равномерного прямолинейного движения

$$x = x_0 + v_x t. \quad (1.5)$$

Уравнение (1.5) есть уравнение равномерного прямолинейного движения точки, записанное в координатной форме. Оно позволяет найти координату x тела при этом движении в любой момент времени, если известны проекция его скорости на ось OX и его начальная координата x_0 .

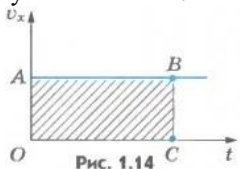
Путь s , пройденный точкой при движении вдоль оси OX (рис. 1.13), равен модулю изменения ее координаты: $s = |x_2 - x_1|$. Его можно найти, зная модуль скорости $v = |v_x|$:

$$s = |v_x| t = vt. \quad (1.6)$$



Отметим, что, строго говоря, равномерного прямолинейного движения не существует. Автомобиль на шоссе никогда не едет абсолютно прямо, небольшие отклонения в ту или иную сторону от прямой всегда имеются. И значение скорости слегка изменяется. Незначительная неровность шоссе, порыв ветра, чуть-чуть большее нажатие на педаль газа и другие причины вызывают небольшие изменения скорости. Но приближенно на протяжении не слишком большого промежутка времени движение автомобиля можно считать равномерным и прямолинейным с достаточной для практических целей точностью. Таково одно из упрощений действительности, позволяющее без больших усилий описывать многие движения.

Графическое представление равномерного прямолинейного движения. Полученные результаты можно изобразить наглядно с помощью графиков. Особенно прост график зависимости проекции скорости от времени (рис. 1.14). Это прямая, параллельная оси времени. Площадь прямоугольника $OABC$, заштрихованная на рисунке, равна изменению координаты точки за время t . Ведь сторона OA есть v_x , а сторона OC - время движения t , поэтому $\Delta x = v_x t$.



На рисунке 1.15 приведены примеры графиков зависимости координаты от времени для трех различных случаев равномерного прямолинейного движения. Прямая 1 соответствует случаю $x_0 = 0, v_{x1} > 0$; прямая 2 - случаю $x_0 < 0, v_{x2} > 0$, а прямая 3 - случаю $x_0 > 0, v_{x3} < 0$. Угол наклона α_2 прямой 2 больше, чем угол наклона α_1 прямой 1. За один и тот же промежуток времени t_1 точка, движущаяся со скоростью v_{x2} , проходит большее расстояние, чем при движении ее со скоростью v_{x1} . Во втором случае скорость v_x больше, чем в первом. Скорость определяет угол наклона прямой к оси t .

Очевидно, скорость v_x численно равна тангенсу угла α . В случае 3 $\alpha_3 < 0$, движение происходит в сторону, противоположную оси OX .

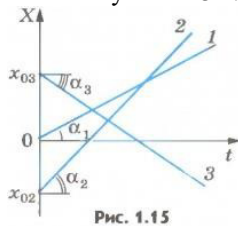


Рис. 1.15

Получено уравнение прямолинейного равномерного движения точки. Графики зависимости $v_x(t)$ и $x(t)$ позволяют легко проанализировать и сравнить движения.

Мгновенная скорость

Ни одно тело не движется все время с постоянной скоростью. Трогаясь с места, автомобиль начинает двигаться все быстрее и быстрее. Некоторое время он может двигаться равномерно или почти равномерно, но рано или поздно замедляет движение и останавливается. При этом он проходит различные расстояния за одни и те же интервалы времени, т. е. движется неравномерно.

Неравномерное движение может быть как прямолинейным, так и криволинейным.

Чтобы полностью описать неравномерное движение точки, надо знать ее положение и скорость в каждый момент времени. Скорость в данный момент времени называется мгновенной скоростью.

Что же понимают под мгновенной скоростью?

Пусть точка, двигаясь неравномерно и криволинейно, в некоторый момент времени t занимает положение M (рис. 1.18). По прошествии времени Δt_1 от этого момента точка займет положение M_1 , совершив перемещение $\Delta \vec{r}_1$. Поделив вектор $\Delta \vec{r}_1$ на промежуток времени Δt_1 , найдем скорость такого равномерного прямолинейного движения, с которой должна была бы двигаться точка, чтобы за время Δt попасть из положения M в положение M_1 . Эту скорость называют **средней** скоростью перемещения точки за время Δt_1 . Обозначив ее через $\vec{v}_{ср1}$, запишем:

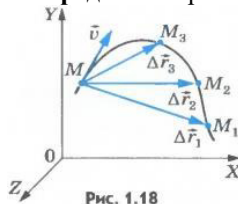


Рис. 1.18

Найдем средние скорости за все меньшие и меньшие промежутки времени:

$$\vec{v}_{ср2} = \frac{\Delta \vec{r}_2}{\Delta t_2}, \quad \vec{v}_{ср3} = \frac{\Delta \vec{r}_3}{\Delta t_3}.$$

При уменьшении промежутка времени Δt перемещения точки уменьшаются по модулю и меняются по направлению. Соответственно этому, средние скорости также меняются как по модулю так и направлению. Но по мере приближения промежутка времени Δt к нулю средние скорости все меньше и меньше будут отличаться друг от друга. А

это означает, что при стремлении промежутка времени Δt к нулю отношение $\frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ стремится к определенному вектору как к своему предельному значению. В механике такую величину называют скоростью точки в данный момент времени, или просто мгновенной скоростью, и обозначают $\vec{v}$.

Мгновенная скорость точки есть величина, равная пределу отношения перемещения $\Delta \vec{r}$ к промежутку времени Δt , в течение которого это перемещение произошло, при стремлении промежутка Δt к нулю.

Выясним теперь, как направлен вектор мгновенной скорости. В любой точке траектории вектор мгновенной скорости направлен так, как в пределе, при стремлении промежутка времени Δt к нулю, направлена средняя скорость перемещения. Эта средняя скорость направлена так, как направлен вектор перемещения $\Delta \vec{r}$. Из рисунка 1.18 видно, что при уменьшении промежутка времени Δt вектор $\Delta \vec{r}$, уменьшая свою длину, одновременно поворачивается. Чем короче становится вектор $\Delta \vec{r}$, тем ближе он к касательной, проведенной к траектории в данной точке M .

Следовательно, мгновенная скорость направлена по касательной к траектории (см. рис. 1.18).

В частности, скорость точки, движущейся по окружности, направлена по касательной к этой окружности. В этом нетрудно убедиться. Если маленькие частички отделяются от вращающегося диска, то они летят по касательной, так как

имеют в момент отрыва скорость, равную скорости точек на окружности диска. Вот почему грязь из-под колес буксующей автомашины летит по касательной к окружности колес.

Помимо средней скорости перемещения, для описания движения чаще пользуются средней путевой скоростью $v_{\text{cпс}}$. Эта средняя скорость определяется отношением пути к промежутку времени, за который этот путь пройден:

$$v_{\text{cпс}} = \frac{s}{t}. \quad (1.7)$$

Когда мы говорим, что путь от Москвы до Санкт-Петербурга поезд прошел со скоростью 80 км/ч, мы имеем в виду именно среднюю путевую скорость движения поезда между этими городами. Модуль средней скорости перемещения при этом будет меньше средней путевой скорости, так как $S > |\Delta \vec{r}|$.

Понятие мгновенной скорости - одно из основных понятий кинематики. Это понятие относится к точке. Поэтому в дальнейшем, говоря о скорости движения тела, которое нельзя считать точкой, мы можем говорить о скорости какой-нибудь его точки.

Ускорение

При движении тел их скорости обычно меняются либо по модулю, либо по направлению, либо же одновременно как по модулю, так и по направлению.

Так, скорость шайбы, скользящей по льду, уменьшается с течением времени до полной ее остановки. Если взять в руки камень и разжать пальцы, то при падении камня его скорость постепенно нарастает.

Изменение скорости тела может происходить как очень быстро (движение пули в канале ствола при выстреле из винтовки), так и сравнительно медленно (движение поезда при его отправлении). Чтобы уметь находить скорость в любой момент времени, необходимо ввести величину, характеризующую быстроту изменения скорости. Эту величину называют **ускорением**. Ускорение - еще одна важная физическая величина.

Ускорением тела называется предел отношения изменения скорости $\Delta \vec{v}$ к промежутку времени Δt , в течение которого это изменение произошло, при стремлении Δt к нулю.

Ускорение направлено так, как в пределе, при стремлении промежутка времени Δt к нулю, направлен вектор изменения скорости $\Delta \vec{v}$. В отличие от направления скорости, направление вектора ускорения нельзя определить, зная траекторию точки и направление движения точки по траектории. В дальнейшем на простых примерах мы увидим, как можно определить направление ускорения тела при прямолинейном и криволинейном движениях. Пока же надо запомнить, что при данном направлении скорости ускорение может иметь любое направление.

Могут возникнуть вопросы: ведь может существовать движение с переменным ускорением? Не следует ли ввести величину, характеризующую быстроту изменения ускорения? Конечно, такую величину ввести можно, но обычно в этом нет необходимости.

При движении скорость тел, как правило, изменяется. Знать быстроту ее изменения со временем, т. е. знать ускорение необходимо для вычисления скорости и определения положения тела.

Единица ускорения

Движение с ускорением можно разделить на два вида: движение с постоянным ускорением, когда модуль и направление вектора ускорения не меняются со временем, и движение с переменным ускорением, когда ускорение со временем меняется.

Движение с постоянным ускорением является наиболее простым движением с переменной скоростью. Можно приближенно считать, что с постоянным ускорением движется автобус (или поезд) при отправлении в путь и при торможении, скользящая по льду шайба и т. д. Мы будем изучать в основном движение с постоянным ускорением.

Если ускорение тела постоянно, то отношение изменения скорости к интервалу времени, за которое это изменение произошло, будет одним и тем же для любого интервала времени. Поэтому, обозначив через Δt некоторый произвольный промежуток времени, а через $\Delta \vec{v}$ - изменение скорости за этот промежуток, можно записать:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.11)$$

Отсюда следует, что модуль ускорения численно равен единице, если за единицу времени модуль вектора изменения скорости изменяется на единицу.

Если время измерено в секундах, а скорость - в метрах в секунду, то 1 единица ускорения = 1 м/с², т. е. ускорение выражается в метрах на секунду в квадрате.

Если ускорение точки постоянно и его модуль равен, например, 2 м/с², то это означает, что за 1 с модуль вектора изменения скорости увеличивается на 2 м/с.

Прямолинейное движение с постоянным ускорением, при котором модуль скорости увеличивается, называется **равноускоренным движением**, а прямолинейное движение с постоянным ускорением, при котором модуль скорости уменьшается, называется **равнозамедленным**.

Понятие ускорения, как и понятие скорости, является одним из основных понятий кинематики. Если тело можно считать точкой, то мы говорим об ускорении тела. Если же формой и размерами тела пренебречь нельзя, то ускорения различных точек тела могут отличаться.

Скорость при движении с постоянным ускорением

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t. \quad (1.12)$$

Векторному уравнению (1.12) соответствуют в случае движения на плоскости два скалярных уравнения для проекций скорости на координатные оси X и Y :

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + a_x t, \\ v_y &= v_{0y} + a_y t. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Как видим, при движении с постоянным ускорением скорость со временем меняется по линейному закону.

Движение с постоянным ускорением

$$\begin{aligned} x &= x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}, \\ y &= y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Эти формулы применимы для описания как прямолинейного, так и криволинейного движения точки. Важно лишь, чтобы ускорение было постоянным.

Обычно в условиях задачи даются значения (модули) скоростей и ускорений. Поэтому удобнее, например, при движении точки по оси OX использовать уравнение $x = x_0 \pm v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$, где v_0 и a - модули начальной скорости и ускорения.

Очевидно, что в этом уравнении знак «+» берется тогда, когда направления скорости v_0 и ускорения a совпадают с направлением оси OX , знак «-» - когда они направлены в противоположную сторону.

Свободное падение тел

Рассмотрим теперь одно часто встречающееся движение с постоянным ускорением, которое называется свободным падением тел. Это движение опытным путем изучал великий итальянский ученый Галилео Галилей.

Каждый из нас наблюдал, что при падении тела на Землю из состояния покоя оно увеличивает свою скорость, т. е. движется с ускорением. Это ускорение сообщает ему земной шар. Долгое время считали, что Земля сообщает разным телам различные ускорения. Простые наблюдения как будто подтверждают это. Например, птичье перо или лист бумаги падают гораздо медленнее, чем камень. Вот почему со времен Аристотеля (греческого ученого, жившего в IV в. до н. э.) считалось незыблемым мнение, что ускорение, сообщаемое Землей телу, тем больше, чем тяжелее тело.

Только Галилею в конце XVI в. удалось опытным путем доказать, что в действительности это не так. Нужно учитывать сопротивление воздуха. Именно оно искажает картину свободного падения тел, которую можно было бы наблюдать в земной атмосфере.

Наблюдая падение различных тел (пушечное ядро, мушкетная пуля и т. д.) со знаменитой наклонной Пизанской башни (рис. 1.32), Галилей доказал, что земной шар сообщает всем телам одно и то же ускорение. Все тела достигали поверхности Земли примерно за одно и то же время.

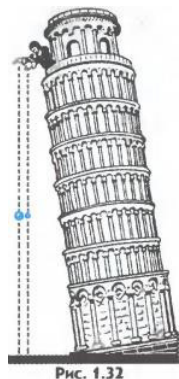


Рис. 1.32

Особенно прост и убедителен опыт, проведенный впервые Ньютоном (рис. 1.33). В стеклянную трубку помещают различные предметы: дробинки, кусочки пробки, пушинки и т. д. Если перевернуть трубку так, чтобы эти предметы могли падать, то быстрее всего упадет дробинка, за ней - кусочек пробки и, наконец, плавно опустится пушинка. Но если выкачать из трубки воздух, то мы увидим, что все три тела упадут одновременно. Значит, движение пушинки задерживалось ранее сопротивлением воздуха, которое в меньшей степени сказывалось на движении, например, пробки. Когда же на эти тела действует только притяжение к Земле, то все они падают с одним и тем же ускорением.

Конечно, на основании данного опыта еще нельзя утверждать, что ускорение всех тел под действием притяжения Земли строго одинаково. Но и более точные опыты, проведенные с помощью самой совершенной современной экспериментальной техники, дают те же результаты.

Если сопротивление воздуха отсутствует, то вблизи поверхности Земли ускорение падающего тела постоянно. Этот факт впервые был установлен Г. Галилеем. Движение тела только под влиянием

притяжения его к Земле называют **свободным падением**.

Соответственно этому, и ускорение, сообщаемое Землей всем телам, называют **ускорением свободного падения**. Оно



Рис. 1.33

всегда направлено вертикально вниз. Его принято обозначать $\vec{g}$.

Свободное падение - это не обязательно движение вниз. Если начальная скорость направлена вверх, то тело при свободном падении некоторое время будет лететь вверх, уменьшая свою скорость, и лишь затем начнет падать.

Ускорение свободного падения изменяется в зависимости от географической широты места на поверхности Земли и от высоты тела над Землей, точнее, от расстояния до центра Земли. На широте Москвы измерения дают следующее значение ускорения свободного падения: $g \approx 9,82 \text{ м/с}^2$.

Вообще же на поверхности Земли g меняется в пределах от $9,78 \text{ м/с}^2$ на экваторе до $9,83 \text{ м/с}^2$ на

полюсе.

Если подняться на 1 км над уровнем моря, то ускорение свободного падения уменьшится примерно на 0,00032 своего значения в данном месте Земли. На высоте 100 км над полюсом Земли оно примерно равно $9,53 \text{ м/с}^2$.

При падении тел в воздухе на их движение влияет сопротивление воздуха. Поэтому ускорение тел не равно $\vec{g}$. Но когда движутся сравнительно массивные тела с небольшими скоростями (камень, спортивное ядро и т. д.), сопротивление воздуха влияет на их движение незначительно. В этом случае движение тел можно рассматривать как свободное падение. Лишь при больших скоростях (снаряд, пуля ит. д.) сопротивление воздуха становится существенным. Для легких тел типа пушинки сопротивление воздуха существенно и при малых скоростях. Свободное падение - движение тела под действием силы притяжения к Земле.

Лекция №2

Тема: «Основы динамики»

1. Вопросы лекции:

1.1. Системы отсчета. Принцип относительности Галилея. Первый закон Ньютона.

1.2. Взаимодействие тел. Принцип суперпозиции сил. Второй и третий законы Ньютона.

1.3. Силы в природе: упругость, трение, сила тяжести. Гравитационная сила. Закон всемирного тяготения. Невесомость.

2. Краткое содержание вопросов

Основное утверждение механики

Законы механики, как и все основные законы физики, имеют точную количественную форму. Но вначале мы постараемся качественно сформулировать основное утверждение механики. Так будет проще уловить главное содержание механики Ньютона. После этого перейдем к количественной формулировке законов механики.

Выбор системы отсчета. Мы уже знаем, что любое движение следует рассматривать по отношению к определенной системе отсчета.

В кинематике, т. е. при описании движения без рассмотрения причин его изменения, все системы отсчета равноправны. Выбор определенной системы отсчета для решения той или иной задачи диктуется соображениями целесообразности и удобства. Так, при стыковке космических кораблей удобно рассматривать движение одного из них относительно другого, а не относительно Земли.

В главном разделе механики - динамике - рассматриваются *взаимодействия тел*, являющиеся причиной изменения движения этих тел, т. е. изменения их скоростей.

Вопрос о выборе системы отсчета в динамике не является простым. Выберем вначале систему отсчета, связанную с земным шаром. Движение тел вблизи поверхности Земли будем рассматривать относительно самой Земли.

Что вызывает ускорение тел? Если тело, лежащее на полу или на столе, начинает двигаться, то всегда по соседству можно обнаружить предмет, который толкает это тело, тянет или действует на него на расстоянии (например, магнит на железный шар). Поднятый над Землей камень не остается висеть в воздухе, а падает. Надо думать, что именно действие Земли приводит к этому.

Вся совокупность подобных фактов говорит о том, что *изменение скорости тела (а значит, ускорение) всегда вызывается воздействием на него каких-либо других тел*. Эта фраза содержит главное утверждение механики Ньютона и выражает принцип причинности в механике.

Может оказаться и так, что тело покоится или движется равномерно и прямолинейно, т. е. без ускорения ($\vec{a} = 0$), хотя на него и действуют другие тела.

На столе лежит книга, ее ускорение равно нулю, хотя действие со стороны других тел налицо. На книгу действуют притяжение Земли и стол, не дающий ей падать вниз. В этом случае говорят, что действия уравнивают (или компенсируют) друг друга. Но книга никогда не придет в движение, не получит ускорение, если на нее не подействовать рукой, сильной струей воздуха или еще каким-нибудь способом. Скорость тела *никогда* не меняется, если на него ничто не действует.

Движение с постоянной скоростью. Однако не следует думать, что основное утверждение механики совершенно очевидно и уяснить его ничего не стоит.

Если действий со стороны других тел на данное тело нет, то согласно основному утверждению механики ускорение тела равно нулю, т. е. тело будет покоиться или двигаться с постоянной скоростью.

Этот факт совсем не является само собой разумеющимся. Понадобился гений Галилея и Ньютона, чтобы его осознать. Ньютону вслед за Галилеем удалось окончательно развеять одно из глубочайших заблуждений человечества о законах движения тел.

Начиная с великого древнегреческого философа Аристотеля, на протяжении почти двадцати веков все были убеждены, что движение тела с постоянной скоростью нуждается для своего поддержания в действиях, производимых на тело извне, т. е. в некоторой активной причине. Считали, что без такой поддержки тело обязательно остановится.

Это, казалось, находит подтверждение в нашем повседневном опыте. Например, автомобиль с выключенным двигателем останавливается и на совершенно горизонтальной дороге. То же самое можно сказать о велосипеде, лодке и теплоходе на воде и любых других движущихся телах. Вот почему даже в наше время можно встретить людей, которые

смотрят на движение так же, как смотрел Аристотель.

В действительности же *свободное тело*, которое не взаимодействует с другими телами, движется всегда с постоянной скоростью или находится в покое. Только действие со стороны другого тела способно изменить его скорость. Действовать на тело, чтобы поддержать его скорость постоянной, нужно лишь потому, что в обычных условиях всегда существует сопротивление движению со стороны земли, воздуха или воды. Если бы не было этого сопротивления, то скорость автомобиля на горизонтальном шоссе и при выключенном двигателе оставалась бы постоянной.

Инерциальные и неинерциальные системы отсчета. До сих пор систему отсчета мы связывали с Землей, т. е. рассматривали движение относительно Земли. В системе отсчета, связанной с Землей, ускорение тела определяется только действием на него других тел. Подобные системы отсчета называют **инерциальными**.

Однако в других системах отсчета может оказаться, что тело имеет ускорение даже в том случае, когда на него другие тела не действуют.

В качестве примера рассмотрим систему отсчета, связанную с автобусом. При равномерном движении автобуса пассажир может не держаться за поручень, действие со стороны автобуса компенсируется взаимодействием с Землей. При резком торможении автобуса стоящие в проходе пассажиры падают вперед, получая ускорение относительно стенок автобуса (рис. 3.2). Однако это ускорение не вызвано какими-либо новыми воздействиями со стороны Земли или автобуса непосредственно на пассажиров. Относительно Земли пассажиры сохраняют свою постоянную скорость, но автобус начинает двигаться с ускорением, и пассажиры относительно него также движутся с ускорением. Однако это ускорение не связано со взаимодействием пассажиров с какими-либо телами, оно появляется вследствие того, что движение их рассматривается относительно тела отсчета (автобуса), движущегося с ускорением.



Таким образом, когда на пассажира не действуют другие тела, он не получает ускорение в системе отсчета, связанной с Землей, но относительно системы отсчета, связанной со стенками автобуса, движущегося замедленно, пассажир имеет ускорение, направленное вперед.

То же самое получится, если связать систему отсчета с вращающейся каруселью. Относительно карусели любой предмет, находящийся на Земле, будет описывать окружность, т. е. будет двигаться с ускорением, хотя никаких внешних действий, вызывающих это ускорение, обнаружить нельзя.

Если относительно какой-нибудь системы отсчета тело движется с ускорением, не вызванным действием на него других тел, то такую систему называют **неинерциальной**. Так, неинерциальными являются системы отсчета, связанные с автобусом, движущимся по отношению к Земле с ускорением, или с вращающейся каруселью.

В неинерциальных системах отсчета основное положение механики о том, что ускорение тела вызывается действием на него других тел, не выполняется.

Введено очень важное понятие - инерциальная система отсчета. В дальнейшем движение тел мы будем рассматривать только в инерциальных системах отсчета.

Первый закон Ньютона

Первый закон механики, или закон инерции, как его часто называют, был, по существу, установлен еще Галилеем. Но общую формулировку этого закона дал Ньютон и включил этот закон в число основных законов механики.

Движение свободного тела. Закон инерции относится к самому простому случаю движения - движению тела, которое не взаимодействует с другими телами. Такие тела мы будем называть *свободными телами*. Ответить на вопрос, как же движутся свободные тела, не обращаясь к опыту, нельзя. Однако нельзя поставить ни одного опыта, который бы в чистом виде показал, как движется ни с чем не взаимодействующее тело, так как таких тел нет. Как же быть?

Имеется лишь один выход. Надо поместить тело в условия, при которых влияние внешних взаимодействий можно делать все меньшим и меньшим, и наблюдать, к чему это ведет. Можно, например, наблюдать за движением гладкого камня на горизонтальной поверхности, после того как ему сообщена некоторая скорость. (Притяжение камня к Земле компенсируется действием поверхности, на которую он опирается; на скорость его движения влияет только трение.) При этом легко обнаружить, что чем более гладкой является поверхность, тем медленнее будет уменьшаться скорость камня. На гладком льду камень скользит весьма долго, не меняя заметно скорость. На основе подобных наблюдений можно сделать вывод: если бы поверхность была идеально гладкой, то при отсутствии сопротивления воздуха (в вакууме) камень совсем не менял бы своей скорости. Именно к такому выводу пришел впервые Галилей.

Нетрудно заметить, что, когда ускорение тела отлично от нуля, обнаруживается воздействие на него других тел.

Отсюда можно прийти к выводу, что тело, достаточно удаленное от других тел и по этой причине не взаимодействующее с ними, будет двигаться с постоянной скоростью.

Закон инерции и относительность движения. Движение относительно, и имеет смысл говорить лишь о движении тела по отношению к системе отсчета, связанной с другими телами. Поэтому сразу же возникает вопрос: движется ли с постоянной скоростью любое свободное тело по отношению к любому другому телу? Ответ будет, конечно,

отрицательным. Так, если по отношению к Земле свободное тело движется равномерно и прямолинейно, то по отношению к вращающейся карусели тело заведомо так двигаться не будет.

Формулировка первого закона Ньютона. Таким образом, наблюдения за движением тел и размышления о характере этого движения приводят нас к заключению о том, что свободные тела движутся с постоянной скоростью по отношению к определенным телам и связанным с ними системам отсчета, например по отношению к Земле. В этом состоит главное содержание закона инерции. Поэтому *первый закон динамики* может быть сформулирован так:

Существуют системы отсчета, называемые инерциальными, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно, если на него не действуют другие тела или действие этих тел скомпенсировано.

Этот закон, с одной стороны, содержит *определение* инерциальной системы отсчета. С другой стороны, он содержит *утверждение* (которое с той или иной степенью точности можно проверить на опыте) о том, что инерциальные системы отсчета существуют в действительности. Первый закон механики ставит в особое, привилегированное положение инерциальные системы отсчета.

Сила

Основное утверждение механики состоит в том, что ускорения тел определяются действиями их друг на друга.

Количественную меру действия тел друг на друга, в результате которого тела получают ускорения или испытывают деформацию, называют в механике **силой**. Это пока еще качественное, недостаточное для такой точной науки, как физика, определение. Введя его, мы расчленили главное утверждение механики на два:

1) ускорения тел вызываются силами;

2) силы обусловлены действиями на данное тело других тел.

Понятие силы относится к двум телам. С самого начала нужно отчетливо представить себе, что понятие силы относится именно к двум телам, а не к одному. Всегда можно указать тело, на которое действует сила, и тело, со стороны которого она действует. Так, сила тяжести действует на камень со стороны Земли, а на шарик, подвешенный на пружине, действует сила упругости со стороны пружины.

Сила имеет направление. Так, сила упругости растянутой пружины действует вдоль ее оси. Сила трения останавливает скользящую по льду шайбу и направлена против скорости ее движения.

Сила - векторная величина.

Сравнение сил. Для количественного определения силы мы должны уметь ее измерять. Только при этом условии можно говорить о силе как об определенной физической величине.

Но ведь действия на данное тело могут быть самыми разнообразными. Что общего, казалось бы, между силой притяжения Земли к Солнцу и силой, которая, преодолевая тяготение, заставляет двигаться ракету? Или между этими двумя силами и силой, сжимающей мяч в руке, определяемой сокращением мускулов? Ведь они совершенно различны по своей природе! Можно ли говорить о них как о чем-то физически родственном? Можно ли сравнивать их?

Когда человек не может поднять тяжелую вещь, он говорит: «Не хватает сил». При этом, в сущности, происходит сравнение двух совершенно разных по своей природе сил - мускульной силы и силы, с которой Земля притягивает этот предмет. Но если вы подняли тяжелый предмет и держите его на весу, то ничто не мешает вам утверждать, что сила, действующая на тело со стороны ваших рук, по модулю равна силе тяжести. Это утверждение, по существу, и является определением равенства сил в механике.

Две силы независимо от их природы считаются равными и противоположно направленными, если их одновременное действие на тело не меняет его скорости (т. е. не сообщает телу ускорение).

Это определение позволяет измерять силы, если одну из них принять за единицу измерения.

Связь между ускорением и силой.

Если на тело одновременно действуют несколько сил, то ускорение тела будет пропорционально геометрической сумме всех этих сил. Иначе говоря, если:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n, \quad (3.2)$$

то $\vec{a} \sim \vec{F}.$

Это положение иногда называют **принципом суперпозиции (наложения) сил**. Отметим, что действие каждой силы не зависит от наличия других сил.

Масса. Прямая пропорциональность между модулями ускорения и силы означает, что отношение модуля силы к модулю ускорения является постоянной величиной, не зависящей от силы:

$$\frac{F}{a} = \text{const.}$$

Величину F/a , равную отношению модуля силы к модулю ускорения, называют **массой** (точнее, **инертной массой**) тела.

Масса - основная динамическая характеристика тела, количественная мера его инертности, т. е. способности тела приобретать определенное ускорение под действием силы. Чем больше масса тела, тем больше его инертность, тем сложнее вывести тело из первоначального состояния, т. е. заставить его двигаться, или, наоборот, остановить его движение.

Второй закон Ньютона. Введя понятие массы, сформулируем окончательно *второй закон* Ньютона: *Ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на него, и обратно пропорционально его*

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

массе:

Эта формула выражает один из самых фундаментальных законов природы, которому с удивительной точностью подчиняется движение как громадных небесных тел, так и мельчайших песчинок. С помощью этого закона можно рассчитать движение поршня в цилиндре автомобиля и сложнейшие траектории космических кораблей.

Для решения задач мы обычно пользуемся другой формулировкой второго закона Ньютона.

Произведение массы тела на ускорение равно сумме действующих на тело сил:

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots \quad (3.3)$$

Уверенность в справедливости второго закона Ньютона вытекает не столько из отдельных опытов, на основании которых удастся подойти к формулировке этого закона, сколько из того, что все вытекающие из него следствия, проверяемые как специальными опытами, так и всей человеческой практикой, оказываются правильными.

Заметим, что если на тело не действуют силы или их сумма равна нулю ($\vec{F} = 0$), то относительно инерциальной системы отсчета $\vec{a} = 0$ и, следовательно, $v = \text{const}$. Однако это не означает, что первый закон Ньютона есть следствие второго. Первый закон Ньютона устанавливает существование инерциальных систем отсчета, а именно таких систем, в которых справедлив второй закон Ньютона.

Третий закон Ньютона

В третьем законе Ньютона формулируется одно общее свойство всех сил, рассматриваемых в механике: любое действие тел друг на друга носит характер *взаимодействия*. Это означает, что если тело *A* действует на тело *B*, то и тело *B* действует на тело *A*.

Взаимодействие тел. Примеров взаимодействия тел и сообщения ими друг другу ускорений можно привести сколько угодно много. Когда вы, находясь в одной лодке, начнете за веревку подтягивать другую лодку, то и ваша лодка обязательно будет двигаться вперед (рис. 3.11). Действуя на другую лодку, вы вызываете ее действие на лодку, в которой находитесь.

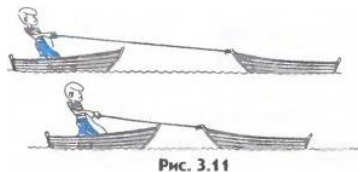


Рис. 3.11

Если вы ударите ногой по футбольному мячу или толкнете плечом товарища, то ощутите обратное действие на ногу или плечо. Все это - проявления закона взаимодействия тел.

Действия тел друг на друга носят характер взаимодействия не только при непосредственном контакте тел. Положите на гладкий стол два сильных магнита разноименными полюсами навстречу друг другу, и вы тут же обнаружите, что они начнут двигаться навстречу друг другу.

Изменения скоростей обоих взаимодействующих тел легко наблюдаются лишь в тех случаях, когда массы этих тел мало отличаются друг от друга. Если же взаимодействующие тела значительно различаются по массе, заметное ускорение получает только то из них, которое имеет меньшую массу. Так, при падении камня мы видим, что камень с ускорением движется, но ускорение Земли (а ведь камень тоже притягивает Землю!) практически обнаружить нельзя, так как оно очень мало.

Третий

закон

Ньютона.

Силы, с которыми тела действуют друг на друга, равны по модулям и направлены по одной прямой в противоположные стороны.

Если на тело *A* со стороны тела *B* действует сила $\vec{F}_A$, (рис. 3.13), то одновременно на тело *B* со стороны тела *A* будет действовать сила $\vec{F}_B$, причем

$$\vec{F}_A = -\vec{F}_B. \quad (3.9)$$

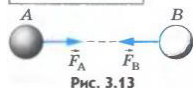


Рис. 3.13

Используя второй закон Ньютона, равенство (3.6) можно записать так:

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2. \quad (3.10)$$

Отсюда следует, что

$$\frac{a_1}{a_2} = -\frac{m_2}{m_1} = \text{const}, \quad (3.11)$$

$$\vec{a}_1 \quad \vec{a}_2$$

т. е. отношение модулей ускорений $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$ взаимодействующих друг с другом тел обратно пропорционально их массам.

Силы взаимодействия двух тел - силы одной физической природы, время их действия одинаково, но они приложены к разным телам, следовательно действие первого тела на второе не может быть скомпенсировано действием второго тела на первое.

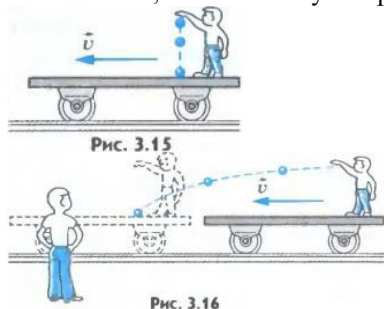
Принцип относительности. На основании наблюдений можно сформулировать один из самых фундаментальных законов природы - **принцип относительности:**

Все механические процессы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

Это утверждение известно как принцип относительности в механике. Его еще называют принципом относительности Галилея.

Не нужно думать, что выполнение принципа относительности означает полную тождественность движения одного и того же тела относительно различных инерциальных систем отсчета. Тождественны лишь законы динамики. Законы движения тел определяются не только законами динамики, но и начальными скоростями и начальными координатами тел. А начальные скорости и начальные координаты данного тела относительно разных систем отсчета различны.

Так, камень будет падать отвесно, если его начальная скорость равна нулю по отношению к Земле. В равномерно движущемся поезде камень также будет падать отвесно по отношению к стенам вагона, если начальная скорость камня по отношению к поезду равна нулю. Но, с точки зрения наблюдателя на Земле, камень, падающий отвесно в поезде, будет двигаться по параболе (рис. 3.15, 3.16). Дело в том, что начальная скорость камня по отношению к системе отсчета, связанной с Землей, отлична от нуля и равна скорости поезда.



Открытие принципа относительности - одно из величайших достижений человеческого разума. Оно оказалось возможным лишь после того, как люди поняли, что ни Земля, ни Солнце не являются центром Вселенной.

Силы в природе. Гравитационные силы

Выясним сначала, много ли видов сил существует в природе.

На первый взгляд кажется, что мы взяли за непосильную и неразрешимую задачу: тел на Земле и вне ее бесконечное множество. Они взаимодействуют по-разному. Так, например, камень падает на Землю; электровоз тянет поезд; нога футболиста ударяет по мячу; потертая о мех эбонитовая палочка притягивает легкие бумажки, магнит притягивает железные опилки; проводник с током поворачивает стрелку компаса; взаимодействуют Луна и Земля, а вместе они взаимодействуют с Солнцем; взаимодействуют звезды и звездные системы и т. д. Подобным примерам нет конца. Похоже, что в природе существует бесконечное множество взаимодействий (сил)? Оказывается, нет!

Четыре типа сил. В безграничных просторах Вселенной, на нашей планете, в любом веществе, в живых организмах, в атомах, в атомных ядрах и в мире элементарных частиц мы встречаемся с проявлением всего лишь четырех типов сил: гравитационных, электромагнитных, сильных (ядерных) и слабых.

Гравитационные силы, или силы всемирного тяготения, действуют между всеми телами - все тела притягиваются друг к другу. Но это притяжение существенно обычно лишь тогда, когда хотя бы одно из взаимодействующих тел так же велико, как Земля или Луна. Иначе эти силы столь малы, что ими можно пренебречь.

Электромагнитные силы действуют между частицами, имеющими электрические заряды. Сфера их действия особенно обширна и разнообразна. В атомах, молекулах, твердых, жидких и газообразных телах, живых организмах именно электромагнитные силы являются главными. Велика их роль в атомах.

Область действия ядерных сил очень ограничена. Они заметны только внутри атомных ядер (т. е. на расстояниях порядка 10^{-13} см). Уже на расстояниях между частицами порядка 10^{-11} см (в тысячу раз меньших размеров атома - 10^{-8} см) они не проявляются совсем.

Слабые взаимодействия проявляются на еще меньших расстояниях, порядка 10^{-15} см. Они вызывают взаимные превращения элементарных частиц, определяют радиоактивный распад ядер, реакции термоядерного синтеза.

Ядерные силы - самые мощные в природе. Если интенсивность ядерных сил принять за единицу, то интенсивность электромагнитных сил составит 10^{-2} , гравитационных - 10^{-40} , слабых взаимодействий - 10^{-16} .

Сильные (ядерные) и слабые взаимодействия проявляются на таких малых расстояниях, когда законы механики Ньютона, а с ними вместе и понятие механической силы теряют смысл.

В механике мы будем рассматривать только гравитационные и электромагнитные взаимодействия.

Силы в механике. В механике обычно имеют дело с тремя видами сил - силами тяготения, силами упругости и силами трения.

Силы упругости и трения имеют электромагнитную природу. Мы не будем здесь объяснять происхождение этих сил, с помощью опытов можно будет выяснить условия, при которых возникают эти силы, и выразить их количественно.

В природе существуют четыре типа взаимодействия. В механике изучаются гравитационные силы и две разновидности электромагнитных сил - силы упругости и силы трения.

Силы всемирного тяготения

Ранее подробно говорилось о том, что земной шар сообщает всем телам у поверхности Земли одно и то же ускорение - ускорение свободного падения. Но если земной шар сообщает телу ускорение, то согласно второму закону Ньютона он действует на тело с некоторой силой. Эту силу называют **силой тяжести**. Сначала найдем эту силу, а затем и рассмотрим силу всемирного тяготения.

Ускорение по модулю определяется из второго закона Ньютона:

$$a = \frac{F}{m}.$$

В общем случае оно зависит от силы, действующей на тело, и его массы. Так как ускорение свободного падения не зависит от массы, то ясно, что сила тяжести должна быть пропорциональна массе:

$$\vec{F} = m\vec{g}, \quad (4.1)$$

где $\vec{g}$ - постоянная для всех тел величина. Тогда, подставляя это выражение для силы тяжести во второй закон Ньютона, получаем для всех тел: $a = \frac{mg}{m} = g$, что находится в полном согласии с опытом.

Нужно только помнить, что сила тяжести, действующая на данное тело вблизи Земли, может считаться постоянной лишь на определенной широте у поверхности Земли. Если тело поднять или перенести в место с другой широтой, то ускорение свободного падения, а следовательно, и сила тяжести изменятся.

На основе формулы $\vec{F} = m\vec{g}$ можно указать простой и практически удобный метод измерения масс тел путем сравнения массы данного тела с эталоном единицы массы. Отношение масс двух тел равно отношению сил тяжести, действующих на тела:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{F_1}{F_2}. \quad (4.2)$$

Это значит, что массы тел одинаковы, если одинаковы действующие на них силы тяжести. На этом основано определение масс путем взвешивания на пружинных или рычажных весах. Добиваясь того, чтобы сила давления тела на чашку весов, равная силе тяжести, приложенной к телу, была уравновешена силой давления гирь на другую чашку весов, равной силе тяжести, приложенной к гилям, мы тем самым определяем массу тела.

Закон всемирного тяготения

Можно лишь догадываться о волнении, охватившем Ньютона, когда он пришел к великому результату: одна и та же причина вызывает явления поразительно широкого диапазона - от падения брошенного камня на Землю до движения огромных космических тел. Ньютон нашел эту причину и смог точно выразить ее в виде одной формулы - закона всемирного тяготения.

Так как сила всемирного тяготения сообщает всем телам одно и то же ускорение независимо от их массы, то она должна быть пропорциональна массе того тела, на которое действует:

$$F = \frac{cm}{R^2}. \quad (4.4)$$

Но поскольку, например, Земля действует на Луну с силой, пропорциональной массе Луны, то и Луна по третьему закону Ньютона должна действовать на Землю с той же силой. Причем эта сила должна быть пропорциональна массе Земли. Если сила тяготения является действительно универсальной, то со стороны данного тела на любое другое тело должна действовать сила, пропорциональная массе этого другого тела. Следовательно, сила всемирного тяготения должна быть пропорциональна произведению масс взаимодействующих тел. Отсюда вытекает формулировка **закона всемирного тяготения**:

Сила взаимного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}. \quad (4.5)$$

Коэффициент пропорциональности G называется **гравитационной постоянной**.

Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения между двумя материальными точками массой 1 кг каждая, если расстояние между ними равно 1 м. Ведь при $m_1 = m_2 = 1$ кг и $R = 1$ м получаем $G = F$ (численно).

Нужно иметь в виду, что закон всемирного тяготения (4.5) как всеобщий закон справедлив для материальных точек. При этом силы гравитационного взаимодействия направлены вдоль линии, соединяющей эти точки (рис. 4.2). Подобного рода силы называются центральными.

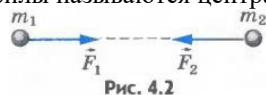


Рис. 4.2

Можно показать, что однородные тела, имеющие форму шара (даже если их нельзя считать материальными точками), также взаимодействуют с силой, определяемой формулой (4.5). В этом случае R - расстояние между центрами шаров. Силы взаимного притяжения лежат на прямой, проходящей через центры шаров. (Такие силы и называются центральными.) Тела, падение которых на Землю мы обычно рассматриваем, имеют размеры, много меньшие, чем земной радиус ($R \approx 6400$ км). Такие тела можно, независимо от их формы, рассматривать как материальные точки и определять силу их притяжения к Земле с помощью закона (4.5), имея в виду, что R есть расстояние от данного тела до центра Земли.

Из опытов было получено следующее значение для гравитационной постоянной:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2.$$

Сила тяжести и вес. Невесомость. Силы упругости

Из равенства ускорений, сообщаемых Землей всем телам, вытекает возможность появления состояния невесомости при свободном падении тел.

Представим себе взмывающий вверх самолет. Он и находящиеся в нем люди и предметы имеют одну и ту же скорость. Если бы в некоторый момент взаимодействие самолета с воздухом прекратилось, то он сам, люди и все предметы внутри него начали бы свободно падать, двигаясь с одним и тем же ускорением, направленным к центру Земли. Их движение происходило бы по одинаковым параболам.

Вот при этом и наступает состояние невесомости: падает пилот в кабине, с тем же ускорением падают стены, пол и потолок кабины. В результате человек будет свободно парить над полом, не оказывая давления на окружающие предметы.

Многочисленно проделывали опыты, в которых создавалось состояние невесомости. Например, самолет разгоняется и, начиная с некоторого момента, движется строго по параболе, той, которая была бы в отсутствие воздуха. В кабине при этом наблюдаются необыкновенные явления: маятник замирает в отклоненном положении, выплеснутая из стакана вода большой сферической каплей повисает в воздухе и рядом с ней застывают, будто подвешенные на невидимых нитях, все остальные предметы независимо от их массы и формы.

То же самое происходит и в кабине космического корабля при движении его по орбите. На большой высоте над Землей почти нет воздуха, так что не надо его сопротивление компенсировать работой двигателей. Да и полет длится не минуту, а многие сутки.

Наконец, вы без особого труда можете сами привести свое тело в состояние невесомости. Для этого достаточно подпрыгнуть. В течение небольшого промежутка времени, пока на ваше тело действует только сила тяжести, вы будете находиться в состоянии невесомости совершенно так же, как космонавты в космическом корабле.

Теперь посмотрим внимательно, чем сила тяжести отличается от веса, и почему вес тела при свободном падении исчезает, в то время как действующая на него сила тяжести остается.

Силой тяжести называют силу, с которой Земля притягивает тело, находящееся на ее поверхности или вблизи этой поверхности. Под весом же в физике обычно понимают нечто совсем иное. **Весом тела** называют силу, с которой это тело действует на горизонтальную опору или растягивает подвес. Вес не является силой какой-то специфической природы. Это название присвоено частному случаю проявления силы упругости.

На полюсе вес тела равен силе тяготения. Очевидно, что на полюсе вес тела больше, чем на экваторе. Остановимся на более простом случае. Пусть тело находится на чашке пружинных весов в лифте, движущемся с

ускорением $\vec{a}$. Согласно второму закону Ньютона $m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_2$, где m - масса тела.

Координатную ось OY системы отсчета, связанной с Землей, направим вертикально вниз. Запишем уравнение движения тела в проекции на эту ось:

$ma_y = F_y + F_{2y}$. Если ускорение направлено вниз, то, выражая проекции векторов через их модули, получаем $ma = F - F_2$. Так как $F_2 = F_1$, то $ma = F - F_1$. Отсюда ясно, что лишь при $a = 0$ вес равен силе, с которой тело притягивается к Земле ($F_1 = F$). Если $a \neq 0$, то $F_1 = F - ma = m(g - a)$. Вес тела зависит от ускорения, с которым движется опора, и появление этого ускорения эквивалентно изменению ускорения свободного падения. Если, например, лифт падает свободно, т. е. $a = g$, то $F_1 = m(g - g) = 0$.

Наступление у тел состояния невесомости означает, что тела не давят на опору и, следовательно, на них не действует сила реакции опоры, они движутся только под действием силы притяжения к Земле.

Деформация и силы упругости

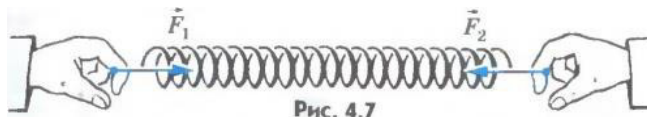
Силы тяготения действуют между телами всегда. Не нужно заботиться о том, чтобы привести эти силы в действие, и нет возможности их уничтожить, их можно только скомпенсировать. А вот силы упругости возникают при деформации тел и исчезают, когда она прекращается.

Под **деформацией** понимают изменение объема или формы тела.

Для того чтобы различные тела или части одного и того же тела взаимодействовали посредством сил упругости, необходимо определенное условие: тела должны быть деформированы.

Силы упругости возникают только при деформации тел. Значения сил упругости обычно определяются значениями этих деформаций.

Для того чтобы резиновый шнур или пружина действовали с некоторой силой на ваши руки, эти тела нужно предварительно растянуть, т. е. деформировать (рис. 4.7).



При исчезновении деформации одновременно исчезают и силы упругости. При попытке изменить объем или форму твердых тел возникают силы упругости, препятствующие деформации. Жидкости форму не сохраняют. Вы можете перелить воду из графина в стакан, и это не вызовет появления сил упругости.

Попробуйте сжать жидкость хотя бы внутри велосипедного насоса или просто в бутылке. Сила упругости не замедлит сказаться. Точно так же сила упругости появляется при сжатии в насосе воздуха.

Итак, силы упругости возникают всегда при попытке изменить объем или форму твердого тела, при изменении объема жидкости, а также при сжатии газа.

Деформация тела возникает лишь в том случае, когда различные части тела совершают различные перемещения. Например, когда вы растягиваете резиновый шнур, различные части шнура перемещаются на различные расстояния. Больше всего смещаются края, а середина вообще остается на месте.

В отличие от сил тяготения, действующих между телами всегда, для возникновения сил упругости необходимо определенное условие: тела должны быть деформированы.

Закон Гука. Силы трения

При малых деформациях связь силы упругости тела с его деформацией проста. Она была открыта экспериментально английским физиком Робертом Гуком, современником Ньютона.

Упругой называется деформация, при которой тело восстанавливает свои первоначальные размеры и форму, как только прекращается действие силы, вызвавшей эту деформацию.

Закон Гука: При упругой деформации растяжения (или сжатия) удлинение тела прямо пропорционально силе.

Закон Гука записывают следующим образом:

$$F = k |\Delta l| = k |x|. \quad (4.10)$$

Коэффициент пропорциональности k называют **коэффициентом упругости** или **жесткостью**. Учитывая, что координата x и проекция силы упругости деформированного тела F_x на ось X имеют противоположные знаки, можно также записать:

$$F_x = -kx. \quad (4.11)$$

Эта закономерность хорошо выполняется только при упругих деформациях, при которых удлинение x тела мало. Она наблюдается при растяжении стержней из стали, чугуна, алюминия и других твердых упругих тел. Закону Гука подчиняется также деформация упругой пружины.

Закон Гука хорошо выполняется только при упругих деформациях, при которых x мало. При дальнейшем увеличении деформации изменение длины тела перестает быть прямо пропорциональным приложенной силе, а при очень больших деформациях тело разрушается.

Роль сил трения

Еще один вид сил, с которыми имеют дело в механике, - это силы трения. Эти силы действуют вдоль поверхности тел при их непосредственном соприкосновении.

Силы трения во всех случаях препятствуют относительному движению соприкасающихся тел. При некоторых условиях силы трения делают это движение невозможным. Однако силы трения не только тормозят движение тел. В ряде практически важных случаев движение тела не могло бы возникнуть без действия сил трения.

Силы трения зависят от состояния трущихся твердых поверхностей, а при движении твердого тела в воде или воздухе - от относительной скорости движения, от размеров и формы этого тела.

Трение - явление, сопровождающее нас везде и повсюду. В одних случаях оно полезно, и мы всячески стараемся его увеличить. В других - вредно, и мы ведем с ним борьбу.

Силы трения между соприкасающимися поверхностями твердых тел

Сначала мы остановимся на так называемом сухом трении, т. е. трении между поверхностями соприкасающихся тел.

Трение покоя. Попробуйте сдвинуть пальцем лежащую на столе толстую книгу. Книга будет оставаться на месте до тех пор, пока действующая на нее сила не достигнет определенного значения. Факт этот совершенно привычный, но, если вдуматься, достаточно странный и непонятный.

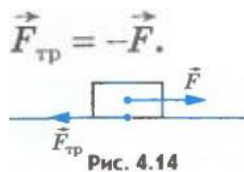
Ведь что это значит? Вы приложили к книге некоторую силу, направленную, скажем, вдоль поверхности стола, а книга остается в покое. Следовательно, между книгой и поверхностью стола возникает сила, направленная против той силы, с которой вы действуете на книгу, и в точности равная ей по модулю. Вы с большей силой толкаете книгу, но она по-

прежнему остается на месте. Значит, и сила $\vec{F}$ трения настолько же возрастает.

Силу трения, действующую между двумя телами, неподвижными относительно друг друга, называют **силой трения покоя**.

Если на тело действует сила $\vec{F}$, параллельная поверхности, на которой оно находится и тело при этом остается

неподвижным, то это означает, что на него действует сила трения покоя $F_{тр}$, равная по модулю и направленная в противоположную сторону силе $\vec{F}$ (рис.4.14). Следовательно, сила трения покоя определяется действующей на него силой



Иначе говоря, когда ускорение тела равно нулю, сила трения равна по модулю и противоположна по направлению той силе, которая наряду с трением действует на тело параллельно поверхности его соприкосновения с другим телом. Если параллельно этой поверхности другие силы не действуют, то трение покоя будет равно нулю.

Наибольшее значение силы трения, при котором скольжение еще не наступает, называется **максимальной силой трения покоя**. Если действующая на покоящееся тело сила хотя бы немного превысит максимальную силу трения покоя, то тело начнет скользить.

При ходьбе и беге на подошвы ног действует сила трения покоя, если только ноги не скользят. Такая же сила действует на ведущие колеса автомобиля. На ведомые колеса также действует сила трения покоя, но уже тормозящая движение, причем эта сила значительно меньше силы, действующей на ведущие колеса (иначе автомобиль не смог бы тронуться с места).

В давнее время, когда не очень хорошо представляли себе способность силы трения покоя принимать различные значения, сомневались, что паровоз сможет ехать по гладким рельсам. Думали, что трение, тормозящее ведомые колеса, будет равно силе трения, действующей на ведущие колеса. Предлагали даже делать ведущие колеса зубчатыми и прокладывать для них специальные зубчатые рельсы.

Трение скольжения. При скольжении сила трения зависит не только от состояния трущихся поверхностей, но и от относительной скорости движения тел, причем эта зависимость от скорости является довольно сложной. Опыт показывает, что часто (хотя и не всегда) в самом начале скольжения, когда относительная скорость еще мала, сила трения становится несколько меньше максимальной силы трения покоя. Лишь затем, по мере увеличения скорости, она растет и начинает превосходить $F_{тр.макс}$.

Вы, вероятно, замечали, что тяжелый предмет, например ящик, трудно сдвинуть с места, а потом двигать его становится легче. Это как раз и объясняется уменьшением силы трения при появлении скольжения с малой скоростью.

При не слишком больших относительных скоростях движения сила трения скольжения мало отличается от максимальной силы трения покоя. Поэтому приближенно можно считать ее постоянной и равной максимальной силе трения покоя:

$$F_{тр} \approx F_{тр.макс} = \mu N.$$

Важная особенность силы трения скольжения состоит в том, что она всегда направлена противоположно относительной скорости соприкасающихся тел.

Силу трения скольжения можно уменьшить во много раз с помощью смазки - чаще всего тонкого слоя жидкости (обычно того или иного сорта минерального масла) - между трущимися поверхностями. Трение между слоями жидкости, прилегающими к твердым поверхностям, значительно меньше, чем между сухими поверхностями. Ни одна современная машина, например двигатель автомобиля или трактора, не может работать без смазки. Специальная система смазки предусматривается при конструировании всех машин.

Сила трения зависит от относительной скорости движения тел. В этом ее главное отличие от сил тяготения и упругости, зависящих только от расстояний.

Лекция №3

Тема: «Законы сохранения в механике»

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Импульс. Закон сохранения импульса и реактивное движение.
- 1.2. Потенциальная и кинетическая энергии. Закон сохранения механической энергии.
- 1.3. Работа и мощность.

2. Краткое содержание вопросов

Импульс материальной точки. Другая формулировка второго закона Ньютона

Введем новую физическую величину - импульс материальной точки. Дадим другую формулировку второго закона Ньютона.

Второй закон Ньютона $m\vec{a} = \vec{F}$ можно записать в иной форме, которая приведена самим Ньютоном в его главном труде «Математические начала натуральной философии».

$$m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \vec{F}\Delta t. \quad (5.1)$$

В этом уравнении появляется новая физическая величина - импульс тела. **Импульсом тела** (материальной точки) называется величина, равная произведению массы тела на его скорость.

Обозначив импульс (его также называют иногда количеством движения) буквой $\vec{p}$, получим

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (5.2)$$

Из формулы (5.2) видно, что импульс - векторная величина. Так как $m > 0$, то импульс имеет такое же направление, как и скорость (рис.5.1).

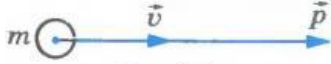


Рис. 5.1

Обозначим через $\vec{p}_1 = m\vec{v}_1$ импульс тела в начальный момент времени, а через $\vec{p}_2 = m\vec{v}_2$ - его импульс в конечный момент времени. Тогда $\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \Delta\vec{p}$ есть изменение импульса тела за время Δt . Теперь уравнение (5.1) можно записать так:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t. \quad (5.3)$$

Так как $\Delta t > 0$, то направления векторов $\Delta\vec{p}$ и $\vec{F}$ совпадают. Согласно формуле (5.3) **изменение импульса тела (материальной точки) пропорционально приложенной к нему силе и имеет такое же направление, как и сила.**

Произведение силы на время ее действия называют **импульсом силы**. Поэтому можно сказать, что **изменение импульса тела равно импульсу действующей на него силы**. Уравнение (5.3) показывает, что одинаковые изменения импульса могут быть получены в результате действия большой силы в течение малого интервала времени или малой силы за большой промежуток времени.

Единица импульса не имеет особого названия, а ее наименование получается из определения этой величины (см. формулу (5.2)):

$$1 \text{ ед. импульса} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}.$$

Для нахождения импульса тела, которое нельзя считать материальной точкой, поступают так: мысленно разбивают тело на отдельные малые элементы (материальные точки), находят импульсы полученных элементов, а потом суммируют их как векторы. Импульс тела равен сумме импульсов его отдельных элементов.

Закон сохранения импульса

Закон сохранения импульса является следствием второго и третьего законов Ньютона.

Для простоты будем считать, что система состоит всего из двух тел. Это могут быть две звезды, два бильярдных шара или два других тела.

Силы, возникающие в результате взаимодействия тела, принадлежащего системе, с телом, не принадлежащим ей, называются **внешними силами**.

Импульс системы тел могут изменить только внешние силы, причем изменение импульса системы $\Delta\vec{p}_{\text{сист}}$ совпадает по направлению с суммарной внешней силой. Внутренние силы изменяют импульсы отдельных тел системы, но изменить суммарный импульс системы они не могут.

Если внешние силы на систему не действуют или их сумма равна нулю, то $\Delta\vec{p} = 0$ и импульс системы остается неизменным, или, как говорят, сохраняется:

$$\vec{p}_{\text{сист}} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = \text{const}. \quad (5.8)$$

Закон сохранения импульса формулируется так: **если сумма внешних сил равна нулю, то импульс системы тел сохраняется.** Иначе говоря, в этом случае тела могут только обмениваться импульсами, суммарное же значение импульса не изменяется.

Импульс, очевидно, сохраняется в изолированной системе тел, так как в этой системе на тела вообще не действуют внешние силы. Но область применения закона сохранения импульса шире: если даже на тела системы действуют внешние силы, но их сумма равна нулю (т. е. система является *замкнутой*), то импульс системы все равно сохраняется.

Полученный результат справедлив для системы, содержащей произвольное число тел:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + m_3\vec{v}_3 + \dots = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2 + m_3\vec{u}_3 + \dots, \quad (5.9)$$

где $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \dots$ - скорости тел в начальный момент времени; $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3, \dots$ - скорости тел конечный момент.

Так как импульс - векторная величина, то уравнение (5.9) представляет собой компактную запись трех уравнений для

проекций импульсов системы на оси координат.

Если сумма внешних сил не равна нулю, но сумма проекций сил на какое-то направление равна нулю, то проекция суммарного импульса системы на это направление не меняется. Например, систему тел на Земле или вблизи поверхности Земли нельзя считать изолированной, так как на тела действует внешняя сила - сила тяжести. Однако вдоль горизонтального направления сила тяжести не действует и сумма проекций импульсов тел на это направление будет оставаться неизменной, если действием сил трения можно пренебречь.

В изолированной системе тел импульс системы сохраняется. Также он может сохраняться в случае, если сумма внешних сил, действующих на систему, равна нулю.

Работа силы

Все наши ежедневные действия сводятся к тому, что мы с помощью мышц либо приводим в движение окружающие тела и поддерживаем это движение, либо же останавливаем движущиеся тела.

Этими телами являются орудия труда (молоток, ручка, пила), в играх - мячи, шайбы, шахматные фигуры. На производстве и в сельском хозяйстве люди также приводят в движение орудия труда. Правда, в настоящее время роль рабочего все больше и больше сводится к управлению механизмами. Но в любой машине можно обнаружить подобие простых орудий ручного труда. В швейной машинке имеется игла, резец токарного станка подобен рубанку, ковш экскаватора заменяет лопату.

Определение работы. Второй закон Ньютона в форме $\Delta \vec{p} = \vec{F} \Delta t$ позволяет определить, как меняется скорость тела $\vec{v}$ по модулю и направлению, если на него в течение времени Δt действует сила $\vec{F}$.

Во многих случаях важно уметь вычислять изменение скорости по модулю, если при перемещении тела на $\Delta \vec{r}$ на него действует сила $\vec{F}$. Воздействия на тела сил, приводящих к изменению модуля их скорости, характеризуются величиной, зависящей как от сил, так и от перемещений тел. Эту величину в механике и называют **работой силы**.

В общем случае при движении твердого тела перемещения его разных точек различны, но при определении работы силы мы под $\Delta \vec{r}$ понимаем перемещение ее точки приложения. При поступательном движении твердого тела перемещение всех его точек совпадает с перемещением точки приложения силы.

Сила, перпендикулярная скорости (а следовательно, и перемещению $\Delta \vec{r}$), изменяет скорость только по направлению, но не по модулю. (При равномерном движении по окружности ускорение тела, а следовательно, и действующая на него сила перпендикулярны скорости.)

Изменение скорости по модулю возможно лишь в том случае, когда проекция силы на направление перемещения тела F_r отлична от нуля. Именно эта проекция определяет действие силы, изменяющей скорость тела по модулю. Она совершает работу. Поэтому работу можно рассматривать как произведение проекции F_r на модуль перемещения $|\Delta \vec{r}|$ (рис. 6.1):

$$A = F_r |\Delta \vec{r}|. \quad (6.1)$$

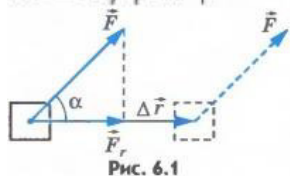


Рис. 6.1

Если угол между силой и перемещением обозначить через α , то $F_r = F \cos \alpha$. Следовательно, работа равна:

$$A = F |\Delta \vec{r}| \cos \alpha. \quad (6.2)$$

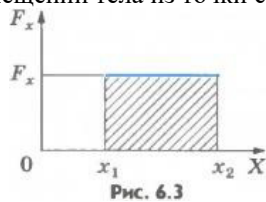
Работа силы равна произведению модулей силы и перемещения точки приложения силы и косинуса угла между ними.

Формула (6.1) справедлива в том случае, когда сила постоянна и перемещение тела происходит вдоль прямой. В случае криволинейной траектории и переменной силы мы разделяем траекторию на малые отрезки, которые можно считать прямолинейными, а силу на них постоянной.

Работа, в отличие от силы и перемещения, является не векторной, а скалярной величиной. Она может быть положительной, отрицательной или равной нулю.

Знак работы определяется знаком косинуса угла между силой и перемещением. Если $\alpha < 90^\circ$, то $A > 0$, так как косинус острых углов положителен. При $\alpha > 90^\circ$ работа отрицательна, так как косинус тупых углов отрицателен. При $\alpha = 90^\circ$ (сила перпендикулярна перемещению) работа не совершается. Так, сила тяжести не совершает работу при перемещении тела по горизонтальной плоскости. При движении спутника по круговой орбите сила тяготения также не совершает работу.

Очевидно, что площадь прямоугольника, заштрихованного на рисунке 6.3, численно равна работе при перемещении тела из точки с координатой x_1 в точку с координатой x_2 .



Единица работы. Единицу работы можно установить с помощью основной формулы (6.2). Если при перемещении тела на единицу длины на него действует сила, модуль которой равен единице, и направление силы совпадает с направлением перемещения ($\alpha = 0$), то и работа будет равна единице. В Международной системе единиц (СИ) работа измеряется в джоулях (обозначается Дж):

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Итак, джоуль - это работа, совершаемая силой 1 Н на перемещении 1 м, если направления силы и перемещения совпадают.

Приведено определение работы силы $\vec{F}$ при перемещении тела на $\Delta \vec{r}$, составляющем угол α с направлением силы:

$$A = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = F \Delta r \cos \alpha.$$

Мощность

Очень часто важно знать не только работу, но и время, в течение которого она произведена. Поэтому надо ввести еще одну величину - мощность.

Работа может быть совершена как за большой промежуток времени, так и за очень малый. На практике, однако, далеко не безразлично, быстро или медленно может быть произведена работа. Временем, в течение которого совершается работа, определяют производительность любого двигателя. Очень большую работу может совершить и крошечный электромоторчик, но для этого понадобится много времени. Потому наряду с работой вводят величину, характеризующую быстроту, с которой она производится, - мощность.

Мощностью называют отношение работы A к интервалу времени Δt , за который эта работа совершена:

$$N = \frac{A}{\Delta t}. \quad (6.4)$$

Иными словами, мощность численно равна работе, совершенной в единицу времени. Подставляя в формулу (6.4) вместо работы A ее выражение (6.2), получим

$$N = F \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} \cos \alpha = Fv \cos \alpha. \quad (6.5)$$

Таким образом, мощность равна произведению модуля вектора силы на модуль вектора скорости и на косинус угла между направлениями этих векторов.

Понятие мощности вводится для оценки работы за единицу времени, совершаемой каким-либо механизмом (насосом, подъемным краном, мотором машины и т. д.). Поэтому в формулах (6.4) и (6.5) под $\vec{F}$ всегда подразумевается сила тяги.

В СИ мощность выражается в ваттах (Вт). Мощность равна 1 Вт, если работа 1 Дж совершается за 1 с.

Наряду с ваттом используются более крупные (кратные) единицы мощности:

1	гВт	(гектоватт)	=	100	Вт,
1	кВт	(киловатт)	=	1000	Вт,
1	МВт	(мегаватт)	=	1000 000	Вт.

Мощность можно повысить как за счет увеличения действующих сил, так и за счет увеличения скорости движения.

Энергия

Если система тел может совершить работу, то мы говорим, что она обладает энергией.

Для совершения работы необходимо, чтобы на движущееся тело действовала та или иная сила. Тепловые двигатели обеспечивают действие силы до тех пор, пока не кончится топливо, а электродвигатель - до тех пор, пока к нему подводится ток. Однако эти двигатели представляют собой сложные системы и в механике не изучаются.

Рассмотрим простые системы движущихся тел, взаимодействующих между собой посредством сил тяготения и способных в той или иной мере деформироваться. (Пружина или резиновый шнур деформируются значительно, а камень, дерево, металл - столь мало, что их деформациями обычно можно пренебречь.) Будем считать, что никаких химических превращений тел не происходит и что в системе нет заряженных тел и электрических токов. Тогда легко обнаружить, что поднятые над землей грузы, а также устройства, имеющие сжатые пружины, способны действовать на движущееся тело и совершать работу лишь в течение определенного промежутка времени. Рано или поздно пружина распрямится, а груз опустится на землю и силы перестанут совершать работу.

Совершение работы не проходит для системы тел бесследно. Рассмотрим, например, часы с пружинным заводом. При заводе часов состояние системы (часового механизма) меняется так, что она приобретает способность совершать работу в течение длительного времени. Пружина поддерживает движение всех колес, стрелок и маятника, испытывающих

сопротивление движению, вызванное трением. По мере хода часов способность пружины совершать работу постепенно утрачивается. Состояние пружины меняется.

Подобным образом при совершении работы меняется состояние сжатого газа и скоростей движущихся тел. **Энергия характеризует способность тела (или системы тел) совершать работу.**

Совершая механическую работу, тело или система тел переходят из одного состояния в другое, в котором их энергия минимальна. Груз опускается, пружина распрямляется, движущееся тело останавливается. При совершении работы энергия постепенно расходуется. Для того чтобы система опять приобрела способность совершать работу, надо изменить ее состояние: увеличить скорости тел, поднять тела вверх или деформировать. Для этого внешние силы должны совершить над системой положительную работу.

Энергия в механике - величина, определяемая состоянием системы - положением тел и их скоростями; изменение энергии при переходе системы из одного состояния в другое равно работе внешних сил.

Кинетическая энергия и ее изменение

В механике состояние системы определяется положением тел и их скоростями. Сначала выясним, как энергия тел зависит от их скоростей.

Подсчитаем работу постоянной силы $\vec{F}$, действующей на тело (материальную точку) массой m при его прямолинейном движении.

$$A = ma \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (6.9)$$

Можно показать, что формула (6.9), выведенная для случая прямолинейного движения тела, на которое действует постоянная сила, справедлива и в тех случаях, когда на тело действует переменная сила и оно движется по траектории.

Таким образом, работа силы при перемещении тела из начального положения в конечное равна изменению

величины $\frac{mv^2}{2}$.

Величина $\frac{mv^2}{2}$ представляет собой энергию, которую имеет тело, движущееся со скоростью $\vec{v}$. Эту энергию называют **кинетической** (от греческого слова «кинема» - движение).

Как видим, **кинетическая энергия** тела равна половине произведения массы тела на квадрат его скорости.

Будем обозначать кинетическую энергию буквой E_k :

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (6.10)$$

Энергия измеряется, в тех же единицах, что и работа. Учитывая равенство (6.10), можно уравнение (6.9) записать так:

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k. \quad (6.11)$$

Равенство (6.11) выражает теорему об изменении кинетической энергии: **изменение кинетической энергии тела (материальной точки) за некоторый промежуток времени равно работе, совершенной за то же время силой, действующей на тело.** Если на тело действует несколько сил, то изменение его кинетической энергии равно сумме работ всех сил, действующих на тело.

Кинетическая энергия тел зависит только от их масс и скоростей. Как мы увидим дальше, полная механическая энергия системы зависит от скоростей тел и расстояний между ними. Для того чтобы вычислить ту часть энергии, которая зависит от расстояний между телами, нужно предварительно рассмотреть вопрос о работе силы тяжести и силы упругости.

Движущееся тело обладает кинетической энергией. Эта энергия равна работе, которую надо совершить, чтобы увеличить скорость тела от нуля до значения v .

Работа силы тяжести

Вычислим работу, используя в этот раз не второй закон Ньютона, а явное выражение для сил взаимодействия между телами в зависимости от расстояний между ними. Это позволит нам ввести понятие потенциальной энергии - энергии, зависящей не от скоростей тел, а от расстояний между телами (или от расстояний между частями одного и того же тела).

Вычислим сначала работу **силы тяжести** при падении тела (например, камня) вертикально вниз:

$$A = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2. \quad (6.14)$$

Формула (6.14) дает возможность подметить важную закономерность. При прямолинейном движении тела работа силы тяжести в каждом случае равна разности двух значений величины, зависящей от положений тела в начальный и конечный моменты времени. Эти положения определяются высотами h_1 и h_2 тела над поверхностью Земли.

При движении тела по замкнутой траектории работа силы тяжести равна нулю.

Силы, обладающие такими свойствами, называют **консервативными**.

Итак, работа силы тяжести не зависит от формы траектории тела; она определяется лишь начальным и конечным положениями тела. При перемещении тела по замкнутой траектории работа силы тяжести равна нулю.

Потенциальная энергия

Используя второй закон Ньютона, мы доказали что в случае движущегося тела работа сил любой природы может быть представлена в виде разности двух значений некоторой величины, зависящей от скорости тела, - разности между значениями кинетической энергии тела в конечный и начальный моменты времени:

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = \Delta E_k. \quad (6.19)$$

Если же силы взаимодействия между телами являются консервативными, то, используя явные выражения для сил, мы показали (см. § 47 и 48), что работу таких сил можно также представить в виде разности двух значений некоторой величины, зависящей от взаимного расположения тел (или частей одного тела):

$$A = mgh_1 - mgh_2 \text{ (для силы тяжести),} \\ A = \frac{k\Delta l_1^2}{2} - \frac{k\Delta l_2^2}{2} \text{ (для силы упругости).} \quad (6.20)$$

Здесь высоты h_1 и h_2 определяют взаимное расположение тела и Земли, а удлинения Δl_1 и Δl_2 - взаимное расположение витков деформированной пружины (или значения деформаций другого упругого тела).

Величину, равную произведению массы тела m на ускорение свободного падения g и на высоту h тела над поверхностью Земли, называют **потенциальной энергией взаимодействия тела и Земли** (от латинского слова «потенция» - положение, возможность).

Условимся обозначать потенциальную энергию буквой E_n :

$$E_n = mgh. \quad (6.21)$$

Величину, равную половине произведения коэффициента упругости k тела на квадрат деформации Δl , называют **потенциальной энергией упруго деформированного тела**:

$$E_n = \frac{k(\Delta l)^2}{2}. \quad (6.22)$$

В обоих случаях потенциальная энергия определяется расположением тел системы или частей одного тела относительно друг друга.

Введя понятие потенциальной энергии, мы получаем возможность выразить работу любых консервативных сил через изменение потенциальной энергии.

$$\text{откуда } \Delta E_n = -A.$$

Изменение потенциальной энергии тела равно работе консервативной силы, взятой с обратным знаком.

Эта формула позволяет дать общее определение потенциальной энергии.

Потенциальной энергией системы называется зависящая от положения тел величина, изменение которой при переходе системы из начального состояния в конечное равно работе внутренних консервативных сил системы, взятой с противоположным знаком.

Знак «-» в формуле (6.23) не означает, что работа консервативных сил всегда отрицательна. Он означает лишь, что изменение потенциальной энергии и работа сил в системе всегда имеют противоположные знаки.

Например, при падении камня на Землю его потенциальная энергия убывает ($\Delta E_n < 0$), но сила тяжести совершает положительную работу ($A > 0$). Следовательно, A и ΔE_n имеют противоположные знаки в соответствии с формулой (6.23).

Нулевой уровень потенциальной энергии. Согласно уравнению (6.23) работа консервативных сил взаимодействия определяет не саму потенциальную энергию, а ее изменение.

Поскольку работа определяет лишь изменение потенциальной энергии, то только изменение энергии в механике имеет физический смысл. Поэтому можно произвольно *выбрать* состояние системы, в котором ее потенциальная энергия *считается* равной нулю. Этому состоянию соответствует нулевой уровень потенциальной энергии. Ни одно явление в природе или технике не определяется значением самой потенциальной энергии. Важна лишь разность значений потенциальной энергии в конечном и начальном состояниях системы тел.

Выбор нулевого уровня производится по-разному и диктуется исключительно соображениями удобства, т. е. простотой записи уравнения, выражающего закон сохранения энергии.

Обычно в качестве состояния с нулевой потенциальной энергией выбирают состояние системы с минимальной энергией. Тогда потенциальная энергия всегда положительна или равна нулю.

Итак, потенциальная энергия системы «тело - Земля» - величина, зависящая от положения тела относительно Земли, равная работе консервативной силы при перемещении тела из точки, где оно находится, в точку, соответствующую нулевому уровню потенциальной энергии системы.

Закон сохранения энергии в механике

В изолированной системе тел положительная работа внутренних сил увеличивает кинетическую энергию и уменьшает потенциальную. Отрицательная работа, напротив, увеличивает потенциальную энергию и уменьшает кинетическую. Именно благодаря этому выполняется закон сохранения энергии.

Снова обратимся к простой системе тел, состоящей из земного шара и поднятого над Землей тела, например камня.

Камень падает под действием силы тяжести. Силу сопротивления воздуха учитывать не будем. Работа, совершаемая силой тяжести при перемещении камня из одной точки в другую, равна изменению (увеличению) кинетической энергии камня:

$$A = \Delta E_k. \quad (6.24)$$

В то же время эта работа равна уменьшению потенциальной энергии:

$$A = -\Delta E_p. \quad (6.25)$$

Работа силы всемирного тяготения, действующей со стороны камня на Землю, практически равна нулю. Из-за большой массы Земли ее перемещением и изменением скорости можно пренебречь. Так как в формулах (6.24) и (6.25) левые части одинаковы, то равны и правые части:

$$\Delta E_k = -\Delta E_p. \quad (6.26)$$

Равенство (6.26) означает, что увеличение кинетической энергии системы равно убыли ее потенциальной энергии (или наоборот). Отсюда вытекает, что

$$\Delta E_k + \Delta E_p = 0,$$

или

$$\Delta (E_k + E_p) = 0. \quad (6.27)$$

Изменение суммы кинетической и потенциальной энергий системы равно нулю.

Величину E , равную сумме кинетической и потенциальной энергий системы, называют **механической энергией системы**:

$$E = E_k + E_p. \quad (6.28)$$

Так как изменение полной энергии системы в рассматриваемом случае согласно уравнению (6.27) равно нулю, то энергия остается постоянной:

$$E = E_k + E_p = \text{const.} \quad (6.29)$$

Таким образом, **в изолированной системе, в которой действуют консервативные силы, механическая энергия сохраняется**. В этом состоит **закон сохранения механической энергии**. Энергия не создается и не уничтожается, а только превращается из одной формы в другую: из кинетической в потенциальную и наоборот.

Учитывая, что в рассматриваемом конкретном случае $E_p = mgh$ и $E_k = \frac{mv^2}{2}$, можно закон сохранения механической энергии записать так:

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const}, \quad (6.30)$$

или

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2.$$

Это уравнение позволяет очень просто найти скорость камня v_2 на любой высоте h_2 над землей, если известна начальная скорость v_1 камня на исходной высоте h_1 .

Закон сохранения механической энергии (6.29) легко обобщается на случай любого числа тел и любых консервативных сил взаимодействия между ними. Под E_k нужно понимать сумму кинетических энергий всех тел, а под E_p - полную потенциальную энергию системы.

Для системы, состоящей из тела массой m и пружины, закон сохранения механической энергии имеет вид

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{k(\Delta l)^2}{2} = \text{const.} \quad (6.31)$$

Полная механическая энергия системы равна сумме ее кинетической и потенциальной энергий. В изолированной системе, в которой действуют только консервативные силы, механическая энергия сохраняется.

Лекция №4

Тема: «Механические колебания и волны»

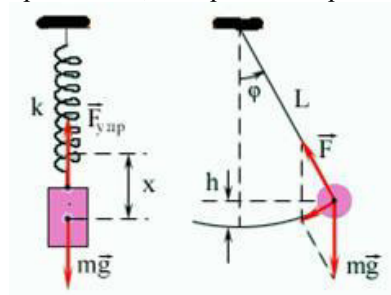
1. Вопросы лекции:

- 1.1. Механические колебания. Амплитуда, период, частота колебаний, фаза колебаний.
- 1.2. Свободные и вынужденные колебания. Резонанс.
- 1.3. Механические волны. Свойства механических волн. Длина волны.
- 1.4. Звуковые волны. Ультразвук и его использование в технике и медицине.

2. Краткое содержание вопросов

Механические колебания

В технике и окружающем нас мире часто приходится сталкиваться с периодическими (или почти периодическими) процессами, которые повторяются через одинаковые промежутки времени. Такие процессы называют колебательными.



Колебательные явления различной физической природы подчиняются общим закономерностям. Например, колебания тока в электрической цепи и колебания математического маятника могут описываться одинаковыми уравнениями. Общность колебательных закономерностей позволяет рассматривать колебательные процессы различной природы с единой точки зрения.

Механическими колебаниями называются движения тел, точно повторяющиеся через одинаковые промежутки времени. Закон движения тела, совершающего колебания, задается с помощью некоторой периодической функции времени $x = f(t)$ (1). Графическое изображение этой функции дает наглядное представление о протекании колебательного процесса во времени.

Примерами простых колебательных систем могут служить груз на пружине или математический маятник, изображенные на рисунке.

Уравнение колебательного движения

является функция вида

$$x = x_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (6).$$

Здесь x – смещение тела от положения равновесия, x_m – амплитуда колебаний, т. е. максимальное смещение от положения равновесия, ω – циклическая или круговая частота колебаний, t – время. Величина, стоящая под знаком косинуса $\varphi = \omega t + \varphi_0$ называется фазой гармонического процесса. При $t = 0$ $\varphi = \varphi_0$, поэтому φ_0 называют начальной фазой.

Гармонические колебания

Колебания, описываемые уравнением (6), являются гармоническими.

Минимальный интервал времени, через который происходит повторение движения тела, называется периодом колебаний T . Частота (величина, обратная периоду) показывает, сколько колебаний совершается за единицу времени:

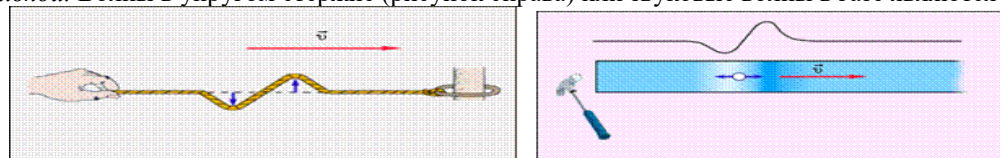
$$\nu = \frac{1}{T}. \quad \text{Циклическая частота колебаний связана с частотой и периодом колебаний } T \text{ соотношениями} \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}.$$

Механические волны

Если в каком-нибудь месте твердой, жидкой или газообразной среды возбуждены колебания частиц, то вследствие взаимодействия атомов и молекул среды колебания начинают передаваться от одной точки к другой с конечной скоростью. Процесс распространения колебаний в среде называется *волной*.

Механические волны бывают разных видов. Если при распространении волны частицы среды испытывают смещение в направлении, перпендикулярном направлению распространения, такая волна называется *поперечной*. Примером волны такого рода могут служить волны, бегущие по натянутому резиновому жгуту или по струне (рисунок слева).

Если смещение частиц среды происходит в направлении распространения волны, такая волна называется *продольной*. Волны в упругом стержне (рисунок справа) или звуковые волны в газе являются примерами таких волн.



Волны на поверхности жидкости имеют как поперечную, так и продольную компоненты.

Механические волны могут распространяться в твердых, жидких и газообразных средах. Продольные механические волны могут распространяться в любых средах – твердых, жидких и газообразных. В жидкостях и газах упругая деформация сдвига не возникает. Если один слой жидкости или газа сместить на некоторое расстояние относительно соседнего слоя, то никаких касательных сил на границе между слоями не появляется. Силы, действующие на границе жидкости и твердого тела, а также силы между соседними слоями жидкости всегда направлены по нормали к границе – это силы давления. То же относится к газообразной среде. Следовательно, поперечные волны не могут существовать в жидкой или газообразной средах.

Рассмотрим волну, которая распространяется в пространстве от источника, совершающего гармонические колебания. Если тело, являющееся источником колебаний, движется по закону $y = y_m \cos(\omega t)$ (20), то уравнение волны, распространяющейся от источника колебаний вдоль оси OX , будет иметь вид

$$y = y_m \cos(\omega t - kx) \quad (21),$$

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

где λ (22) называется волновым числом. Волновое число определяет количество волн, укладывающихся на отрезке 2π м подобно тому, как циклическая частота ω определяет число периодов, укладывающихся на временном отрезке 2π с.

Длиной волны λ называют расстояние между двумя соседними точками на оси OX , колеблющимися в одинаковых фазах. Расстояние, равное длине волны λ , волна пробегает за период T , следовательно, $\lambda = vT$ (23), где v – скорость распространения волны.

Обращаем внимание, что волна, описываемая уравнением (21), движется вдоль оси OX , против оси OX будет двигаться волна, описываемая уравнением $y(x,t) = x_m \cos(\omega t + kx)$.

Скорость распространения упругой волны зависит от типа деформации и плотности среды, и вычисляется как

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

(24), где E – модуль соответствующей деформации (сжатия, сдвига, изгиба), ρ – плотность среды. Скорость распространения волны не имеет никакого отношения к скорости отдельных точек волны, и при малых амплитудах не зависит от амплитуды.

Например, при температуре 20°C скорость распространения продольных волн в воде $v \approx 1480$ м/с, в различных сортах стали $v \approx 5\text{--}6$ км/с.

Звуковые волны

Звуковыми волнами или просто **звуком** принято называть волны, воспринимаемые человеческим ухом. Диапазон звуковых частот лежит в пределах от 20 Гц до 20 кГц. Волны с частотой менее 20 Гц называются *инфразвуком*, а с частотой более 20 кГц – *ультразвуком*. Волны звукового диапазона могут распространяться не только в газе, но и в жидкости (продольные волны) и в твердом теле (продольные и поперечные волны). Изучением звуковых явлений занимается физика, который называют *акустикой*.

При распространении звука в газе атомы и молекулы колеблются вдоль направления распространения волны. Это приводит к изменениям локальной плотности ρ и давления p . Звуковые волны в газе часто называют волнами плотности или волнами давления.

Скорость распространения звуковых волн определяется инертными и упругими свойствами среды. Скорость

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

распространения продольных волн в любой безграничной однородной среде определяется по формуле $v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$, где B – модуль всестороннего сжатия, ρ – средняя плотность среды. Скорость звука при нормальных условиях (то есть при температуре 0°C и давлении 1 атм) равна 331,5 м/с, а скорость звука при температуре 20°C и давлении 1 атм равна 343 м/с.

При восприятии различных звуков человеческое ухо оценивает их прежде всего по уровню громкости, зависящей от интенсивности звуковой волны. Воздействие звуковой волны на барабанную перепонку зависит от звукового давления, то есть амплитуды p_0 колебаний давления в волне. Порог слышимости соответствует значению p_0 порядка 10^{-10} атм, то есть 10^{-5} Па, болевой порог соответствует значению p_0 порядка 10^{-4} атм или 10 Па. Таким образом, человеческое ухо способно воспринимать волны, в которых звуковое давление изменяется в миллион раз.

Еще одной характеристикой звуковых волн, определяющей их слуховое восприятие, является высота звука. Колебания в гармонической звуковой волне воспринимаются человеческим ухом как музыкальный тон. Колебания высокой частоты воспринимаются как звуки высокого тона, колебания низкой частоты – как звуки низкого тона. Звуки, издаваемые музыкальными инструментами, а также звуки человеческого голоса могут сильно различаться по высоте тона и по диапазону частот. Так, например, диапазон наиболее низкого мужского голоса – баса – простирается приблизительно от 80 до 400 Гц, а диапазон высокого женского голоса – сопрано – от 250 до 1050 Гц.

Лекция №5

Тема: «Молекулярно-кинетическое строение вещества. Агрегатные состояния вещества»

1. Вопросы лекции:

1.1. Атомистическая теория строения вещества. Наблюдения и опыты, подтверждающие атомно-молекулярное строение вещества. Масса и размеры молекул.

1.2. Тепловое движение. Абсолютная температура как мера средней кинетической энергии частиц.

1.3. Объяснение агрегатных состояний вещества на основе атомно-молекулярных представлений. Изменения агрегатных состояний вещества.

1.4. Модель идеального газа. Связь между давлением и средней кинетической энергией молекул газа. Изопроцессы.

1.5. Модель строения жидкости. Насыщенные и ненасыщенные пары. Влажность воздуха. Поверхностное натяжение и смачивание.

1.6. Модель строения твердых тел. Аморфные вещества и жидкие кристаллы. Механические свойства твердых тел.

2. Краткое содержание вопросов

Основные положения молекулярно-кинетической теории. Размеры молекул.

Молекулы очень малы, но посмотрите, как просто оценить их размеры и массу. Достаточно одного наблюдения и пары несложных расчетов. Правда, надо еще додуматься до того, как это сделать.

В основе молекулярно-кинетической теории строения вещества лежат три утверждения: **вещество состоит из частиц; эти частицы беспорядочно движутся; частицы взаимодействуют друг с другом**. Каждое утверждение строго доказано с помощью опытов.

Свойства и поведение всех без исключения тел от инфузории до звезды определяются движением взаимодействующих друг с другом частиц: молекул, атомов или еще более малых образований - элементарных частиц.

Масса молекул. Количество вещества.

Относительная молекулярная масса.

Так как массы молекул очень малы, удобно использовать в расчетах не абсолютные значения масс, а относительные. По международному соглашению массы всех атомов и молекул сравнивают с $1/12$ массы атома углерода (так называемая углеродная шкала атомных масс). **Относительной молекулярной (или атомной) массой вещества M_r** называют отношение массы молекулы (или атома) m_0 данного вещества к $1/12$ массы атома углерода m_{0C} :

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}. \quad (8.2)$$

Относительные атомные массы всех химических элементов точно измерены.

Складывая относительные атомные массы элементов, входящих в состав молекулы вещества, можно вычислить относительную молекулярную массу вещества. Например, относительная молекулярная масса углекислого газа CO_2 приблизительно равна 44, так как относительная атомная масса углерода точно равна 12, а кислорода примерно $16: 12 + 2 \cdot 16 = 44$.

Количество вещества и постоянная Авогадро. *Количество вещества* наиболее естественно было бы измерять числом молекул или атомов в теле. Но число молекул в любом макроскопическом теле так велико, что в расчетах используют не абсолютное число молекул, а относительное их число.

В Международной системе единиц количество вещества выражают в *молях*. Один моль - это количество вещества, в котором содержится столько же молекул или атомов, сколько атомов содержится в углероде массой 0,012 кг.

Значит, в 1 моль любого вещества содержится одно и то же число атомов или молекул. Это число атомов обозначают N_A и называют *постоянной Авогадро* в честь итальянского ученого (XIX в.).

Для определения постоянной Авогадро надо найти массу одного атома углерода. Приближенная оценка массы может быть произведена так, как это было сделано выше для массы молекулы воды (наиболее точные методы основаны на отклонении пучков ионов электромагнитным полем).

Для массы атома углерода измерения дают: $m_{0C} = 1,995 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

Постоянную Авогадро N_A можно определить, разделив массу углерода, взятого в количестве одного моля, на массу одного атома углерода:

$$N_A = 0,012 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{1}{m_{0C}} = 0,012 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \frac{1}{1,995 \cdot 10^{-26} \text{ кг}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

$$N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}. \quad (8.3)$$

Наименование моль^{-1} указывает на то, что N_A - число атомов в 1 моле любого вещества. Если, например, количество вещества $\nu = 2,5 \text{ моль}$, то число молекул в теле $N = \nu N_A = 1,5 \cdot 10^{24}$. Отсюда видно, что количество вещества равно отношению числа молекул N в данном теле к постоянной Авогадро N_A , т. е. к числу молекул в 1 моле вещества:

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \quad (8.4)$$

Огромное числовое значение постоянной Авогадро показывает, насколько малы микроскопические масштабы по сравнению с макроскопическими. Тело, обладающее количеством вещества 1 моль, имеет привычные для нас макроскопические размеры и массу порядка нескольких десятков граммов.

Молярная масса. Наряду с относительной молекулярной массой M_r в физике и химии широко используют понятие *молярная масса*. **Молярной массой M вещества** называют массу вещества, взятого в количестве 1 моль.

Согласно такому определению молярная масса вещества равна произведению массы молекулы на постоянную Авогадро:

$$M = m_0 N_A. \quad (8.5)$$

Масса m любого количества вещества равна произведению массы одной молекулы на число молекул в теле:

$$m = m_0 N. \quad (8.6)$$

Заменив N_A и N в формуле (8.4) их выражениями из формул (8.5) и (8.6), получим

$$\nu = \frac{m}{M}. \quad (8.7)$$

Количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе. Именно такое определение количества вещества дается в учебнике химии.

Число молекул любого количества вещества массой m и молярной массой M согласно формулам (8.4) и (8.7) равно:

$$N = \nu N_A = N_A \frac{m}{M}. \quad (8.8)$$

Формулы (8.2), (8.4) и (8.5) дают определения новым физическим величинам, таким, как относительная молекулярная масса, количество вещества и молярная масса. Вывести их нельзя, их надо просто запомнить. Остальные формулы, например (8.7) и (8.8), можно вывести.

Силы

взаимодействия

молекул.

Молекулы взаимодействуют друг с другом. Без этого взаимодействия не было бы ни твердых, ни жидких тел. Доказать существование значительных сил взаимодействия между атомами или молекулами несложно. Попробуйте-ка сломать толстую палку! А ведь она состоит из молекул. Но одни *силы притяжения* не могут обеспечить существования устойчивых образований из атомов и молекул. На очень малых расстояниях между молекулами обязательно действуют *силы отталкивания*. Благодаря этому молекулы не проникают друг в друга и куски вещества никогда не сжимаются до размеров порядка размеров одной молекулы.

Как возникает взаимодействие молекул. Молекула - это сложная система, состоящая из отдельных заряженных частиц: электронов и атомных ядер. Хотя в целом молекулы электрически нейтральны, тем не менее между ними на малых расстояниях действуют значительные электрические силы: происходит взаимодействие электронов и атомных ядер соседних молекул.

Если молекулы находятся на расстояниях, превышающих их размеры в несколько раз, то силы взаимодействия практически не сказываются. Силы между электрически нейтральными молекулами являются короткодействующими.

На расстояниях, превышающих 2-3 диаметра молекул, действуют силы притяжения. По мере уменьшения расстояния между молекулами сила их взаимного притяжения сначала увеличивается, но одновременно увеличивается и сила отталкивания. При определенном расстоянии сила притяжения становится равной силе отталкивания. Это расстояние считается равным диаметру молекулы.

При дальнейшем уменьшении расстояния электронные оболочки атомов начинают перекрываться и быстро увеличивается сила отталкивания.

Атомы и молекулы состоят из электрически заряженных частиц. Благодаря действию электрических сил на малых расстояниях силы притяжения больше сил отталкивания.

Температура и тепловое равновесие

Термометрами пользуются все. А что они измеряют? Конечно, температуру! Однако это еще не ответ. Что означают слова: «Я измерил температуру тела»? Что я при этом узнал? Что именно характеризует температура? Это все не так просто, как может показаться на первый взгляд.

Макроскопические параметры. Для описания процессов в газах и других макроскопических телах нет необходимости все время обращаться к молекулярно-кинетической теории. Поведение макроскопических тел, в частности газов, можно охарактеризовать немногим числом физических величин, относящихся не к отдельным молекулам, составляющим тела, а ко всем молекулам в целом. К числу таких величин относятся объем V , давление p , температура t .

Так, газ данной массы всегда занимает некоторый объем, имеет определенные давление и температуру. Объем и давление представляют собой механические величины, которые помогают описывать состояние газа. Температура в механике не рассматривается, так как она характеризует внутреннее состояние тела.

Величины, характеризующие состояние макроскопических тел без учета их молекулярного строения (V , p , t), называют **макроскопическими параметрами**. Однако макроскопические параметры не исчерпываются объемом, давлением и температурой.

Например, для описания состояния смеси газов нужно еще знать концентрации отдельных компонентов. Обычный атмосферный воздух представляет собой смесь газов.

Холодные и горячие тела. Центральное место во всем учении о тепловых явлениях занимает понятие *температура*. Все мы хорошо знаем различие между холодными и горячими телами. На ощупь мы определяем, какое тело нагрето сильнее, и говорим, что это тело имеет более высокую температуру. Таким образом, *температура* характеризует степень нагретости тела (холодное, теплое, горячее). Для ее измерения был создан прибор, называемый *термометром*. В его устройстве использовано свойство тел изменять объем при нагревании или охлаждении.

Тепловое равновесие. Для измерения температуры тела человека нужно подержать медицинский термометр под мышкой 5-8 мин. За это время ртуть в термометре нагревается и уровень ее повышается. По длине столбика ртути можно определить температуру. Термометр никогда не покажет температуру тела сразу же после того, как он соприкоснулся с ним. Необходимо некоторое время для того, чтобы температуры тела и термометра выровнялись и между телами установилось *тепловое равновесие*, при котором температура перестает изменяться.

Тепловое равновесие с течением времени устанавливается между любыми телами, имеющими различную температуру.

Бросьте в стакан с водой кусочек льда и закройте стакан плотной крышкой. Лед начнет плавиться, а вода охлаждаться. Когда лед растает, вода начнет нагреваться: после того как она примет температуру окружающего воздуха, никаких изменений внутри стакана с водой происходить не будет.

Из этих и подобных им простых наблюдений можно сделать вывод о существовании очень важного общего свойства тепловых явлений. Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние теплового равновесия.

Тепловым равновесием называют такое состояние тел, при котором все макроскопические параметры сколь угодно долго остаются неизменными. Это означает, что в системе *не меняются объем и давление*, не происходит теплообмен, отсутствуют взаимные превращения газов, жидкостей, твердых тел и т. д. В частности, не меняется объем столбика ртути в термометре, т. е. *температура системы остается постоянной*.

Но микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии: меняются положения молекул, их скорости при столкновениях.

Температура. Система макроскопических тел может находиться в различных состояниях. В каждом из этих состояний температура имеет свое, строго определенное значение. Другие физические величины в состоянии теплового равновесия системы могут иметь разные значения, которые с течением времени не меняются. Так, например, объемы различных частей системы и давления внутри них при наличии твердых перегородок могут быть разными. Если вы внесете с улицы мяч, наполненный сжатым воздухом, то спустя некоторое время температура воздуха в мяче и комнате выровняется. Давление же воздуха в мяче все равно будет больше комнатного.

Температура характеризует состояние теплового равновесия системы тел: все тела системы, находящиеся друг с другом в тепловом равновесии, имеют одну и ту же температуру.

При одинаковых температурах двух тел между ними не происходит теплообмена. Если же температуры тел различны, то при установлении между ними теплового контакта будет происходить обмен энергией. При этом тело с большей температурой будет отдавать энергию телу с меньшей температурой. Разность температур тел указывает направление теплообмена между ними.

Абсолютная температура. Температура — мера средней кинетической энергии молекул

Не все в мире относительно. Так, существует абсолютный нуль температуры. Есть и абсолютная шкала температур. Сейчас вы узнаете об этом, а также о том, какова точная связь между температурой и средней кинетической энергией молекул.

Вместо температуры Θ , выражаемой в энергетических единицах, введем температуру, выражаемую в привычных для нас градусах.

Будем считать величину Θ прямо пропорциональной температуре T , измеряемой в градусах:

$$\Theta = kT, \quad (9.5)$$

где k - коэффициент пропорциональности. Определенная равенством (9.5) температура называется **абсолютной**. Такое название, как мы сейчас увидим, имеет достаточные основания.

Учитывая определение (9.5), получим

$$\frac{pV}{N} = kT. \quad (9.6)$$

По этой формуле вводится температурная шкала (в градусах), не зависящая от вещества, используемого для измерения температуры.

Абсолютный нуль температуры. Температура, определяемая формулой (9.6), очевидно, не может быть отрицательной, так как все величины, стоящие в левой части этой формулы, заведомо положительны. Следовательно, наименьшим возможным значением температуры T является значение $T=0$, если давление p или объем V равны нулю.

Предельную температуру, при которой давление идеального газа обращается в нуль при фиксированном объеме или при которой объем идеального газа стремится к нулю при неизменном давлении, называют **абсолютным нулем температуры**. Это самая низкая температура в природе, та «наибольшая или последняя степень холода», существование которой предсказывал Ломоносов.

Абсолютная шкала температур. Английский ученый У. Кельвин (1824-1907) ввел абсолютную шкалу температур. Нулевая температура по абсолютной шкале (*ее называют также шкалой Кельвина*) соответствует абсолютному нулю, а каждая единица температуры по этой шкале равна градусу по шкале Цельсия.

Единица абсолютной температуры в СИ называется *Кельвином* (обозначается буквой К).

Постоянная Больцмана. Определим коэффициент k в формуле (9.6) так, чтобы один кельвин (1 К) был равен градусу по шкале Цельсия (1°C).

Мы знаем значения величины Θ при 0°C и 100°C (см. формулы (9.2) и (9.4)). Обозначим абсолютную температуру при 0°C через T_1 , а при 100°C через T_2 . Тогда согласно формуле (9.5)

$$\Theta_{100} - \Theta_0 = k(T_2 - T_1),$$

$$\Theta_{100} - \Theta_0 = k \cdot 100 \text{ К} = (5,14 - 3,76) \cdot 10^{-21} \text{ Дж.}$$

Отсюда

$$k = \frac{5,14 - 3,76}{100} \cdot 10^{-21} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Коэффициент

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \quad (9.7)$$

называется **постоянной Больцмана** в честь Л. Больцмана, одного из основателей молекулярно-кинетической теории газов.

Постоянная Больцмана связывает температуру Θ в энергетических единицах с температурой T в Кельвинах. Это одна из наиболее важных постоянных в молекулярно-кинетической теории.

Связь абсолютной шкалы и шкалы Цельсия. Зная постоянную Больцмана, можно найти значение абсолютного нуля по шкале Цельсия. Для этого найдем сначала значение **абсолютной температуры**, соответствующее 0°C .

Так как при 0°C $kT_1 = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$, то $T_1 = \frac{3,76 \cdot 10^{-21}}{1,38 \cdot 10^{-23}} \text{ К} \approx 273 \text{ К}.$

Один кельвин и один градус шкалы Цельсия совпадают. Поэтому любое значение абсолютной температуры T будет на 273 градуса выше соответствующей температуры t по Цельсию:

$$T (\text{К}) = t (^\circ\text{C}) + 273 (^\circ\text{C}). \quad (9.8)$$

Но изменение абсолютной температуры ΔT равно изменению температуры по шкале Цельсия Δt : $\Delta T (\text{К}) = \Delta t (^\circ\text{C})$.

На рисунке 9.3 для сравнения изображены абсолютная шкала и шкала Цельсия. Абсолютному нулю соответствует температура $t = -273^\circ\text{C}$.

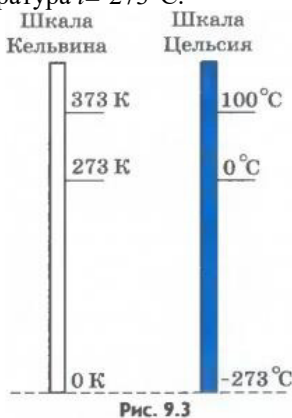


Рис. 9.3

Отметим важнейший факт: абсолютный нуль температуры недостижим!

Температура - мера средней кинетической энергии молекул. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории в форме (9.1) и определения температуры (9.6) вытекает важнейшее следствие: *абсолютная температура есть мера средней кинетической энергии движения молекул.*

Докажем

это.

Левые части уравнений $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \overline{E}$ и $\frac{pV}{N} = kT$ одинаковы. Значит, должны быть равны и их правые части. Отсюда вытекает связь между средней кинетической энергией поступательного движения молекулы и температурой:

$$\overline{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (9.9)$$

Средняя кинетическая энергия хаотичного поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре. Чем выше температура, тем быстрее движутся молекулы. Таким образом, выдвинутая ранее догадка о связи температуры со средней скоростью молекул получила надежное обоснование.

Соотношение (9.9) между температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул установлено для идеальных газов. Однако оно оказывается справедливым для любых веществ, у которых движение атомов или молекул подчиняется законам механики Ньютона. Оно верно для жидкостей, а также и для твердых тел, где атомы могут лишь колебаться возле положений равновесия в узлах кристаллической решетки.

При приближении температуры к абсолютному нулю энергия теплового движения молекул приближается к нулю.

Строение газообразных, жидких и твердых тел

Молекулярно-кинетическая теория дает возможность понять, почему вещество может находиться в газообразном, жидком и твердом состояниях.

Газы. В газах расстояние между атомами или молекулами в среднем во много раз больше размеров самих молекул. Например, при атмосферном давлении объем сосуда в десятки тысяч раз превышает объем находящихся в нем молекул.

Газы легко сжимаются, при этом уменьшается среднее расстояние между молекулами, но форма молекулы не изменяется.

Молекулы с огромными скоростями - сотни метров в секунду - движутся в пространстве. Сталкиваясь, они отскакивают друг от друга в разные стороны подобно бильярдным шарам. Слабые силы притяжения молекул газа не способны удержать их друг возле друга. Поэтому *газы могут неограниченно расширяться. Они не сохраняют ни формы, ни объема.*

Многочисленные удары молекул о стенки сосуда создают давление газа.

Жидкости. Молекулы жидкости расположены почти вплотную друг к другу, поэтому молекула жидкости ведет себя иначе, чем молекула газа. В жидкостях существует так называемый ближний порядок, т. е. упорядоченное расположение молекул сохраняется на расстояниях, равных нескольким молекулярным диаметрам. Молекула колеблется около своего положения равновесия, сталкиваясь с соседними молекулами. Лишь время от времени она совершает очередной «прыжок», попадая в новое положение равновесия. В этом положении равновесия сила отталкивания равна силе притяжения, т. е. суммарная сила взаимодействия молекулы равна нулю. Время *оседлой жизни* молекулы воды, т. е. время ее колебаний около одного определенного положения равновесия при комнатной температуре, равно в среднем 10^{-11} с. Время же одного колебания значительно меньше (10^{-12} - 10^{-13} с). С повышением температуры время оседлой жизни молекул уменьшается.

Характер молекулярного движения в жидкостях, впервые установленный советским физиком Я.И.Френкелем, позволяет понять основные свойства жидкостей.

Молекулы жидкости находятся непосредственно друг возле друга. При уменьшении объема силы отталкивания становятся очень велики. Этим и объясняется *малая сжимаемость жидкостей.*

Как известно, *жидкости текучи, т. е. не сохраняют своей формы.* Объяснить это можно так. Внешняя сила заметно не меняет числа перескоков молекул в секунду. Но перескоки молекул из одного оседлого положения в другое происходят преимущественно в направлении действия внешней силы. Вот почему жидкость течет и принимает форму сосуда.

Твердые тела. Атомы или молекулы твердых тел, в отличие от атомов и молекул жидкостей, колеблются около определенных положений равновесия. По этой причине твердые тела *сохраняют не только объем, но и форму.* Потенциальная энергия взаимодействия молекул твердого тела существенно больше их кинетической энергии.

Есть еще одно важное различие между жидкостями и твердыми телами. Жидкость можно сравнить с толпой людей, где отдельные индивидуумы беспокойно толкуются на месте, а твердое тело подобно стройной когорте тех же индивидуумов, которые хотя и не стоят по стойке смирно, но выдерживают между собой в среднем определенные расстояния. Если соединить центры положений равновесия атомов или ионов твердого тела, то получится правильная пространственная решетка, называемая *кристаллической.*

У газа расстояние l между молекулами много больше размеров молекул: $l \gg r_0$.

У жидкостей и твердых тел $l \approx r_0$. Молекулы жидкости расположены в беспорядке и время от времени перескакивают из одного оседлого положения в другое.

У кристаллических твердых тел молекулы (или атомы) расположены строго упорядоченно.

Плазма

Сейчас вы познакомитесь с четвертым состоянием вещества - плазмой. Это состояние не является экзотическим. Подавляющая часть вещества Вселенной находится именно в состоянии плазмы.

При очень низких температурах все вещества находятся в твердом состоянии. Их нагревание вызывает переход веществ из твердого состояния в жидкое. Дальнейшее повышение температуры приводит к превращению жидкостей в газ.

При достаточно больших температурах начинается ионизация газа за счет столкновений быстро движущихся атомов или молекул. Вещество переходит в новое состояние, называемое *плазмой*. **Плазма** - это частично или полностью ионизованный газ, в котором локальные плотности положительных и отрицательных зарядов практически совпадают. Таким образом, плазма в целом является электрически нейтральной системой. В зависимости от условий степень ионизации плазмы (отношение числа ионизованных атомов к их полному числу) может быть различной. В полностью ионизованной плазме нейтральных атомов нет.

Наряду с нагреванием, ионизация газа и образование плазмы могут быть вызваны различными излучениями или бомбардировкой атомов газа быстрыми заряженными частицами. При этом получается так называемая *низкотемпературная плазма.*

Свойства плазмы. Плазма обладает рядом специфических свойств, что позволяет рассматривать ее как особое, четвертое состояние вещества.

Из-за большой подвижности заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей. Поэтому любое нарушение электрической нейтральности отдельных областей плазмы, вызванное скоплением частиц одного знака заряда, быстро ликвидируется. Возникающие электрические поля перемещают заряженные частицы до тех пор, пока электрическая нейтральность не восстановится и электрическое поле не станет равным нулю.

В отличие от нейтрального газа, между молекулами которого существуют короткодействующие силы, между заряженными частицами плазмы действуют кулоновские силы, сравнительно медленно убывающие с расстоянием. Каждая частица взаимодействует сразу с большим количеством окружающих частиц. Благодаря этому, наряду с беспорядочным (тепловым) движением, частицы плазмы могут участвовать в разнообразных упорядоченных (коллективных) движениях. В плазме легко возбуждаются разного рода колебания и волны.

Проводимость плазмы увеличивается по мере роста степени ее ионизации. При высоких температурах полностью ионизованная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.

Плазма в космическом пространстве. В состоянии плазмы находится подавляющая (около 99%) часть вещества Вселенной. Вследствие высокой температуры Солнце и другие звезды состоят в основном из полностью ионизованной плазмы.

Из плазмы состоит и межзвездная среда, заполняющая пространство между звездами и галактиками. Плотность межзвездной среды очень мала - в среднем менее одного атома на 1 см^3 . Ионизация атомов межзвездной среды вызывается излучением звезд и космическими лучами - потоками быстрых частиц, пронизывающими пространство Вселенной по всем направлениям. В отличие от горячей плазмы звезд температура межзвездной плазмы очень мала.

Плазмой окружена и наша планета. Верхний слой атмосферы на высоте 100-300 км представляет собой ионизованный газ - *ионосферу*. Ионизация воздуха в верхнем слое атмосферы вызывается преимущественно излучением Солнца и потоком заряженных частиц, испускаемых Солнцем. Выше ионосферы простираются радиационные пояса Земли, открытые с помощью спутников. Радиационные пояса также состоят из плазмы.

Многими свойствами плазмы обладают свободные электроны в металлах. В отличие от обычной плазмы в плазме твердого тела положительные ионы не могут перемещаться по всему телу.

Частично или полностью ионизованный газ называют плазмой. Звезды состоят из плазмы. Расширяется техническое применение плазмы.

Идеальный газ в молекулярно-кинетической теории

Качественное объяснение основных свойств вещества на основе молекулярно-кинетической теории не является особенно сложным. Однако теория, устанавливающая количественные связи между измеряемыми на опыте величинами (давлением, температурой и др.) и свойствами самих молекул, их числом и скоростью движения, весьма сложна.

Идеальный газ. У газа при обычных давлениях расстояние между молекулами во много раз превышает их размеры. В этом случае силы взаимодействия молекул пренебрежимо малы и кинетическая энергия молекул много больше потенциальной энергии взаимодействия. Молекулы газа можно рассматривать как материальные точки или очень маленькие твердые шарики. Вместо *реального газа*, между молекулами которого действуют сложные силы взаимодействия, мы будем рассматривать его *модель* - *идеальный газ*.

Идеальный газ - это газ, взаимодействие между молекулами которого пренебрежимо мало. Естественно, при столкновении молекул идеального газа на них действует сила отталкивания. Так как молекулы газа мы можем согласно модели считать материальными точками, то размерами молекул мы пренебрегаем, считая, что объем, который они занимают, гораздо меньше объема сосуда.

Напомним, что в физической модели принимают во внимание лишь те свойства реальной системы, учет которых совершенно необходим для объяснения исследуемых закономерностей поведения этой системы. Ни одна модель не может передать все свойства системы. Сейчас нам предстоит решить довольно узкую задачу: вычислить с помощью молекулярно-кинетической теории давление идеального газа на стенки сосуда. Для этой задачи модель идеального газа оказывается вполне удовлетворительной. Она приводит к результатам, которые подтверждаются опытом.

Идеальный газ - модель реального газа. Согласно этой модели молекулы газа можно рассматривать как материальные точки, взаимодействие которых происходит только при их столкновении. Сталкиваясь со стенкой, молекулы газа оказывают на нее давление.

Среднее значение квадрата скорости молекул

Для вычисления среднего давления надо знать среднюю скорость молекул (точнее, среднее значение квадрата скорости). Это не простой вопрос. Вы привыкли к тому, что скорость имеет каждая частица. Средняя же скорость молекул зависит от движения всех частиц.

Средние значения. С самого начала нужно отказаться от попыток проследить за движением всех молекул, из которых состоит газ. Их слишком много, и движутся они очень сложно. Нам и не нужно знать, как движется каждая молекула. Мы должны выяснить, к какому результату приводит движение всех молекул газа.

Характер движения всей совокупности молекул газа известен из опыта. Молекулы участвуют в беспорядочном (тепловом) движении. Это означает, что скорость любой молекулы может оказаться как очень большой, так и очень малой. Направление движения молекул беспрестанно меняется при их столкновениях друг с другом.

Скорости отдельных молекул могут быть любыми, однако *среднее* значение модуля этих скоростей вполне определенное. Точно так же рост учеников в классе неодинаков, но его среднее значение - определенное число. Чтобы это число найти, надо сложить рост отдельных учеников и разделить эту сумму на число учащихся.

Среднее значение квадрата скорости. В дальнейшем нам понадобится среднее значение не самой скорости, а квадрата скорости. От этой величины зависит средняя кинетическая энергия молекул. А средняя кинетическая энергия молекул, как мы вскоре убедимся, имеет очень большое значение во всей молекулярно-кинетической теории.

Обозначим модули скоростей отдельных молекул газа через $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$. Среднее значение квадрата скорости определяется следующей формулой:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N}, \quad (8.9)$$

где N - число молекул в газе.

Но квадрат модуля любого вектора равен сумме квадратов его проекций на оси координат Ox, Oy, Oz . Поэтому

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2. \quad (8.10)$$

Средние значения величин v_x^2, v_y^2, v_z^2 можно определить с помощью формул, подобных формуле (8.9).

Между средним значением v^2 и средними значениями квадратов проекций существует такое же соотношение, как соотношение (8.10):

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \quad (8.11)$$

Действительно, для каждой молекулы справедливо равенство (8.10). Сложив такие равенства для отдельных молекул и разделив обе части полученного уравнения на число молекул N , мы приходим к формуле (8.11).

Внимание! Так как направления трех осей OX, OY и OZ вследствие беспорядочного движения молекул равноправны, средние значения квадратов проекций скорости равны друг другу:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \quad (8.12)$$

Видите, из хаоса выплывает определенная закономерность. Смогли бы вы это сообразить сами?

Учитывая соотношение (8.12), подставим в формулу (8.11) $\overline{v_x^2}$ вместо $\overline{v_y^2}$ и $\overline{v_z^2}$. Тогда для среднего квадрата проекции скорости получим:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}, \quad (8.13)$$

т. е. средний квадрат проекции скорости равен 1/3 среднего квадрата самой скорости. Множитель 1/3 появляется вследствие трехмерности пространства и соответственно существования трех проекций у любого вектора.

Скорости молекул беспорядочно меняются, но средний квадрат скорости вполне определенная величина.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

$$p = \frac{\overline{F}}{S} = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}. \quad (8.14)$$

Это и есть основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.

Формула (8.14) связывает макроскопическую величину - давление, которое может быть измерено манометром, - с микроскопическими величинами, характеризующими молекулы: их массой, скоростью хаотичного движения.

Связь давления со средней кинетической энергией молекул. Если через $\overline{E}$ обозначить среднюю кинетическую

энергию поступательного движения молекулы $\overline{E} = \frac{m_0 v^2}{2}$, то уравнение (8.14) можно записать в виде

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E}. \quad (8.15)$$

Давление идеального газа пропорционально произведению концентрации молекул и средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

Зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры. Учитывая, что $\frac{N}{V} = n$ из формулы (9.6) получим выражение, показывающее зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

$$p = nkT. \quad (9.10)$$

Из формулы (9.10) вытекает, что при одинаковых давлениях и температурах концентрация молекул у всех газов одна и та же.

Отсюда следует **закон Авогадро**, известный вам из курса химии: **в равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул.**

Существует минимальная температура, при которой давление или объем идеального газа обращается в нуль. Это абсолютный нуль температуры: -273°C . Удобно отсчитывать температуру от абсолютного нуля. Так строится абсолютная шкала температур.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул прямо пропорциональна абсолютной температуре.

Измерение скоростей молекул газа

Зная температуру, нетрудно вычислить среднюю кинетическую энергию молекул газа. После этого легко вычислить и среднюю скорость молекулы. А можно ли эту скорость измерить? Ведь молекулы так малы!

Средняя скорость теплового движения молекул. Уравнение (9.9) дает возможность найти средний квадрат скорости

движения молекулы. Подставив в это уравнение $\overline{E} = \frac{m_0 v^2}{2}$, получим выражение для среднего квадрата скорости:

$$\overline{v^2} = 3 \frac{kT}{m_0}. \quad (9.11)$$

Квадратный корень из этой величины называется **средней квадратичной скоростью**:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (9.12)$$

Вычисляя по формуле (9.12) скорость молекул, например азота при $t=0^\circ\text{C}$, получим $\bar{v} \approx 500 \text{ м/с}$. Молекулы водорода при той же температуре имеют среднюю скорость $\bar{v} \approx 1800 \text{ м/с}$.

Когда впервые были получены эти числа (вторая половина XIX в.), многие физики были ошеломлены. Скорости молекул газа по расчетам оказались больше, чем скорости артиллерийских снарядов! На этом основании высказывали даже сомнения в справедливости кинетической теории. Ведь известно, что запахи распространяются довольно медленно: нужно время порядка десятков секунд, чтобы запах духов, пролитых в одном углу комнаты, распространился до другого угла. Это нетрудно объяснить. Из-за столкновения молекул траектория каждой молекулы представляет собой запутанную ломаную линию (рис. 9.4). Большие скорости молекула имеет на прямолинейных отрезках ломаной. Перемещение же молекулы в каком-либо направлении в среднем невелико даже за время порядка нескольких минут. Вот и получается, что при перемещении молекулы из точки A в точку B пройденный ею путь оказывается гораздо больше расстояния AB.

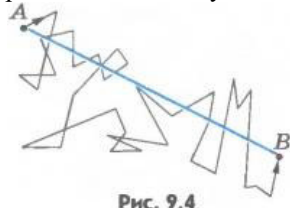


Рис. 9.4

Уравнение состояния идеального газа

Состояние газа данной массы характеризуется тремя макроскопическими параметрами: давлением p , объемом V и температурой T . Сейчас мы найдем между ними связь, а затем посмотрим, для чего эта связь нужна.

Уравнение состояния. Мы детально рассмотрели поведение идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Была определена зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры (см. формулу 9.10). На основе этой зависимости можно получить уравнение, связывающее все три макроскопических параметра p , V и T , характеризующие состояние достаточно разреженного газа данной массы. Это уравнение называют *уравнением состояния идеального газа*.

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (10.4)$$

Единственная величина в этом уравнении, зависящая от рода газа, - это его молярная масса.

Из уравнения состояния вытекает связь между давлением, объемом и температурой идеального газа, который может находиться в двух любых состояниях.

Если индексом 1 обозначить параметры, относящиеся к первому состоянию, а индексом 2 - параметры, относящиеся ко второму состоянию, то согласно уравнению (10.4) для газа данной массы

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M} R \quad \text{и} \quad \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R.$$

Правые части этих уравнений одинаковы, следовательно, должны быть равны и их левые части:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const.} \quad (10.5)$$

Уравнение состояния в форме (10.5) называется *уравнением Клапейрона* и представляет собой одну из форм записи уравнения состояния.

Уравнение состояния в форме (10.4) было впервые получено великим русским ученым Д. И. Менделеевым. Его называют уравнением Менделеева - Клапейрона.

Газовые законы

С помощью уравнения состояния идеального газа можно исследовать процессы, в которых масса газа и один из трех параметров - давление, объем или температура - остаются неизменными. Количественные зависимости между двумя параметрами газа при фиксированном значении третьего называют *газовыми законами*.

Процессы, протекающие при неизменном значении одного из параметров, называют *изопроцессами* (от греческого слова «изос» - равный). Правда, в действительности ни один процесс не может протекать при строго фиксированном значении какого-либо параметра. Всегда имеются те или иные воздействия, нарушающие постоянство температуры, давления или объема. Лишь в лабораторных условиях удастся поддерживать постоянство того или иного параметра с высокой точностью, но в действующих технических устройствах и в природе это практически неосуществимо. Изопроцесс - это идеализированная модель реального процесса, которая только приближенно отражает действительность.

Изотермический процесс. Процесс изменения состояния системы макроскопических тел (*термодинамической системы*) при постоянной температуре называют **изотермическим**. Для поддержания температуры газа постоянной необходимо, чтобы он мог обмениваться теплотой с большой системой - термостатом. Иначе при сжатии или

расширении температура газа будет меняться. Термостатом может служить атмосферный воздух, если температура его заметно не меняется на протяжении всего процесса.

Согласно уравнению состояния идеального газа (10.4) в любом состоянии с неизменной температурой произведение давления газа на его объем остается постоянным:

$$pV = \text{const при } T = \text{const.} \quad (10.6)$$

Для газа данной массы при постоянной температуре произведение давления газа на его объем постоянно.

Этот закон экспериментально был открыт английским ученым Р. Бойлем (1627-1691) и несколько позже французским ученым Э. Мариоттом (1620-1684). Поэтому он носит название **закона Бойля - Мариотта**.

Закон Бойля - Мариотта справедлив обычно для любых газов, а также и для их смесей, например для воздуха. Лишь при давлениях, в несколько сотен раз больших атмосферного, отклонения от этого закона становятся существенными.

Зависимость давления газа от объема при постоянной температуре графически изображают кривой, которую называют **изотермой**. Изотерма газа изображает обратно пропорциональную зависимость между давлением и объемом. Кривую такого рода в математике называют гиперболой (рис.10.1).

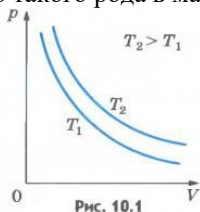


Рис. 10.1

Различным постоянным температурам соответствуют различные изотермы. При повышении температуры газа давление согласно уравнению состояния (10.4) увеличивается, если $V = \text{const}$. Поэтому изотерма, соответствующая более высокой температуре T_2 , лежит выше изотермы, соответствующей более низкой температуре T_1 (см. рис.10.1).

Для того чтобы процесс происходил при постоянной температуре, сжатие или расширение газа должно происходить очень медленно. Дело в том, что, например, при сжатии газ нагревается, так как при движении поршня в сосуде скорость молекул после ударов о поршень увеличивается, а следовательно, увеличивается и температура газа. Именно поэтому для реализации изотермического процесса надо после небольшого смещения поршня подождать, когда температура газа в сосуде опять станет равной температуре окружающего воздуха.

Кроме этого, отметим, что при быстром сжатии давление под поршнем сразу становится больше, чем во всем сосуде. Если значения давления и температуры в различных точках объема разные, то в этом случае газ находится в неравновесном состоянии и мы не можем назвать значения температуры и давления, определяющие в данный момент состояние системы. Если систему предоставить самой себе, то температура и давление постепенно выравниваются, система приходит в равновесное состояние. *Равновесное состояние* - это состояние, при котором температура и давление во всех точках объема одинаковы. Параметры состояния газа могут быть определены, если он находится в равновесном состоянии. Процесс, при котором все промежуточные состояния газа являются равновесными, называют *равновесным процессом*. Очевидно, что на графиках зависимости одного параметра от другого мы можем изображать только равновесные процессы.

Изобарный процесс. Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называют **изобарным** (от греческого слова «барос» - вес).

Согласно уравнению (10.4) в любом состоянии газа с неизменным давлением отношение объема газа к его температуре остается постоянным:

$$\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const.} \quad (10.7)$$

Для газа данной массы при постоянном давлении отношение объема к температуре постоянно.

Этот закон был установлен экспериментально в 1802 г. французским ученым Ж. Гей-Люссаком (1778-1850) и носит название **закона Гей-Люссака**. Согласно уравнению (10.7) объем газа при постоянном давлении пропорционален температуре:

$$V = \text{const} \cdot T. \quad (10.8)$$

Эта зависимость графически изображается прямой, которая называется *изобарой* (рис.10.2). Разным давлениям соответствуют разные изобары. С ростом давления объем газа при постоянной температуре согласно закону Бойля - Мариотта уменьшается. Поэтому изобара, соответствующая более высокому давлению p_2 , лежит ниже изобары, соответствующей более низкому давлению p_1 .

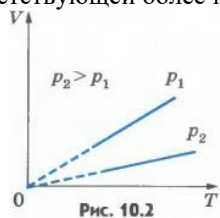


Рис. 10.2

В области низких температур все изобары *идеального* газа сходятся в точке $T=0$. Но это не означает, что объем *реального* газа обращается в нуль. Все газы при сильном охлаждении превращаются в жидкости, а к жидкостям уравнение состояния (10.4) неприменимо. Именно поэтому, начиная с некоторого значения температуры, зависимость объема от температуры проводится на графике штриховой линией. В действительности таких значений температуры и давления у вещества в газообразном состоянии быть не может.

Изобарным можно считать расширение газа при нагревании его в цилиндре с подвижным поршнем, если внешнее давление постоянно. Постоянство давления в цилиндре обеспечивается атмосферным давлением на внешнюю поверхность поршня.

Изохорный процесс. Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме называют **изохорным** (от греческого слова «хорема» - вместимость).

Из уравнения состояния (10.4) вытекает, что в любом состоянии газа с неизменным объемом отношение давления газа к его температуре остается постоянным:

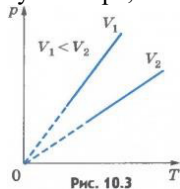
$$\frac{P}{T} = \text{const при } V = \text{const.} \quad (10.9)$$

Для газа данной массы отношение давления к температуре постоянно, если объем не меняется.

Этот газовый закон был установлен в 1787 г. французским физиком Ж.Шарлем (1746-1823) и носит название **закона Шарля**. Согласно уравнению (10.9) давление газа при постоянном объеме пропорционально температуре:

$$p = \text{const} \cdot T. \quad (10.10)$$

Эта зависимость изображается прямой, называемой *изохорой* (рис.10.3). Разным объемам соответствуют разные изохоры. С ростом объема газа при постоянной температуре давление его согласно закону Бойля - Мариотта падает. Поэтому изохора, соответствующая большему объему V_2 , лежит ниже изохоры, соответствующей меньшему объему V_1 .



В соответствии с уравнением (10.10) все изохоры идеального газа начинаются в точке $T=0$. Значит, давление идеального газа при абсолютном нуле равно нулю.

Увеличение давления газа в любом сосуде или в электрической лампочке при нагревании можно считать изохорным процессом. Изохорный процесс используется в газовых термометрах постоянного объема.

Газовые законы - частный случай уравнения состояния идеального газа, один из параметров которого остается постоянным.

Испарение и конденсация. Хорошо закрытый флакон с духами может стоять очень долго, и количество духов в нем не изменится. Если же флакон оставить открытым, то, взглянув на него через достаточно продолжительное время, вы увидите, что жидкости в нем нет. Жидкость, в которой растворены ароматические вещества, испарилась. Гораздо быстрее испаряется (высыхает) лужа на асфальте, особенно если высока температура воздуха и дует ветер. Эти явления можно объяснить так.

Молекулы жидкости движутся беспорядочно. Чем выше температура жидкости, тем больше кинетическая энергия молекул. Среднее значение кинетической энергии молекул при заданной температуре имеет определенное значение. Но у каждой молекулы кинетическая энергия в данный момент может оказаться как меньше, так и больше средней. В какой-то момент кинетическая энергия отдельных молекул может стать настолько большой, что они окажутся способными вылететь из жидкости, преодолев силы притяжения остальных молекул. Процесс превращения жидкости в пар называется **испарением**. При этом процессе число молекул, покидающих жидкость за определенный промежуток времени, больше числа молекул возвращающихся.

Вылетевшая молекула принимает участие в беспорядочном тепловом движении газа. Беспорядочно двигаясь, она может навсегда удалиться от поверхности жидкости, находящейся в открытом сосуде, но может и вернуться снова в жидкость. Процесс превращения пара в жидкость называется **конденсацией**.

Если поток воздуха над сосудом уносит с собой образовавшиеся пары жидкости, то жидкость испаряется быстрее, так как у молекулы пара уменьшается возможность вновь вернуться в жидкость. Чем выше температура жидкости, тем большее число молекул имеет достаточную для вылета из жидкости кинетическую энергию, тем быстрее идет испарение.

При испарении жидкость покидают более быстрые молекулы, поэтому средняя кинетическая энергия молекул жидкости уменьшается. Это означает, что происходит понижение температуры жидкости. Смочив руку какой-нибудь быстро испаряющейся жидкостью (например, бензином или ацетоном), вы тут же почувствуете сильное охлаждение смоченного места. Охлаждение этого места усилится, если на руку подуть.

Процесс испарения происходит со свободной поверхности жидкости.

Если лишить жидкость возможности испаряться, то охлаждение ее будет происходить гораздо медленнее. Вспомните, как долго остывает жирный суп. Слой жира на его поверхности мешает выходу быстрых молекул воды. Жидкость почти не испаряется, и ее температура падает медленно (сам жир испаряется крайне медленно, так как его большие молекулы более прочно сцеплены друг с другом, чем молекулы воды).

Насыщенный пар. Если сосуд с жидкостью плотно закрыть, то сначала количество жидкости уменьшится, а затем

будет оставаться постоянным. При неизменной температуре система жидкость - пар придет в состояние теплового равновесия и будет находиться в нем сколь угодно долго. Одновременно с процессом испарения происходит и конденсация, оба процесса в среднем компенсируют друг друга.

В первый момент, после того как жидкость нальют в сосуд и закроют его, жидкость будет испаряться и плотность пара над ней будет увеличиваться. Однако одновременно с этим будет расти и число молекул, возвращающихся в жидкость. Чем больше плотность пара, тем большее число его молекул возвращается в жидкость. В результате в закрытом сосуде при постоянной температуре установится *динамическое (подвижное) равновесие* между жидкостью и паром, т. е. число молекул, покидающих поверхность жидкости за некоторый промежуток времени, будет равно в среднем числу молекул пара, возвратившихся за то же время в жидкость. Для воды при комнатной температуре это число приблизительно равно 10^{22} молекул за время, равное 1 с (на 1 см^2 площади поверхности). Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют **насыщенным паром**. Это определение подчеркивает, что в данном объеме при данной температуре не может находиться большее количество пара. Если воздух из сосуда с жидкостью предварительно откачан, то над поверхностью жидкости будет находиться только ее насыщенный пар.

Давление насыщенного пара. Что будет происходить с насыщенным паром, если уменьшить занимаемый им объем? Например, если сжимать пар, находящийся в равновесии с жидкостью в цилиндре под поршнем, поддерживая температуру содержимого цилиндра постоянной.

При сжатии пара равновесие начнет нарушаться. Плотность пара в первый момент немного увеличится, и из газа в жидкость начнет переходить большее число молекул, чем из жидкости в газ. Ведь число молекул, покидающих жидкость в единицу времени, зависит только от температуры, и сжатие пара это число не меняет. Процесс продолжается до тех пор, пока вновь не установится динамическое равновесие и плотность пара, а значит, и концентрация его молекул не примут прежних своих значений. Следовательно, *концентрация молекул насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от его объема*.

Так как давление пропорционально концентрации молекул ($p=nkT$), то из этого определения следует, что давление насыщенного пара не зависит от занимаемого им объема.

Давление $p_{н.п.}$ пара, при котором жидкость находится в равновесии со своим паром, называют **давлением насыщенного пара**.

При сжатии насыщенного пара все большая часть его переходит в жидкое состояние. Жидкость данной массы занимает меньший объем, чем пар той же массы. В результате объем пара при неизменной его плотности уменьшается.

Отметим еще один важный факт. Очевидно, газовые законы для насыщенного пара несправедливы (при любом объеме при постоянной температуре давление насыщенного пара одинаково). В то же время состояние насыщенного пара достаточно точно описывается уравнением Менделеева - Клапейрона.

Ненасыщенный пар. Если пар постепенно сжимают, а превращение его в жидкость не происходит, то такой пар называют **ненасыщенным**. При определенном объеме пар становится насыщенным, и при дальнейшем его сжатии происходит превращение его в жидкость. В этом случае над жидкостью уже будет находиться насыщенный пар.

Однако пар превращается в жидкость не при любой температуре. Если температура выше некоторого значения, то, как бы мы ни сжимали газ, он никогда не превратится в жидкость. Максимальная температура, при которой пар еще может превратиться в жидкость, называется **критической температурой**.

Состояние вещества при температуре выше критической называется газом; при температуре ниже критической, когда у пара есть возможность превратиться в жидкость, - паром.

Каждому веществу соответствует своя критическая температура, у гелия $T_{кр}=4 \text{ К}$, у азота $T_{кр}=126 \text{ К}$. Свойства насыщенного и ненасыщенного пара различны.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Кипение

Жидкость не только испаряется. При некоторой температуре она кипит.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Состояние насыщенного пара, как показывает опыт (мы говорили об этом в предыдущем параграфе), приближенно описывается уравнением состояния идеального газа (10.4), а его давление определяется формулой

$$p_{н.п.} = nkT. \quad (11.1)$$

С ростом температуры давление растет. Так как давление насыщенного пара не зависит от объема, то, следовательно, оно зависит только от температуры.

Однако зависимость $p_{н.п.}$ от T , найденная экспериментально, не является прямо пропорциональной, как у идеального газа при постоянном объеме. С увеличением температуры давление реального насыщенного пара растет быстрее, чем давление идеального газа (рис. 11.1, участок кривой AB). Это становится очевидным, если провести изохоры идеального газа через точки A и B (штриховые прямые). Почему это происходит?

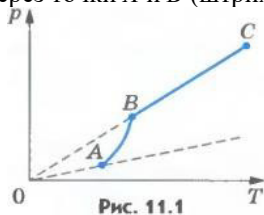


Рис. 11.1

При нагревании жидкости в закрытом сосуде часть жидкости превращается в пар. В результате согласно формуле (11.1) *давление насыщенного пара растет не только вследствие повышения температуры жидкости, но и вследствие увеличения концентрации молекул (плотности) пара*. В основном увеличение давления при повышении температуры определяется именно увеличением концентрации. Главное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара состоит в том, что при изменении температуры пара в закрытом сосуде (или при изменении объема при постоянной температуре) меняется масса пара. Жидкость частично превращается в пар, или, напротив, пар частично конденсируется. С идеальным газом ничего подобного не происходит.

Когда вся жидкость испарится, пар при дальнейшем нагревании перестанет быть насыщенным и его давление при постоянном объеме будет возрастать прямо пропорционально абсолютной температуре (см. рис. 11.1, участок кривой BC).

Кипение. По мере увеличения температуры жидкости интенсивность испарения увеличивается. Наконец, жидкость начинает кипеть. При кипении по всему объему жидкости образуются быстро растущие пузырьки пара, которые всплывают на поверхность. Температура кипения жидкости остается постоянной. Это происходит потому, что вся подводимая к жидкости энергия расходуется на превращение ее в пар. При каких условиях начинается кипение?

В жидкости всегда присутствуют растворенные газы, выделяющиеся на дне и стенках сосуда, а также на взвешенных в жидкости пылинках, которые являются центрами парообразования. Пары жидкости, находящиеся внутри пузырьков, являются насыщенными. С увеличением температуры давление насыщенных паров возрастает и пузырьки увеличиваются в размерах. Под действием выталкивающей силы они всплывают вверх. Если верхние слои жидкости имеют более низкую температуру, то в этих слоях происходит конденсация пара в пузырьках. Давление стремительно падает, и пузырьки захлопываются. Захлопывание происходит настолько быстро, что стенки пузырька, сталкиваясь, производят нечто вроде взрыва. Множество таких микровзрывов создает характерный шум. Когда жидкость достаточно прогреется, пузырьки перестанут захлопываться и всплывут на поверхность. Жидкость закипит. Понаблюдайте внимательно за чайником на плите. Вы обнаружите, что перед закипанием он почти перестает шуметь.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры объясняет, почему температура кипения жидкости зависит от давления на ее поверхность. Пузырек пара может расти, когда давление насыщенного пара внутри него немного превосходит давление в жидкости, которое складывается из давления воздуха на поверхность жидкости (внешнее давление) и гидростатического давления столба жидкости.

Обратим внимание на то, что испарение жидкости происходит при температурах, меньших температуры кипения, и только с поверхности жидкости, при кипении образование пара происходит по всему объему жидкости.

Кипение начинается при температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках сравнивается с давлением в жидкости.

Чем больше внешнее давление, тем выше температура кипения. Так, в паровом котле при давлении, достигающем $1,6 \cdot 10^6$ Па, вода не кипит и при температуре 200°C . В медицинских учреждениях в герметически закрытых сосудах - автоклавах кипение воды также происходит при повышенном давлении. Поэтому температура кипения жидкости значительно выше 100°C . Автоклавы применяют для стерилизации хирургических инструментов и др.

И наоборот, *уменьшая внешнее давление, мы тем самым понижаем температуру кипения.* Откачивая насосом воздух и пары воды из колбы, можно заставить воду кипеть при комнатной температуре. При подъеме в горы атмосферное давление уменьшается, поэтому уменьшается температура кипения. На высоте 7134 м (пик Ленина на Памире) давление приблизительно равно $4 \cdot 10^4$ Па (300 мм рт. ст.). Вода кипит там примерно при 70°C . Сварить мясо в этих условиях невозможно.

У каждой жидкости своя температура кипения, которая зависит от давления ее насыщенного пара. Чем выше давление насыщенного пара, тем ниже температура кипения жидкости, так как при меньших температурах давление насыщенного пара становится равным атмосферному. Например, при температуре кипения 100°C давление насыщенных паров воды равно 101 325 Па (760 мм рт. ст.), а паров ртути - всего лишь 117 Па (0,88 мм рт. ст.). Кипит ртуть при температуре 357°C при нормальном давлении.

Жидкость закипает, когда давление ее насыщенного пара становится равно давлению внутри жидкости.

Влажность воздуха

Вода занимает около 70,8% поверхности земного шара. Живые организмы содержат от 50 до 99,7% воды. Образно говоря, живые организмы - это одушевленная вода. В атмосфере находится около 13-15 тыс. км³ воды в виде капель, кристаллов снега и водяного пара. Атмосферный водяной пар влияет на погоду и климат Земли.

Водяной пар в атмосфере. Водяной пар в воздухе, несмотря на огромные поверхности океанов, морей, озер и рек, далеко не всегда является насыщенным. Перемещение воздушных масс приводит к тому, что в одних местах нашей планеты в данный момент испарение воды преобладает над конденсацией, а в других, наоборот, преобладает конденсация. Но в воздухе практически всегда имеется некоторое количество водяного пара.

Содержание водяного пара в воздухе, т. е. его влажность, можно характеризовать несколькими величинами.

Плотность водяного пара в воздухе называется **абсолютной влажностью**. Абсолютная влажность измеряется, следовательно, в килограммах на метр кубический (кг/м³).

Парциальное давление водяного пара. Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов и водяного пара. Каждый из газов вносит свой вклад в суммарное давление, производимое воздухом на находящиеся в нем тела. Давление, которое производил бы водяной пар, если бы все остальные газы отсутствовали, называют **парциальным давлением водяного пара**. Парциальное давление водяного пара принимают за один из показателей влажности воздуха. Его выражают в единицах давления - паскалях или миллиметрах ртутного столба.

Атмосферное давление определяется суммой парциальных давлений компонент сухого воздуха (кислорода, азота и т. д.) и водяного пара.

Относительная влажность. По парциальному давлению водяного пара и абсолютной влажности еще нельзя судить о том, насколько водяной пар в данных условиях близок к насыщению. А именно от этого зависит интенсивность испарения воды и потеря влаги живыми организмами. Вот почему вводят величину, показывающую, насколько водяной пар при данной температуре близок к насыщению, - *относительную влажность*.

Относительной влажностью воздуха называют отношение парциального давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению $p_{н.п.}$ насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{p}{p_{н.п.}} \cdot 100\%, \quad (11.2)$$

Относительная влажность воздуха обычно меньше 100%.

Психрометр. Влажность воздуха измеряют с помощью специальных приборов. Мы расскажем об одном из них - *психрометре*.

Психрометр состоит из двух термометров (рис.11.4). Резервуар одного из них остается сухим, и он показывает температуру воздуха. Резервуар другого окружен полоской ткани, конец которой опущен в воду. Вода испаряется, и благодаря этому термометр охлаждается. Чем больше относительная влажность, тем менее интенсивно идет испарение и температура, показываемая термометром, окруженным влажной тканью, ближе к температуре сухого термометра.

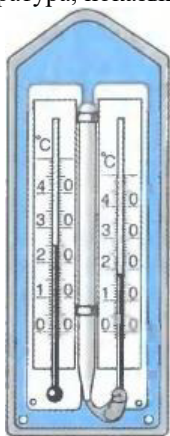


Рис. 11.4

При относительной влажности, равной 100%, вода вообще не будет испаряться и показания обоих термометров будут одинаковы. По разности температур этих термометров с помощью специальных таблиц можно определить влажность воздуха.

Значение влажности. От влажности зависит интенсивность испарения влаги с поверхности кожи человека. А испарение влаги имеет большое значение для поддержания температуры тела постоянной. В космических кораблях поддерживается наиболее благоприятная для человека относительная влажность воздуха (40-60%).

Очень важно знать влажность в метеорологии - в связи с предсказанием погоды. Хотя относительное количество водяного пара в атмосфере сравнительно невелико (около 1%), роль его в атмосферных явлениях значительна. Конденсация водяного пара приводит к образованию облаков и последующему выпадению осадков. При этом выделяется большое количество теплоты. И наоборот, испарение воды сопровождается поглощением теплоты.

В ткацком, кондитерском и других производствах для нормального течения процесса необходима определенная влажность.

Хранение произведений искусства и книг требует поддержания влажности воздуха на необходимом уровне. Поэтому в музеях на стенах вы можете видеть психрометры.

Важно знать не абсолютное количество водяного пара в атмосфере, а относительное. Относительную влажность измеряют психрометром.

Кристаллические тела

Твердые тела сохраняют не только свой объем, как жидкости, но и форму. Они находятся преимущественно в кристаллическом состоянии.

Кристаллы - это твердые тела, атомы или молекулы которых занимают определенные, упорядоченные положения в пространстве. Поэтому кристаллы имеют плоские грани. Например, крупинка обычной поваренной соли имеет плоские грани, составляющие друг с другом прямые углы (рис.12.1).



Рис. 12.1

Это можно заметить, рассматривая соль с помощью лупы. А как геометрически правильна форма снежинки! В ней также отражена геометрическая правильность внутреннего строения кристаллического твердого тела - льда (рис.12.2).

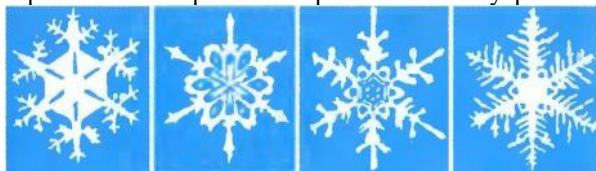


Рис. 12.2

Анизотропия кристаллов. Однако правильная внешняя форма не единственное и даже не самое главное следствие упорядоченного строения кристалла. Главное - это *зависимость физических свойств кристалла от выбранного направления*.

Прежде всего бросается в глаза различная механическая прочность кристаллов по разным направлениям. Например, кусок слюды легко расслаивается в одном из направлений на тонкие пластинки, но разорвать его в направлении, перпендикулярном пластинкам, гораздо труднее.

Так же легко расслаивается в одном направлении кристалл графита. Когда вы пишете карандашом, такое расслоение происходит непрерывно и тонкие слои графита остаются на бумаге. Это происходит потому, что кристаллическая решетка графита имеет слоистую структуру. Слои образованы рядом параллельных сеток, состоящих из атомов углерода. Атомы располагаются в вершинах правильных шестиугольников. Расстояние между слоями сравнительно велико - примерно в 2 раза больше, чем длина стороны шестиугольника, поэтому связи между слоями менее прочны, чем связи внутри них.

Многие кристаллы по-разному проводят тепло и электрический ток в различных направлениях. От направления зависят и оптические свойства кристаллов. Так, кристалл кварца по-разному преломляет свет в зависимости от направления падающих на него лучей.

Зависимость физических свойств от направления внутри кристалла называют **анизотропией**. Все кристаллические тела анизотропны.

Монокристаллы и поликристаллы. Кристаллическую структуру имеют металлы. Именно металлы преимущественно используются в настоящее время для изготовления орудий труда, различных машин и механизмов.

Если взять сравнительно большой кусок металла, то на первый взгляд его кристаллическое строение никак не проявляется ни во внешнем виде этого куска, ни в его физических свойствах. Металлы в обычном состоянии не обнаруживают анизотропии.

Дело здесь в том, что обычно металл состоит из огромного количества сросшихся друг с другом маленьких кристалликов. Под микроскопом или даже с помощью лупы их нетрудно рассмотреть, особенно на свежем изломе металла (рис.12.5). Свойства каждого кристаллика зависят от направления, но кристаллики ориентированы по отношению друг к другу беспорядочно. В результате в объеме, значительно превышающем объем отдельных кристалликов, все направления внутри металлов равноправны и свойства металлов одинаковы по всем направлениям.

Твердое тело, состоящее из большого числа маленьких кристалликов, называют *поликристаллическим*. Одиночные кристаллы называют *монокристаллами*.

Соблюдая большие предосторожности, можно вырастить металлический кристалл больших размеров - монокристалл.

В обычных условиях поликристаллическое тело образуется в результате того, что начавшийся рост многих кристаллов продолжается до тех пор, пока они не приходят в соприкосновение друг с другом, образуя единое тело.

К поликристаллам относятся не только металлы. Кусок сахара, например, также имеет поликристаллическую структуру.

Большинство кристаллических тел - поликристаллы, так как они состоят из множества сросшихся кристаллов. Одиночные кристаллы - монокристаллы имеют правильную геометрическую форму, и их свойства различны по разным направлениям (анизотропия).

Аморфные тела

Не все твердые тела - кристаллы. Существует множество аморфных тел. Чем они отличаются от кристаллов?

У аморфных тел нет строгого порядка в расположении атомов. Только ближайшие атомы-соседи располагаются в некотором порядке. Но строгой повторяемости по всем направлениям одного и того же элемента структуры, которая характерна для кристаллов, в аморфных телах нет.

По расположению атомов и по их поведению аморфные тела аналогичны жидкостям.

Часто одно и то же вещество может находиться как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии. Например, кварц SiO_2 может быть как в кристаллической, так и в аморфной форме (кремнезем). Кристаллическую форму кварца схематически можно представить в виде решетки из правильных шестиугольников (рис.12.6, а). Аморфная структура кварца также имеет вид решетки, но неправильной формы. Наряду с шестиугольниками в ней встречаются пяти- и семиугольники (рис.12.6, б).

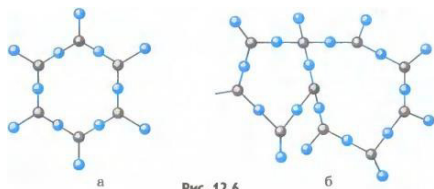


Рис. 12.6

Свойства аморфных тел. Все аморфные тела изотропны, т. е. их физические свойства одинаковы по всем направлениям. К аморфным телам относятся стекло, смола, канифоль, сахарный леденец и др.

При внешних воздействиях аморфные тела обнаруживают одновременно упругие свойства, подобно твердым телам, и текучесть, подобно жидкости. Так, при кратковременных воздействиях (ударах) они ведут себя как твердые тела и при сильном ударе раскалываются на куски. Но при очень продолжительном воздействии аморфные тела текут. В этом вы можете убедиться сами, если запасетесь терпением. Проследите за куском смолы, который лежит на твердой поверхности. Постепенно смола по ней растекается, и, чем выше температура смолы, тем быстрее это происходит.

Атомы или молекулы аморфных тел, подобно молекулам жидкости, имеют определенное время «оседлой жизни» - время колебаний около положения равновесия. Но в отличие от жидкостей это время у них весьма велико.

Так, для вара при $t = 20^\circ\text{C}$ время «оседлой жизни» примерно 0,1 с. В этом отношении аморфные тела близки к кристаллическим, так как перескоки атомов из одного положения равновесия в другое происходят сравнительно редко.

Аморфные тела при низких температурах по своим свойствам напоминают твердые тела. Текучестью они почти не обладают, но по мере повышения температуры постепенно размягчаются и их свойства все более и более приближаются к свойствам жидкостей. Это происходит потому, что с ростом температуры постепенно учащаются перескоки атомов из одного положения равновесия в другое. *Определенной температуры плавления у аморфных тел, в отличие от кристаллических, нет.*

Жидкие кристаллы. В природе встречаются вещества, обладающие одновременно основными свойствами кристалла и жидкости, а именно анизотропией и текучестью. Такое состояние вещества называется *жидкокристаллическим*. Жидкими кристаллами являются в основном органические вещества, молекулы которых имеют длинную нитевидную форму или форму плоских пластин.

Рассмотрим наиболее простой случай, когда жидкий кристалл образуется нитевидными молекулами. Эти молекулы расположены параллельно друг другу, однако беспорядочно сдвинуты, т. е. порядок, в отличие от обычных кристаллов, существует только в одном направлении.

При тепловом движении центры этих молекул движутся хаотически, однако ориентация молекул не изменяется, и они остаются параллельны самим себе. Строгая ориентация молекул существует не во всем объеме кристалла, а в небольших областях, называемых доменами. На границе доменов происходит преломление и отражение света, поэтому жидкие кристаллы непрозрачны. Однако в слое жидкого кристалла, помещенном между двумя тонкими пластинами, расстояния между которыми 0,01-0,1 мм, с параллельными углублениями 10-100 нм, все молекулы будут параллельны и кристалл станет прозрачным. Если на какие-то участки жидкого кристалла подать электрическое напряжение, то жидкокристаллическое состояние нарушается. Эти участки становятся непрозрачными и начинают светиться, а участки без напряжения остаются темными. Это явление используется при создании жидкокристаллических экранов телевизоров. Нужно отметить, что сам экран состоит из огромного числа элементов и электронная схема управления таким экраном чрезвычайно сложна.

Физика твердого тела. Человечество всегда использовало и будет использовать твердые тела. Но если раньше физика твердого тела отставала от развития технологии, основанной на непосредственном опыте, то теперь положение изменилось. Теоретические исследования приводят к созданию твердых тел, свойства которых совершенно необычны.

Получить такие тела методом проб и ошибок было бы невозможно. Создание транзисторов, о которых пойдет речь в дальнейшем, - яркий пример того, как понимание структуры твердых тел привело к революции во всей радиотехнике.

Получение материалов с заданными механическими, магнитными, электрическими и другими свойствами - одно из основных направлений современной физики твердого тела. Примерно половина физиков мира работают сейчас в этой области физики.

Аморфные тела занимают промежуточное положение между кристаллическими твердыми телами и жидкостями. Их атомы или молекулы располагаются в относительном порядке. Понимание структуры твердых тел (кристаллических и аморфных) позволяет создавать материалы с заданными свойствами.

Лекция №6

Тема: «Основы термодинамики»

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Внутренняя энергия и работа газа.
- 1.2. Первый закон термодинамики. Адиабатный процесс.
- 1.3. Тепловые двигатели и охрана окружающей среды. КПД тепловых двигателей.
- 1.4. Необратимость тепловых процессов. Второй закон термодинамики.

2. Краткое содержание вопросов

Термодинамика была создана в середине XIX в. после открытия закона сохранения энергии. В ее основе лежит понятие *внутренняя энергия*.

Внутренняя энергия в молекулярно-кинетической теории. В середине XIX в. было доказано, что наряду с механической энергией макроскопические тела обладают еще и энергией, заключенной внутри самих тел. Эта *внутренняя энергия* входит в баланс энергетических превращений в природе. После открытия внутренней энергии был сформулирован закон сохранения и превращения энергии.

Что такое внутренняя энергия?

Когда скользящая по льду шайба останавливается под действием силы трения, то ее механическая (кинетическая) энергия не просто исчезает, а передается беспорядочно движущимся молекулам льда и шайбы. Неровности поверхностей трущихся тел деформируются при движении, и интенсивность беспорядочного движения молекул возрастает. Оба тела нагреваются, что и означает увеличение их внутренней энергии.

Нетрудно наблюдать и обратный переход внутренней энергии в механическую. Если нагревать воду в пробирке, закрытой пробкой, то внутренняя энергия воды и внутренняя энергия пара начнут возрастать. Давление пара увеличится настолько, что пробка будет выбита. Кинетическая энергия пробки увеличится за счет внутренней энергии пара. Расширяясь, водяной пар совершает работу и охлаждается. Его внутренняя энергия при этом уменьшается.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории **внутренняя энергия макроскопического тела равна сумме кинетических энергий беспорядочного движения всех молекул (или атомов) тела и потенциальных энергий взаимодействия всех молекул друг с другом (но не с молекулами других тел).**

Вычислить внутреннюю энергию тела (или ее изменение), учитывая движение отдельных молекул и их положения относительно друг друга, практически невозможно из-за огромного числа молекул в макроскопических телах. Поэтому необходимо уметь определять значение внутренней энергии (или ее изменение) в зависимости от макроскопических параметров, которые можно непосредственно измерить.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа. Наиболее прост по своим свойствам одноатомный газ, состоящий из отдельных атомов, а не молекул. Одноатомными являются инертные газы - гелий, неон, аргон и др. Вычислим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа.

Так как молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, то их потенциальная энергия равна нулю. Вся внутренняя энергия идеального газа определяется кинетической энергией беспорядочного движения его молекул.

Для вычисления внутренней энергии идеального одноатомного газа массой m нужно умножить среднюю кинетическую энергию одного атома на число атомов. Учитывая, что $kN_A = R$, получим формулу для внутренней энергии идеального газа:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (13.1)$$

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Она не зависит от объема и других макроскопических параметров системы.

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1),$$

Изменение внутренней энергии идеального газа равно ΔU , т.е. определяется температурами начального и конечного состояний газа и не зависит от процесса.

Если идеальный газ состоит из более сложных молекул, чем одноатомный, то его внутренняя энергия также пропорциональна абсолютной температуре, но коэффициент пропорциональности между U и T другой. Объясняется это тем, что сложные молекулы не только *движутся поступательно*, но и *вращаются*. Внутренняя энергия таких газов равна сумме энергий поступательного и вращательного движений молекул.

Зависимость внутренней энергии от макроскопических параметров. Мы установили, что внутренняя энергия идеального газа зависит от одного параметра - температуры. От объема внутренняя энергия идеального газа не зависит потому, что потенциальная энергия взаимодействия его молекул равна нулю.

У реальных газов, жидкостей и твердых тел средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул *не равна нулю*. Правда, для газов она много меньше средней кинетической энергии молекул, но для твердых и жидких тел сравнима с ней.

Средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул газа зависит от объема вещества, так как при изменении объема меняется среднее расстояние между молекулами. Следовательно, *внутренняя энергия реального газа в термодинамике в общем случае зависит, наряду с температурой T , и от объема V .*

Значения макроскопических параметров (температуры T , объема V и др.) однозначно определяют состояние тел. Поэтому они определяют и внутреннюю энергию макроскопических тел.

Внутренняя энергия U макроскопических тел однозначно определяется параметрами, характеризующими состояние этих тел: температурой и объемом.

В основе термодинамики лежит понятие внутренней энергии. Эта энергия зависит от макроскопических параметров: температуры и объема.

Внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Работа в термодинамике

В термодинамике движение тела как целого не рассматривается, речь идет о перемещении частей макроскопического тела друг относительно друга. В результате может меняться объем тела, а его скорость остается

равной нулю. Работа в термодинамике определяется так же, как и в механике, но она равна не изменению кинетической энергии тела, а изменению его внутренней энергии.

Изменение внутренней энергии при совершении работы. Почему при сжатии или расширении тела меняется его внутренняя энергия тела? Почему, в частности, нагревается воздух при накачивании велосипедной шины?

Причина изменения температуры газа в процессе его сжатия состоит в следующем: *при упругих соударениях молекул газа с движущимся поршнем изменяется их кинетическая энергия.* Так, при движении навстречу молекулам газа поршень во время столкновений передает им часть своей механической энергии, в результате чего газ нагревается. Поршень действует подобно футболисту, встречающему летящий мяч ударом ноги. Нога сообщает мячу скорость, значительно большую той, которой он обладал до удара.

И наоборот, если газ расширяется, то после столкновения с удаляющимся поршнем скорости молекул уменьшаются, в результате чего газ охлаждается. Так же действует и футболист, для того чтобы уменьшить скорость летящего мяча или остановить его, - нога футболиста движется от мяча, как бы уступая ему дорогу.

При сжатии или расширении меняется и средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул, так как при этом меняется среднее расстояние между молекулами.

Работа A , совершаемая внешними телами над газом, отличается от работы самого газа A' только знаком: $A = -A'$, так как сила $\vec{F}$, действующая на газ, направлена против силы $\vec{F}'$ а перемещение поршня остается тем же самым. Поэтому работа внешних сил, действующих на газ, равна:

$$A = -A' = -p\Delta V. \quad (13.4)$$

При сжатии газа, когда $\Delta V = V_2 - V_1 < 0$, работа внешней силы оказывается положительной. Так и должно быть: при сжатии газа направления силы и перемещения точки ее приложения совпадают.

Если давление не поддерживать постоянным, то при расширении газ теряет энергию и передает ее окружающим телам: поднимающемуся поршню, воздуху и т. д. Газ при этом охлаждается. При сжатии газа, наоборот, внешние тела передают ему энергию и газ нагревается.

Количество теплоты

Изменить внутреннюю энергию газа в цилиндре можно, не только совершая работу, но и нагревая газ.

Если закрепить поршень (рис. 13.5), то объем газа при нагревании не меняется и работа не совершается. Но температура газа, а следовательно, и его внутренняя энергия возрастают.

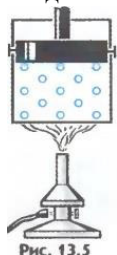


Рис. 13.5

Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы называют *теплообменом* или *теплопередачей*.

Количественную меру изменения внутренней энергии при теплообмене называют **количеством теплоты**. Количеством теплоты называют также энергию, которую тело отдает в процессе теплообмена.

При теплообмене не происходит превращения энергии из одной формы в другую, часть внутренней энергии горячего тела передается холодному телу.

Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики - это закон сохранения энергии, распространенный на тепловые явления. Он показывает, от каких причин зависит изменение внутренней энергии.

Закон сохранения энергии. К середине XIX в. многочисленные опыты доказали, что *механическая энергия никогда не пропадает бесследно*. Падает, например, молот на кусок свинца, и свинец нагревается вполне определенным образом. Силы трения тормозят тела, которые при этом разогреваются.

На основании множества подобных наблюдений и обобщения опытных фактов был сформулирован **закон сохранения энергии**:

Энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает: количество энергии неизменно, она только переходит из одной формы в другую.

Закон сохранения энергии управляет всеми явлениями природы и связывает их воедино. Он всегда выполняется абсолютно точно, неизвестно ни одного случая, когда бы этот великий закон не выполнялся.

Этот закон был открыт в середине XIX в. немецким ученым, врачом по образованию Р. Майером (1814-1878), английским ученым Дж. Джоулем (1818-1889) и получил наиболее точную формулировку в трудах немецкого ученого Г. Гельмгольца (1821-1894).

Первый закон термодинамики. Закон сохранения и превращения энергии, распространенный на тепловые явления, носит название *первого закона термодинамики*.

В термодинамике рассматриваются тела, положение центра тяжести которых практически не меняется. Механическая

энергия таких тел остается постоянной, изменяться может лишь внутренняя энергия каждого тела.

До сих пор мы рассматривали процессы, в которых внутренняя энергия системы изменялась либо за счет совершения работы, либо за счет теплообмена с окружающими телами.

В общем случае при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия изменяется одновременно как за счет совершения работы, так и за счет передачи теплоты. **Первый закон** термодинамики формулируется именно для таких общих случаев:

Изменение внутренней энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:

$$\Delta U = A + Q. \quad (13.10)$$

Если система является изолированной, то работа внешних сил равна нулю ($A = 0$) и система не обменивается теплотой с окружающими телами ($Q = 0$). В этом случае согласно первому закону термодинамики $\Delta U = U_2 - U_1 = 0$ или $U_1 = U_2$. Внутренняя энергия изолированной системы остается неизменной (сохраняется).

Часто вместо работы A внешних тел над системой рассматривают работу A' системы над внешними телами. Учитывая, что $A' = -A$, первый закон термодинамики (13.10) можно записать так:

$$Q = \Delta U + A'. \quad (13.11)$$

Количество теплоты, переданное системе, идет на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

Невозможность создания вечного двигателя. Из первого закона термодинамики вытекает невозможность создания вечного двигателя - устройства, способного совершать неограниченное количество работы без затрат топлива или каких-либо других материалов. Если к системе не поступает тепло ($Q=0$), то работа A' согласно уравнению (13.11) может быть совершена только за счет убыли внутренней энергии: $A' = -\Delta U$. После того как запас энергии окажется исчерпанным, двигатель перестанет работать.

Работа и количество теплоты - характеристики процесса изменения внутренней энергии. В данном состоянии система всегда обладает определенной внутренней энергией.

Но нельзя говорить, что в системе содержится определенное количество теплоты или работы. Как работа, так и количество теплоты являются величинами, характеризующими изменение внутренней энергии системы в результате того или иного процесса.

Внутренняя энергия системы может измениться одинаково как за счет совершения системой работы, так и за счет передачи окружающим телам какого-либо количества теплоты. Например, нагретый газ в цилиндре может уменьшить свою энергию остывая, без совершения работы. Но он может потерять точно такое же количество энергии, перемещая поршень, без отдачи теплоты окружающим телам. Для этого стенки цилиндра и поршень должны быть теплонепроницаемыми.

Применение первого закона термодинамики к различным процессам

С помощью первого закона термодинамики можно делать важные заключения о характере протекающих процессов. Рассмотрим различные процессы, при которых одна из физических величин остается неизменной (изопроцессы), например случай, когда система представляет собой идеальный газ.

Изохорный процесс. При изохорном процессе объем газа не меняется, и поэтому работа газа равна нулю. Изменение внутренней энергии газа согласно уравнению (13.11) равно количеству переданной ему теплоты:

$$\Delta U = Q. \quad (13.12)$$

Если газ нагревается, то $Q > 0$ и $\Delta U > 0$, его внутренняя энергия увеличивается. При охлаждении газа $Q < 0$ и $\Delta U = U_2 - U_1 < 0$, изменение внутренней энергии отрицательно и внутренняя энергия газа уменьшается.

Изотермический процесс. При изотермическом процессе ($T = \text{const}$) внутренняя энергия идеального газа (см. формулу (13.1)) не меняется. Согласно формуле (13.11) все переданное газу количество теплоты идет на совершение работы:

$$Q = A'. \quad (13.13)$$

Если газ получает тепло ($Q > 0$), то он совершает положительную работу ($A' > 0$). Если, напротив, газ отдает тепло окружающей среде (термостату), то $Q < 0$ и $A' < 0$. Работа же внешних сил над газом в последнем случае положительна.

Изобарный процесс. При изобарном процессе согласно формуле (13.11) передаваемое газу количество теплоты идет на изменение его внутренней энергии и на совершение им работы при постоянном давлении:

$$Q = \Delta U + A' = \Delta U + p\Delta V.$$

Адиабатный процесс. Рассмотрим теперь процесс, протекающий в системе, которая не обменивается теплом с окружающими телами. Процесс в теплоизолированной системе называют **адиабатным**.

При адиабатном процессе $Q=0$ и согласно уравнению (13.10) изменение внутренней энергии происходит только за счет совершения работы:

$$\Delta U = A. \quad (13.14)$$

Конечно, нельзя окружить систему оболочкой, абсолютно не допускающей теплопередачу. Но в ряде случаев можно считать реальные процессы очень близкими к адиабатным. Для этого они должны протекать достаточно быстро, так, чтобы за время процесса не произошло заметного теплообмена между системой и окружающими телами.

Согласно уравнению (13.14) при совершении над системой положительной работы, например при сжатии газа, его внутренняя энергия увеличивается, что означает повышение температуры газа. И наоборот, при расширении газа сам газ совершает положительную работу ($A' > 0$) и его внутренняя энергия уменьшается - газ охлаждается.

Нагревание воздуха при быстром сжатии нашло применение в двигателях Дизеля. В этих двигателях отсутствует система зажигания горючей смеси, необходимая для обычных карбюраторных двигателей внутреннего сгорания. В цилиндр засасывается не горючая смесь, а атмосферный воздух. К концу такта сжатия в цилиндр с помощью специальной форсунки впрыскивается жидкое топливо (рис.13.8). К этому моменту температура воздуха так велика, что горючее воспламеняется. Двигатели Дизеля имеют больший коэффициент полезного действия, чем обычные, но более массивны и сложны в изготовлении и эксплуатации. Все большее количество автомобилей снабжается двигателями Дизеля, благодаря дешевизне дизельного топлива.

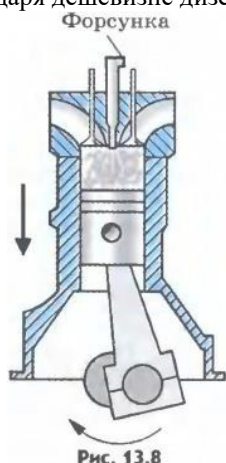


Рис. 13.8

При работе мощных компрессоров, сжимающих воздух, температура воздуха настолько увеличивается, что приходится прибегать к специальной системе охлаждения цилиндров. Адиабатное охлаждение газов при их расширении используется в машинах для сжижения газов.

Охлаждение газа при адиабатном расширении происходит в грандиозных масштабах в атмосфере Земли. Нагретый воздух поднимается вверх и расширяется, так как атмосферное давление падает с увеличением высоты. Это расширение сопровождается значительным охлаждением. В результате водяные пары конденсируются и образуют облака.

Теплообмен в изолированной системе. Рассмотрим теплообмен внутри системы, состоящей из нескольких тел, имеющих первоначально различные температуры, например теплообмен между водой в сосуде и опущенным в воду горячим железным шариком. Будем считать, что система достаточно изолирована от окружающих тел и ее внутренняя энергия не изменяется (изолированная система). Никакой работы внутри этой системы не совершается. Тогда согласно первому закону термодинамики (см. уравнение (13.10)) изменение энергии любого тела системы равно количеству теплоты, отданной или полученной этим телом до наступления теплового равновесия внутри системы. Складывая подобные выражения для всех тел системы и учитывая, что суммарная внутренняя энергия не

меняется ($\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots = 0$), получим следующее уравнение:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0. \quad (13.15)$$

Это уравнение носит название **уравнения теплового баланса**. Здесь Q_1, Q_2, Q_3 - количества теплоты, полученные или отданные телами. Эти количества теплоты выражаются формулой (13.5) или формулами (13.6)-(13.9), если в процессе теплообмена происходят превращения вещества из жидкого состояния в газообразное или твердое (или же, напротив, образуется жидкость).

Внутренняя энергия идеального газа не изменяется только при изотермическом процессе. При изохорном она изменяется за счет теплопередачи, а при изобарном процессе внутренняя энергия газа изменяется как за счет теплопередачи, так и за счет совершения работы. В теплоизолированной системе происходит адиабатный процесс. Изменение энергии системы в этом процессе равно работе внешних сил.

Необратимость процессов в природе

Закон сохранения энергии утверждает, что количество энергии при любых ее превращениях остается неизменным. Между тем многие процессы, вполне допустимые с точки зрения закона сохранения энергии, никогда не протекают в действительности.

Примеры необратимых процессов. Нагретые тела постепенно остывают, передавая свою энергию более холодным окружающим телам. Обратный процесс передачи теплоты от холодного тела к горячему не противоречит закону сохранения энергии, если количество теплоты, отданное холодным телом, равно количеству теплоты, полученному горячим, но такой процесс самопроизвольно никогда не происходит.

Общее заключение о необратимости процессов в природе. Переход тепла от горячего тела к холодному и механической энергии во внутреннюю - это примеры наиболее типичных необратимых процессов. Число подобных примеров можно увеличивать практически неограниченно. Все они говорят о том, что процессы в природе имеют определенную направленность, никак не отраженную в первом законе термодинамики. *Все макроскопические процессы в природе протекают только в одном определенном направлении.* В обратном направлении они самопроизвольно протекать не могут. Все процессы в природе необратимы, и самые трагические из них - старение и смерть организмов.

Точная формулировка понятия необратимого процесса. Для правильного понимания существа необратимости процессов необходимо сделать следующее уточнение: **необратимыми** называются такие процессы, которые могут самопроизвольно протекать лишь в одном определенном направлении; в обратном направлении они могут протекать только при внешнем воздействии. Так, можно вновь увеличить размах колебаний маятника, подтолкнув его рукой. Но это увеличение возникает не само собой, а становится возможным в результате более сложного процесса, включающего движение руки.

Математически необратимость механических процессов выражается в том, что уравнения движения макроскопических тел изменяются с изменением знака времени. Они, как говорят в таких случаях, не инвариантны при преобразовании $t \rightarrow -t$. Ускорение не меняет знака при замене $t \rightarrow -t$. Силы, зависящие от расстояний, также не изменяют знака. Знак при замене t на $-t$ меняется у скорости. Именно поэтому при совершении работы силами трения, зависящими от скорости, кинетическая энергия тела необратимо переходит во внутреннюю.

Кино «наоборот». Яркой иллюстрацией необратимости явлений в природе служит просмотр кинофильма в обратном направлении. Например, прыжок в воду будет при этом выглядеть следующим образом. Спокойная вода в бассейне начинает бурлить, появляются ноги, стремительно движущиеся вверх, а затем и весь ныряльщик. Поверхность воды быстро успокаивается. Постепенно скорость ныряльщика уменьшается, и вот уже он спокойно стоит на вышке. То, что мы видим на экране, могло бы происходить в действительности, если бы процессы можно было обратить.

Нелепость происходящего на экране происходит из того, что мы привыкли к определенной направленности процессов и не сомневаемся в невозможности их обратного течения. А ведь такой процесс, как вознесение ныряльщика на вышку из воды, не противоречит ни закону сохранения энергии, ни законам механики, ни вообще каким-либо законам, кроме *второго закона термодинамики.*

Второй закон термодинамики. Второй закон термодинамики указывает направление возможных энергетических превращений, т. е. направление процессов, и тем самым выражает необратимость процессов в природе. Этот закон был установлен путем непосредственного обобщения опытных фактов.

Есть несколько формулировок второго закона, которые, несмотря на внешнее различие, выражают, в сущности, одно и то же и поэтому равноценны.

Немецкий ученый Р. Клаузиус (1822-1888) сформулировал этот закон так: *невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или в окружающих телах.*

Здесь констатируется опытный факт определенной направленности теплопередачи: тепло само собой переходит всегда от горячих тел к холодным. Правда, в холодильных установках осуществляется теплопередача от холодного тела к более тепловому, но эта передача связана с другими изменениями в окружающих телах: охлаждение достигается за счет работы.

Важность этого закона в том, что из него можно вывести заключение о необратимости не только процесса теплопередачи, но и других процессов в природе. Если бы тепло в каких-либо случаях могло самопроизвольно передаваться от холодных тел к горячим, то это позволило бы сделать обратимыми и другие процессы.

Все процессы самопроизвольно протекают в одном определенном направлении. Они необратимы. Тепло всегда переходит от горячего тела к холодному, а механическая энергия макроскопических тел - во внутреннюю.

Направление процессов в природе указывается вторым законом термодинамики.

Принцип действия тепловых двигателей. Коэффициент полезного действия (КПД) тепловых двигателей

Запасы внутренней энергии в земной коре и океанах можно считать практически неограниченными. Но для решения практических задач располагать запасами энергии еще недостаточно. Необходимо еще уметь за счет энергии приводить в движение станки на фабриках и заводах, средства транспорта, тракторы и другие машины, вращать роторы генераторов электрического тока и т. д. Человечеству нужны двигатели - устройства, способные совершать работу. Большая часть двигателей на Земле - это *тепловые двигатели*. Тепловые двигатели - это устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую.

Принципы действия тепловых двигателей. Для того чтобы двигатель совершал работу, необходима разность давлений по обе стороны поршня двигателя или лопастей турбины. Во всех тепловых двигателях эта разность давлений достигается за счет повышения температуры рабочего тела (газа) на сотни или тысячи градусов по сравнению с температурой окружающей среды. Такое повышение температуры происходит при сгорании топлива.

Одна из основных частей двигателя - сосуд, наполненный газом, с подвижным поршнем. Рабочим телом у всех тепловых двигателей является газ, который совершает работу при расширении. Обозначим начальную температуру рабочего тела (газа) через T_1 . Эту температуру в паровых турбинах или машинах приобретает пар в паровом котле. В двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах повышение температуры происходит при сгорании топлива внутри самого двигателя. Температуру T_1 называют *температурой нагревателя.*

Роль холодильника. По мере совершения работы газ теряет энергию и неизбежно охлаждается до некоторой температуры T_2 , которая обычно несколько выше температуры окружающей среды. Ее называют *температурой*

холодильника. Холодильником является атмосфера или специальные устройства для охлаждения и конденсации отработанного пара - конденсаторы. В последнем случае температура холодильника может быть немного ниже температуры атмосферы.

Таким образом, в двигателе рабочее тело при расширении не может отдать всю свою внутреннюю энергию на совершение работы. Часть теплоты неизбежно передается холодильнику (атмосфере) вместе с отработанным паром или выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. Эта часть внутренней энергии теряется.

Тепловой двигатель совершает работу за счет внутренней энергии рабочего тела. Причем в этом процессе происходит передача теплоты от более горячих тел (нагревателя) к более холодным (холодильнику).

Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рисунке 13.11.

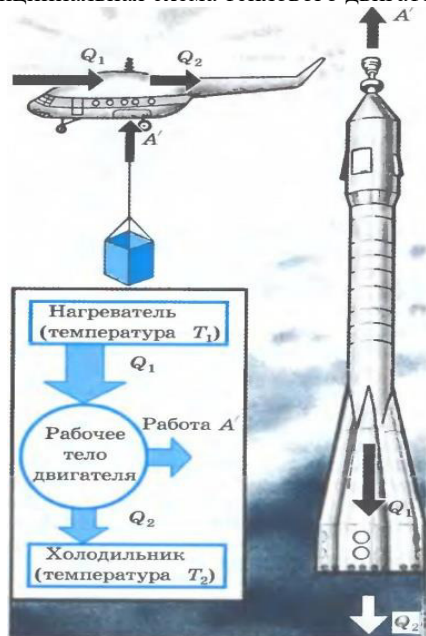


Рис. 13.11

Рабочее тело двигателя получает от нагревателя при сгорании топлива количество теплоты Q_1 , совершает работу A' и передает холодильнику количество теплоты $Q_2 < Q_1$.

Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя. Невозможность полного превращения внутренней энергии газа в работу тепловых двигателей обусловлена необратимостью процессов в природе. Если бы тепло могло самопроизвольно возвращаться от холодильника к нагревателю, то внутренняя энергия могла бы быть полностью превращена в полезную работу с помощью любого теплового двигателя.

Согласно закону сохранения энергии работа, совершаемая двигателем, равна:

$$A' = Q_1 - |Q_2|, \quad (13.17)$$

где Q_1 - количество теплоты, полученное от нагревателя, а Q_2 - количество теплоты, отданное холодильнику.

Коэффициентом полезного действия (КПД) теплового двигателя называют отношение работы A' , совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученной от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}. \quad (13.18)$$

Так как у всех двигателей некоторое количество теплоты передается холодильнику, то $\eta < 1$.

КПД теплового двигателя пропорционален разности температур нагревателя и холодильника. При $T_1 - T_2 = 0$ двигатель не может работать.

Максимальное значение КПД тепловых двигателей. Законы термодинамики позволяют вычислить максимально возможный КПД теплового двигателя, работающего с нагревателем, имеющим температуру T_1 , и холодильником с температурой T_2 . Впервые это сделал французский инженер и ученый Сад Карно (1796-1832) в труде «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824).

Карно придумал идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела. Идеальная тепловая машина Карно работает по циклу, состоящему из двух изотерм и двух адиабат. Сначала сосуд с газом приводят в контакт с нагревателем, газ изотермически расширяется, совершая положительную работу, при температуре T_1 , при этом он получает количество теплоты Q_1 .

Затем сосуд теплоизолируют, газ продолжает расширяться уже адиабатно, при этом его температура понижается до температуры холодильника T_2 . После этого газ приводят в контакт с холодильником, при изотермическом сжатии он отдает холодильнику количество теплоты Q_2 , сжимаясь до объема $V_4 < V_1$. Затем сосуд снова теплоизолируют, газ сжимается адиабатно до объема V_1 и возвращается в первоначальное состояние.

Карно получил для КПД этой машины следующее выражение:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (13.19)$$

Как и следовало ожидать, КПД машины Карно прямо пропорционален разности абсолютных температур нагревателя и холодильника.

Главное значение этой формулы состоит в том, что любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем, имеющим температуру T_1 , и холодильником с температурой T_2 , не может иметь КПД, превышающий КПД идеальной тепловой машины.

$$\frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Формула (13.19) дает теоретический предел для максимального значения КПД тепловых двигателей. Она показывает, что тепловой двигатель тем эффективнее, чем выше температура нагревателя и ниже температура холодильника. Лишь при температуре холодильника, равной абсолютному нулю, $\eta=1$.

Но температура холодильника практически не может быть ниже температуры окружающего воздуха. Повышать температуру нагревателя можно. Однако любой материал (твердое тело) обладает ограниченной теплостойкостью, или жаропрочностью. При нагревании он постепенно утрачивает свои упругие свойства, а при достаточно высокой температуре плавится.

Сейчас основные усилия инженеров направлены на повышение КПД двигателей за счет уменьшения трения их частей, потерь топлива вследствие его неполного сгорания и т. д. Реальные возможности для повышения КПД здесь все еще остаются большими. Так, для паровой турбины начальные и конечные температуры пара примерно таковы: $T_1 \approx 800$ К и $T_2 \approx 300$ К. При этих температурах максимальное значение коэффициента полезного действия равно:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \approx 0,62, \quad \eta_{\max} = 62\%.$$

Действительное же значение КПД из-за различного рода энергетических потерь приблизительно равно 40%. Максимальный КПД - около 44% - имеют двигатели Дизеля.

Повышение КПД тепловых двигателей и приближение его к максимально возможному - важнейшая техническая задача.

Тепловые двигатели совершают работу благодаря разности давлений газа на поверхностях поршней или лопастей турбины. Эта разность давлений создается с помощью разности температур. Максимально возможный КПД пропорционален этой разности температур и обратно пропорционален абсолютной температуре нагревателя.

Тепловой двигатель не может работать без холодильника, роль которого обычно играет атмосфера.

Лекция №7

Тема: «Электрическое поле»

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Электрический заряд. Взаимодействие заряженных тел.
- 1.2. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона.
- 1.3. Электрическое поле. Напряженность поля. Силовые линии.
- 1.4. Потенциал поля. Разность потенциалов. Проводники и диэлектрики в электрическом поле.
- 1.5. Электрическая емкость. Конденсатор.

2. Краткое содержание вопросов

Электрический заряд и элементарные частицы

Со словами *электричество*, *электрический заряд*, *электрический ток* вы встречались много раз и успели к ним привыкнуть. Но попробуйте ответить на вопрос: «Что такое электрический заряд?» - и вы убедитесь, что это не так-то просто. Дело в том, что понятие заряд - это основное, первичное понятие, которое не сводится на современном уровне развития наших знаний к каким-либо более простым, элементарным понятиям.

Попытаемся сначала выяснить, что понимают под утверждением: «Данное тело или частица имеет электрический заряд».

Вы знаете, что все тела построены из мельчайших частиц, которые неделимы на более простые и поэтому называются **элементарными**. Все элементарные частицы имеют массу и благодаря этому притягиваются друг к другу согласно закону всемирного тяготения. С увеличением расстояния между частицами сила тяготения убывает обратно пропорционально квадрату этого расстояния. Большинство элементарных частиц, хотя и не все, кроме того, обладают способностью взаимодействовать друг с другом с силой, которая также убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, но эта сила в огромное число раз превосходит силу тяготения. Так, в атоме водорода, изображенном схематически на рисунке 14.1, электрон притягивается к ядру (протону) с силой, в 10^{39} раз превышающей силу гравитационного притяжения.

Если частицы взаимодействуют друг с другом с силами, которые убывают с увеличением расстояния так же, как и силы всемирного тяготения, но превышают силы тяготения во много раз, то говорят, что *эти частицы имеют электрический заряд*. Сами частицы называются *заряженными*. Бывают частицы без электрического заряда, но не существует электрического заряда без частицы.

Взаимодействия между заряженными частицами носят название **электромагнитных**. Электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий, подобно тому как масса определяет интенсивность гравитационных взаимодействий.

Электрический заряд элементарной частицы - это не особый механизм в частице, который можно было бы снять с нее, разложить на составные части и снова собрать. Наличие электрического заряда у электрона и других частиц означает лишь существование определенных силовых взаимодействий между ними. Но мы, в сущности, ничего не знаем о заряде, если не знаем законов этих взаимодействий. Знание законов взаимодействий должно входить в наши представления о заряде. Эти законы непросты, и изложить их в нескольких словах невозможно. Поэтому нельзя дать достаточно удовлетворительное краткое определение понятию **электрический заряд**.

Два знака электрических зарядов. Все тела обладают массой и поэтому притягиваются друг к другу. Заряженные же тела могут как притягивать, так и отталкивать друг друга. Этот важнейший факт, знакомый вам, означает, что *в природе есть частицы с электрическими зарядами противоположных знаков; в случае зарядов одинаковых знаков частицы отталкиваются, а в случае разных - притягиваются.*

Заряд элементарных частиц - *протонов*, входящих в состав всех атомных ядер, называют положительным, а заряд *электронов* - отрицательным. Между положительными и отрицательными зарядами внутренних различий нет. Если бы знаки зарядов частиц поменялись местами, то от этого характер электромагнитных взаимодействий несколько бы не изменился.

Элементарный заряд. Кроме электронов и протонов, есть еще несколько типов заряженных элементарных частиц. Но только электроны и протоны могут неограниченно долго существовать в свободном состоянии. Остальные же заряженные частицы живут менее миллионных долей секунды. Они рождаются при столкновениях быстрых элементарных частиц и, просуществовав ничтожно малое время, распадаются, превращаясь в другие частицы. С этими частицами вы познакомитесь в 11 классе.

К частицам, не имеющим электрического заряда, относится *нейтрон*. Его масса лишь незначительно превышает массу протона. Нейтроны вместе с протонами входят в состав атомного ядра. Если элементарная частица имеет заряд, то его значение строго определено.

Существует минимальный заряд, называемый элементарным, которым обладают все заряженные элементарные частицы. Заряды элементарных частиц различаются лишь знаками. Отделить часть заряда, например у электрона, невозможно.

Заряженные тела. Электризация тел

Каким образом макроскопические тела приобретают электрический заряд? Об этом сейчас будет рассказано.

Электромагнитные силы в природе играют огромную роль благодаря тому, что в состав всех тел входят электрически заряженные частицы. Составные части атомов - ядра и электроны - обладают электрическим зарядом.

Непосредственно действие электромагнитных сил между телами не обнаруживается, так как тела в обычном состоянии электрически нейтральны. Нейтрален атом любого вещества, так как число электронов в нем равно числу протонов в ядре. Положительно и отрицательно заряженные частицы связаны друг с другом электрическими силами и образуют нейтральные системы.

Макроскопическое тело заряжено электрически в том случае, если оно содержит избыточное количество элементарных частиц с каким-либо одним знаком заряда. Так, отрицательный заряд тела обусловлен избытком числа электронов по сравнению с числом протонов, а положительный - недостатком электронов.

Для того чтобы получить электрически заряженное макроскопическое тело, т. е. *наэлектризовать* его, нужно отделить часть отрицательного заряда от связанного с ним положительного. Это можно сделать с помощью трения. Если провести расческой по сухим волосам, то небольшая часть самых подвижных заряженных частиц - электронов перейдет с волос на расческу и зарядит ее отрицательно, а волосы зарядятся положительно.

Электризация тел и ее проявления. Значительная электризация происходит при трении синтетических тканей. Снимая с себя нейлоновую рубашку в сухом воздухе, можно слышать характерное потрескивание. Между заряженными участками трущихся поверхностей проскакивают маленькие искорки. С подобными явлениями приходится считаться на производстве. Так, нити пряжи на текстильных фабриках электризуются за счет трения, притягиваются к веретенам и роликам и рвутся. Пряжа притягивает пыль и загрязняется. Приходится применять специальные меры против электризации нитей.

Электризация тел при тесном контакте используется в различных электрокопировальных установках и др.

Макроскопическое тело электрически заряжено в том случае, если оно содержит избыточное количество элементарных частиц с одним знаком заряда. Отрицательный заряд тела обусловлен избытком электронов по сравнению с протонами, а положительный - недостатком электронов.

Закон сохранения электрического заряда

Вы знаете, что масса тел сохраняется. Сохраняется также и электрический заряд. Именно заряд, а не число заряженных частиц.

Опыт с электризацией пластин доказывает, что при электризации трением происходит перераспределение имеющихся зарядов между телами, нейтральными в первый момент. Небольшая часть электронов переходит с одного тела на другое. При этом новые частицы не возникают, а существовавшие ранее не исчезают.

При электризации тел выполняется **закон сохранения электрического заряда**. Этот закон справедлив для системы, в которую не входят извне и из которой не выходят наружу заряженные частицы, т. е. для *изолированной системы*. **В**

изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех частиц сохраняется. Если заряды частиц обозначить через q_1, q_2 и т. д., то

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.} \quad (14.1)$$

Закон сохранения заряда имеет глубокий смысл. Если число заряженных элементарных частиц не меняется, то выполнение закона сохранения заряда очевидно. Но элементарные частицы могут превращаться друг в друга, рождаться и исчезать, давая жизнь новым частицам. Однако во всех случаях заряженные частицы рождаются только парами с одинаковыми по модулю и противоположными по знаку зарядами; исчезают заряженные частицы тоже только парами, превращаясь в нейтральные. И во всех этих случаях алгебраическая сумма зарядов остается одной и той же.

Справедливость закона сохранения заряда подтверждают наблюдения над огромным числом превращений элементарных частиц. Этот закон выражает одно из самых фундаментальных свойств электрического заряда. Причина сохранения заряда до сих пор неизвестна.

Электрический заряд во Вселенной сохраняется. Полный электрический заряд Вселенной, скорее всего, равен нулю; число положительно заряженных элементарных частиц равно числу отрицательно заряженных элементарных частиц.

Основной закон электростатики — закон Кулона

Приступим к изучению количественных законов электромагнитных взаимодействий. Основным законом электростатики — закон взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел.

Основной закон электростатики был экспериментально установлен Шарлем Кулоном в 1785 г. и носит его имя.

Если расстояние между телами во много раз больше их размеров, то ни форма, ни размеры заряженных тел существенно не влияют на взаимодействия между ними. В таком случае заряженные тела считают **точечными зарядами**. Вспомните, что и закон всемирного тяготения тоже сформулирован для тел, которые можно считать материальными точками.

Сила взаимодействия заряженных тел зависит от свойств среды между заряженными телами. Пока будем считать, что взаимодействие происходит в вакууме. Опыт показывает, что воздух очень мало влияет на силу взаимодействия заряженных тел, она оказывается почти такой же, как в вакууме.

Закон Кулона. опыты Кулона привели к установлению закона, поразительно напоминающего закон всемирного тяготения. *Сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.* Эту силу называют **кулоновской**.

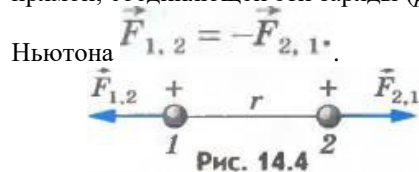
Если обозначить модули зарядов через $|q_1|$ и $|q_2|$, а расстояние между ними через r , то закон Кулона можно записать в следующей форме:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}, \quad (14.2)$$

где k — коэффициент пропорциональности, численно равный силе взаимодействия единичных зарядов на расстоянии, равном единице длины. Его значение зависит от выбора системы единиц.

Такую же форму (14.2) имеет закон всемирного тяготения, только вместо заряда в закон тяготения входят массы, а роль коэффициента k играет гравитационная постоянная.

Легко обнаружить, что два заряженных шарика, подвешенные на нитях, либо притягиваются друг к другу, либо отталкиваются. Отсюда следует, что силы взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды (рис. 14.4). Подобные силы называют **центральными**. В соответствии с третьим законом



Открытие закона Кулона — первый конкретный шаг в изучении свойств электрического заряда. Наличие электрического заряда у небольших тел или элементарных частиц означает, что они взаимодействуют друг с другом по закону Кулона.

Единица электрического заряда

Введена новая физическая величина — электрический заряд. Нужно выбрать единицу этой величины. Этот выбор, как и выбор единиц других физических величин, произволен. Дело здесь только в целесообразности того или иного выбора.

Создать макроскопический эталон единицы электрического заряда, подобный эталону массы — килограмму, невозможно из-за утечки заряда. Естественно было бы за единицу принять заряд электрона, что и сделано в атомной физике, но этот заряд слишком мал, и поэтому пользоваться им в качестве единицы заряда не всегда удобно.

Единица заряда — кулон. В Международной системе единиц (СИ) единица заряда является не основной, а производной и эталон для нее не вводится. Наряду с метром, секундой и килограммом в СИ введена основная единица для электрических величин — единица силы тока — *ампер*. Эталонное значение ампера устанавливается с помощью магнитных взаимодействий токов.

Единицу заряда в СИ — кулон устанавливают с помощью единицы силы тока. *Один кулон (1 Кл) — это заряд, проходящий*

за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А.

Коэффициент k в законе Кулона при записи его в единицах СИ выражается в Н·м²/Кл², так как согласно формуле (14.2) имеем

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1||q_2|}, \quad (14.3)$$

где сила взаимодействия зарядов выражается в ньютонах, расстояние - в метрах, заряд - в кулонах. Числовое значение этого коэффициента можно определить экспериментально. Для этого надо измерить силу взаимодействия F между двумя известными зарядами $|q_1|$ и $|q_2|$, находящимися на заданном расстоянии r , и эти значения подставить в формулу (14.3). Полученное значение k будет равно:

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2. \quad (14.4)$$

Заряд в 1 Кл очень велик. Сила взаимодействия двух точечных зарядов, по 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 1 км друг от друга, чуть меньше силы, с которой земной шар притягивает груз массой 1 т. Поэтому сообщить небольшому телу (размером порядка нескольких метров) заряд в 1 Кл невозможно. Отталкиваясь друг от друга, заряженные частицы не могут удержаться на теле. Никаких других сил, способных в данных условиях компенсировать кулоновское отталкивание, в природе не существует. Но в проводнике, который в целом нейтрален, привести в движение заряд в 1 Кл не составляет большого труда. Ведь в обычной электрической лампочке мощностью 100 Вт при напряжении 127 В сила тока немного меньше 1 А. При этом за 1 с через поперечное сечение проводника проходит заряд, почти равный 1 Кл.

Минимальный заряд, существующий в природе, - это заряд элементарных частиц. В единицах СИ модуль этого заряда равен:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}. \quad (14.5)$$

Заряд, который можно сообщить телу, всегда кратен минимальному заряду:

$$q = \pm N |e|,$$

где N - целое число. Когда заряд тела существенно больше по модулю минимального заряда, то проверять кратность не имеет смысла, однако когда речь идет о заряде частиц ядер атомов, то заряд их должен быть всегда равен целому числу модулей заряда электрона.

В СИ единица заряда - кулон устанавливается с помощью единицы силы тока - ампер. Элементарный электрический заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электрическое

поле

Что такое электрическое поле? Мы знаем, что электрическое поле существует реально: его свойства можно исследовать опытным путем. Но мы не можем сказать, из чего это поле состоит. Здесь мы доходим до границы того, что известно науке.

Дом состоит из кирпичей, плит и других материалов, которые, в свою очередь, состоят из молекул, молекулы - из атомов, атомы - из элементарных частиц. Более же простых образований, чем элементарные частицы, мы не знаем. Так же обстоит дело и с электрическим полем: ничего более простого, чем поле, мы не знаем. Поэтому о природе электрического поля мы можем сказать лишь следующее:

во-первых, поле материально; оно существует независимо от нас, от наших знаний о нем; во-вторых, поле обладает определенными свойствами, которые не позволяют спутать его с чем-либо другим в окружающем мире.

Установление этих свойств и формирует наши представления о том, что такое электрическое поле.

При изучении электрического поля мы сталкиваемся с особым видом материи, движение которой не подчиняется законам механики Ньютона. С открытием электрического поля впервые за всю историю науки появилась глубокая идея: существуют различные виды материи и каждому из них присущи свои свойства.

Основные свойства электрического поля. Главное свойство электрического поля - действие его на электрические заряды с некоторой силой. По действию на заряд устанавливают существование поля, распределение его в пространстве, изучают все его характеристики.

Электрическое поле неподвижных зарядов называют **электростатическим**. Оно не меняется со временем. Электростатическое поле создается только электрическими зарядами. Оно существует в пространстве, окружающем эти заряды, и неразрывно с ними связано.

По мере изучения электродинамики мы будем знакомиться с новыми свойствами электрического поля. Познакомимся и с переменным во времени электрическим полем, которое уже не связано с зарядами неразрывно.

Многие свойства статических и переменных полей совпадают. Однако имеются между ними и существенные различия. Говоря о свойствах поля, мы будем называть это поле просто электрическим, если данное свойство в равной мере присуще как статическим, так и переменным полям.

Согласно теории близкодействия взаимодействие между заряженными частицами осуществляется посредством электрического поля. Электрическое поле - это особая форма материи, существующая независимо от наших представлений о нем. Доказательства реальности электрического поля - конечная скорость распространения электромагнитных взаимодействий и действие поля на заряженные тела.

Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции полей

Недостаточно утверждать, что электрическое поле существует. Надо ввести количественную характеристику поля. После этого электрические поля можно будет сравнивать друг с другом и продолжать изучать их свойства.

Напряженность электрического поля. Электрическое поле обнаруживается по силам, действующим на заряд. Можно утверждать, что мы знаем о поле все, что нам нужно, если будем знать силу, действующую на любой заряд в любой точке поля.

Поэтому надо ввести такую характеристику поля, знание которой позволит определить эту силу.

Если поочередно помещать в одну и ту же точку поля небольшие заряженные тела и измерять силы, то обнаружится, что сила, действующая на заряд со стороны поля, прямо пропорциональна этому заряду. Действительно, пусть поле создается точечным зарядом q_1 . Согласно закону Кулона (14.2) на заряд q_2 действует сила, пропорциональная заряду q_2 . Поэтому отношение силы, действующей на помещаемый в данную точку поля заряд, к этому заряду для каждой точки поля не зависит от заряда и может рассматриваться как характеристика поля. Эту характеристику называют напряженностью электрического поля. Подобно силе, напряженность поля – *векторная величина*; ее обозначают

буквой $\vec{E}$. Если помещенный в поле заряд обозначить через q вместо q_2 , то напряженность будет равна:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (14.7)$$

Напряженность поля в данной точке равна отношению силы, с которой поле действует на точечный заряд, помещенный в эту точку, к этому заряду.

Отсюда сила, действующая на заряд q со стороны электрического поля, равна:

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (14.8)$$

Направление вектора $\vec{E}$ совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд.

Напряженность поля точечного заряда. Найдем напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом q_0 . По закону Кулона этот заряд будет действовать на положительный заряд q с силой, равной

$$F = k \frac{|q_0|q}{r^2}.$$

Модуль напряженности поля точечного заряда q_0 на расстоянии r от него равен:

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{|q_0|}{r^2}. \quad (14.9)$$

Вектор напряженности в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд (рис. 14.7) и совпадает с силой, действующей на точечный положительный заряд, помещенный в данную точку.

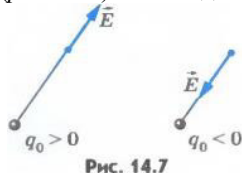


Рис. 14.7

Принцип суперпозиции полей. Если на тело действует несколько сил, то согласно законам механики результирующая сила равна геометрической сумме этих сил:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots$$

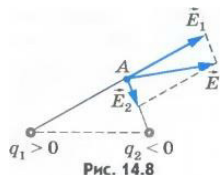
На электрические заряды действуют силы со стороны электрического поля. Если при наложении полей от нескольких зарядов эти поля не оказывают никакого влияния друг на друга, то результирующая сила со стороны всех полей должна быть равна геометрической сумме сил со стороны каждого поля. Опыт показывает, что именно так и происходит на самом деле. Это означает, что напряженности полей складываются геометрически.

если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, напряженности которых $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$ и т. д., то результирующая напряженность поля в этой точке равна сумме напряженностей этих полей:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots, \quad (14.10)$$

причем напряженность поля, создаваемая отдельным зарядом, определяется так, как будто других зарядов, создающих поле, не существует.

Благодаря принципу суперпозиции для нахождения напряженности поля системы заряженных частиц в любой точке достаточно знать выражение (14.9) для напряженности поля точечного заряда. На рисунке 14.8 показано, как определяется напряженность поля $\vec{E}$ в точке А, созданная двумя точечными зарядами q_1 и q_2 , $q_1 > q_2$



Введение электрического поля позволяет разделить задачу вычисления сил взаимодействия заряженных частиц на две части. Сначала вычисляют напряженность поля, созданного зарядами, а затем по известной напряженности определяют силы. Такое разделение задачи на части обычно облегчает расчеты сил.

Силовые линии электрического поля. Напряженность поля заряженного шара

Электрическое поле не действует на органы чувств. Его мы не видим.

Однако мы можем получить некоторое представление о распределении поля, если нарисуем векторы напряженности поля в нескольких точках пространства (рис. 14.9, слева). Картина будет более наглядной, если нарисовать непрерывные линии, касательные к которым в каждой точке, через которую они проходят, совпадают по направлению с векторами напряженности. Эти линии называют **силовыми линиями электрического поля** или **линиями напряженности** (рис. 14.9, справа).

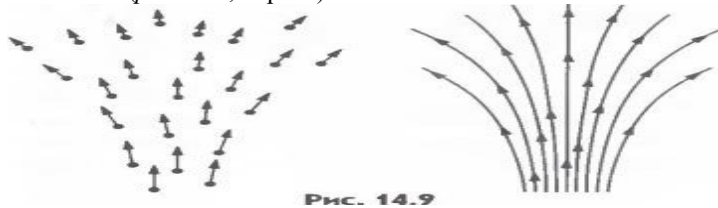


Рис. 14.9

Направление силовых линий позволяет определить направление вектора напряженности в различных точках поля, а густота (число линий на единицу площади) силовых линий показывает, где напряженность поля больше. Так, на

рисунках 14.10-14.13 густота силовых линий в точках *A* больше, чем в точках *B*. Очевидно, $\vec{E}_A > \vec{E}_B$.

Не следует думать, что линии напряженности существуют в действительности вроде растянутых упругих нитей или шнуров, как предполагал сам Фарадей. Линии напряженности помогают лишь наглядно представить распределение поля в пространстве. Они не более реальны, чем меридианы и параллели на земном шаре.

Однако силовые линии можно сделать видимыми. Если продолговатые кристаллики изолятора (например, хинина) хорошо перемешать в вязкой жидкости (например, в касторовом масле) и поместить туда заряженные тела, то вблизи этих тел кристаллики выстроятся в цепочки вдоль линий напряженности.

На рисунках приведены примеры линий напряженности: положительно заряженного шарика (см. рис. 14.10); двух разноименно заряженных шариков (см. рис. 14.11); двух одноименно заряженных шариков (см. рис. 14.12); двух пластин, заряды которых равны по модулю и противоположны по знаку (см. рис. 14.13). Последний пример особенно На рисунке 14.13 видно, что в пространстве между пластинами ближе к середине силовые линии параллельны: электрическое поле здесь одинаково во всех точках.

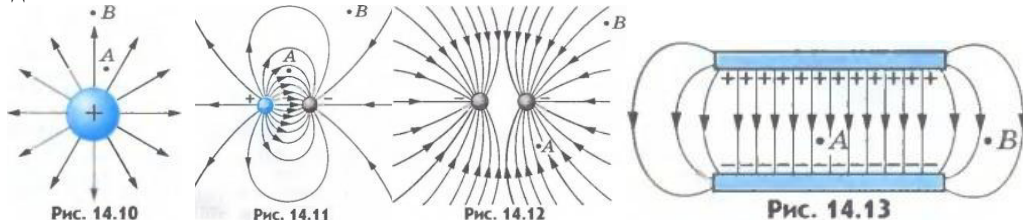


Рис. 14.10

Рис. 14.11

Рис. 14.12

Рис. 14.13

Электрическое поле, напряженность которого одинакова во всех точках пространства, называется **однородным**. В ограниченной области пространства электрическое поле можно считать приближенно однородным, если напряженность поля внутри этой области меняется незначительно.

Однородное электрическое поле изображается параллельными линиями, расположенными на равных расстояниях друг от друга.

Силовые линии электрического поля не замкнуты, они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. Силовые линии непрерывны и не пересекаются, так как пересечение означало бы отсутствие определенного направления напряженности электрического поля в данной точке.

Проводники в электростатическом поле

Что происходит с телами, если их зарядить или поместить в электрическом поле? Проще всего ответить на этот вопрос в случае проводника.

Свободные заряды. В проводниках, к которым в первую очередь относятся металлы, имеются заряженные частицы, способные перемещаться внутри проводника под влиянием электрического поля. По этой причине заряды этих частиц называют **свободными зарядами**.

В металлах носителями свободных зарядов являются электроны. При образовании металла его нейтральные атомы начинают взаимодействовать друг с другом. Благодаря этому взаимодействию электроны внешних оболочек атомов полностью утрачивают связи со своими атомами и становятся «собственностью» всего проводника в целом. В результате

образовавшиеся положительно заряженные ионы оказываются окруженными отрицательно заряженным «газом», образованным коллективизированными электронами. Эти свободные электроны участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по металлу в любом направлении.

Электрический заряд проводников. Внутри проводника при равновесии зарядов не только напряженность поля равна нулю, равен нулю и заряд. Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности. В самом деле, если бы внутри проводника имелся заряд, то вблизи заряда имелось бы и поле. Но электростатического поля внутри проводника нет. Следовательно, *заряды в проводнике могут располагаться только на его поверхности*. Этот вывод справедлив как для незаряженных проводников в электрическом поле, так и для заряженных.

При равновесии зарядов электрическое поле и электрический заряд внутри проводника равны нулю. Весь заряд сосредоточен на поверхности проводника, а линии напряженности электрического поля в любой точке поверхности проводника перпендикулярны этой поверхности.

Диэлектрики в электростатическом поле. Два вида диэлектриков

Какое влияние оказывают на электростатическое поле тела, не являющиеся проводниками? Для выяснения этого вопроса надо ближе познакомиться со строением таких тел.

У изолятора или диэлектрика электрические заряды, а точнее, электрически заряженные частицы - электроны и ядра в нейтральных атомах *связаны* друг с другом. Они не могут, подобно свободным зарядам проводника, перемещаться под действием электрического поля по всему объему тела.

Различие в строении проводников и диэлектриков приводит к тому, что они по-разному ведут себя в электростатическом поле. Электрическое поле может существовать внутри диэлектрика.

Два вида диэлектриков. Существующие диэлектрики можно разбить на два вида: *полярные*, состоящие из таких молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают;

неполярные, состоящие из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают. Следовательно, молекулы у этих диэлектриков разные.

К полярным диэлектрикам относятся спирты, вода и другие вещества; к неполярным - инертные газы, кислород, водород, бензол, полиэтилен и др.

Существуют два вида диэлектриков: полярные и неполярные. Они различаются строением молекул.

Потенциальная энергия заряженного тела в однородном электростатическом поле

Заряженные тела притягивают или отталкивают друг друга. При перемещении заряженных тел, например листочков электроскопа, действующие на них силы совершают работу. Из механики известно, что система, способная совершить работу благодаря взаимодействию тел друг с другом, обладает потенциальной энергией. Значит, система заряженных тел обладает потенциальной энергией, называемой **электростатической** или **электрической**.

Понятие потенциальной энергии самое сложное в электростатике. Вспомните, как нелегко было представить себе, что такое потенциальная энергия в механике. Силу мы ощущаем непосредственно, а потенциальную энергию нет. На пятом этаже дома потенциальная энергия нашего тела больше, чем на первом. Но мы это никак не воспринимаем. Различие становится понятным, если вспомнить, что при подъеме вверх пришлось совершить работу, а также если представить себе, что произойдет при падении с пятого этажа.

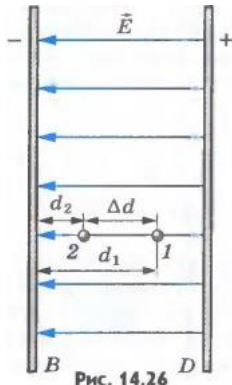
Энергия взаимодействия электронов с ядром в атоме и энергия взаимодействия атомов друг с другом в молекулах (химическая энергия) - это в основном электрическая энергия.

С точки зрения теории близкодействия на заряд непосредственно действует электрическое поле, созданное другим зарядом. При перемещении заряда действующая на него со стороны поля сила совершает работу. (В дальнейшем для краткости будем говорить просто о работе поля.) Поэтому можно утверждать, что заряженное тело в электрическом поле обладает энергией. Найдем потенциальную энергию заряда в однородном электрическом поле.

Работа при перемещении заряда в однородном электростатическом поле. Однородное поле создают, например, большие параллельные металлические пластины, имеющие заряды противоположного знака. Это поле действует на

заряд q с постоянной силой $\vec{F} = q\vec{E}$, подобно тому как Земля действует с постоянной силой $\vec{F} = m\vec{g}$ на камень вблизи ее поверхности.

Пусть пластины расположены вертикально (рис.14.26), левая пластина B заряжена отрицательно, а правая D - положительно. Вычислим работу, совершаемую полем при перемещении положительного заряда q из точки 1, находящейся на расстоянии d_1 от левой пластины, в точку 2, расположенную на расстоянии d_2 от нее. Точки 1 и 2 лежат на одной силовой линии.



Электрическое поле при перемещении заряда совершит положительную работу

$$A = qE (d_1 - d_2) = qE\Delta d. \quad (14.12)$$

Эта работа не зависит от формы траектории, подобно тому как не зависит от формы траектории работа силы тяжести.

Потенциальная энергия. Поскольку работа электростатической силы не зависит от формы траектории точки ее приложения, эта сила является консервативной, и ее работа согласно формуле (6.23) равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = - (W_{n2} - W_{n1}) = -\Delta W_n. \quad (14.13)$$

Сравнивая полученное выражение (14.12) с общим определением потенциальной энергии (14.13), видим, что потенциальная энергия заряда в однородном электростатическом поле равна:

$$W_n = qEd. \quad (14.14)$$

(Считаем, что в точке 2 потенциальная энергия равна нулю.)

Формула (14.14) подобна формуле $W_n = mgh$ для потенциальной энергии тела. Но заряд q в отличие от массы может быть как положительным, так и отрицательным.

Если поле совершает положительную работу, то потенциальная энергия заряженного тела в поле уменьшается: $\Delta W_n < 0$. Одновременно согласно закону сохранения энергии растет его кинетическая энергия. И наоборот, если работа отрицательна (например, при движении положительно заряженной частицы в направлении, противоположном направлению вектора напряженности поля $\vec{E}$; это движение подобно движению камня, брошенного вверх), то $\Delta W_n > 0$. Потенциальная энергия растет, а кинетическая энергия уменьшается; частица тормозится.

На замкнутой траектории, когда заряд возвращается в начальную точку, работа поля равна нулю:

$$A = -\Delta W_n = -(W_{n1} - W_{n2}) = 0.$$

Заряженные частицы в электростатическом поле обладают потенциальной энергией. При перемещении частицы из одной точки поля в другую электрическое поле совершает работу, не зависящую от формы траектории. Эта работа равна изменению потенциальной энергии, взятой со знаком «-».

Потенциал электростатического поля и разность потенциалов

В механике взаимное действие тел друг на друга характеризуют силой и потенциальной энергией. Электростатическое поле, осуществляющее взаимодействие между зарядами, также характеризуют двумя величинами. Напряженность поля - это *силовая характеристика*. Теперь введем энергетическую характеристику - потенциал.

Потенциал поля. Работа любого электростатического поля при перемещении в нем заряженного тела из одной точки в другую также не зависит от формы траектории, как и работа однородного поля. *На замкнутой траектории работа электростатического поля всегда равна нулю.* Поля, обладающие таким свойством, называют **потенциальными**. Потенциальный характер, в частности, имеет электростатическое поле точечного заряда.

Работу потенциального поля можно выразить через изменение потенциальной энергии. Формула $A = -(W_{n2} - W_{n1})$ справедлива для любого электростатического поля. Но только в случае однородного поля потенциальная энергия выражается формулой (14.14).

Потенциал. Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле пропорциональна заряду. Это справедливо как для однородного поля (см. формулу (14.14)), так и для неоднородного. Следовательно, *отношение потенциальной энергии к заряду не зависит от помещенного в поле заряда.*

Это позволяет ввести новую количественную характеристику поля - *потенциал*, не зависящую от заряда, помещенного в поле.

Для определения значения потенциальной энергии, как мы знаем, необходимо выбрать нулевой уровень ее отсчета. При определении потенциала поля, созданного системой зарядов, предполагается, что потенциал в бесконечно удаленной точке поля равен нулю.

Потенциалом точки электростатического поля называют отношение потенциальной энергии заряда,

помещенного в данную точку, к этому заряду.

Согласно данному определению потенциал равен:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q}. \quad (14.15)$$

Напряженность поля $\vec{E}$ - векторная величина. Она представляет собой силовую характеристику поля, которая определяет силу, действующую на заряд q в данной точке поля. А потенциал φ - скаляр, это энергетическая характеристика поля; он определяет потенциальную энергию заряда q в данной точке поля.

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q} = Ed. \quad (14.16)$$

Разность потенциалов. Подобно потенциальной энергии, значение потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчета потенциала, т. е. от выбора точки, потенциал которой принимается равным нулю. Изменение потенциала не зависит от выбора нулевого уровня отсчета потенциала.

Так как потенциальная энергия $W_{\text{п}} = q\varphi$, то работа сил поля равна:

$$A = -(W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (14.17)$$

Здесь

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (14.18)$$

- разность потенциалов, т. е. разность значений потенциала в начальной и конечной точках траектории.

Разность потенциалов называют также **напряжением**.

Согласно формулам (14.17) и (14.18) разность потенциалов между двумя точками оказывается равной:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (14.19)$$

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении положительного заряда из начальной точки в конечную к величине этого заряда.

Если за нулевой уровень отсчета потенциала принять потенциал бесконечно удаленной точки поля, то потенциал в данной точке равен отношению работы электростатических сил по перемещению положительного заряда из данной точки в бесконечность к этому заряду.

Единица разности потенциалов. Единицу разности потенциалов устанавливают с помощью формулы (14.19). В Международной системе единиц работу выражают в джоулях, а заряд - в кулонах. Поэтому разность потенциалов между двумя точками численно равна единице, если при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую электрическое поле совершает работу в 1 Дж. Эту единицу называют **вольт** (В); 1 В = 1 Дж/1 Кл.

Энергетическую характеристику электростатического поля называют потенциалом. Потенциал данной точки поля равен отношению потенциальной энергии заряда, помещенного в эту точку в поле, к заряду. Разность потенциалов между двумя точками численно равна работе сил поля по перемещению единичного заряда между этими точками.

Связь между напряженностью электростатического поля и разностью потенциалов.

Каждой точке электрического поля соответствуют определенные значения потенциала и напряженности. Найдем связь напряженности электрического поля с потенциалом.

Пусть заряд q перемещается в направлении вектора напряженности однородного электрического поля $\vec{E}$ из точки 1 в точку 2, находящуюся на расстоянии Δd от точки 1 (рис. 14.28). Электрическое поле совершает работу:

$$A = qE\Delta d.$$

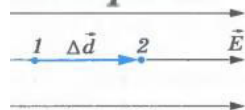


Рис. 14.28

Эту работу согласно формуле (14.19) можно выразить через разность потенциалов в точках 1 и 2:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (14.20)$$

Приравняв выражения для работы, найдем модуль вектора напряженности поля:

$$E = \frac{U}{\Delta d}. \quad (14.21)$$

В этой формуле U - разность потенциалов между точками 1 и 2, которые связаны вектором перемещения Δd , совпадающим по направлению с вектором напряженности $\vec{E}$ (см. рис. 14.28).

Формула (14.21) показывает: чем меньше меняется потенциал на расстоянии Δd , тем меньше напряженность электростатического поля. Если потенциал не меняется совсем, то напряженность поля равна нулю.

Так как при перемещении положительного заряда в направлении вектора напряженности $\vec{E}$ электростатическое поле

совершает положительную работу $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, то потенциал φ_1 больше потенциала φ_2 .

Следовательно, напряженность электрического поля направлена в сторону убывания потенциала.

Любое электростатическое поле в достаточно малой области пространства можно считать однородным. Поэтому формула (14.21) справедлива для произвольного электростатического поля, если только расстояние Δd настолько мало, что изменением напряженности поля на этом расстоянии можно пренебречь.

Единица напряженности электрического поля. Единицу напряженности электрического поля в СИ устанавливают, используя формулу (14.21). Напряженность электрического поля численно равна единице, если разность потенциалов между двумя точками на расстоянии 1 м в однородном поле равна 1 В. Наименование этой единицы - вольт на метр (В/м).

Напряженность можно также выражать в ньютонах на кулон. Действительно,

$$1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \cdot \frac{1}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} \cdot \frac{1}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Электроёмкость.

Единицы

электроёмкости.

При любом способе электризации тел - с помощью трения, электростатической машины, гальванического элемента и т. д. - первоначально нейтральные тела заряжаются вследствие того, что некоторая часть заряженных частиц переходит от одного тела к другому. Обычно этими частицами являются электроны.

При электризации двух проводников, например от электростатической машины, один из них приобретает заряд $+q$, а другой $-q$. Между проводниками появляется электрическое поле и возникает разность потенциалов (напряжение). С увеличением заряда проводников электрическое поле между ними усиливается.

В сильном электрическом поле (при большом напряжении и соответственно при большой напряженности) диэлектрик (например, воздух) становится проводящим. Возможен так называемый *пробой* диэлектрика: между проводниками проскакивает искра, и они разряжаются. Чем меньше увеличивается напряжение между проводниками с увеличением их зарядов, тем больший заряд можно на них накопить.

Электроёмкость. Введем физическую величину, характеризующую способность двух проводников накапливать электрический заряд. Эту величину называют **электроёмкостью**.

Напряжение U между двумя проводниками пропорционально электрическим зарядам, которые находятся на проводниках (на одном $+|q|$, а на другом $-|q|$). Действительно, если заряды удвоить, то напряженность электрического поля станет в 2 раза больше, следовательно, в 2 раза увеличится и работа, совершаемая полем при перемещении заряда, т. е. в 2 раза увеличится напряжение. Поэтому отношение заряда q одного из проводников (на другом находится такой же по модулю заряд) к разности потенциалов между этим проводником и соседним не зависит от заряда. Оно определяется геометрическими размерами проводников, их формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды.

Это позволяет ввести понятие электроёмкости двух проводников.

Электроёмкостью двух проводников называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними:

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

Чем меньше напряжение U между проводниками при сообщении им зарядов $+|q|$ и $-|q|$, тем больше электроёмкость проводников. На проводниках можно накопить большие заряды, не вызывая пробоя диэлектрика. Но сама электроёмкость не зависит ни от сообщенных проводникам зарядов, ни от возникающего между ними напряжения.

Единицы электроёмкости. Формула (14.22) позволяет ввести единицу электроёмкости.

Электроёмкость двух проводников численно равна единице, если при сообщении им зарядов $+1$ Кл и -1 Кл между ними возникает разность потенциалов 1 В. Эту единицу называют *фарад* (Ф); $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$.

Из-за того что заряд в 1 Кл очень велик, ёмкость 1 Ф оказывается очень большой. Поэтому на практике часто используют доли этой единицы: микрофарад (мкФ) - 10^{-6} Ф и пикофарад (пФ) - 10^{-12} Ф.

Важная характеристика проводников - электроёмкость. Электроёмкость проводников тем больше, чем меньше разность потенциалов между ними при сообщении им зарядов противоположных знаков.

Конденсаторы

Систему проводников очень большой электроёмкости вы можете обнаружить в любом радиоприемнике или купить в магазине. Называется она конденсатором. Сейчас вы узнаете, как устроены подобные системы и от чего зависит их электроёмкость.

Конденсатор. Большой электроёмкостью обладают системы из двух проводников, называемые **конденсаторами**. Конденсатор представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Проводники в этом случае называются **обкладками** конденсатора.

Простейший плоский конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга (рис. 14.33).

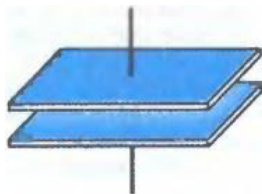


Рис. 14.33

Если заряды пластин одинаковы по модулю и противоположны по знаку, то силовые линии электрического поля начинаются на положительно заряженной обкладке конденсатора и оканчиваются на отрицательно заряженной. Поэтому почти все электрическое поле *сосредоточено внутри конденсатора и однородно*.

Для зарядки конденсатора нужно присоединить его обкладки к полюсам источника напряжения, например к полюсам батареи аккумуляторов. Можно также первую обкладку соединить с полюсом батареи, у которой другой полюс заземлен, а вторую обкладку конденсатора заземлить. Тогда на заземленной обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равный по модулю заряду незаземленной обкладки. Такой же по модулю заряд уйдет в землю.

Под *зарядом конденсатора* понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок. Электроёмкость конденсатора определяется формулой (14.22).

Электрические поля окружающих тел почти не проникают внутрь конденсатора и не влияют на разность потенциалов между его обкладками. Поэтому электроёмкость конденсатора практически не зависит от наличия вблизи него каких-либо других тел.

Электроёмкость плоского конденсатора. Геометрия плоского конденсатора полностью определяется площадью S его пластин и расстоянием d между ними. От этих величин и должна зависеть ёмкость плоского конденсатора.

Чем больше площадь пластин, тем больший заряд можно на них накопить: $q \sim S$. С другой стороны, напряжение между пластинами согласно формуле (14.21) пропорционально расстоянию d между ними. Поэтому ёмкость

$$C = \frac{q}{U} \sim \frac{S}{d}. \quad (14.23)$$

Кроме того, ёмкость конденсатора зависит от свойств диэлектрика между пластинами. Так как диэлектрик ослабляет поле, то электроёмкость при наличии диэлектрика увеличивается.

Конденсаторы позволяют накапливать электрический заряд. Электроёмкость плоского конденсатора пропорциональна площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами. Кроме того, она зависит от свойств диэлектрика между обкладками.

Энергия заряженного конденсатора. Для того чтобы зарядить конденсатор, нужно совершить работу по разделению положительных и отрицательных зарядов. Согласно закону сохранения энергии эта работа равна энергии конденсатора. В том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно убедиться, если разрядить его через цепь, содержащую лампу накаливания, рассчитанную на напряжение в несколько вольт (рис.14.37). При разрядке конденсатора лампа вспыхивает. Энергия конденсатора превращается в тепло и энергию света.

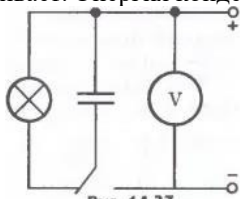


Рис. 14.37

$$W_{\pi} = \frac{qU}{2}. \quad (14.25)$$

Эта энергия равна работе, которую совершит электрическое поле при сближении пластин вплотную. Заменив в формуле (14.25) разность потенциалов или заряд с помощью выражения (14.22) для электроёмкости конденсатора, получим:

$$W_{\pi} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \quad (14.26)$$

Лекция №8

Тема: «Постоянный электрический ток»

1. Вопросы лекции:

1.1. Постоянный электрический ток. Сила тока. Источники тока. Напряжение, электрическое сопротивление.

1.2. Закон Ома для участка цепи. Последовательное и параллельное соединения проводников. ЭДС источника тока.

Закон Ома для замкнутой цепи.

1.3. Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля—Ленца. Работа и мощность электрического тока.

2. Краткое содержание вопросов

Электрический ток. Сила тока

При движении заряженных частиц в проводнике происходит перенос электрического заряда с одного места в другое. Однако если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как, например, *свободные электроны в металле*, то переноса заряда не происходит. Поперечное сечение проводника в среднем пересекает одинаковое число электронов в двух противоположных направлениях. Электрический заряд перемещается через поперечное сечение проводника лишь в том случае, если наряду с беспорядочным движением электроны участвуют в направленном движении. В этом случае говорят, что в проводнике устанавливается электрический ток.

Электрическим током называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Электрический ток возникает при упорядоченном перемещении свободных электронов или ионов. Если перемещать нейтральное в целом тело, то, несмотря на упорядоченное движение огромного числа электронов и атомных ядер, электрический ток не возникнет. Полный заряд, переносимый через любое сечение, будет при этом равным нулю, так как заряды разных знаков перемещаются с одинаковой средней скоростью.

Электрический ток имеет определенное направление. *За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.* Отсюда следует, что направление тока совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля. Если ток образован движением отрицательно заряженных частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц. (Такой выбор направления тока не очень удачен, так как в большинстве случаев ток представляет собой упорядоченное движение электронов - отрицательно заряженных частиц.) Выбор направления тока был сделан в то время, когда о свободных электронах в металлах еще ничего не знали.)

Действие тока. Движение частиц в проводнике мы непосредственно не видим. О наличии электрического тока приходится судить по тем действиям или явлениям, которые его сопровождают.

Во-первых, проводник, по которому течет ток, нагревается.

Во-вторых, электрический ток может изменять химический состав проводника, например выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса и т. д.).

В-третьих, ток оказывает силовое воздействие на соседние токи и намагниченные тела. Это действие тока называется **магнитным**. Так, магнитная стрелка вблизи проводника с током поворачивается. Магнитное действие тока в отличие от химического и теплового является основным, так как проявляется у всех без исключения проводников. Химическое действие тока наблюдается лишь у растворов и расплавов электролитов, а нагревание отсутствует у сверхпроводников.

Сила тока. Если в цепи устанавливается электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника все время переносится электрический заряд. Заряд, перенесенный в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой **силой тока**. Если через поперечное сечение проводника за время Δt переносится заряд Δq , то среднее значение силы тока равно:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (15.1)$$

Таким образом, **средняя сила тока равна отношению заряда Δq , прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt , к этому промежутку времени.** Если сила тока со временем не меняется, то ток называют **постоянным**.

Сила тока в данный момент времени определяется также по формуле (15.1), но промежуток времени Δt в таком случае должен быть очень мал.

Если ток переменный, то сила тока, подобно заряду, - величина переменная. Она может быть как *положительной*, так и *отрицательной*. Знак силы тока зависит от того, какое из направлений вдоль проводника принять за положительное. Сила тока $I > 0$, если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением вдоль проводника. В противном случае $I < 0$. (Термин *сила тока* нельзя считать удачным, так как понятие *сила*, применяемое к току, не имеет никакого отношения к понятию *сила* в механике. Но термин *сила тока* был введен давно и утвердился в науке.)

Связь силы тока со скоростью направленного движения частиц.

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_0 n S \Delta l v}{\Delta t} = q_0 n v S. \quad (15.2)$$

В СИ единицей силы тока является **ампер (А)**. Эту единицу устанавливают на основе магнитного взаимодействия токов.

Измеряют силу тока **амперметрами**. Принцип устройства этих приборов основан на магнитном действии тока. **Условия, необходимые для существования электрического тока**

Для возникновения и существования постоянного электрического тока в веществе необходимо, во-первых, **наличие свободных заряженных частиц**. Если положительные и отрицательные заряды связаны друг с другом в атомах или молекулах, то их перемещение не приведет к появлению электрического тока. Но наличия свободных зарядов еще недостаточно для возникновения тока.

Для создания и поддержания упорядоченного движения заряженных частиц необходима, во-вторых, **сила**, действующая на них в определенном направлении. Если эта сила перестанет действовать, то упорядоченное движение заряженных

частиц прекратится из-за электрического сопротивления, оказываемого их движению ионами кристаллической решетки металлов или нейтральными молекулами электролитов.

Закон Ома для участка цепи. Сопротивление Вольт-амперная характеристика.

Для каждого проводника - твердого, жидкого и газообразного - существует определенная зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов на концах проводника. Эту зависимость выражает так называемая **вольт-амперная характеристика** проводника. Ее находят, измеряя силу тока в проводнике при различных значениях напряжения. Знание вольт-амперной характеристики играет большую роль при изучении электрического тока.

Закон Ома. Наиболее простой вид имеет вольт-амперная характеристика металлических проводников и растворов электролитов. Впервые (для металлов) ее установил немецкий ученый Георг Ом, поэтому зависимость силы тока от напряжения носит название закона Ома.

Закон Ома для участка цепи:

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка R :

$$I = \frac{U}{R}. \quad (15.3)$$

Сопротивление. Основная электрическая характеристика проводника - сопротивление. От этой величины зависит сила тока в проводнике при заданном напряжении. **Сопротивление проводника** представляет собой как бы меру противодействия проводника направленному движению электрических зарядов. С помощью закона Ома (15.3) можно определить сопротивление проводника:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Для этого нужно измерить напряжение на концах проводника и силу тока через него.

Сопротивление зависит от материала проводника и его геометрических размеров. Сопротивление проводника длиной l с постоянной площадью поперечного сечения S равно:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (15.4)$$

где ρ - величина, зависящая от рода вещества и его состояния (от температуры в первую очередь). Величину ρ называют **удельным сопротивлением** проводника. *Удельное сопротивление материала численно равно сопротивлению проводника из этого материала длиной l м и площадью поперечного сечения 1 м^2 .*

Единицу сопротивления проводника устанавливают на основе закона Ома и называют ее омом. *Проводник имеет сопротивление 1 Ом , если при разности потенциалов 1 В сила тока в нем 1 А .*

Единицей удельного сопротивления является $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Удельное сопротивление металлов мало. А вот диэлектрики обладают очень большим удельным сопротивлением. В справочных таблицах приводятся значения удельного сопротивления некоторых веществ.

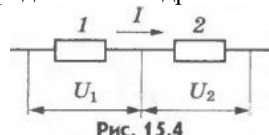
Электрические цепи. Последовательное и параллельное соединения проводников

От источника тока энергия может быть передана по проводам к устройствам, потребляющим энергию: электрической лампе, радиоприемнику и др. Для этого составляют *электрические цепи* различной сложности.

Электрическая цепь обычно состоит из источника тока, устройств, потребляющих электрическую энергию, соединительных проводов и выключателей для замыкания цепи. Часто в электрическую цепь включают приборы, контролирующие силу тока и напряжение на различных участках цепи, - амперметры и вольтметры.

К наиболее простым и часто встречающимся соединениям проводников относятся последовательное и параллельное соединения.

Последовательное соединение проводников. При последовательном соединении электрическая цепь не имеет разветвлений. Все проводники включают в цепь поочередно друг за другом. На рисунке 15.4 показано последовательное соединение двух проводников 1 и 2 , имеющих сопротивления R_1 и R_2 . Это могут быть две лампы, две обмотки электродвигателя и др.



$$U = U_1 + U_2.$$

$$R = R_1 + R_2. \quad (15.6)$$

Параллельное соединение проводников. На рисунке 15.5 показано параллельное соединение двух проводников 1 и 2 сопротивлениями R_1 и R_2 .

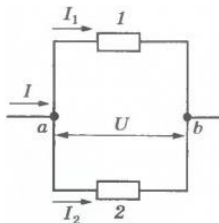


Рис. 15.5

$$I = I_1 + I_2. \quad (15.8)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (15.9)$$

Отсюда следует, что

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (15.10)$$

Работа и мощность постоянного тока

Электрический ток получил такое широкое применение потому, что он несет с собой энергию. Эта энергия может быть превращена в любую форму.

При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике *электрическое поле совершает работу*. Ее принято называть *работой тока*. Сейчас мы напомним сведения о работе и мощности тока.

Работа тока. Рассмотрим произвольный участок цепи. Это может быть однородный проводник, например нить лампы накаливания, обмотка электродвигателя и др. Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника проходит заряд Δq . Электрическое поле совершит при этом работу $A = \Delta q U$ (U - напряжение между концами участка проводника).

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

Так как сила тока $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, то эта работа равна:

$$A = IU\Delta t. \quad (15.12)$$

Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого шел ток.

$$A = IU\Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = Q. \quad (15.13)$$

Формулой $A = I^2 R \Delta t$ удобно пользоваться в случае последовательного соединения проводников, так как сила тока в этом случае одинакова во всех проводниках. При параллельном соединении удобна

формула $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$, так как напряжение на всех проводниках одинаково.

Закон Джоуля - Ленца. Закон, определяющий количество теплоты, которое выделяет проводник с током в окружающую среду, был впервые установлен экспериментально английским ученым Д. Джоулем (1818-1889) и русским ученым Э. Х. Ленцем (1804-1865). Закон Джоуля - Ленца формулируется следующим образом: *количество теплоты, выделяемой проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока по проводнику:*

$$Q = I^2 R \Delta t. \quad (15.14)$$

Мощность тока. Любой электрический прибор (лампа, электродвигатель и т. д.) рассчитан на потребление определенной энергии в единицу времени. Поэтому, наряду с работой тока, очень важное значение имеет понятие *мощности тока*. Мощность тока равна отношению работы тока ко времени прохождения тока.

Согласно этому определению мощность тока

$$P = \frac{A}{\Delta t}. \quad (15.15)$$

Из этой формулы очевидно, что мощность тока выражается в *ваттах* (Вт).

Это выражение для мощности тока можно переписать в нескольких эквивалентных формах, используя закон Ома для участка цепи:

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

На большинстве приборов указана потребляемая ими мощность.

Прохождение по проводнику электрического тока сопровождается выделением в нем энергии. Эта энергия определяется работой тока - произведением перенесенного заряда и напряжения на концах проводника.
Электродвижущая сила

Любой источник тока характеризуется электродвижущей силой, или, сокращенно, ЭДС. Так, на круглой батарейке для карманного фонарика написано: 1,5 В. Что это значит?

Соедините проводником два металлических шарика, несущих заряды противоположных знаков. Под влиянием электрического поля этих зарядов в проводнике возникает электрический ток. Но этот ток будет очень кратковременным. Заряды быстро нейтрализуют друг друга, потенциалы шариков станут одинаковыми, и электрическое поле исчезнет.

Сторонние силы. Для того чтобы ток был постоянным, надо поддерживать постоянное напряжение между шариками. Для этого необходимо устройство (*источник тока*), которое перемещало бы заряды от одного шарика к другому в направлении, противоположном направлению сил, действующих на эти заряды со стороны электрического поля шариков. В таком устройстве на заряды, кроме электрических сил, должны действовать силы неэлектростатического происхождения. Одно лишь электрическое поле заряженных частиц (*кулоновское поле*) не способно поддерживать постоянный ток в цепи.

Любые силы, действующие на электрически заряженные частицы, за исключением сил электростатического происхождения (т. е. кулоновских), называют **сторонними силами** цепи.

Электродвижущая сила. Действие сторонних сил характеризуется важной физической величиной, называемой *электродвижущей силой* (сокращенно ЭДС).

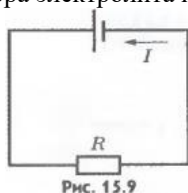
Электродвижущая сила источника тока равна отношению работы сторонних сил при перемещении заряда по замкнутому контуру к величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст.}}}{q}. \quad (15.16)$$

Электродвижущую силу, как и напряжение, выражают в вольтах.

Закон Ома для полной цепи

Рассмотрим простейшую полную (т. е. замкнутую) цепь, состоящую из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора сопротивлением R (рис.15.9). Источник тока имеет ЭДС $\mathcal{E}$ и сопротивление r . Сопротивление источника часто называют *внутренним сопротивлением* - в отличие от внешнего сопротивления R цепи. В генераторе r - это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе - сопротивление раствора электролита и электродов.



Закон Ома для замкнутой цепи связывает силу тока в цепи, ЭДС и *полное сопротивление цепи* $R+r$. **Закон Ома для замкнутой цепи** записывают в виде:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (15.20)$$

Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи.

Зависимость сопротивления проводника от температуры

Если при температуре, равной 0°C , сопротивление проводника равно R_0 , а при температуре t оно равно R , то относительное изменение сопротивления, как показывает опыт, прямо пропорционально изменению температуры t :

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha t. \quad (16.1)$$

Коэффициент пропорциональности α называют **температурным коэффициентом** сопротивления. Он характеризует зависимость сопротивления вещества от температуры. **Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на 1 К.** Для всех металлических проводников коэффициент $\alpha > 0$ и незначительно меняется с изменением температуры. Если интервал изменения температуры невелик, то температурный коэффициент можно считать постоянным и равным его среднему значению на этом интервале температур.

Лекция №9

Тема: «Магнитное поле»

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Магнитное поле. Постоянные магниты и магнитное поле тока. Индукция магнитного поля.
- 1.2. Сила Ампера. Принцип действия электродвигателя. Электроизмерительные приборы. Сила Лоренца.
- 1.3. Магнитный поток. Энергия магнитного поля.

2. Краткое содержание вопросов

Между неподвижными электрическими зарядами действуют силы, определяемые законом Кулона. Согласно теории близкодействия это взаимодействие осуществляется так: каждый из зарядов создает электрическое поле, которое действует на другой заряд.

Однако между электрическими зарядами могут существовать силы и иной природы. Их можно обнаружить с помощью следующего опыта.

Возьмем два гибких проводника, укрепим их вертикально, а затем присоединим нижними концами к полюсам источника тока (рис. 1.1). Притяжения или отталкивания проводников при этом не обнаружится.

Если теперь другие концы проводников замкнуть проволокой так, чтобы в проводниках возникли токи противоположного направления, то проводники начнут отталкиваться друг от друга (рис. 1.2). В случае же токов одного направления проводники притягиваются (рис. 1.3).

Взаимодействия между проводниками с током, т. е. взаимодействия между направленно движущимися электрическими зарядами, называют магнитными. Силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, называются

магнитными

силами.

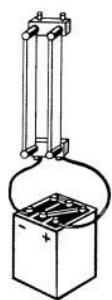


Рис. 1.1

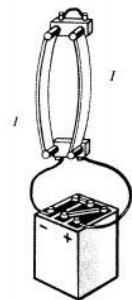


Рис. 1.2



Рис. 1.3

Магнитное поле. Согласно теории близкодействия, подобно тому как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле, в пространстве, окружающем токи, возникает поле, называемое **магнитным**.

Электрический ток в проводнике создает вокруг себя магнитное поле, которое действует на ток в другом проводнике. А поле, созданное электрическим током второго проводника, действует на первый.

Магнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами.

Перечислим основные свойства магнитного поля, которые установлены экспериментально.

1. Магнитное поле порождается электрическим током (направлению движущимися зарядами).
2. Магнитное поле обнаруживается по действию на электрический ток (на движущиеся заряды).

Подобно электрическому полю, магнитное поле существует реально, независимо от нас, от наших знаний о нем.

Экспериментальным доказательством реальности магнитного поля, как и реальности электрического поля, может служить факт существования электромагнитных волн.

Замкнутый контур с током в магнитном поле. Для изучения магнитного поля можно взять замкнутый контур малых (по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно изменяется) размеров. Например, можно взять маленькую плоскую проволочную рамку произвольной формы (рис. 1.4). Подводящие ток проводники нужно расположить близко друг к другу (рис. 1.4, а) или сплести их вместе (рис. 1.4, б). Тогда результирующая сила, действующая со стороны магнитного поля на эти проводники, будет равна нулю.

Выяснить характер действия магнитного поля на контур с током можно с помощью следующего опыта.

Подвесим на тонких гибких проводниках, сплетенных вместе, маленькую плоскую рамку, состоящую из нескольких витков проволоки. На расстоянии, значительно большем размеров рамки, вертикально расположим провод (рис. 1.5, а). Рамка при пропускании электрического тока через нее и через провод поворачивается и располагается так, что провод оказывается в плоскости рамки (рис. 1.5, б). При изменении направления тока в проводе рамка поворачивается на 180° .

Опыт показывает, что магнитное поле создается не только токами в проводниках. Любое направленное движение электрических зарядов вызывает появление магнитного поля. Так, например, токи в газах, полупроводниках вызывают возникновение в окружающем их пространстве магнитного поля. Смещение связанных электрических зарядов в диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, также вызывает появление магнитного поля.

Из курса физики вам известно, что магнитное поле создается не только электрическим током, но и постоянными магнитами. Если мы подвесим на гибких проводах плоскую рамку с током между полюсами магнита, то рамка будет поворачиваться до тех пор, пока ее плоскость не установится перпендикулярно линии, соединяющей полюсы магнита (рис. 1.6). Таким образом, магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие.

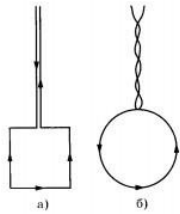


Рис. 1.4

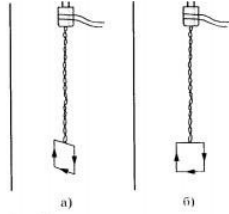


Рис. 1.5

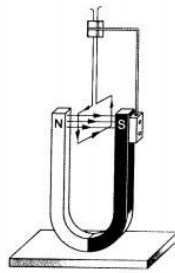


Рис. 1.6

Движущиеся заряды (электрический ток) создают магнитное поле.

Вокруг любых направленно движущихся зарядов возникает магнитное поле. Оно также появляется в случае, если в пространстве существует электрическое поле, изменяющееся со временем.

Обнаруживается магнитное поле по действию на электрический ток.

ВЕКТОР МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Электрическое поле характеризуется векторной величиной — напряженностью электрического поля. Надо бы ввести также и величину, характеризующую магнитное поле количественно. Дело это непростое, так как магнитные взаимодействия сложнее электрических. Векторную характеристику магнитного поля называют вектором магнитной индукции и обозначают буквой $\vec{B}$.

Сначала мы рассмотрим вопрос только о направлении вектора $\vec{B}$. **Магнитная стрелка.** Мы видели, что в магнитном поле рамка с током на гибком подвесе, со стороны которого не действуют силы упругости, препятствующие ориентации рамки, поворачивается до тех пор, пока она не установится определенным образом. Вам известно, что так же ведет себя и магнитная стрелка — маленький продолговатый магнит с двумя полюсами на концах — южным S и северным N. **Направление вектора магнитной индукции.** Ориентирующее действие магнитного поля на магнитную стрелку или рамку с током можно использовать для определения направления вектора магнитной индукции.

За направление вектора магнитной индукции принимается направление, которое показывает северный полюс N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле. Это направление совпадает с направлением положительной нормали к замкнутому контуру с током. Положительная нормаль направлена в ту сторону, куда перемещается буравчик (с правой нарезкой), если вращать его по направлению тока в рамке.

Используя рамку с током или магнитную стрелку, можно определить направление вектора магнитной индукции в любой точке поля.

Направление вектора магнитной индукции устанавливают с помощью правила буравчика: если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика указывает направление вектора магнитной индукции.

Опыт по определению направления вектора индукции магнитного поля Земли проводит каждый, кто ориентируется на местности по компасу.

Линии магнитной индукции. Наглядную картину магнитного поля можно получить, если построить так называемые *линии магнитной индукции*. Линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым в любой их точке совпадают с вектором $\vec{B}$ в данной точке поля. Линии вектора магнитной индукции аналогичны линиям вектора напряженности электростатического поля.

Для магнитного поля прямолинейного проводника с током из приведенных ранее опытов следует, что линии магнитной индукции — концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной этому проводнику с током. Центр окружностей находится на оси проводника. Стрелки на линиях указывают, в какую сторону направлен вектор магнитной индукции, касательный к данной линии.

Вихревое поле. Важная особенность линий магнитной индукции состоит в том, что они не имеют ни начала, ни конца. Они всегда замкнуты. Вспомним, что с электростатическим полем дело обстоит иначе. Его силовые линии во всех случаях имеют источники: они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных.

Поля с замкнутыми векторными линиями называют вихревыми. Магнитное поле — *вихревое поле*.

Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля. Оно заключается в том, что магнитное поле не имеет источников. Магнитных зарядов, подобных электрическим, в природе не существует.

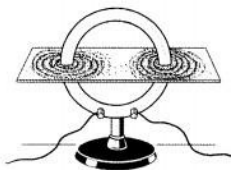


Рис. 1.15

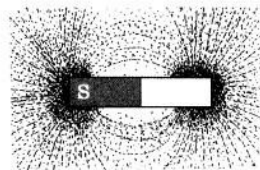


Рис. 1.16

Магнитное поле — вихревое поле, в каждой точке поля вектор магнитной индукции имеет определенное направление.

Это направление указывает магнитная стрелка или его можно определить по правилу буравчика. Магнитное поле не имеет источников; магнитных зарядов в природе не существует.

МОДУЛЬ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. СИЛА АМПЕРА

Магнитное поле действует на все участки проводника с током. Зная силу, действующую на каждый малый участок проводника, можно вычислить силу, действующую на весь замкнутый проводник в целом.

Закон, определяющий силу, действующую на отдельный небольшой участок проводника (элемент тока), был установлен в 1820 г. А. Ампером. Так как создать обособленный элемент тока нельзя, то Ампер проводил опыты с замкнутыми проводниками. Меняя форму проводников и их расположение, он сумел установить выражение для силы, действующей на отдельный элемент тока.

Модуль вектора магнитной индукции определяется отношением максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на отрезок проводника с током, к произведению силы тока на длину этого отрезка:

$$B = \frac{F_m}{I \Delta l} \quad (1.1)$$

Магнитное поле полностью характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}$. В каждой точке магнитного поля можно определить направление вектора магнитной индукции и его модуль, если измерить силу, действующую на отрезок проводника с током.

Модуль силы Ампера. Пусть вектор магнитной индукции $\vec{B}$ составляет угол α (рис. 1.18) с направлением отрезка проводника с током (элементом тока). (За направление элемента тока принимают направление, в котором по проводнику идет ток.) Опыт показывает, что магнитное поле, вектор индукции которого направлен вдоль проводника с током, не оказывает никакого действия на ток. Модуль силы зависит лишь от модуля составляющей вектора $\vec{B}$, перпендикулярной проводнику, т. е. от $B_{\perp} = B \sin \alpha$, и не зависит от составляющей $\vec{B}_{\parallel}$, направленной вдоль проводника.

Максимальная сила Ампера согласно формуле (1.1) равна:

$F_m = I \Delta l B$, ей соответствует угол $\alpha = \frac{\pi}{2}$. При произвольном значении угла α сила пропорциональна не B , а составляющей $B_{\perp} = B \sin \alpha$.

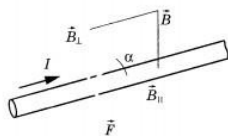


Рис. 1.18

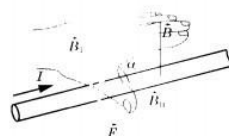


Рис. 1.19

Поэтому выражение для силы F , действующей на малый отрезок проводника Δl , при силе тока в нем I , со стороны магнитного поля с индукцией $\vec{B}$, составляющей с элементом тока угол α , имеет вид

$$F = I |\vec{B}| \Delta l \sin \alpha. \quad (1.2)$$

Это выражение называют **законом Ампера**. Сила Ампера равна произведению модуля силы тока, вектора магнитной индукции, длины, отрезка проводника и синуса угла между направлениями векторов магнитной индукции и тока.

Направление силы Ампера. В рассмотренном выше опыте вектор $\vec{F}$ перпендикулярен элементу тока и вектору $\vec{B}$. Его направление определяется правилом левой руки: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная проводнику составляющая вектора магнитной индукции $\vec{B}$ входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы, действующей на отрезок проводника (рис. 1.19).

Это правило справедливо во всех случаях.

Единица магнитной индукции. Мы ввели новую величину — вектор магнитной индукции. За единицу модуля вектора магнитной индукции можно принять магнитную индукцию однородного поля, в котором на отрезок проводника длиной 1 м при силе тока в нем 1 А действует со стороны поля максимальная сила $F_m = 1$ Н. Согласно

формуле (1.1) единица магнитной индукции равна $1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$.

Единица магнитной индукции получила название тесла (Тл) в честь югославского ученого-электротехника П. Тее ла (1856—1943).

Измеряя силу, действующую со стороны магнитного поля на участок проводника с током, можно определить модуль вектора магнитной индукции. Сформулирован закон Ампера для силы, действующей на участок проводника с

ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.
ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЙСЯ ЗАРЯД. СИЛА ЛОРЕНЦА
 Электрический ток — это упорядоченно движущиеся нагретые частицы. Поэтому действие магнитного поля на проводник с током есть результат действия поля на движущиеся заряженные частицы внутри проводника. Найдем силу, действующую на одну частицу.

Модуль силы Лоренца равен отношению модуля силы F , действующей на участок проводника длиной Δl , к числу N заряженных частиц, упорядоченно движущихся в этом участке проводника:

$$F_{\text{Л}} = \frac{F}{N}. \quad (1.3)$$

На каждый движущийся заряд со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, равная:

$$F_{\text{Л}} = \frac{F}{N} = |q| v B \sin \alpha, \quad (1.5)$$

где α — угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции. Сила Лоренца перпендикулярна векторам $\vec{B}$ и $\vec{v}$. Ее направление определяется с помощью того же правила левой руки, что и направление силы Ампера: если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции $\vec{B}$, перпендикулярная скорости заряда, входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на 90° большой палец укажет направление действующей на заряд силы Лоренца $F_{\text{Л}}$ (рис. 1.24).

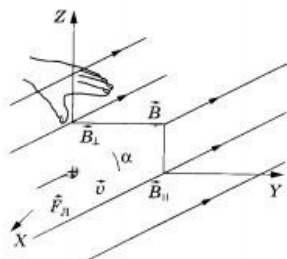


Рис. 1.24

МАГНИТНЫЙ

ПОТОК

Для того чтобы дать точную количественную формулировку закона электромагнитной индукции Фарадея, нужно ввести новую величину — поток вектора магнитной индукции.

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ характеризует магнитное поле в каждой точке пространства. Можно ввести еще одну величину, зависящую от значений вектора $\vec{B}$ не в одной точке, а во всех точках поверхности, ограниченной плоским замкнутым контуром.

Для этого рассмотрим плоский замкнутый проводник (контур), ограничивающий поверхность площадью S и помещенный в однородное магнитное поле (рис. 2.4). Нормаль $\vec{n}$ (вектор, модуль которого равен единице) к плоскости проводника составляет угол α с направлением вектора магнитной индукции $\vec{B}$. Магнитным потоком Φ (поток вектора магнитной индукции) через поверхность площадью S называют величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на площадь S и косинус угла α между векторами $\vec{B}$ и $\vec{n}$:

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (2.1)$$

Произведение $B \cos \alpha = B_n$ представляет собой проекцию вектора магнитной индукции на нормаль $\vec{n}$ к плоскости контура. Поэтому

$$\Phi = B_n S. \quad (2.2)$$

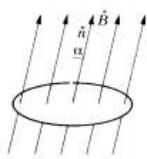


Рис. 2.4

Магнитный поток тем больше, чем больше B_n и S . Величина Φ названа «магнитным потоком» по аналогии с потоком воды, который тем больше, чем больше скорость течения воды и площадь сечения трубы.

Магнитный поток графически можно истолковать как величину, пропорциональную числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S .

Единицей магнитного потока является **вебер**. *Магнитный поток в 1 вебер (1 Вб) создается однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м², расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.*

Магнитный поток зависит от ориентации поверхности, которую пронизывает магнитное поле.

ЭНЕРГИЯ

МАГНИТНОГО

ПОЛЯ

ТОКА

Согласно закону сохранения энергии энергия магнитного поля, созданного током, равна той энергии, которую должен затратить источник тока (гальванический элемент, генератор на электростанции и др.) на создание тока. При размыкании цепи эта энергия переходит в другие виды энергии.

То, что для создания тока необходимо затратить энергию, т. е. необходимо совершить работу, объясняется тем, что при замыкании цепи, когда ток начинает нарастать, в проводнике появляется вихревое электрическое поле, действующее против того электрического поля, которое создается в проводнике благодаря источнику тока. Для того чтобы сила тока стала равной I , источник тока должен совершить работу против сил вихревого поля. Эта работа идет на увеличение энергии магнитного поля тока.

При размыкании цепи ток исчезает, и вихревое поле совершает положительную работу. Запасенная током энергия выделяется. Это обнаруживается, например, по мощной искре, возникающей при размыкании цепи с большой индуктивностью.

Энергия магнитного поля, созданного током, проходящим по участку цепи с индуктивностью L , определяется по формуле

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (2.9)$$

Магнитное поле, созданное электрическим током, обладает энергией, прямо пропорциональной квадрату силы тока.

Лекция №10

Тема: «Электромагнетизм»

1. Вопросы лекции:

1.1. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца. Вихревое электрическое поле.

1.2. Самоиндукция. Индуктивность.

2. Краткое содержание вопросов

ОТКРЫТИЕ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ

ИНДУКЦИИ

В 1821 г. М. Фарадей записал в своем дневнике: «Превратить магнетизм в электричество». Через 10 лет эта задача была им решена.

Не случайно первый, решающий шаг в открытии новых свойств электромагнитных взаимодействий сделан основоположником представлений об электромагнитном поле М. Фарадеем, который был уверен в единой природе электрических и магнитных явлений. Благодаря этому он и сделал открытие, вошедшее в основу устройства генераторов всех электростанций мира, превращающих механическую энергию в энергию электрического тока. (Источники, работающие на других принципах: гальванические элементы, аккумуляторы и пр., — дают ничтожную долю вырабатываемой электрической энергии.)

Явление электромагнитной индукции заключается в возникновении электрического тока в проводящем контуре, который либо покоится в переменном во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле таким образом, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется. Это явление было открыто 29 августа 1831 г. Редкий случай, когда дата нового замечательного открытия известна так точно!

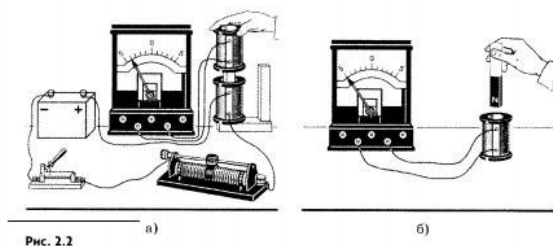
Сначала Фарадеем была открыта электромагнитная индукция в неподвижных относительно друг друга проводниках при замыкании и размыкании цепи. Затем, ясно понимая, что сближение или удаление проводников с током должно приводить к тому же результату, что и замыкание и размыкание цепи, Фарадей с помощью опытов доказал: ток возникает при перемещении катушек относительно друг друга. Знакомый с трудами Ампера, Фарадей понимал, что магнит — это совокупность маленьких токов, циркулирующих в молекулах. 17 октября, как зарегистрировано и его лабораторном журнале, был обнаружен индукционный ток в катушке во время введения (или удаления) магнита.

В течение одного месяца Фарадей опытным путем установил все главные особенности явления электромагнитной индукции. В настоящее время опыты Фарадея может повторить каждый. Для этого надо иметь две катушки, магнит, батарею элементов и достаточно чувствительный гальванометр.

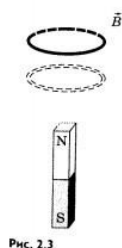
В установке, изображенной на рисунке 2.1, а, индукционный ток возникает в одной из катушек в момент замыкания или размыкания электрической цепи другой катушки, неподвижной относительно первой. В других опытах индукционный ток возникает при изменении силы тока в одной из катушек с помощью реостата (рис. 2.1, б), при движении катушек относительно друг друга (рис. 2.2, а), при движении постоянного магнита относительно катушки (рис. 2.2, б).

Уже сам Фарадей заметил то общее, от чего зависит появление индукционного тока в опытах, которые поставлены по-разному.

В замкнутом проводящем контуре возникает ток при изменении числа линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром.



И чем быстрее меняется число линий магнитной индукции, тем больше возникающий индукционный ток. При этом причина изменения числа линий магнитной индукции не существенна. Это может быть и изменение числа линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную неподвижным проводящим контуром, вследствие изменения силы тока в соседней катушке (см. рис. 2.1, б), и изменение числа линий индукции вследствие движения контура в неоднородном магнитном поле, густота линий которого меняется в пространстве (рис. 2.3).



В проводящем замкнутом контуре возникает электрический ток, если контур находится в переменном магнитном поле или движется в постоянном во времени магнитном поле так, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется.

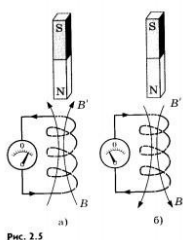
НАПРАВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА. ПРАВИЛО ЛЕНЦА.

Присоединив катушку, в которой возникает индукционный ток, к гальванометру, можно обнаружить, что направление этого тока зависит от того, приближается ли магнит к катушке (например, северным полюсом) или удаляется от нее (см. рис. 2.2, б).

Возникающий **индукционный ток** того или иного направления как-то взаимодействует с магнитом (притягивает или отталкивает его). Катушка с проходящим по ней током подобна магниту с двумя полюсами — северным и южным. Направление индукционного тока определяет, какой конец катушки выполняет роль северного полюса (линии магнитной индукции выходят из него). На основе закона сохранения энергии можно предсказать, в каких случаях катушка будет притягивать магнит, а в каких отталкивать его.

Взаимодействие индукционного тока с магнитом. Если магнит приближать к катушке, то в ней появляется индукционный ток такого направления, что магнит обязательно отталкивается. Для сближения магнита и катушки нужно совершить положительную работу. Катушка становится подобной магниту, обращенному одноименным полюсом к приближающемуся к ней магниту. Одноименные же полюса отталкиваются.

При удалении магнита, наоборот, в катушке возникает ток такого направления, чтобы появилась притягивающая магнит сила.



В чем состоит различие двух опытов: приближение магнита к катушке и его удаление? В первом случае число линий магнитной индукции, пронизывающих витки катушки, или, что то же самое, магнитный поток, увеличивается (рис. 2.5, а), а во втором случае уменьшается (рис. 2.5, б). Причем в первом случае линии индукции $\vec{B}'$ магнитного поля, созданного возникшим в катушке индукционным током, выходят из верхнего конца катушки, так как катушка отталкивает магнит, а во втором случае, наоборот, входят в этот конец. Эти линии магнитной индукции на рисунке 2.5 изображены черным цветом. В случае а катушка с током аналогична магниту, северный полюс которого находится сверху, а в случае б — снизу.

Правило Ленца. Теперь мы подошли к главному: при увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует усилению магнитного

потока через витки катушки. Ведь линии индукции $\vec{B}'$ этого поля направлены против линий индукции $\vec{B}$ поля, изменение которого порождает электрический ток. Если же магнитный поток через катушку ослабевает, то индукционный ток создает магнитное поле с индукцией $\vec{B}'$, увеличивающее магнитный поток через витки катушки.

В этом и состоит сущность общего правила определения направления индукционного тока, которое применимо во всех случаях. Это правило было установлено русским физиком Э. Х. Ленцем.

Согласно правилу Ленца *возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван. Более кратко это правило можно сформулировать следующим образом: индукционный ток направлен так, чтобы препятствовать причине, его вызывающей.*

Применять правило Ленца для нахождения направления индукционного тока в контуре надо так:

1. Определить направление линий магнитной индукции $\vec{B}$ внешнего магнитного поля.
2. Выяснить, увеличивается ли поток вектора магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ($\Delta\Phi > 0$), или уменьшается ($\Delta\Phi < 0$).
3. Установить направление линий магнитной индукции $\vec{B}'$ магнитного поля индукционного тока. Эти линии должны быть согласно правилу Ленца направлены противоположно линиям магнитной индукции $\vec{B}$ при $\Delta\Phi > 0$ и иметь одинаковое с ними направление при $\Delta\Phi < 0$.
4. Зная направление линий магнитной индукции $\vec{B}'$, найти направление индукционного тока, пользуясь правилом буравчика.

Направление индукционного тока определяется с помощью закона сохранения энергии. Индукционный ток во всех случаях направлен так, чтобы своим магнитным полем препятствовать изменению магнитного потока, вызывающего данный **индукционный ток**.

Закон электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС, а не для силы индукционного тока, т. к. сила тока зависит и от свойств проводника, для ЭДС определяется только изменением магнитного потока. *Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю, скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:*

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

ЭДС индукции определяется скоростью изменения магнитного потока.

ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩИХСЯ ПРОВОДНИКАХ

При движении проводника его свободные заряды движутся вместе с ним. Поэтому на заряды со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. Она-то и вызывает перемещение зарядов внутри проводника. ЭДС индукции, следовательно, имеет магнитное происхождение.

На многих электростанциях земного шара именно сила Лоренца вызывает перемещение электронов в движущихся проводниках.

$$\Delta\Phi = -Blv \Delta t \sin \alpha.$$

Следовательно,

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = Blv \sin \alpha.$$

ЭДС индукции в проводниках, движущихся в постоянном магнитном поле, возникает за счет действия на заряды проводника силы Лоренца.

САМОИНДУКЦИЯ.

ИНДУКТИВНОСТЬ.

Самоиндукция. Если по катушке идет переменный ток, то магнитный поток, пронизывающий катушку, меняется. Поэтому в том же самом проводнике, по которому идет переменный ток, возникает ЭДС индукции. Это явление называют **самоиндукцией**.

При самоиндукции проводящий контур выполняет двойную роль: переменный ток в проводнике вызывает появление магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. А так как магнитный поток изменяется со временем, то появляется ЭДС индукции $\mathcal{E}_{is}$. По правилу Ленца в момент нарастания тока напряженность вихревого электрического поля направлена против тока. Следовательно, в этот момент вихревое поле препятствует нарастанию тока. Наоборот, в момент уменьшения тока вихревое поле поддерживает его.

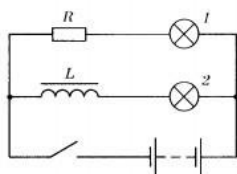


Рис. 2.13

Явление самоиндукции можно наблюдать в простых опытах. На рисунке 2.13 показана схема параллельного соединения двух одинаковых ламп. Одну из них подключают к источнику через резистор R , а другую — последовательно с катушкой L , снабженной железным сердечником.

При замыкании ключа первая лампа вспыхивает практически сразу, а вторая — с заметным запозданием. ЭДС самоиндукции в цепи этой лампы велика, и сила тока не сразу достигает своего максимального значения (рис. 2.14).

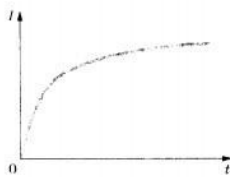


Рис. 2.14

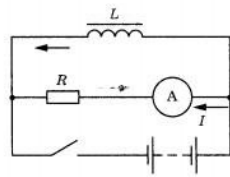


Рис. 2.15

Появление ЭДС самоиндукции при размыкании можно наблюдать в опыте с цепью, схематически показанной на рисунке 2.15. При размыкании ключа в катушке L возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая первоначальный ток. в результате в момент размыкания через гальванометр идет ток (цветная стрелка), направленный против начального тока до размыкания (черная стрелка). Сила тока при размыкании цепи может превышать силу тока, проходящего через гальванометр при замкнутом ключе. Это означает, что ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{is}$ больше ЭДС $\mathcal{E}$ батареи элементов.

Индуктивность. Модуль вектора индукции $\vec{B}$ магнитного поля, создаваемого током, пропорционален силе тока. Так как магнитный поток Φ пропорционален B , то $\Phi \sim B \sim I$. Можно, следовательно, утверждать, что $\Phi = LI$, (2.7)

где L — коэффициент пропорциональности между током в проводящем контуре и магнитным потоком. Величину L называют индуктивностью контура, или его коэффициентом самоиндукции.

Используя закон электромагнитной индукции и выражение (2.7), получаем равенство

$$\mathcal{E}_{is} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (2.8)$$

Из формулы (2.8) следует, что индуктивность — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока в нем на 1 А за 1 с.

Индуктивность, подобно емкости, зависит от геометрических факторов: размеров проводника и его формы, но не зависит непосредственно от силы тока в проводнике. Кроме геометрии проводника, индуктивность зависит от магнитных свойств среды, в которой находится проводник. Очевидно, что индуктивность одного проволочного витка меньше, чем у катушки (соленоида), состоящей из N таких же витков, так как магнитный поток катушки увеличивается в N раз.

Единицу индуктивности в СИ называют генри (обозначается Гн). Индуктивность проводника равна 1 Гн, если в нем при равномерном изменении силы тока на 1 А за 1 с возникает ЭДС самоиндукции 1 В:

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В}}{1 \frac{\text{А}}{\text{с}}} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}.$$

Лекция №11

Тема: «Электромагнитные колебания»

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Свободные и вынужденные электромагнитные колебания. Колебательный контур.
- 1.2. Переменный ток. Действующие значения силы тока и напряжения. Конденсатор и катушка в цепи переменного тока. Активное сопротивление. Электрический резонанс.
- 1.3. Принцип действия электрогенератора. Трансформатор. Производство, передача и потребление электроэнергии. Проблемы энергосбережения. Техника безопасности в обращении с электрическим током.

2. Краткое содержание вопросов

СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Электромагнитные колебания были открыты почти случайно. После того как изобрели лейденскую банку (первый конденсатор) и научились сообщать ей большой заряд с помощью электростатической машины, начали изучать электрический разряд банки. Замыкая обкладки лейденской банки с помощью проволочной катушки, обнаружили, что стальные спицы внутри катушки намагничиваются. В этом ничего удивительного не было: электрический ток и должен намагничивать стальной сердечник катушки. Станным же было то, что нельзя было предсказать, какой конец сердечника катушки окажется северным полюсом, а какой — южным. Повторяя опыт примерно в одинаковых условиях,

получали в одних случаях один результат, а в других — другой. Далеко не сразу поняли, что при разрядке конденсатора через катушку в электрической цепи возникают колебания. За время разрядки конденсатор успевает много раз перезарядиться, и ток меняет направление много раз, в результате чего сердечник может намагничиваться различным образом.

Периодические или почти периодические изменения заряда, силы тока и напряжения называются электромагнитными колебаниями. Обычно эти колебания происходят с очень большой частотой, значительно превышающей частоту механических колебаний. Поэтому для их наблюдения и исследования очень удобен электронный осциллограф. Свободными колебаниями называются колебания, которые возникают в системе после выведения ее из положения равновесия.

Нетрудно получить в электрической цепи также и вынужденные электромагнитные колебания. Вынужденными колебаниями называются колебания в цепи под действием внешней периодически изменяющейся электродвижущей силы.

Свободные электромагнитные колебания возникают при разрядке конденсатора через катушку индуктивности. Вынужденные колебания вызываются периодической ЭДС. **КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР.**

Простейшая система, в которой могут происходить свободные электромагнитные колебания, состоит из конденсатора и катушки, присоединенной к его обкладкам (рис. 4.3), и называется колебательным контуром.

Зарядим конденсатор, присоединив его на некоторое время к батарее с помощью переключателя (рис. 4.4, а). При этом конденсатор получит энергию

$$W_a = \frac{q_m^2}{2C}, \quad (4.1)$$

где q_m — заряд конденсатора, а C — его емкость. Между обкладками конденсатора возникнет разность потенциалов U_m .

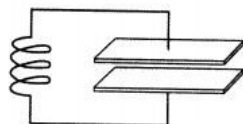


Рис. 4.3

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля тока, которая определяется формулой

$$W_m = \frac{Li^2}{2}, \quad (4.2)$$

где i — сила переменного тока; L — индуктивность катушки.

Полная энергия W электромагнитного поля контура равна сумме энергий его магнитного и электрического полей:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}. \quad (4.3)$$

В момент, когда конденсатор полностью разрядится ($q = 0$), энергия электрического поля станет равной нулю. Энергия же магнитного поля тока, согласно закону сохранения энергии, будет максимальной. В этот момент сила тока также достигнет, конечно, максимального значения I_m .

Несмотря на то что к этому моменту разность потенциалов на концах катушки становится равной нулю, электрический ток не может прекратиться сразу. Этому препятствует явление самоиндукции. Как только сила тока и созданное им магнитное поле начнут уменьшаться, возникает ЭДС самоиндукции, стремящаяся поддержать ток.

В результате конденсатор будет перезаряжаться до тех пор, пока сила тока, постепенно уменьшаясь, не станет равной нулю. Энергия магнитного поля в этот момент также будет равна нулю, энергия электрического поля конденсатора опять станет максимальной.

После этого конденсатор вновь начнет перезаряжаться, и система возвратится в исходное состояние. Если бы не было потерь энергии, то этот процесс продолжался бы сколь угодно долго. Колебания были бы незатухающими. Через промежутки времени, равные периоду колебаний, состояние системы в точности повторялось бы. Полная энергия при этом сохранялась бы неизменной, и ее значение в любой момент времени было бы равно максимальной энергии электрического поля или максимальной энергии магнитного поля:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (4.4)$$

Но в действительности потери энергии неизбежны. Так, в частности, катушка и соединительные провода обладают сопротивлением R , а это ведет к постепенному превращению энергии электромагнитного поля во внутреннюю энергию проводника.

В колебательном контуре энергия электрического поля заряженного конденсатора периодически переходит в энергию магнитного поля тока. При отсутствии сопротивления в контуре полная энергия электромагнитного поля остается неизменной.

АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Перейдем к более детальному рассмотрению процессов, которые происходят в цепи, подключенной к источнику переменного напряжения.

Сила тока в цепи с резистором. Пусть цепь состоит из соединительных проводов и нагрузки с малой индуктивностью и большим сопротивлением R (рис. 4.10). Эту величину, которую мы до сих пор называли электрическим сопротивлением или просто сопротивлением, теперь будем называть активным сопротивлением.

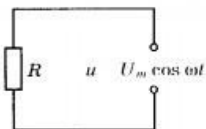


Рис. 4.10

Сопротивление R называется активным, потому что при наличии нагрузки, обладающей этим сопротивлением, цепь поглощает энергию, поступающую от генератора. Эта энергия превращается во внутреннюю энергию проводников — они нагреваются. Будем считать, что напряжение на зажимах цепи меняется по гармоническому закону: $u = U_m \cos \omega t$. Как и в случае постоянного тока, мгновенное значение силы тока прямо пропорционально мгновенному значению напряжения. Поэтому для нахождения мгновенного значения силы тока можно применить закон Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t. \quad (4.16)$$

В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока совпадают по фазе с колебаниями напряжения (рис. 4.11), а амплитуда силы тока определяется равенством

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (4.17)$$

Действующие значения силы тока и напряжения. Величина $\frac{I_m^2}{2}$ есть среднее за период значение квадрата силы тока:

$$i^2 = \frac{I_m^2}{2}. \quad (4.22)$$

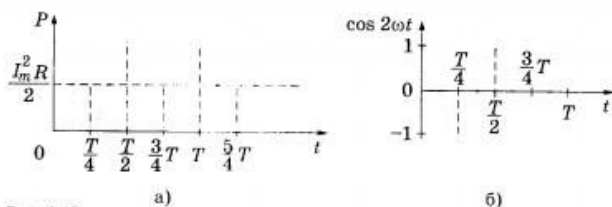


Рис. 4.12

Величина, равная квадратному корню из среднего значения квадрата силы тока, называется действующим значением силы переменного тока. Действующее значение силы переменного тока обозначается через I :

$$I = \sqrt{i^2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (4.23)$$

Действующее значение силы переменного тока равно силе такого постоянного тока, при котором в проводнике выделяется то же количество теплоты, что и при переменном токе за то же время.

Действующее значение переменного напряжения определяется аналогично действующему значению силы тока:

$$U = \sqrt{u^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (4.24)$$

Заменяя в формуле (4.17) амплитудные значения силы тока и напряжения на их действующие значения, получаем

$$I = \frac{U}{R}. \quad (4.25)$$

Это закон Ома для участка цепи переменного тока с резистором.

Как и при механических колебаниях, в случае электрических колебаний обычно нас не интересуют значения силы тока, напряжения и других величин в каждый момент времени. Важны общие характеристики колебаний, такие, как амплитуда, период, частота, действующие значения силы тока и напряжения, средняя мощность. Именно действующие значения силы тока и напряжения регистрируют амперметры и вольтметры переменного тока.

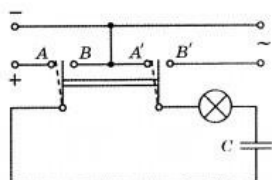


Рис. 4.13

Постоянный ток не может идти по цепи, содержащей конденсатор. Ведь фактически при этом цепь оказывается разомкнутой, так как обкладки конденсатора разделены диэлектриком.

Переменный же ток может идти по цепи, содержащей конденсатор. В этом можно убедиться с помощью простого опыта.

Пусть у нас имеются источники постоянного и переменного напряжений, причем постоянное напряжение на зажимах источника равно действующему значению переменного напряжения. Цепь состоит из конденсатора и лампы накаливания (рис. 4.13), соединенных последовательно. При включении постоянного напряжения (переключатель повернут влево, цепь подключена к точкам AA') лампа не светится. Но при включении переменного напряжения (переключатель повернут вправо, цепь подключена к точкам BB') лампа загорается, если емкость конденсатора достаточно велика.

Как же переменный ток может идти по цепи, если она фактически разомкнута (между пластинами конденсатора заряды перемещаться не могут)? Все дело в том, что происходит периодическая зарядка и разрядка конденсатора под действием переменного напряжения. Ток, идущий в цепи при перезарядке конденсатора, нагревает нить лампы.

Установим, как меняется со временем сила тока в цепи, содержащей только конденсатор, если сопротивлением проводов и обкладок конденсатора можно пренебречь (рис. 4.14).

Напряжение

на

конденсаторе

$$u = \phi_1 - \phi_2 = \frac{q}{C}$$

равно напряжению на концах цепи. Следовательно,

$$\frac{q}{C} = U_m \cos \omega t. \quad (4.26)$$

Заряд конденсатора меняется по гармоническому закону:

$$q = CU_m \cos \omega t. \quad (4.27)$$

Сила тока, представляющая собой производную заряда по времени, равна:

$$i = q' = -U_m C \omega \sin \omega t = U_m C \omega \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (4.28)$$

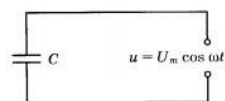


Рис. 4.14

Следовательно, колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на конденсаторе на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 4.15).

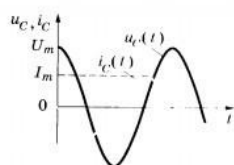


Рис. 4.15

Амплитуда силы тока равна: $I_m = U_m C \omega$. (4.29)

Если

ввести

обозначение

$$\frac{1}{\omega C} = X_C \quad (4.30)$$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим

$$I = \frac{U}{X_C} \quad (4.31)$$

Величину X_C , обратную произведению ωC циклической частоты на электрическую емкость конденсатора, называют емкостным сопротивлением. Роль этой величины аналогична роли активного сопротивления R в законе Ома (см. формулу (4.17)). Действующее значение силы тока связано с действующим значением напряжения на конденсаторе точно так же, как связаны согласно закону Ома сила тока и напряжение для участка цепи постоянного тока. Это и позволяет рассматривать величину X_C как сопротивление конденсатора переменному току (емкостное сопротивление).

Чем больше емкость конденсатора, тем больше ток перезарядки. Это легко обнаружить по увеличению накала лампы при увеличении емкости конденсатора. В то время как сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико, его сопротивление переменному току имеет конечное значение X_C . С увеличением емкости оно уменьшается. Уменьшается оно и с увеличением частоты ω .

В заключение отметим, что на протяжении четверти периода, когда конденсатор заряжается до максимального напряжения, энергия поступает в цепь и запасается в конденсаторе в форме энергии электрического поля. В следующую четверть периода, при разрядке конденсатора, эта энергия возвращается в сеть.

Сопротивление цепи с конденсатором обратно пропорционально произведению циклической частоты на электроемкость. Колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на $\frac{\pi}{2}$.

КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Индуктивность в цепи влияет на силу переменного тока. Это можно доказать с помощью простого опыта.

Соберем цепь из катушки с большой индуктивностью и электрической лампы накаливания (рис. 4.16). С помощью переключателя можно подключить эту цепь либо к источнику постоянного напряжения, либо к источнику переменного напряжения. При этом постоянное напряжение и действующее значение переменного напряжения должны быть равны. Опыт показывает, что лампа светится ярче при постоянном напряжении. Следовательно, действующее значение силы переменного тока в рассматриваемой цепи меньше силы постоянного тока.

Объясняется это явлением самоиндукции. При подключении катушки к источнику постоянного напряжения сила тока в цепи нарастает постепенно. Возникающее при этом вихревое электрическое поле тормозит движение электронов. Лишь по прошествии некоторого времени сила тока достигает наибольшего (установившегося) значения, соответствующего данному постоянному напряжению.

Если напряжение быстро меняется, то сила тока не будет успевать достигнуть тех значений, которые она приобрела бы с течением времени при постоянном напряжении.

Следовательно, максимальное значение силы переменного тока (его амплитуда) ограничивается индуктивностью цепи и будет тем меньше, чем больше индуктивность и чем больше частота приложенного напряжения.

Определим силу тока в цепи, содержащей катушку, активным сопротивлением которой можно пренебречь (рис. 4.17). Для этого предварительно найдем связь между напряжением на катушке и ЭДС самоиндукции в ней.

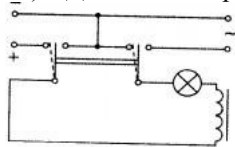


Рис. 4.16

Если сопротивление катушки равно нулю, то и напряженность электрического поля внутри проводника в любой момент времени должна быть равна нулю. Иначе сила тока, согласно закону Ома, была бы бесконечно большой. Равенство нулю

напряженности поля оказывается возможным потому, что напряженность вихревого электрического поля $\vec{E}_i$, порождаемого переменным магнитным полем, в каждой точке равна по модулю и противоположна по направлению

напряженности кулоновского поля $\vec{E}_k$, создаваемого в проводнике зарядами, расположенными на зажимах источника и в проводах цепи.

Из равенства $\vec{E}_i = -\vec{E}_k$ следует, что удельная работа вихревого поля (т. е. ЭДС самоиндукции e_i) равна по модулю и противоположна по знаку удельной работе кулоновского поля. Учитывая, что удельная работа кулоновского поля равна напряжению на концах катушки, можно записать: $e_i = -i$. При изменении силы тока по гармоническому закону $i = I_m \sin \omega t$ ЭДС самоиндукции равна: $e_i = -L \omega I_m \cos \omega t$. (4.32) Так как $u = -e_i$, то напряжение на концах катушки оказывается равным

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

где $U_m = L\omega I_m$ — амплитуда напряжения.

Следовательно, колебания напряжения на катушке опережают по фазе колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$, или, что то же самое, колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 4.18).

Амплитуда силы тока в катушке равна:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}. \quad (4.33)$$

Если ввести обозначение

$$\omega L = X_L \quad (4.34)$$

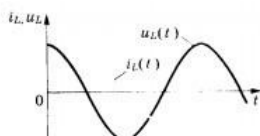


Рис. 4.18

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим:

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (4.35)$$

Величину X_L , равную произведению циклической частоты на индуктивность, называют индуктивным сопротивлением.

Согласно формуле (4.35) действующее значение силы тока связано с действующим значением напряжения и индуктивным сопротивлением соотношением, подобным закону Ома для цепи постоянного тока.

Индуктивное сопротивление зависит от частоты ω . Постоянный ток вообще «не замечает» индуктивности катушки. При $\omega = 0$ индуктивное сопротивление равно нулю ($X_L = 0$).

Чем быстрее меняется напряжение, тем больше ЭДС самоиндукции и тем меньше амплитуда силы тока.

Катушка индуктивности оказывает сопротивление переменному току. Это сопротивление, называемое индуктивным, равно произведению циклической частоты на индуктивность. Колебания силы тока в цепи с

индуктивностью отстают по фазе от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$.

ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрическая энергия обладает неоспоримыми преимуществами перед всеми другими видами энергии. Ее можно передавать по проводам на огромные расстояния со сравнительно малыми потерями и удобно распределять между потребителями. Главное же в том, что эту энергию с помощью достаточно простых устройств легко превратить в любые другие формы: механическую, внутреннюю (нагревание тел), энергию света и т. д.

Переменный ток в отличие от постоянного имеет то преимущество, что напряжение и силу тока можно в очень широких пределах преобразовывать (трансформировать) почти без потерь энергии. Такие преобразования необходимы во многих электро- и радиотехнических устройствах. Но особенно необходима трансформация напряжения и тока при передаче электроэнергии на большие расстояния.

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрический ток вырабатывается в генераторах — устройствах, преобразующих энергию того или иного вида в электрическую энергию. К генераторам относятся гальванические элементы, электростатические машины, термобатареи, солнечные батареи и т. п. Исследуются возможности создания принципиально новых типов генераторов. Например, разрабатываются так называемые топливные элементы, в которых энергия, освобождающаяся в результате реакции водорода с кислородом, непосредственно прекращается в электрическую.

Область применения каждого из перечисленных типов генераторов электроэнергии определяется их характеристиками. Так, электростатические машины создают высокую разность потенциалов, но не способны создать в цепи сколько-нибудь значительную силу тока. Гальванические элементы могут дать большой ток, но продолжительность их действия невелика.

Основную роль в наше время выполняют электромеханические индукционные генераторы переменного тока. В этих генераторах механическая энергия превращается в электрическую. Их действие основано на явлении электромагнитной индукции. Такие генераторы имеют сравнительно простое устройство и позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении.

В дальнейшем, говоря о генераторах, мы будем иметь в виду именно индукционные электромеханические генераторы.

Генератор переменного тока.

В настоящее время имеется много различных типов индукционных генераторов. Но все они состоят из одних и тех же основных частей. Это, во-первых, электромагнит или постоянный магнит, создающий магнитное поле, и, во-вторых, обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС (в рассмотренной модели генератора это вращающаяся рамка). Так как ЭДС, наводимые в последовательно соединенных витках, складываются, то амплитуда ЭДС индукции в рамке

пропорциональна числу ее витков. Она пропорциональна также амплитуде переменного магнитного потока ($\Phi_m = BS$) через каждый виток (см. § 31).

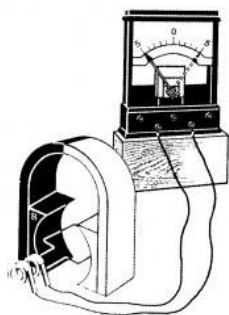


Рис. 5.1

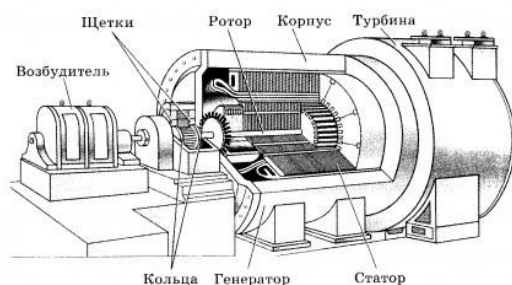


Рис. 5.2

Для получения большого магнитного потока в генераторах применяют специальную магнитную систему, состоящую из двух сердечников, изготовленных из электротехнической стали. Обмотки, создающие магнитное поле, размещены в пазах одного из сердечников, а обмотки, в которых индуцируется ЭДС, — в пазах другого. Один из сердечников (обычно внутренний) вместе с обмоткой вращается вокруг горизонтальной или вертикальной оси. Поэтому он называется ротором. Неподвижный сердечник с обмоткой называют статором. Зазор между сердечниками статора и ротора делают как можно меньшим для увеличения потока вектора магнитной индукции.

В изображенной на рисунке 5.1 модели генератора вращается проволочная рамка, которая является ротором (но без железного сердечника). Магнитное поле создает неподвижный постоянный магнит. Разумеется, можно было бы поступить и наоборот: вращать магнит, а рамку оставить неподвижной.

В больших промышленных генераторах вращается именно электромагнит, являющийся ротором, а обмотки, в которых наводится ЭДС, уложены в пазах статора и остаются неподвижными. Дело в том, что подводить ток к ротору или отводить его из обмотки ротора во внешнюю цепь приходится при помощи скользящих контактов. Для этого ротор снабжается контактными кольцами, присоединенными к концам его обмотки (рис. 5.2). Неподвижные пластины — щетки — прижаты к кольцам и осуществляют связь обмотки ротора с внешней цепью. Сила тока в обмотках электромагнита, создающего магнитное поле, значительно меньше силы тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь. Поэтому генерируемый ток удобнее снимать с неподвижных обмоток, а через скользящие контакты подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся электромагниту. Этот ток вырабатывается отдельным генератором постоянного тока (возбудителем), расположенным на том же валу.

В малоомощных генераторах магнитное поле создается вращающимся постоянным магнитом. В таком случае кольца и щетки вообще не нужны.

Появление ЭДС в неподвижных обмотках статора объясняется возникновением в них вихревого электрического поля, порожденного изменением магнитного потока при вращении ротора.

Современный генератор электрического тока — это внушительное сооружение из медных проводов, изоляционных материалов и стальных конструкций. При размерах в несколько метров важнейшие детали генераторов изготавливаются с точностью до миллиметра. Нигде в природе нет такого сочетания движущихся частей, которые могли бы порождать электрическую энергию столь же непрерывно и экономично.

ПЕРЕДАЧА

ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Потребители электроэнергии имеются повсюду. Производится же она в сравнительно немногих местах, близких к источникам топливо- и гидроресурсов. **Электроэнергию** не удастся консервировать в больших масштабах. Она должна быть потреблена сразу же после получения. Поэтому возникает необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния.

Передача электроэнергии связана с заметными потерями, так как электрический ток нагревает провода линий электропередачи. В соответствии с законом Джоуля — Ленца энергия, расходуемая на нагрев проводов линии, определяется формулой

$$Q = I^2 R t = \frac{P^2}{U^2} R t,$$

где R — сопротивление линии, U — передаваемое напряжение, P — мощность источника тока.

При очень большой длине линии передача энергии может стать экономически невыгодной. Значительно снизить сопротивление линии R практически весьма трудно. Поэтому приходится уменьшать силу тока I .

Так как мощность источника тока P равна произведению силы тока I на напряжение U , то для уменьшения передаваемой мощности нужно повысить передаваемое напряжение в линии передачи.

Поэтому на крупных электростанциях устанавливают повышающие трансформаторы. Трансформатор увеличивает напряжение в линии во столько же раз, во сколько раз уменьшает силу тока.

Чем длиннее линия передачи, тем выгоднее использовать более высокое напряжение. Так, в высоковольтной линии передачи Волжская ГЭС — Москва и некоторых других используют напряжение 500 кВ. Между тем генераторы переменного тока настраивают на напряжения, не превышающие 16—20 кВ. Более высокое напряжение потребовало бы принятия сложных специальных мер для изоляции обмоток и других частей генераторов.

Для непосредственного использования электроэнергии в электроприводах станков, в осветительной сети и для других целей напряжение на концах линии нужно понизить.

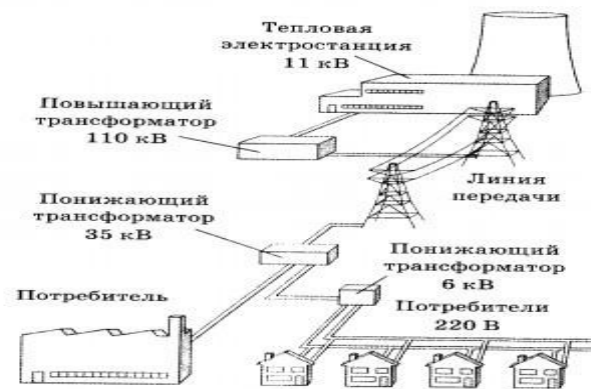


Рис. 5.7

Это достигается с помощью понижающих трансформаторов. Общая схема передачи энергии и ее распределения показана на рисунке 5.7.

Обычно понижение напряжения и соответственно увеличение силы тока осуществляются в несколько этапов. На каждом этапе напряжение становится все меньше, а территория, охватываемая электрической сетью, — все шире.

При очень высоком напряжении между проводами может начаться разряд, приводящий к потерям энергии. Допустимая амплитуда переменного напряжения должна быть такой, чтобы при заданной площади поперечного сечения провода потери энергии вследствие разряда были незначительными.

Электрические станции ряда районов страны объединены высоковольтными линиями электропередачи, образуя общую электрическую сеть, к которой подключены потребители. Такое объединение, называемое энергосистемой, дает возможность сгладить пиковые нагрузки потребления энергии в утренние и вечерние часы. Энергосистема обеспечивает бесперебойность подачи энергии потребителям вне зависимости от места их расположения. Сейчас почти вся территория нашей страны обеспечивается электроэнергией объединенными энергетическими системами. Действует Единая энергетическая система европейской части страны.

Передача электроэнергии на большие расстояния с малыми потерями — сложная задача. Использование электрического тока высокого напряжения помогает успешно разрешить ее.

Лекция №12

Тема: «Электромагнитные волны»

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Электромагнитные волны. Распространение электромагнитных волн. Виды электромагнитных волн.
- 1.2. Принципы радиосвязи и телевидения.

2. Краткое содержание вопросов

ЧТО

ТАКОЕ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ

ВОЛНА

Распространение электромагнитных взаимодействий.

Фундаментальные законы природы, к числу которых относятся и открытые Максвеллом законы электромагнетизма, замечательны тем, что они могут дать гораздо больше, чем заключено в тех фактах, на основе которых они получены.

Среди бесчисленных, очень интересных и важных следствий, вытекающих из максвелловских законов электромагнетизма, одно заслуживает особого внимания. Это вывод о том, что электромагнитное взаимодействие распространяется с конечной скоростью.

Согласно теории дальнего действия кулоновская сила, действующая на электрический заряд, сразу же изменится, если соседний заряд сдвинуть с места. Действие, по этой теории, передается мгновенно. С точки зрения этой гипотезы иначе и быть не может: ведь один заряд непосредственно через пустоту «чувствует» присутствие другого.

Согласно же представлению о ближнем действии все происходит не только совершенно иначе, но и намного сложнее. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле в соседних областях пространства. Переменное же магнитное поле, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле и т. д.

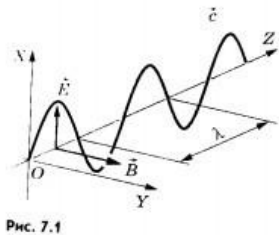
Перемещение заряда вызывает, таким образом, «возмущение» электромагнитного поля, которое, распространяясь, охватывает все большие и большие области окружающего пространства, изменяя то поле, которое существовало до смещения заряда. Наконец, это «возмущение» достигает другого заряда, что и приводит к изменению действующей на него силы. Но произойдет это не в тот момент времени, когда произошло смещение первого заряда. Процесс распространения электромагнитного возмущения, механизм которого был открыт Максвеллом, происходит с конечной, хотя и очень большой, скоростью. В этом и состоит фундаментальное свойство поля, которое не оставляет сомнений в его реальности.

Максвелл математически доказал, что скорость распространения этого процесса («возмущения» электромагнитного поля) равна скорости света в вакууме.

Электромагнитная волна. Представьте себе, что электрический заряд не просто сместился из одной точки в другую, а был приведен в быстрые колебания вдоль некоторой прямой. Заряд движется подобно телу, подвешенному на пружине, но только колебания его происходят со значительно большей частотой. Тогда электрическое поле в непосредственной близости от заряда начнет периодически изменяться. Период этих изменений, очевидно, будет равен периоду колебаний заряда. Переменное электрическое поле будет порождать периодически меняющееся магнитное поле, а оно, в свою очередь, вызовет появление переменного электрического поля уже на большем расстоянии от заряда и т. д.

В окружающем заряд пространстве, захватывая все большие и большие области, возникает система взаимно перпендикулярных, периодически изменяющихся электрических и магнитных полей. На рисунке 7.1 изображен «мгновенный снимок» такой системы полей на большом расстоянии от колеблющегося заряда.

На этом рисунке показаны векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в различных точках пространства. Направление Z — одно из направлений распространения электромагнитных возмущений.



Образуется так называемая электромагнитная волна, бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда.

В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически. Чем дальше расположена точка от заряда, тем позднее достигнут ее колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$. Следовательно, на разных расстояниях от заряда колебания каждого из этих векторов происходят с различными фазами.

Колебания векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в любой точке совпадают по фазе. Кратчайшее расстояние между двумя ближайшими точками, в которых колебания происходят в одинаковых фазах, есть длина волны λ данный момент времени векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ меняются в пространстве по оси Z по закону синуса с периодом λ .

Направления этих двух колеблющихся векторов — напряженности электрического поля и индукции магнитного поля — перпендикулярны направлению распространения волны. Электромагнитная волна является поперечной.

Таким образом, векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в электромагнитной волне перпендикулярны друг к другу и перпендикулярны направлению распространения волны. Если вращать буравчик с правой нарезкой от вектора $\vec{E}$ к вектору $\vec{B}$, то поступательное перемещение буравчика будет совпадать с направлением вектора скорости волны $\vec{c}$ (см. рис. 7.1).

Излучение электромагнитных волн. Электромагнитные волны излучаются колеблющимися зарядами. При этом существенно, что скорость движения таких зарядов меняется со временем, т. е. что они движутся с ускорением. Наличие ускорения у движущихся зарядов — главное условие излучения ими электромагнитных волн.

Электромагнитное поле излучается заметным образом не только при колебаниях заряда, но и при любом достаточно быстром изменении его скорости. Интенсивность излучаемой волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

Наглядно это можно представить себе так. При движении заряженной частицы с постоянной скоростью созданные ею электрическое и магнитное поля, подобно развевающемуся шлейфу, сопровождают частицу. При ускорении частицы обнаруживается присущая электромагнитному полю инертность. Поле «отрывается» от частицы и начинает самостоятельное существование в форме электромагнитных волн.

Энергия электромагнитного поля волны в любой фиксированный момент времени меняется периодически в пространстве, вместе с изменением векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$. Бегущая волна несет с собой энергию, перемещающуюся со скоростью $\vec{c}$ вдоль направления распространения волны. В результате этого энергия, переносимая электромагнитной волной в любой точке пространства, меняется периодически со временем.

Максвелл был глубоко убежден в реальности электромагнитных волн. Но он не дождался их экспериментального обнаружения. Лишь через 10 лет после его смерти электромагнитные волны были экспериментально получены Г. Герцем.

Электромагнитные волны возникают из-за того, что переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле. Это переменное магнитное поле, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле. Электромагнитная волна переносит энергию.

ПЛОТНОСТЬ

ПОТОКА

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО

ИЗЛУЧЕНИЯ

Излучаемые электромагнитные волны несут с собой энергию.

Плотность потока излучения. Рассмотрим поверхность площадью S , через которую электромагнитные волны переносят энергию. На рисунке 7.5 изображена такая площадка.



Рис. 7.5

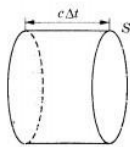


Рис. 7.6

Прямые линии указывают направления распространения электромагнитных волн. Это лучи — линии, перпендикулярные поверхностям, во всех точках которых колебания происходят в одинаковых фазах. Такие поверхности называются волновыми поверхностями. **Плотностью потока электромагнитного излучения** / называют отношение электромагнитной энергии ΔW , проходящей за время Δt через перпендикулярную лучам поверхность площадью S , к произведению площади S на время Δt :

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}. \quad (7.1)$$

Фактически это мощность **электромагнитного излучения** (энергия в единицу времени), проходящего через единицу площади поверхности. Плотность потока излучения в СИ выражают в ваттах на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Иногда эту величину называют интенсивностью волны.

Выразим I через плотность электромагнитной энергии и скорость ее распространения c . Выберем поверхность площадью S , перпендикулярную лучам, и построим на ней как на основании цилиндр с образующей $c \Delta t$ (рис. 7.6). Объем цилиндра $\Delta V = S c \Delta t$. Энергия электромагнитного поля внутри цилиндра равна произведению плотности энергии на объем: $W = w c \Delta t S$. Вся эта энергия за время Δt пройдет через правое основание цилиндра. Поэтому из формулы (7.1) получаем

$$I = \frac{w c \Delta t S}{S \Delta t} = w c, \quad (7.2)$$

т. е. **плотность потока излучения** равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость ее распространения.

ПРИНЦИПЫ

РАДИОСВЯЗИ

Принципы радиосвязи заключаются в следующем. Переменный электрический ток высокой частоты, созданный в передающей антенне, вызывает в окружающем пространстве быстроменяющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитной волны. Достигая приемной антенны, электромагнитная волна вызывает в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик.

Важнейшим этапом в развитии радиосвязи было создание в 1913 г. генератора незатухающих электромагнитных колебаний. Кроме передачи телеграфных сигналов, состоящих из коротких и более продолжительных импульсов («точки» и «тире») электромагнитных волн, стала возможной надежная и высококачественная радиотелефонная связь — передача речи и музыки с помощью электромагнитных волн.

Радиотелефонная связь. При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Казалось бы, если эти колебания усилить и подать в антенну, то можно будет передавать на расстояние речь и музыку с помощью электромагнитных волн.

Однако в действительности такой способ передачи неосуществим. Дело в том, что частота звуковых колебаний мала, а электромагнитные волны низкой (звуковой) частоты имеют малую интенсивность.

Модуляция. Для осуществления радиотелефонной связи необходимо использовать высокочастотные колебания, интенсивно излучаемые антенной. Незатухающие гармонические колебания высокой частоты вырабатывает генератор, например генератор на транзисторе.

Для передачи звука эти высокочастотные колебания изменяют, или, как говорят, модулируют, с помощью электрических колебаний низкой (звуковой) частоты. Можно, например, изменять со звуковой частотой амплитуду высокочастотных колебаний. Этот способ называют амплитудной модуляцией.

На рисунке 7.8 приведены три графика: а) график колебаний высокой частоты, которую называют несущей частотой; б) график колебаний звуковой частоты, т. е. модулирующих колебаний; в) график модулированных по амплитуде колебаний.

Без модуляции мы в лучшем случае можем контролировать лишь, работает станция или молчит. Без модуляции нет ни телеграфной, ни телефонной, ни телевизионной передачи.

Модуляция — медленный процесс. Это такие изменения в высокочастотной колебательной системе, при которых она успевает совершить очень много высокочастотных колебаний, прежде чем их амплитуда изменится заметным образом.

Детектирование. В приемнике из модулированных колебаний высокой частоты выделяются низкочастотные колебания. Такой процесс преобразования сигнала называют детектированием.

Полученный в результате детектирования сигнал соответствует тому звуковому сигналу, который действовал на микрофон передатчика. После усиления колебания низкой частоты могут быть превращены в звук.

РАДИОЛОКАЦИЯ

Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют радиолокацией. Радиолокационная установка — радиолокатор (или радар) — состоит из передающей и приемной частей. В радиолокации используют электрические колебания сверхвысокой частоты (10^8 — 10^{11} Гц). Мощный генератор СВЧ связан с антенной, которая излучает остронаправленную волну. В радиолокаторах, работающих на длинах волн порядка 10 см и меньше, такая волна создается антеннами в виде параболических зеркал. Для волн метрового диапазона антенны имеют вид сложных систем вибраторов. При этом острая направленность излучения получается вследствие сложения волн. Антенна устроена так, что волны, посланные каждым из вибраторов, при сложении взаимно усиливают друг друга лишь в заданном направлении. В остальных направлениях происходит полное или частичное их взаимное гашение.

Отраженная волна улавливается либо той же излучающей антенной, либо другой приемной антенной, тоже остронаправленной. Строгая направленность излучения позволяет говорить о луче радиолокатора. Направление на объект и определяется как направление луча в момент приема отраженного сигнала.

Для определения расстояния до цели применяют импульсный режим излучения. Передатчик излучает волны кратковременными импульсами. Длительность каждого импульса составляет миллионные доли секунды, а промежутки между импульсами примерно в 1000 раз больше. Во время пауз принимаются отраженные волны.

Определение расстояния R проводится путем измерения общего времени t прохождения радиоволн до цели и обратно. Так как скорость радиоволн

$$R = \frac{ct}{2},$$

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с в атмосфере практически постоянна на всем пути луча, то вследствие рассеяния радиоволн до приемника доходит лишь ничтожная часть той энергии, которую излучает передатчик. Потому приемники радиолокаторов усиливают принятый сигнал в миллионы миллионов раз (10^{12}). Такой чувствительный приемник, разумеется, должен быть отключен на время посылки импульса передатчиком. Для фиксации посланного и отраженного сигналов используют электронно-лучевую трубку. В момент посылки импульса светлая точка, равномерно движущаяся по экрану электронно-лучевой трубки, отклоняется. На экране появляется всплеск около нулевой отметки шкалы дальности. Светящееся пятнышко на экране продолжает равномерно двигаться вдоль шкалы и в момент приема слабого отраженного сигнала снова отклоняется. Расстояние между всплесками на экране пропорционально времени t прохождения сигнала и, следовательно, расстоянию R до цели. Это позволяет проградуировать шкалу непосредственно в километрах.

Радиолокационные установки обнаруживают корабли и самолеты на расстояниях до нескольких сот километров. На их работу лишь незначительно влияют условия погоды и время суток. В больших аэропортах локаторы следят за взлетающими и идущими на посадку самолетами. Наземная служба передает по радио пилотам необходимые указания и таким образом обеспечивает безопасность полетов. Внешний вид аэродромного локатора показан на рисунке 7.23. Корабли и самолеты также снабжены радиолокаторами, служащими для навигационных целей. Такие локаторы создают на экране картину расположения объектов, рассеивающих радиоволны, и оператор видит радиолокационную карту местности.

В настоящее время применение радиолокации становится все более разнообразным. С помощью локаторов наблюдают метеоры в верхних слоях атмосферы. Локаторы используются службой погоды для наблюдения за облаками.

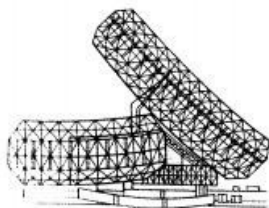


Рис. 7.23

Наконец, локаторы используются в космических исследованиях. Каждый космический корабль обязательно имеет на борту несколько радиолокаторов. В 1946 г. в США и Венгрии был осуществлен эксперимент по приему сигнала, отраженного от поверхности Луны. В 1961 г. учеными нашей страны произведена радиолокация планеты Венера, что позволило оценить период ее вращения вокруг своей оси. В настоящее время осуществлена локация и других планет Солнечной системы.

Радиолокаторы используются для обнаружения самолетов и кораблей, в службе погоды, для локации планет и др.

Лекция №13

Тема: «Световые волны»

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Свет как электромагнитная волна. Волновые и корпускулярные свойства света.
- 1.2. Линзы. Построение изображений в линзах. Формула тонкой линзы.
- 1.3. Оптические приборы. Разрешающая способность оптических приборов.

1.4. Интерференция и дифракция света. Дисперсия света.

1.5. Различные виды электромагнитных излучений, их свойства и практические применения.

2. Краткое содержание вопросов

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА.

ЗАКОН

ОТРАЖЕНИЯ

СВЕТА

Законы отражения и преломления света можно вывести из одного общего принципа, описывающего поведение волн. Этот принцип впервые был выдвинут современником Ньютона Христианом Гюйгенсом.

Принцип Гюйгенса. Согласно принципу Гюйгенса каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн. Для того чтобы, зная положение волновой поверхности (фронта волны) в момент времени t , найти ее положение в следующий момент времени $t + \Delta t$, нужно каждую точку фронта рассматривать как источник вторичных волн. Точки M_1, M_2, M_3 и т. д. являются такими источниками. Поверхность, касательная к фронтам вторичных волн, представляет собой фронт первичной волны в следующий момент времени (рис. 8.4). Этот принцип в равной мере пригоден для описания распространения волн любой природы: механических, световых и т. д. Гюйгенс сформулировал его первоначально именно для световых волн.

Для механических волн принцип Гюйгенса имеет наглядное истолкование: частицы среды, до которых доходят колебания, в свою очередь, колеблясь, приводят в движение соседние частицы среды, с которыми они взаимодействуют.



Рис. 8.4

Закон

отражения.

Из теории Гюйгенса вытекает закон отражения света: *луч падающий, луч отраженный и нормаль к отражающей поверхности в точке падения лежат в одной плоскости, причем угол падения равен углу отражения.*

При обратном направлении распространения световых лучей отраженный луч станет падающим, а падающий — отраженным. Обратимость хода световых лучей — их важное свойство.

ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА.

Наблюдение преломления света. На границе двух сред свет меняет направление своего распространения. Часть световой энергии возвращается в первую среду, т. е. происходит отражение света. Если вторая среда прозрачна, то свет частично может пройти через границу сред, также меняя при этом, как правило, направление распространения.

Это явление называется преломлением света.

Вследствие преломления наблюдается кажущееся изменение формы предметов, их расположения и размеров. В этом нас могут убедить простые наблюдения. Положим на дно пустого непрозрачного стакана монету или другой небольшой предмет. Подвинем стакан так, чтобы центр монеты, край стакана и глаз находились на одной прямой.

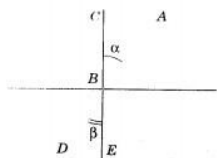


Рис. 8.6

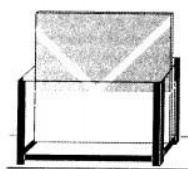


Рис. 8.7

Не меняя положения головы, будем наливать в стакан воду. По мере повышения уровня воды дно стакана с монетой как бы приподнимается. Монета, которая ранее была видна лишь частично, теперь будет видна полностью. Установим наклонно карандаш в сосуде с водой. Если посмотреть на сосуд сбоку, то можно заметить, что часть карандаша, находящаяся в воде, кажется сдвинутой в сторону.

Эти явления объясняются изменением направления лучей на границе двух сред — преломлением света.

Закон преломления света определяет взаимное расположение падающего луча АВ (рис. 8.6), преломленного луча DB и перпендикуляра CE к поверхности раздела сред, восстановленного в точке падения. Угол α называется *углом падения*, а угол β — *углом преломления*.

Падающий, отраженный и преломленный лучи нетрудно наблюдать, сделав узкий световой пучок видимым. Ход такого пучка в воздухе можно проследить, если пустить в воздух немного дыма или же поставить экран под небольшим углом к лучу. Преломленный пучок виден также в подкрашенной флюоресцином воде аквариума (рис. 8.7).

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n,$$

(8.4)

где n — постоянная величина, не зависящая от угла падения. Сформулируем законы преломления света.

1) *Падающий луч, преломленный луч и нормаль к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.*

2) *Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для этих двух сред, равная отношению показателю преломления второй среды относительно первой.*

Показатель преломления. Из принципа Гюйгенса не только следует закон преломления, но с помощью этого принципа раскрывается физический смысл показателя преломления. Он равен отношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление:

$$n = \frac{v_1}{v_2}. \quad (8.5)$$

Если угол преломления β меньше угла падения α , то согласно уравнению (8.4) скорость света во второй среде меньше, чем в первой.

Показатель преломления среды относительно вакуума называют абсолютным показателем преломления этой среды. Он показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в среде, и равен отношению синуса угла

падения к синусу угла преломления при переходе светового луча из вакуума в данную среду: $n = \frac{c}{v}$.

Пользуясь формулой (8.5), можно выразить относительный показатель преломления через абсолютные показатели преломления n_1 и n_2 первой и второй сред.

Действительно, так как $n_1 = \frac{c}{v_1}$ и $n_2 = \frac{c}{v_2}$, где c — скорость света в вакууме, то

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (8.6)$$

Среду с меньшим абсолютным показателем преломления принято называть оптически менее плотной средой.

Абсолютный показатель преломления определяется скоростью распространения света в данной среде, которая зависит от физических свойств и состояния среды, т. е. от температуры вещества, его плотности, наличия в нем упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от длины волны λ света. Для красного света он меньше, чем для зеленого, а для зеленого меньше, чем для фиолетового. Поэтому в таблицах значений показателей преломления для разных веществ обычно указывается, для какого света приведено данное значение при каком состоянии находится среда. Если таких указаний нет, то это означает, что зависимостью от приведенных факторов можно пренебречь.

В большинстве случаев приходится рассматривать переход света через границу воздух — твердое тело или воздух — жидкость, а не через границу вакуум — среда. Однако абсолютный показатель преломления n_2 твердого или жидкого вещества отличается от показателя преломления того же вещества относительно воздуха незначительно. Так, абсолютный показатель преломления воздуха при нормальных условиях для желтого света равен примерно

$$n_1 \approx 1,000292.$$

Следовательно,

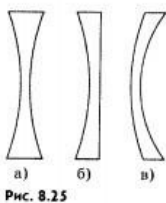
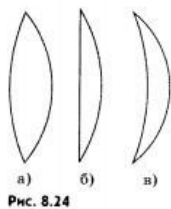
$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2. \quad (8.7)$$

ЛИНЗА

Прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями, называют *линзой*.

Виды линз. Линза может быть ограничена двумя выпуклыми сферическими поверхностями (двояковыпуклая линза — рис. 8.24, а), выпуклой сферической поверхностью и плоскостью (плосковыпуклая линза — рис. 8.24, б), выпуклой и вогнутой сферическими поверхностями (вогнуто-выпуклая линза — рис. 8.24, в). Эти линзы посередине толще, чем у краев, и все они называются выпуклыми.

Линзы, которые посередине тоньше, чем у краев, называются вогнутыми. На рисунке 8.25 изображены три вида вогнутых линз: *двояковогнутая* — а, *плосковогнутая* — б и *выпукло-вогнутая* — в.



Тонкая линза. Мы рассмотрим наиболее простой случай, когда толщина линзы $I = AB$ пренебрежимо мала по сравнению с радиусами R_1 и R_2 сферических поверхностей линзы (рис. 8.26) и расстоянием предмета от линзы. Такую линзу называют тонкой линзой. В дальнейшем, говоря о линзе, мы всегда будем подразумевать *тонкую линзу*.

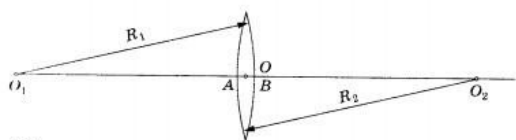


Рис. 8.26

Точки А и В — вершины сферических сегментов — расположены в тонкой линзе столь близко друг от друга, что их можно принять за одну точку, которую называют оптическим центром линзы и обозначают буквой О. Луч света, который проходит через оптический центр линзы, не изменяет своего направления, а только смещается, но, так как линза тонкая, этим смещением можно пренебречь.

Прямую O_1O_2 (см. рис. 8.26), проходящую через центры сферических поверхностей, которые ограничивают линзу, называют ее главной оптической осью. Главная оптическая ось тонкой линзы проходит через оптический центр. Любую другую прямую, проходящую через оптический центр, называют побочной оптической осью (рис. 8.27).

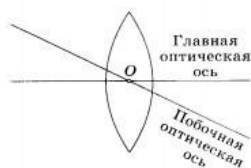


Рис. 8.27

Изображение в линзе. Подобно плоскому зеркалу, линза создает изображения источников света. Это означает, что свет, исходящий из какой-либо точки предмета (источника), после преломления в линзе снова собирается в одну точку (изображение) независимо от того, через какую часть линзы прошли лучи. Если по выходе из линзы лучи сходятся, они образуют действительное изображение. В случае же, когда прошедшие через линзу лучи расходятся, то пересекаются в одной точке не сами эти лучи, а лишь их продолжения. Изображение в этом случае мнимое. Его можно наблюдать глазом непосредственно или с помощью оптических приборов.

Собирающая линза. Обычно линзы изготавливают из стекла. Выпуклые линзы являются собирающими. Любую из них схематично можно себе представить как совокупность стеклянных призм. В воздухе каждая призма отклоняет лучи к основанию. Все лучи, идущие через линзу, отклоняются в сторону ее главной оптической оси.

Точка, в которой пересекаются после преломления в собирающей линзе лучи, падающие на нее параллельно главной оптической оси, называется главным фокусом линзы. Эту точку обозначают буквой F (рис. 8.29, а). Пучки, параллельные главной оптической оси, можно направить на линзу и с противоположной стороны.



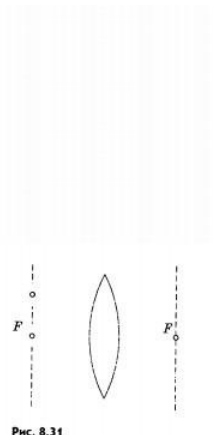
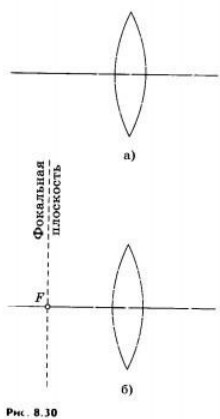
Рис. 8.29

Точка, в которой они сойдутся, пройдя линзу, будет другим главным фокусом (рис. 8.29, б).

Таким образом, у линзы два главных фокуса. В однородной среде они располагаются по обе стороны линзы на одинаковых расстояниях от нее. Эти расстояния называются фокусным расстоянием линзы; его обозначают буквой F (той же буквой, что и фокус).

Направим три узких параллельных пучка лучей от осветителя под углом к главной оптической оси линзы. Мы увидим, что пересечение лучей произойдет не в главном фокусе, а в другой точке (рис. 8.30, а).

Но примечательно то, что точки пересечения независимо от углов, образуемых этими пучками с главной оптической осью, располагаются в плоскости, перпендикулярной главной оптической оси линзы и проходящей через главный фокус (рис. 8.30, б). Эту плоскость называют фокальной плоскостью.



Поместив светящуюся точку в фокусе линзы (или в любой точке ее фокальной плоскости), получим после преломления параллельные лучи (рис. 8.31).

Если сместить источник дальше от фокуса линзы, лучи за линзой становятся сходящимися и дают действительное изображение (рис. 8.32, а). Когда же источник находится ближе фокуса, преломленные лучи расходятся и изображение получается мнимым (рис. 8.32, б).

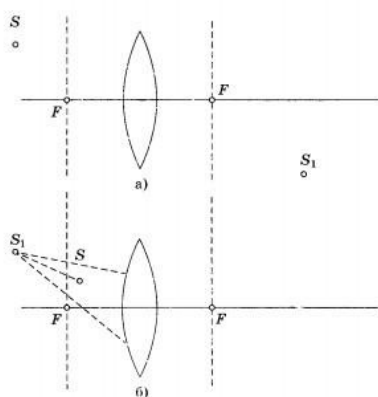


Рис. 8.32

Рассеивающая линза. Вогнутые линзы, находящиеся в оптически менее плотной среде (по сравнению с материалом линзы), являются рассеивающими. Направив на такую линзу лучи параллельно главной оптической оси, мы получим расходящийся пучок лучей. Их продолжения пересекаются в главном фокусе рассеивающей линзы.

В этом случае главный фокус является мнимым (рис. 8.33) и расположен на расстоянии F от линзы. Другой мнимый главный фокус находится по другую сторону линзы на таком же расстоянии, если среда по обе стороны линзы одна и та же (рис. 8.34).

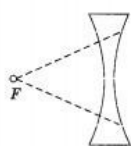


Рис. 8.33

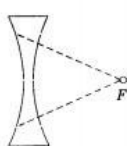


Рис. 8.34

Оптическая сила линзы. Величину, обратную фокусному расстоянию, называют оптической силой линзы. Ее обозначают буквой D :

$$D = \pm \frac{1}{|F|}.$$

$D > 0$, если линза собирающая, $D < 0$, если линза рассеивающая.

Чем ближе к линзе ее фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их, и тем больше оптическая сила линзы.

Оптическую силу D линз выражают в диоптриях (дптр). Оптической силой в 1 дптр обладает линза с фокусным расстоянием 1 м.

Основной характеристикой линзы является ее оптическая сила.

ПОСТРОЕНИЕ

ИЗОБРАЖЕНИЯ

В

ЛИНЗЕ.

Рассмотрим способы построения изображения в линзе.

Свойства тонкой линзы определяются главным образом расположением ее фокусов. Это означает, что, зная расстояние от источника света до линзы и ее фокусное расстояние (положение фокусов), можно найти расстояние до изображения, не рассматривая ход лучей внутри линзы. Поэтому нет необходимости изображать на чертеже точный вид сферических поверхностей линзы. Собирающую линзу обозначают символом, показанным на рисунке 8.35, а рассеивающую — символом, приведенным на рисунке 8.36.

Нам уже известно, что все лучи, вышедшие из какой-либо точки предмета, пройдя сквозь линзу, пересекаются также в одной точке. Именно поэтому тонкая линза дает изображение любой точки предмета, а следовательно, и всего предмета в целом.

Для построения изображений, получаемых с помощью собирающей линзы, фокусы и оптический центр которой заданы, мы будем пользоваться в основном тремя видами «удобных» лучей.

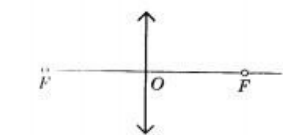


Рис. 8.35

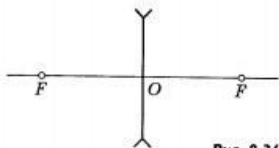


Рис. 8.36

Построим изображение предмета АВ (рис. 8.37). Чтобы найти изображение точки А, направим луч АС параллельно главной оптической оси. После преломления он пройдет через фокус линзы. Другой луч — АД можно направить через фокус. После преломления он пройдет параллельно главной оптической оси. В точке пересечения этих двух преломленных лучей будет находиться изображение A_1 точки А. Так же можно построить и все остальные точки изображения. Не следует только думать, что изображение создается двумя или тремя лучами; оно формируется всем бесчисленным множеством лучей, вышедших из точки А и собравшихся в точке A_1 . В частности, в точку попадает луч AOA_1 , прошедший через оптический центр О линзы. Таким образом, для построения изображения точки можно использовать любые два из трех «удобных» лучей, ход которых через линзу известен:

- 1) луч, проходящий через оптический центр;
- 2) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси;
- 3) луч, проходящий через фокус.

Изображение предмета АВ в этом случае будет действительным, перевернутым, увеличенным.

Рассмотрим еще случай, когда необходимо построить изображение точки, расположенной на главной оптической оси. Трудность заключается в том, что все три «удобных» луча сливаются в один луч SF, совпадающий с главной оптической осью. Поэтому необходимо определить ход произвольного луча SB (рис. 8.38), попавшего на линзу в точке В.

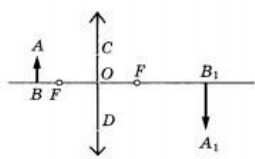


Рис. 8.37

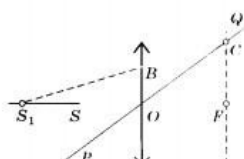


Рис. 8.38

Для построения преломленного луча проведем побочную оптическую ось PQ, параллельную лучу SB. Затем построим фокальную плоскость и найдем точку С пересечения фокальной плоскости с побочной оптической осью. Через эту точку и пройдет преломленный луч ВС. Таким образом, построен ход двух лучей, выходящих из точки S. После преломления в линзе эти лучи расходятся. Изображение S_1 точки S будет мнимым, так как источник расположен между фокусом и линзой.

Для построения изображения можно использовать два из трех «удобных» лучей.

ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ.

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D. \quad (8.11)$$

Уравнение (8.11), принято называть формулой тонкой линзы. Величины d, f и F могут быть как положительными, так и отрицательными. Отметим (без доказательства), что, применяя формулу линзы, нужно ставить знаки перед членами уравнения согласно следующему правилу. Если линза собирающая, то ее фокус действительный, и перед

членом $\frac{1}{F}$ ставят знак «+». В случае рассеивающей линзы $F < 0$ и в правой части формулы (8.10) будет стоять отрицательная величина. Перед членом $\frac{1}{f}$ ставят знак «+», если изображение действительное, и знак «-» в случае мнимого изображения. Наконец, перед членом $\frac{1}{d}$ ставят знак «+» в случае действительной светящейся точки и знак «-», если она мнимая (т. е. на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются в одной точке).

$$\frac{1}{F}, \frac{1}{f} \text{ или } \frac{1}{d}$$

В том случае, когда F , f или d неизвестны, перед соответствующими членами ставят знак «+». Но если в результате вычислений фокусного расстояния или расстояния от линзы до изображения либо до источника получается отрицательная величина, то это означает, что фокус, изображение или источник мнимые.

ДИСПЕРСИЯ

СВЕТА

Занимаясь усовершенствованием телескопов, Ньютон обратил внимание на то, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он заинтересовался этим и первый «исследовал разнообразие световых лучей и протекающие отсюда особенности цветов, которых до того времени никто даже не подозревал» (слова из надписи на надгробном памятнике Ньютону). Радужную окраску изображения, получаемого с помощью линзы, наблюдали, конечно, и до него. Было замечено также, что радужные края имеют предметы, рассматриваемые через призму. Пучок световых лучей, прошедших через призму, окрашивается по краям.

Опыт Ньютона был гениально прост. Ньютон догадался направить на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов. Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Саму радужную полоску Ньютон назвал спектром.

Закрыв отверстие красным стеклом, Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрыв синим стеклом — синее пятно и т. д. Это означало, что не призма окрашивает белый свет, как предполагалось раньше. Призма не изменяет свет, а лишь разлагает его на составные части. Белый свет имеет сложный состав. Из него можно выделить пучки различных цветов, и лишь совместное их действие вызывает у нас впечатление белого цвета. В самом деле, если с помощью второй призмы, повернутой на 180° относительно первой, собрать все пучки спектра, то опять получится белый свет (см. рис. II на цветной вклейке). Выделив какую-либо часть спектра, например зеленую, и заставив свет пройти еще через одну призму, мы уже не получим дальнейшего изменения окраски.

Другой важный вывод, к которому пришел Ньютон, был сформулирован им в трактате «Оптика» следующим образом: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» (для них стекло имеет различные показатели преломления). Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других — красные. Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал *дисперсией*.

Показатель преломления зависит и от скорости света в веществе. Абсолютный показатель преломления $n = \frac{c}{v}$. Луч красного цвета преломляется меньше из-за того, что красный свет имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета преломляется больше, так как скорость для фиолетового света наименьшая. Именно поэтому призма и разлагает свет. В пустоте скорости света разного цвета одинаковы. Если бы это было не так, то, к примеру, спутник Юпитера Ио, который наблюдал Рёмер, казался бы красным в момент выхода спутника из тени. Но этого не наблюдается.

Впоследствии была выяснена зависимость цвета от физической характеристики световой волны: ее частоты колебаний ν (или длины волны λ). Поэтому можно дать более глубокое определение дисперсии, чем то, к которому пришел Ньютон. Дисперсией называется зависимость показателя преломления среды от частоты световой волны.

Зная, что белый свет имеет сложный состав, можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если предмет, например лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем красной краски, мы не создаем при этом свет нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные же поглотятся слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелеными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражаются лишь зеленые, поглощая остальные. Если посмотреть на траву через красное стекло, пропускающее только красные лучи, то она будет казаться почти черной.

Явление дисперсии, открытое Ньютоном, первый шаг к пониманию природы цвета. Основательно понять дисперсию смогли лишь после того, как была выяснена зависимость цвета от частоты колебаний (или длины световой волны).

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

СВЕТА.

Если свет представляет собой поток волн, то должно наблюдаться явление интерференции света. Однако получить интерференционную картину (чередование максимумов и минимумов освещенности) с помощью двух независимых источников света, например двух электрических лампочек, невозможно. Включение еще одной лампочки лишь увеличивает освещенность поверхности, но не создает чередования минимумов и максимумов освещенности.

Выясним, в чем причина этого и при каких условиях можно наблюдать интерференцию света.

Условие когерентности световых волн. Причина отсутствия интерференционной картины в опыте с двумя лампочками в том, что световые волны, излучаемые независимыми источниками, не согласованы друг с другом. Для получения же устойчивой интерференционной картины нужны согласованные волны. Они должны иметь одинаковые длины волн и постоянную во времени разность фаз в любой точке пространства. Напомним, что такие согласованные волны с одинаковыми длинами волн и постоянной разностью фаз называются когерентными.

Почти точного равенства длин волн от двух источников добиться нетрудно. Для этого достаточно использовать хорошие светофильтры, пропускающие свет в очень узком интервале длин волн. Но невозможно осуществить постоянство разности фаз от двух независимых источников. Атомы источников излучают свет независимо друг от друга отдельными «обрывками» (цугами) синусоидальных волн, имеющими обычно длину около метра. И такие цуги волн от обоих источников налагаются друг на друга. В результате амплитуда колебаний в любой точке пространства хаотично меняется со временем в зависимости от того, как в данный момент времени цуги волн от различных источников сдвинуты относительно друг друга по фазе. Волны от различных источников света некогерентные из-за того, что разность фаз волн не остается постоянной¹.

Интерференция в тонких пленках. Тем не менее интерференцию света удастся наблюдать. Хотя ее и наблюдали очень давно, но только не придавали этому значения.

Вы тоже много раз видели интерференционную картину, когда в детстве развлекались пусканием мыльных пузырей или наблюдали за радужным переливом цветов такой пленки керосина либо нефти на поверхности воды. «Мыльный пузырь, витая в воздухе... загорается всеми оттенками цветов, присущими окружающим предметам. Мыльный пузырь, пожалуй, самое изысканное чудо природы» (Марк Твен). Именно интерференция света делает мыльный пузырь столь достойным восхищения.

Английский ученый Томас Юнг первым пришел к гениальной мысли о возможности объяснения цветов тонких пленок сложением волн. Когерентность волн, отраженных от наружной и внутренней поверхностей пленки, возникает из-за того, что они являются частями одного и того же светового пучка. Цуг волн от каждого излучающего атома разделяется пленкой на два цуга, а затем эти части сводятся вместе и интерферируют.

Юнг понял также, что различие в цвете связано с различием в длине волны (или частоте световых волн). Световым пучкам различного цвета соответствуют волны с разной длиной волны λ . Для взаимного усиления волн, отличающихся друг от друга длиной волны (углы падения предполагаются одинаковыми), требуется различная толщина пленки. Следовательно, если пленка имеет неодинаковую толщину, то при освещении ее белым светом должны появиться различные цвета.

Кольца Ньютона. Простая интерференционная картина возникает в тонкой прослойке воздуха между стеклянной пластиной и положенной на нее плосковыпуклой линзой, сферическая поверхность которой имеет большой радиус кривизны. Эта интерференционная картина имеет вид концентрических колец, получивших название колец Ньютона.

Возьмите плосковыпуклую линзу с малой кривизной сферической поверхности и положите ее выпуклостью вниз на стеклянную пластину. Внимательно разглядывая плоскую поверхность линзы (лучше через лупу), вы обнаружите в месте соприкосновения линзы и пластины темное пятно и вокруг него совокупность маленьких радужных колец. Это и есть кольца Ньютона. Ньютон наблюдал и исследовал их не только в белом свете, но и при освещении линзы одноцветным (монохроматическим) пучком. Оказалось, что радиусы колец одного и того же порядкового номера увеличиваются при переходе от фиолетового конца спектра к красному; красные кольца имеют максимальный радиус. Расстояния между соседними кольцами уменьшаются с увеличением их радиусов.

Удовлетворительно объяснить, почему возникают кольца, Ньютон не смог. Удалось это Юнгу. Проследим за ходом его рассуждений. В их основе лежит предположение о том, что свет — это волны. Рассмотрим случай, когда волна определенной длины волны падает почти перпендикулярно на плосковыпуклую линзу (рис. 8.49). Волна 1 появляется в результате отражения от выпуклой поверхности линзы на границе сред стекло — воздух, а волна 2 — в результате отражения от пластины на границе сред воздух — стекло. Эти волны когерентны: они имеют одинаковую длину волны и постоянную разность фаз, которая возникает из-за того, что волна 2 проходит больший путь, чем волна 1. Если вторая волна отстает от первой на целое число длин волн, то, складываясь, волны усиливают друг друга.

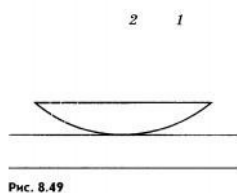


Рис. 8.49

Напротив, если вторая волна отстает от первой на нечетное число полуволн, то колебания, вызванные ими, будут происходить в противоположных фазах, и волны погасят друг друга.

Если известен радиус кривизны R выпуклой поверхности линзы, то можно вычислить, на каких расстояниях от точки соприкосновения линзы со стеклянной пластиной разности хода таковы, что волны определенной длины волны λ , гасят друг друга. Эти расстояния и являются радиусами темных колец Ньютона. Ведь линии постоянной толщины воздушной прослойки представляют собой окружности. Измерив радиусы колец, можно вычислить длины волн.

Длина световой волны. В результате измерений было установлено, что для красного света $\lambda_{кр} = 8 \cdot 10^{-7}$ м, а для фиолетового — $\lambda_{ф} = 4 \cdot 10^{-7}$ м. Длины волн, соответствующие другим цветам спектра, принимают промежуточные

значения. Для любого цвета длина световой волны очень мала. Поясним это на простом примере. Представьте себе среднюю морскую волну длиной волны в несколько метров, которая увеличилась настолько, что заняла весь Атлантический океан от берегов Америки до Европы. Длина световой волны, увеличенной в той же пропорции лишь ненамного превысила бы ширину этой страницы.

Явление интерференции не только доказывает наличие у света волновых свойств, но и позволяет измерить длину волны. Подобно тому как высота звука определяется его частотой, цвет света определяется частотой колебаний или длиной волны.

В природе нет никаких красок, есть лишь волны разных длин волн. Глаз — сложный физический прибор, способный обнаруживать различие в цвете, которому соответствует весьма незначительная (около 10^6 см) разница в длинах световых волн. Интересно, что большинство животных не способны различать цвета. Они всегда видят черно-белую картину. Не различают цвета также дальтоники — люди, страдающие цветовой слепотой. При переходе света из одной среды в другую длина волны изменяется. Это можно увидеть. Заполним водой или другой прозрачной жидкостью с показателем преломления n воздушную прослойку между линзой и пластиной. Радиусы интерференционных колец уменьшаются.

Почему это происходит? Мы знаем, что при переходе света из вакуума в какую-нибудь среду скорость света уменьшается в n раз. Так как $v = \lambda \nu$, то при этом должна уменьшиться в n раз либо частота ν , либо длина волны λ . Но радиусы колец зависят от длины волны. Следовательно, когда свет входит в среду, изменяется в n раз именно длина волны, а не частота.

Интерференция электромагнитных волн. В опытах с генератором СВЧ можно наблюдать интерференцию электромагнитных волн (радиоволн).

Генератор и приемник располагают друг против друга. Затем подносят снизу металлическую пластину в горизонтальном положении. Постепенно поднимая пластину, обнаруживают поочередное ослабление и усиление звука.

Явление объясняется следующим образом. Часть волны из рупора генератора попадает непосредственно в приемный рупор. Другая же ее часть отражается от металлической пластины. Меняя расположение пластины, мы изменяем разность хода прямой и отраженной волн. Вследствие этого волны либо усиливают, либо ослабляют друг друга в зависимости от того, равна разность хода целому числу длин волн или нечетному числу полуволн.

Наблюдение интерференции света доказывает, что свет при распространении проявляет волновые свойства. Интерференционные опыты позволяют измерить длину световой волны: она очень мала — от $4 \cdot 10^{-7}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ м.

ДИФРАКЦИЯ

СВЕТА.

Если свет представляет собой волновой процесс, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и дифракция света. Ведь дифракция — огибание волнами краев препятствий — присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко, так как волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны, как мы с вами знаем, очень мала.

Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света: светлое пятно на экране против отверстия будет иметь большие размеры, чем размеры пучка.

Опыт Юнга. В 1802 г. Т. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 8.55). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия В и С на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим через малое отверстие А в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют ведь только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия А возбуждала в отверстиях В и С когерентные колебания. Вследствие дифракции от отверстий В и С выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции этих двух световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаружил, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причем весьма точно.



Теория Френеля. Исследование дифракции было завершено в работах О. Френеля. Френель не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и разработал количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе Рис. 8.55 рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Им же было впервые объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории.

Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля *каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, причем все вторичные источники когерентны (принцип Гюйгенса Френеля).*

На основе этой теории Френель доказал прямолинейность распространения света и рассмотрел количественно дифракцию на различного рода препятствиях.

Дифракционные картины от различных препятствий. Расчеты, сделанные Френелем, полностью были подтверждены экспериментом. Из-за того что длина световой волны очень мала, угол отклонения света от направления прямолинейного распространения невелик. Поэтому для отчетливого наблюдения дифракции нужно либо использовать очень маленькие препятствия, либо не располагать экран далеко от препятствий. При расстоянии между препятствием и экраном порядка метра размеры препятствия не должны превышать сотых долей миллиметра. Если же расстояние до экрана достигает сотен метров или нескольких километров, то дифракцию можно наблюдать на препятствиях размерами в несколько сантиметров и даже метров. На рисунке 8.57, а—в схематично показаны дифракционные картины от различных препятствий: а — от тонкой проволоочки; б — от круглого отверстия; в — от круглого экрана.

Вместо тени от проволоочки видны светлые и темные полосы; в центре дифракционной картины от отверстия появляется темное пятно, окруженное светлыми и темными кольцами; в центре тени, образованной круглым экраном, видно светлое пятнышко, а сама тень окружена темными концентрическими кольцами.

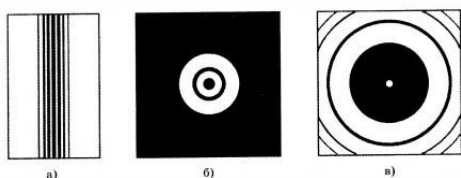


Рис. 8.57

Любопытный случай произошел на заседании Французской академии наук в 1818 г. Один из ученых, присутствовавших на заседании, обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекают факты, явно противоречащие здравому смыслу. Так, при определенных размерах отверстия и определенных расстояниях от отверстия до источника света и экрана в центре светлого пятна должно находиться темное пятнышко. А за маленьким непрозрачным диском, наоборот, должно находиться светлое пятно в центре тени. Каково же было удивление ученых, когда поставленные эксперименты доказали, что так и есть на самом деле!

ДИФРАКЦИОННАЯ

РЕШЕТКА

На явлении дифракции основано устройство оптического прибора — дифракционной решетки.

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками (рис. 8.58). Хорошую решетку изготавливают с помощью специальной делительной машины, наносящей на стеклянную пластину параллельные штрихи. Число штрихов доходит до нескольких тысяч на 1 мм; общее число штрихов превышает 100 000. Просты в изготовлении желатиновые отпечатки с такой решетки, зажатые между двумя стеклянными пластинами. Наилучшими качествами обладают так называемые отражательные решетки. Они представляют собой чередующиеся участки, отражающие свет и рассеивающие его. Рассеивающие свет штрихи наносятся резцом на отшлифованную металлическую пластину.

Если ширина прозрачных щелей (или отражающих свет полос) равна a , и ширина непрозрачных промежутков (или рассеивающих свет полос) равна b , то величина $d = a + b$ называется периодом решетки. Обычно период **дифракционной** решетки порядка 10 мкм.

Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решетки. Пусть на решетку (рис. 8.59) падает плоская монохроматическая волна длиной волны λ . Вторичные источники, расположенные в щелях, создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдем условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим, например, волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом φ . Разность хода между волнами от краев соседних щелей равна длине отрезка AC. Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от всех щелей, складываясь, будут усиливать друг друга.



Рис. 8.58

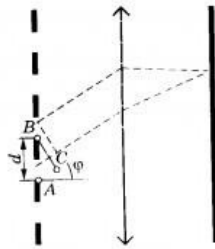


Рис. 8.59

Из треугольника ABC можно найти длину катета AC: $AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$. Максимумы будут наблюдаться под углом φ , в соответствии с условием

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda, \quad (8.17)$$

где величина $k = 0, 1, 2, \dots$ определяет порядок спектра.

Нужно иметь в виду, что при выполнении условия (см. формулу (8.17)) усиливают друг друга не только волны, идущие от нижних (см. рис. 8.60) краев щелей, но и волны, идущие от всех других точек щелей. Каждой точке в первой щели соответствует точка во второй щели, находящаяся на расстоянии d от первой точки. Поэтому разность хода

испущенных этими точками вторичных волн равна $k\lambda$, и эти волны взаимно усиливаются.

За решеткой помещают собирающую линзу и за ней — экран на фокусном расстоянии от линзы. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке. В этой точке происходит сложение волн и их взаимное усиление. Углы φ , удовлетворяющие условию (8.17), определяют положение так называемых главных максимумов на экране. Наряду с картиной, получаемой в результате дифракции света, в случае дифракционной решетки наблюдается дифракционная картина и от отдельных щелей. Интенсивности максимумов в ней меньше интенсивности главных максимумов.

Так как положение максимумов (кроме центрального, соответствующего $k = 0$) зависит от длины волны, то решетка разлагает белый свет в спектр. Чем больше λ , тем дальше от центрального максимума располагается тот или иной максимум, соответствующий данной длине волны. Каждому значению k соответствует свой порядок спектра.

Между максимумами расположены минимумы освещенности. Чем больше число щелей, тем более резко очерчены максимумы и тем более широкими минимумами они разделены. Световая энергия, падающая на решетку, перераспределяется ею так, что большая ее часть приходится на максимумы, а в область минимумов попадает незначительная часть энергии.

С помощью дифракционной решетки можно проводить очень точные измерения длины волны. Если период решетки известен, то определение длины волны сводится к измерению угла φ , соответствующего направлению на максимум.

Наши ресницы вместе с промежутками между ними представляют собой грубую дифракционную решетку. Поэтому, если посмотреть, прищурившись, на яркий источник света, то можно обнаружить радужные цвета. Белый свет разлагается в спектр при дифракции вокруг ресниц. Лазерный диск с бороздками, проходящими близко друг от друга, подобен отражательной дифракционной решетке. Если вы посмотрите на отраженный им свет от электрической лампочки, то обнаружите разложение света в спектр. Можно наблюдать несколько спектров, соответствующих разным значениям k . Картина будет очень четкой, если свет от лампочки падает на пластинку под большим углом.

Множество узких щелей на небольшом расстоянии друг от друга образует замечательный оптический прибор — дифракционную решетку. Решетка разлагает свет в спектр и позволяет очень точно измерять длины световых волн.

Лекция №14

Тема: «Квантовые свойства света. Физика атома»

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Фотон. Гипотеза Планка о квантах.
- 1.2. Фотоэффект. Технические устройства, основанные на использовании фотоэффекта.
- 1.3. Строение атома: планетарная модель и модель Бора.
- 1.4. Поглощение и испускание света атомом. Квантование энергии.

1.3. Принцип действия и использование лазера.

2. Краткое содержание вопросов

ФОТОЭФФЕКТ

В развитии представлений о природе света важный шаг был сделан при изучении одного замечательного явления, открытого Г. Герцем и тщательно исследованного выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым. Явление это получило название фотоэффекта.

Фотоэффект — это вырывание электронов из вещества под действием света.

Наблюдение фотоэффекта. Для обнаружения фотоэффекта на опыте можно использовать электрометр с присоединенной к нему цинковой пластиной (рис. 11.1). Если зарядить пластину положительно, то ее освещение, например электрической дугой, не влияет на быстроту разрядки электрометра. Но если пластину зарядить отрицательно, то световой пучок от дуги разряжает электрометр очень быстро.

Объяснить это можно так. Свет вырывает электроны с поверхности пластины. Если пластина заряжена отрицательно, электроны отталкиваются от нее, и электрометр разряжается. При положительном же заряде пластины вырванные светом электроны притягиваются к пластине и снова оседают на ней. Поэтому заряд электрометра в этом случае не изменяется.

Однако, когда на пути света поставлено обыкновенное стекло, отрицательно заряженная пластина уже не теряет электроны, какова бы ни была интенсивность излучения. Так как известно, что стекло поглощает ультрафиолетовые лучи, то из этого опыта можно заключить: именно ультрафиолетовый участок спектра вызывает фотоэффект. Этот простой факт нельзя объяснить на основе волновой теории света. Ведь непонятно, почему световые волны малой частоты не могут вырывать электроны, если даже амплитуда волны велика и, следовательно, велика сила, действующая на электроны.

Законы фотоэффекта. Для того чтобы получить о фотоэффекте более полное представление, нужно было выяснить, от чего зависит число вырванных светом с поверхности вещества электронов (фотоэлектронов) и чем определяется их скорость или кинетическая энергия. С этой целью были продолжены экспериментальные исследования.

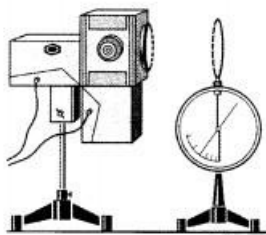


Рис. 11.1

В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещаются два электрода (рис. 11.2).

Внутри баллона на один из электродов поступает свет через кварцевое окошко, прозрачное не только для видимого света, но и для ультрафиолетового излучения. На электроды подается напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром.

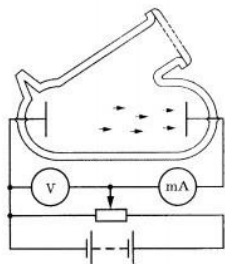


Рис. 11.2

К освещаемому электроду присоединяется отрицательный полюс батареи. Под действием света этот электрод испускает электроны, которые при движении в электрическом поле образуют электрический ток. При малых напряжениях не все вырванные светом электроны достигают другого электрода. Если, не меняя интенсивности излучения, увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока возрастает. При некотором напряжении она достигает максимального значения, после чего перестает увеличиваться. Максимальное значение силы тока I_n называется током насыщения. Сила тока насыщения определяется числом электронов, испускаемых за 1 с освещаемым электродом.

Изменяя в этом опыте интенсивность излучения, удалось установить, что число электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.

На основании результатов этого опыта можно сформулировать **первый закон фотоэффекта: фототок насыщения прямо пропорционален падающему световому потоку.**

Теперь остановимся на измерении кинетической энергии (или скорости) электронов. Сила фототока отлична от нуля и при нулевом напряжении. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает правого электрода и при отсутствии напряжения. Если изменить полярность батареи, то сила тока уменьшится, и при некотором напряжении обратной полярности она станет равной нулю. Это значит, что электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки, а затем возвращает их на электрод.

Задерживающее напряжение U_3 зависит от максимальной кинетической энергии, которую имеют вырванные светом электроны. Измеряя задерживающее напряжение и применяя теорему о кинетической энергии, можно найти максимальное значение кинетической энергии электронов:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_3.$$

При изменении интенсивности света (плотности потока излучения) задерживающее напряжение, как показали опыты, не

меняется. Значит, не меняется кинетическая энергия электронов. С точки зрения волновой теории света этот факт непонятен. Ведь, чем больше интенсивность света, тем большие силы действуют на электроны со стороны электромагнитного поля световой волны и тем большая энергия, казалось бы, должна передаваться электронам.

На опытах было обнаружено, что кинетическая энергия вырванных светом электронов зависит только от частоты света.

Второй закон фотоэффекта: максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно растёт с частотой света и не зависит от его интенсивности.

Если частота света меньше определенной для данного вещества минимальной частоты $V_{\min}$ то фотоэффекта не происходит.

Законы фотоэффекта просты по форме. Но зависимость кинетической энергии вырванных светом электронов от частоты света требует объяснения.

СТРОЕНИЕ

АТОМА.

ОПЫТЫ

РЕЗЕРФОРДА

Модель Томсона. Не сразу ученые пришли к правильным представлениям о строении атома. Первая модель атома была предложена английским физиком Дж. Дж. Томсоном, открывшим электрон. По мысли Томсона, положительный заряд атома занимает весь объем атома и распределен в этом объеме с постоянной плотностью. Простейший атом — атом водорода — представляет собой положительно заряженный шар радиусом около 10^{-8} см, внутри которого находится электрон. У более сложных атомов в положительно заряженном шаре находится несколько электронов, так что атом подобен кексу, в котором роль изюминок выполняют электроны.

Однако модель атома Томсона оказалась в полном противоречии с известными уже к тому времени свойствами атома, главным из которых является устойчивость.

Планетарная модель атома. На основе своих опытов Резерфорд создал планетарную модель атома. В центре атома расположено положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. В целом атом нейтрален. Поэтому число внутриатомных электронов, как и заряд ядра, равно порядковому номеру элемента в периодической системе. Ясно, что покоиться электроны внутри атома не могут, так как они упали бы на ядро. Они движутся вокруг ядра, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца. Такой характер движения электронов определяется действием кулоновских сил притяжения со стороны ядра. В атоме водорода вокруг ядра обращается всего лишь один электрон. Ядро атома водорода имеет положительный заряд, равный по модулю заряду электрона, и массу, примерно в 1836,1 раза большую массы электрона. Это ядро было названо протоном и стало рассматриваться как элементарная частица. Размер атома водорода — это радиус орбиты его электрона.

Простая и наглядная планетарная модель атома имеет прямое экспериментальное обоснование. Она кажется совершенно необходимой для объяснения опытов по рассеиванию α -частиц. Но на основе этой модели нельзя объяснить факт существования атома, его устойчивость. Ведь движение электронов по орбитам происходит с ускорением, причем весьма немалым. Ускоренно движущийся заряд по законам электродинамики Максвелла должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения вокруг ядра. Излучение сопровождается потерей энергии. Теряя энергию, электроны должны приближаться к ядру, подобно тому как спутник приближается к Земле при торможении в верхних слоях атмосферы. Как показывают строгие расчеты, основанные на механике Ньютона и электродинамике Максвелла, электрон за ничтожно малое время (порядка 10^{-8} с) должен упасть на ядро. Атом должен прекратить свое существование.

В действительности ничего подобного не происходит. Атомы устойчивы и в невозбужденном состоянии могут существовать неограниченно долго, совершенно не излучая электромагнитные волны.

Не согласующийся с опытом вывод о неизбежной гибели атома вследствие потери энергии на излучение — это результат применения законов классической физики к явлениям, происходящим внутри атома. Отсюда следует, что к таким явлениям законы классической физики неприменимы.

Резерфорд создал планетарную модель атома: электроны обращаются вокруг ядра, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца. Эта модель проста, обоснована экспериментально, но не позволяет объяснить устойчивость атома.

КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА. МОДЕЛЬ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

Выход из крайне затруднительного положения в теории атома был найден в 1913 г. датским физиком Нильсом Бором на пути дальнейшего развития квантовых представлений о процессах в природе.

Эйнштейн оценивал проделанную Бором работу «как высшую музыкальность в области мысли», всегда его поражающую. Основываясь на разрозненных опытных фактах, Бор благодаря гениальной интуиции правильно предугадал путь развития теории атома.

Постулаты Бора. Последовательной теории атома Бор, однако, не разработал. Он в виде постулатов сформулировал основные положения новой теории. Причем и законы классической физики не отвергались им безоговорочно. Новые постулаты, скорее, налагали лишь некоторые ограничения на рассматриваемые классической физикой движения.

Успех теории Бора был тем не менее поразительным, и всем ученым стало ясно, что Бор нашел правильный путь развития теории. Этот путь привел впоследствии к созданию стройной теории движения микрочастиц — квантовой механики.

Первый постулат Бора гласит: *существуют особые, стационарные состояния атома, находясь в которых атом не излучает энергию, при этом электроны в атоме движутся с ускорением. Каждому стационарному состоянию соответствует определенная энергия E_n .*

Согласно второму постулату Бора *излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n . Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:*

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n \quad (12.2)$$

Отсюда частоту излучения можно выразить так:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}. \quad (12.3)$$

Согласно теории Бора энергия электрона в атоме **водорода**, находящегося на n -м энергетическом уровне, равна:

$$E_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2h^2} \frac{1}{n^2}.$$

При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Второй постулат, также как и первый, противоречит электродинамике Максвелла, так как согласно этому постулату частота излучения света свидетельствует не об особенностях движения электрона, а лишь об изменении энергии атома.

Свои постулаты Бор применил для построения теории простейшей атомной системы — атома водорода. Основная задача состояла в нахождении частот электромагнитных волн, излучаемых водородом. Эти частоты можно найти на основе второго постулата и правила определения стационарных значений энергии атома. Это правило (так называемое правило квантования) Бору опять-таки пришлось постулировать.

Модель атома водорода по Бору. Используя законы механики Ньютона и правило квантования, на основе которого определяются возможные стационарные состояния атома. Бор смог вычислить радиусы орбит электрона и энергии стационарных состояний атома. Минимальный радиус орбиты определяет размеры атома. На рисунке 12.4 значения энергий стационарных состояний (в электрон-вольтах¹) отложены на вертикальной оси.

Второй постулат Бора позволяет вычислить по известным значениям энергий стационарных состояний частоты излучений атома водорода.



Теория Бора приводит к количественному согласию с экспериментом для значений этих частот. Все частоты излучений атома водорода составляют в своей совокупности ряд серий, каждая из которых образуется при переходах атома в одно из энергетических состояний со всех верхних энергетических состояний (состояний с большей энергией).

Переходы в первое возбужденное состояние (на второй энергетический уровень) с верхних уровней образуют серию Бальмера. На рисунке 12.4 эти переходы изображены стрелками. Красная, зеленая и две синие линии в видимой части спектра водорода соответствуют переходам

$$E_3 \rightarrow E_2, E_4 \rightarrow E_2, E_5 \rightarrow E_2, E_6 \rightarrow E_2.$$

Данная серия названа по имени швейцарского учителя И. Бальмера, который еще в 1885 г. на основе экспериментальных данных вывел простую формулу для определения частот видимой части спектра водорода.

Поглощение света. Поглощение света — процесс, обратный излучению. Атом, поглощая свет, переходит из низших энергетических состояний в высшие. При этом он поглощает излучение той же самой частоты, которую излучает, переходя из высших энергетических состояний в низшие.

На основе двух постулатов и правила квантования Бор определил радиус атома водорода и энергии стационарных состояний атома. Это позволило вычислить частоты излучаемых и поглощаемых атомом электромагнитных волн.

1. Вопросы лекции:

- 1.1. Строение атомного ядра. Дефект массы. Ядерные реакции. Энергия связи. Связь массы и энергии.
- 1.2. Радиоактивность. α - и β -распады.
- 1.3. Ядерная энергетика. Радиоактивные излучения и их воздействие на живые организмы.

2. Краткое содержание вопросов

СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ.

Сразу же после того, как в опытах Чедвика был открыт нейтрон, советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий ученый В. Гейзенберг в 1932 г. предложили протонно-нейтронную модель ядра. Она была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений и в настоящее время является общепризнанной.

Протонно-нейтронная модель ядра. Согласно протонно-нейтронной модели ядра состоят из элементарных частиц двух видов — протонов и нейтронов.

Так как в целом атом электрически нейтрален, а заряд протона равен модулю заряда электрона, то число протонов в ядре равно числу электронов в атомной оболочке. Следовательно, число протонов в ядре равно атомному номеру элемента Z в периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

Сумму числа протонов Z и числа нейтронов N в ядре называют массовым числом и обозначают буквой A :

$$A = Z + N. \quad (13.2)$$

Массы протона и нейтрона близки друг к другу, и каждая из них примерно равна атомной единице массы. Масса электронов в атоме много меньше массы его ядра. Поэтому массовое число ядра равно округленной до целого числа относительной атомной массе элемента. Массовые числа могут быть определены путем приближенного измерения массы ядер приборами, не обладающими высокой точностью.

Изотопы представляют собой ядра с одним и тем же значением Z но с различными массовыми числами A , т. е. с различными числами нейтронов N .

Ядерные силы. Так как ядра весьма устойчивы, то протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра какими-то силами, причем очень большими. Что это за силы? Сразу можно сказать, что это не гравитационные силы, которые слишком слабые. Устойчивость ядра не может быть объяснена также электромагнитными силами, так как между одноименно заряженными протонами действует электрическое отталкивание. А нейтроны не имеют электрического заряда.

Значит, между ядерными частицами — протонами и нейтронами (их называют нуклонами) — действуют особые силы, называемые ядерными силами.

Каковы основные свойства ядерных сил? Ядерные силы примерно в 100 раз превышают электрические (кулоновские) силы. Это самые мощные силы из всех существующих в природе. Поэтому взаимодействия ядерных частиц часто называют сильными взаимодействиями.

Сильные взаимодействия проявляются не только во взаимодействиях нуклонов в ядре. Это особый тип взаимодействий, присущий большинству элементарных частиц наряду с электромагнитными взаимодействиями.

Другая важная особенность ядерных сил — их короткодействие. Электромагнитные силы сравнительно медленно ослабевают с увеличением расстояния. Ядерные силы заметно проявляются лишь на расстояниях, равных размерам ядра (10^{-12} — 10^{-13} см), что показали уже опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц атомными ядрами. Ядерные силы — это, так сказать, «богатырь с очень короткими руками». Законченная количественная теория ядерных сил пока еще не разработана. Значительные успехи в ее разработке были достигнуты совсем недавно — в последние 10—15 лет.

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов. Эти частицы удерживаются в ядре ядерными силами.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

Важнейшую роль во всей ядерной физике играет понятие энергии связи ядра. Энергия связи позволяет объяснить устойчивость ядер, выявить, какие процессы ведут к выделению ядерной энергии. Нуклоны в ядре прочно удерживаются ядерными силами. Для того чтобы удалить нуклон из ядра, надо совершить довольно большую работу, т. е. сообщить ядру значительную энергию.

Под энергией связи ядра понимают ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны. На основе закона сохранения энергии можно также утверждать, что энергия связи ядра равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

Энергия связи атомных ядер очень велика. Но как ее определить?

В настоящее время рассчитать энергию связи теоретически, подобно тому как это можно сделать для электронов в атоме, не удастся. Выполнить соответствующие расчеты можно, лишь применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией:

$$E = mc^2. \quad (13.3)$$

Точнейшие измерения масс ядер показывают, что масса покоя ядра M_A всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:

$$M_A < Zm_p + Nm_n. \quad (13.4)$$

Существует, как говорят, дефект масс: разность масс $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_A$

положительна. В частности, для гелия масса ядра на 0,75% меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Соответственно для гелия в количестве вещества один моль $\Delta M = 0,03$ г.

Уменьшение массы при образовании ядра из нуклонов означает, что при этом уменьшается энергия этой системы нуклонов. Энергия связи $E_{\text{св}} = \Delta Mc^2$ на $(Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2$. (13.5)

Но куда при этом исчезают энергия $E_{\text{св}}$ и масса ΔM ? При образовании ядра из частиц последние за счет действия ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением друг к другу. Излучаемые при этом γ -кванты как раз обладают энергией $E_{\text{св}}$ и

$$\Delta M = \frac{E_{\text{св}}}{c^2},$$

массой

Энергия связи — это энергия, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц, и соответственно это та энергия, которая необходима для расщепления ядра на составляющие его частицы.

О том, как велика энергия связи, можно судить по такому примеру: образование 4 г гелия сопровождается выделением такой же энергии, что и при сгорании 1,5—2 вагонов каменного угля.

Важную информацию о свойствах ядер содержит зависимость удельной энергии связи от массового числа A .

АЛЬФА-, БЕТА- И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

После открытия радиоактивных элементов началось исследование физической природы их излучения. Кроме Беккереля и супругов Кюри, этим занялся Резерфорд.

Классический опыт, позволивший обнаружить сложный состав радиоактивного излучения, состоял в следующем. Препарат радия помещали на дно узкого канала в куске свинца. Против канала находилась фотопластинка. На выходящее из канала излучение действовало сильное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны лучу (рис. 13.6). Вся установка размещалась в вакууме.

В отсутствие магнитного поля на фотопластинке после проявления обнаруживалось одно темное пятно точно напротив канала. В магнитном поле пучок распадался на три пучка. Два составляющие первичного потока отклонялись в противоположные стороны. Это указывало на наличие у этих излучений электрических зарядов противоположных знаков. При этом отрицательный компонент излучения отклонялся магнитным полем гораздо сильнее, чем положительный. Третья составляющая совсем не отклонялась магнитным полем. Положительно заряженный компонент получил название альфа-лучей, отрицательно заряженный — бета-лучей и нейтральный — гамма-лучей (α -лучи, β -лучи, γ -лучи).

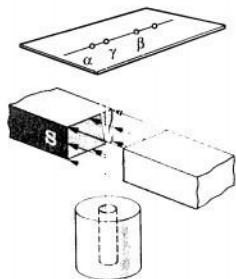


Рис. 13.6

Эти три вида излучения очень сильно различаются по проникающей способности, т. е. по тому, насколько интенсивно они поглощаются различными веществами. Наименьшей проникающей способностью обладают α -лучи. Слой бумаги толщиной около 0,1 мм для них уже непрозрачен. Если прикрыть отверстие в свинцовой пластинке листочком бумаги, то на фотопластинке не обнаружится пятна, соответствующего α -излучению.

Гораздо меньше поглощаются при прохождении через вещество β -лучи. Алюминиевая пластинка полностью их задерживает только при толщине в несколько миллиметров. Наибольшей проникающей способностью обладают γ -лучи.

Интенсивность поглощения γ -лучей усиливается с увеличением атомного номера вещества-поглотителя. Но и слой свинца толщиной в 1 см не является для них непреодолимой преградой. При прохождении γ -лучей через такой слой свинца их интенсивность ослабевает лишь вдвое. Физическая природа α -, β - и γ -лучей, очевидно, различна.

Гамма-лучи. По своим свойствам γ -лучи очень сильно напоминают рентгеновские, но только их проникающая способность гораздо больше, чем у рентгеновских лучей. Это наводило на мысль, что γ -лучи представляют собой электромагнитные волны. Все сомнения в этом отпали после того, как была обнаружена дифракция γ -лучей на кристаллах и измерена их длина волны. Она оказалась очень малой — от 10^{-8} до 10^{-11} см.

На шкале электромагнитных волн γ -лучи непосредственно следуют за рентгеновскими. Скорость распространения у γ -лучей такая же, как у всех электромагнитных волн, — около 300 000 км/с.

Бета-лучи. С самого начала α - и β -лучи рассматривались как потоки заряженных частиц. Проще всего было экспериментировать с β -лучами, так как они сильнее отклоняются как в магнитном, так и в электрическом поле.

Основная задача экспериментаторов состояла в определении заряда и массы частиц. При исследовании отклонения β -частиц в электрических и магнитных полях было установлено, что они представляют собой не что иное, как электроны, движущиеся со скоростями, очень близкими к скорости света. Существенно, что скорости β -частиц, испущенных каким-либо радиоактивным элементом, неодинаковы. Встречаются частицы с самыми различными скоростями. Это и приводит к расширению пучка β -частиц в магнитном поле.

Альфа-частицы. Труднее было выяснить природу α -частиц, так как они слабее отклоняются магнитным и электрическим полями. Окончательно эту задачу удалось решить Резерфорду. Он измерил отношение заряда q частицы к ее массе m по отклонению в магнитном поле. Оно оказалось примерно в 2 раза меньше, чем у протона — ядра атома водорода. Заряд протона равен элементарному, а его масса очень близка к атомной единице массы¹. Следовательно, у α -частицы на один элементарный заряд приходится масса, равная двум атомным единицам массы.

Но заряд α -частицы и ее масса оставались, тем не менее, неизвестными. Следовало измерить либо заряд, либо массу α -частицы. С появлением счетчика Гейгера стало возможным проще и точнее измерить заряд. Сквозь очень тонкое окошко α -частицы могут проникать внутрь счетчика и регистрироваться им.

Резерфорд поместил на пути α -частиц счетчик Гейгера, который измерял число частиц, испускавшихся радиоактивным препаратом за определенное время. Затем он поставил на место счетчика металлический цилиндр, соединенный с чувствительным электрометром (рис. 13.7). Электрометром Резерфорд измерял заряд α -частиц испущенных источником внутрь цилиндра за такое же время (радиоактивность многих веществ почти не меняется со временем). Зная суммарный заряд α -частиц и их число, Резерфорд определил отношение этих величин, т. е. заряд одной α -частицы. Этот заряд оказался равным двум элементарным.

Таким образом, он установил, что у α -частицы на каждый из двух элементарных зарядов приходится две атомные единицы массы. Следовательно, на два элементарных заряда приходится четыре атомные единицы массы. Такой же заряд и такую же относительную атомную массу имеет ядро гелия. Из этого следует, что α -частица — это ядро атома гелия.

Не довольствуясь достигнутым результатом, Резерфорд затем еще прямыми опытами доказал, что при радиоактивном α -распаде образуется именно гелий. Собирая α -частицы внутри специального резервуара на протяжении нескольких дней, он с помощью спектрального анализа убедился в том, что в сосуде накапливается гелий (каждая α -частица захватывала два электрона и превращалась в атом гелия).

ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА

Радиоактивный распад подчиняется статистическому закону. Резерфорд, исследуя превращения радиоактивных веществ, установил опытным путем, что их активность убывает с течением времени

то

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (13.1)$$

Это и есть основной закон радиоактивного распада. По формуле (13.1) можно найти число нераспавшихся ядер в любой момент времени.

Период полураспада — основная величина, определяющая скорость радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем меньше времени «живут» ядра, тем быстрее происходит распад. Для разных веществ период полураспада имеет сильно различающиеся значения. Так, период полураспада урана ²³⁸₉₂U равен 4,5 млрд лет. Именно поэтому активность урана на протяжении нескольких лет заметно не меняется. Период полураспада радия значительно меньше — он равен 1600 лет. Поэтому активность радия значительно больше активности урана. Есть радиоактивные элементы с периодом полураспада в миллионные доли секунды.

Чтобы, пользуясь формулой (13.1), определить период полураспада, надо знать число атомов N_0 в начальный момент времени и число нераспавшихся атомов N спустя определенный интервал времени t .

Сам закон радиоактивного распада довольно прост. Но физический смысл этого закона уяснить себе нелегко. Действительно, согласно этому закону за любой интервал времени распадается одна и та же доля имеющихся атомов (за период полураспада половина атомов). Значит, с течением времени скорость распада нисколько не меняется?

Радиоактивные ядра «не стареют». Так, ядра радона, возникающие при распаде радия, претерпевают радиоактивный распад как сразу же после своего образования, так и спустя 10 мин после этого. Распад любого атомного ядра — это, так сказать, не «смерть от старости», а «несчастный случай» в его жизни. Для радиоактивных ядер

не существует понятия возраста. Можно определить лишь их среднее время жизни τ .

Время существования отдельных ядер может варьироваться от долей секунды до миллиардов лет. Атом урана, например, может спокойно пролежать в земле миллиарды лет и внезапно взорваться, тогда как его соседи благополучно

продолжают оставаться в прежнем состоянии. Среднее время жизни τ — это просто среднее арифметическое времени жизни достаточно большого количества атомов данного вида. Оно прямо пропорционально периоду полураспада. Предсказать, когда произойдет распад ядра данного атома, невозможно. Смысл имеют только утверждения о поведении в среднем большой совокупности атомов. Закон радиоактивного распада определяет среднее число ядер атомов, распадающихся за определенный интервал времени. Но всегда имеются неизбежные отклонения от среднего значения, и,

чем меньше количество радиоактивных ядер в препарате, тем больше эти отклонения. **Закон радиоактивного распада** является статистическим законом.

Говорить об определенном законе радиоактивного распада для малого числа ядер атомов не имеет смысла. Этот закон справедлив в основном для большого количества частиц.

ДЕЛЕНИЕ

ЯДЕР

УРАНА.

Делиться на части могут только ядра некоторых тяжелых элементов. При делении ядер испускаются два-три нейтрона и γ -лучи. Одновременно выделяется большая энергия.

Механизм деления ядра. Процесс деления атомного ядра можно объяснить на основе капельной модели ядра. Согласно этой модели сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 13.14, а). Ядерные силы между нуклонами являются короткодействующими, подобно силам, действующим между молекулами жидкости. Наряду с большими силами электростатического отталкивания между протонами, стремящимися разорвать ядро на части, действуют еще большие ядерные силы притяжения. Эти силы удерживают ядро от распада.

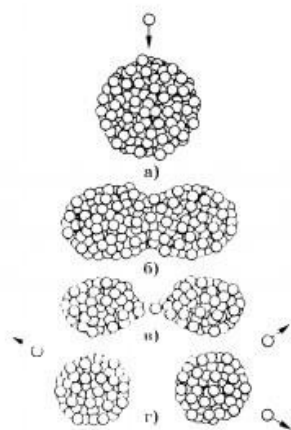


Рис. 13.14

Ядро урана-235 имеет форму шара. Поглотив лишний нейтрон, оно возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму (рис. 13.14, б). Ядро будет растягиваться до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не начнут преобладать над силами притяжения, действующими в перешейке (рис. 13.14, в). После этого оно разрывается на две части (рис. 13.14, г).

Под действием кулоновских сил отталкивания эти осколки разлетаются со скоростью, равной 1/30 скорости света.

Испускание нейтронов в процессе деления. Фундаментальный факт ядерного деления — испускание в процессе деления двух-трех нейтронов. Именно благодаря этому оказалось возможным практическое использование внутриядерной энергии.

Понять, почему происходит испускание свободных нейтронов, можно исходя из следующих соображений. Известно, что отношение числа нейтронов к числу протонов в стабильных ядрах возрастает с повышением атомного номера. Поэтому у возникающих при делении осколков относительное число нейтронов оказывается большим, чем это допустимо для ядер атомов, находящихся в середине таблицы Менделеева. В результате несколько нейтронов освобождается в процессе деления. Их энергия имеет различные значения — от нескольких миллионов электрон-вольт до совсем малых, близких к нулю.

Деление обычно происходит на осколки, массы которых отличаются примерно в 1,5 раза. Осколки эти сильно радиоактивны, так как содержат избыточное количество нейтронов. В результате серии последовательных β -распадов в конце концов получаются стабильные изотопы.

Реакция деления ядер сопровождается выделением энергии.

ЦЕПНЫЕ

ЯДЕРНЫЕ

РЕАКЦИИ.

При делении ядра урана освобождаются два-три нейтрона. Это позволяет осуществлять цепную реакцию деления урана.

Любой из нейтронов, вылетающих из ядра в процессе деления, может, в свою очередь, вызвать деление соседнего ядра, которое также испускает нейтроны, способные вызвать дальнейшее деление. В результате число делящихся ядер очень быстро увеличивается. Возникает цепная реакция. Ядерной цепной реакцией называется реакция, в которой частицы, вызывающие ее (нейтроны), образуются как продукты этой реакции.

Цепная реакция сопровождается выделением огромной энергии. При делении каждого ядра выделяется энергия около 200 МэВ. При полном же делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделяется энергия $2,3 \cdot 10^4$ кВт · ч. Это эквивалентно энергии, получаемой при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти.

Но для осуществления цепной реакции нельзя использовать любые ядра, делящиеся под влиянием нейтронов. В силу ряда причин из ядер, встречающихся в природе, пригодны лишь ядра изотопа урана с массовым числом 235, т. е. ${}^{235}_{92}\text{U}$.

Изотопы урана. Естественный уран состоит в основном из двух изотопов: $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{238}_{92}\text{U}$. Но изотоп $^{235}_{92}\text{U}$ составляет всего 1/140 долю от более распространенного изотопа $^{238}_{92}\text{U}$.

Ядра $^{235}_{92}\text{U}$ и делятся под влиянием как быстрых, так и медленных нейтронов. Ядра же $^{238}_{92}\text{U}$ могут делиться лишь под влиянием нейтронов с энергией более 1 МэВ. Такую энергию имеют примерно 60% нейтронов, появляющихся при делении. Однако примерно лишь один нейтрон из пяти производит деление $^{238}_{92}\text{U}$. Остальные нейтроны захватываются этим изотопом, не производя деления. В результате цепная реакция с использованием чистого изотопа $^{238}_{92}\text{U}$ невозможна.

Коэффициент размножения нейтронов. Для течения цепной реакции нет необходимости, чтобы каждый нейтрон обязательно вызывал деление ядра. Необходимо лишь, чтобы среднее число освобожденных нейтронов в данной массе урана не уменьшалось с течением времени.

Это условие будет выполнено, если коэффициент размножения нейтронов k больше или равен единице. Коэффициентом размножения нейтронов называют отношение числа нейтронов в каком-либо «поколении» к числу нейтронов предшествующего «поколения». Подсменой «поколений» понимают деление ядер, при котором поглощаются нейтроны старого «поколения» и рождаются новые нейтроны.

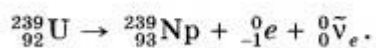
Если $k \geq 1$, то число нейтронов увеличивается с течением времени или остается постоянным, и цепная реакция идет. При $k < 1$ число нейтронов убывает и цепная реакция невозможна.

Коэффициент размножения определяется четырьмя фактами:

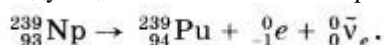
- 1) захватом медленных нейтронов ядрами $^{235}_{92}\text{U}$ с последующим делением и захватом быстрых нейтронов ядрами $^{235}_{92}\text{U}$ и $^{238}_{92}\text{U}$ также с последующим делением;
- 2) захватом нейтронов ядрами урана без деления;
- 3) захватом нейтронов продуктами деления, замедлителем (о нем сказано дальше) и конструктивными элементами установки;
- 4) вылетом нейтронов из делящегося вещества наружу. Лишь первый процесс сопровождается увеличением числа нейтронов (в основном за счет деления $^{235}_{92}\text{U}$). Все остальные приводят к их убыли. Цепная реакция в чистом изотопе $^{238}_{92}\text{U}$ невозможна, так как в этом случае $k < 1$ (число нейтронов, поглощаемых ядрами без деления, больше числа нейтронов, вновь образующихся за счет деления ядер).

Для стационарного течения цепной реакции коэффициент размножения нейтронов должен быть равен единице. Это равенство необходимо поддерживать с большой точностью. Уже при $k = 1,01$ почти мгновенно произойдет взрыв.

Образование плутония. Важное значение имеет не вызывающий деления захват нейтронов ядрами изотопа урана $^{238}_{92}\text{U}$. После захвата образуется радиоактивный изотоп $^{239}_{92}\text{U}$ с периодом полураспада 23 мин. Распад происходит с испусканием электрона и антинейтрино и возникновением первого трансуранового элемента — нептуния:



Нептуний β -радиоактивен с периодом полураспада около двух дней. В процессе распада нептуния образуется следующий трансурановый элемент — плутоний:



Плутоний относительно стабилен, так как его период полураспада велик — порядка 24 000 лет. Важнейшее свойство плутония состоит в том, что он делится под влиянием медленных нейтронов, так же как и изотоп $^{235}_{92}\text{U}$. Поэтому с помощью плутония также может быть осуществлена цепная реакция, которая сопровождается выделением громадной энергии.

Цепная реакция деления возможна благодаря тому, что при делении ядер испускается два-три нейтрона. Большая часть выделяемой энергии приходится на кинетическую энергию осколков делящихся ядер.

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Развитие ядерной энергетики. По такому же принципу действуют введенные в эксплуатацию Нововоронежская, Ленинградская, Курская, Кольская и другие АЭС. Реакторы этих станций имеют мощность 500—1000 МВт.

Атомные электростанции строятся прежде всего в европейской части страны. Это связано с преимуществами АЭС по сравнению с тепловыми электростанциями, работающими на органическом топливе. Ядерные реакторы не потребляют дефицитного органического топлива и не загружают перевозками угля железнодорожный транспорт. Атомные электростанции не потребляют атмосферный кислород и не засоряют среду золой и продуктами сгорания. Однако размещение АЭС в густонаселенных областях таит в себе потенциальную угрозу.

В реакторах на тепловых (т. е. медленных) нейтронах уран используется лишь на 1—2%. Полное использование урана достигается в реакторах на быстрых нейтронах, в которых обеспечивается также воспроизводство нового ядерного

горючего в виде плутония. В 1980 г. на Белоярской АЭС состоялся пуск первого в мире реактора на быстрых нейтронах мощностью 600 МВт.

Ядерной энергетике, как и многим другим отраслям промышленности, присущи вредные или опасные факторы воздействия на окружающую среду. Наибольшую потенциальную опасность представляет радиоактивное загрязнение. Сложные проблемы возникают с захоронением радиоактивных отходов и демонтажем отслуживших свой срок атомных электростанций. Срок их службы около 20 лет, после чего восстановление станций из-за многолетнего воздействия радиации на материалы конструкций невозможно.

АЭС проектируется с расчетом на максимальную безопасность персонала станции и населения. Опыт эксплуатации АЭС во всем мире показывает, что биосфера надежно защищена от радиационного воздействия предприятий ядерной энергетики в нормальном режиме эксплуатации. Однако взрыв четвертого реактора на Чернобыльской АЭС показал, что риск разрушения активной зоны реактора из-за ошибок персонала и просчетов в конструкции реакторов остается реальностью, поэтому принимаются строжайшие меры для снижения этого риска.

Ядерные реакторы устанавливаются также на атомных подводных лодках и ледоколах.

Ядерное оружие. Неуправляемая цепная реакция с большим коэффициентом увеличения нейтронов осуществляется в атомной бомбе.

Для того чтобы происходило почти мгновенное выделение энергии (взрыв), реакция должна идти на быстрых нейтронах (без применения замедлителей). Взрывчатым веществом служит чистый уран $^{235}_{92}\text{U}$ или плутоний $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Чтобы мог произойти взрыв, размеры делящегося материала должны превышать критические. Это достигается либо путем быстрого соединения двух кусков делящегося материала с докритическими размерами, либо же за счет резкого сжатия одного куска до размеров, при которых утечка нейтронов через поверхность падает настолько, что размеры куска оказываются надкритическими. То и другое осуществляется с помощью обычных взрывчатых веществ.

При взрыве атомной бомбы температура достигает десятков миллионов кельвин. При такой высокой температуре очень резко повышается давление и образуется мощная взрывная волна. Одновременно возникает мощное излучение. Продукты цепной реакции при взрыве атомной бомбы сильно радиоактивны и опасны для жизни живых организмов.

Атомные бомбы применили США в конце Второй мировой войны против Японии. В 1945 г. были сброшены атомные бомбы на японские города Хиросима и Нагасаки.

В термоядерной (водородной) бомбе для инициирования реакции синтеза используется взрыв атомной бомбы, помещенной внутри термоядерной.

Нетривиальным решением оказалось то, что взрыв атомной бомбы используется не для повышения температуры, а для сильнейшего сжатия термоядерного топлива излучением, образующимся при взрыве атомной бомбы.

В нашей стране основные идеи создания термоядерной бомбы были выдвинуты после Великой Отечественной войны А. Д. Сахаровым.

С созданием ядерного оружия победа в войне стала невозможной. Ядерная война способна привести человечество к гибели, поэтому народы всего мира настойчиво борются за запрещение ядерного оружия.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ

РЕАКЦИИ

Масса покоя ядра урана больше суммы масс покоя осколков, на которые делится ядро. Для легких ядер дело обстоит как раз наоборот. Так, масса покоя ядра гелия значительно меньше суммы масс покоя двух ядер тяжелого водорода, на которые можно разделить ядро гелия.

Это означает, что при слиянии легких ядер масса покоя уменьшается и, следовательно, должна выделяться значительная энергия. Подобного рода реакции слияния легких ядер могут протекать только при очень высоких температурах. Поэтому они называются термоядерными.

Термоядерные реакции — это реакции слияния легких ядер при очень высокой температуре.

Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизились на расстояние около 10^{-12} см, т. е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание ядер, которое может быть преодолено лишь за счет большой кинетической энергии теплового движения ядер.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях в расчете на один нуклон, превышает удельную энергию, выделяющуюся при цепных реакциях деления ядер. Так, при слиянии тяжелого водорода — дейтерия — со сверхтяжелым изотопом водорода — тритием — выделяется около 3,5 МэВ на один нуклон. При делении же урана выделяется примерно 1 МэВ энергии на один нуклон.

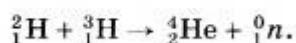
Термоядерные реакции играют большую роль в эволюции Вселенной. Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение. По современным представлениям, на ранней стадии развития звезда в основном состоит из водорода. Температура внутри звезды столь велика, что в ней протекают реакции слияния ядер водорода с образованием гелия. Затем при слиянии ядер гелия образуются и более тяжелые элементы.

Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции химического состава вещества во Вселенной. Все эти реакции сопровождаются выделением энергии, обеспечивающей излучение света звездами на протяжении миллиардов лет.

Осуществление управляемых термоядерных реакций на Земле сулит человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. Наиболее перспективной в этом отношении реакцией является реакция слияния дейтерия

с

тритием:



В этой реакции выделяется энергия 17,6 МэВ. Поскольку трития в природе нет, он должен вырабатываться в самом термоядерном реакторе из лития.

Экономически выгодная реакция, как показывают расчеты, может идти только при нагревании реагирующих веществ до температуры порядка сотен миллионов кельвин при большой плотности вещества (10^{14} — 10^{15} частиц в 1 см^3). Такие температуры могут быть в принципе достигнуты путем создания в плазме мощных электрических разрядов. Основная трудность на этом пути состоит в том, чтобы удерживать плазму столь высокой температуры внутри установки в течение $0,1$ — 1 с .

Никакие стенки из вещества здесь не годятся, так как при столь высокой температуре они сразу же превратятся в пар. Единственно возможным является метод удержания высокотемпературной плазмы в ограниченном объеме с помощью очень сильных магнитных полей. Однако до сих пор решить эту задачу не удалось из-за неустойчивости плазмы. Неустойчивость приводит к диффузии части заряженных частиц сквозь магнитные стенки.

Для уменьшения неоднородности магнитного поля, приводящей к изменению конфигурации плазменного столба и соответственно к его неустойчивости, академиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом была предложена форма плазменного столба в виде тора, которая используется на установке, называемой «Токамак».

На этой установке удалось получить плазму температурой $1,3 \cdot 10^7 \text{ К}$. Однако проблема ее удержания еще не решена.

Помимо энергетического преимущества, при термоядерных реакциях не образуются радиоактивные отходы, т. е. не надо решать проблемы загрязнения окружающей среды.

В настоящее время существует уверенность в том, что рано или поздно термоядерные реакторы будут созданы.

Ученые нашей страны достигли больших успехов в создании управляемых термоядерных реакций. Эти работы были начаты под руководством академиков Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича и продолжаются их учениками.

Пока же удалось осуществить лишь неуправляемую реакцию синтеза взрывного типа в водородной (или термоядерной) бомбе.

Осуществление управляемых термоядерных реакций способно решить энергетическую проблему человечества. Неуправляемые термоядерные реакции в водородных бомбах могут человечество уничтожить.

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Излучения радиоактивных веществ оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Даже сравнительно слабое излучение, которое при полном поглощении повышает температуру тела лишь на $0,001 \text{ }^\circ\text{C}$, нарушает жизнедеятельность клеток.

Живая клетка — это сложный механизм не способный продолжать нормальную деятельность далее при малых повреждениях отдельных его участков. Между тем и слабые излучения способны нанести клеткам существенные повреждения и вызвать опасные заболевания (лучевая болезнь).

При большой интенсивности излучения живые организмы погибают. Опасность излучений усугубляется тем, что они не вызывают никаких болевых ощущений даже при смертельных дозах.

Механизм биологического действия излучения, поражающего объекты, еще недостаточно изучен. Но ясно, что оно сводится к ионизации атомов и молекул и это приводит к изменению их химической активности. Наиболее чувствительны к излучениям ядра клеток, особенно клеток, которые быстро делятся. Поэтому в первую очередь излучения поражают костный мозг, из-за чего нарушается процесс образования крови. Далее наступает поражение клеток пищеварительного тракта и других органов.

Сильное влияние оказывает облучение на наследственность, поражая гены в хромосомах. В большинстве случаев это влияние является неблагоприятным.

Облучение живых организмов может оказывать и определенную пользу. Быстроразмножающиеся клетки в злокачественных (раковых) опухолях более чувствительны к облучению, чем нормальные. На этом основано подавление раковой опухоли γ -лучами радиоактивных препаратов, которые для этой цели более эффективны, чем рентгеновские лучи.

Доза излучения. Воздействие излучений на живые организмы характеризуется дозой излучения. **Поглощенной дозой излучения** называется отношение поглощенной энергии E ионизирующего излучения к массе m облучаемого вещества:

$$D = \frac{E}{m}. \quad (13.6)$$

В СИ поглощенную дозу излучения выражают в грях (сокращенно: Гр). 1 Гр равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж:

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Естественный фон радиации (космические лучи, радиоактивность окружающей среды и человеческого тела) составляет за год дозу излучения около $2 \cdot 10^{-3} \text{ Гр}$ на человека. Международная комиссия по радиационной защите установила для лиц, работающих с излучением, предельно допустимую за год дозу $0,05 \text{ Гр}$. Доза излучения 3 — 10 Гр , полученная за короткое время, смертельна.

Рентген. На практике широко используется внесистемная единица экспозиционной дозы излучения — рентген (сокращенно: Р). Эта единица является мерой ионизирующей способности рентгеновского и гамма-излучений. Доза излучения равна одному рентгену (1 Р), если в 1 см³ сухого воздуха при температуре 0 °С и давлении 760 мм рт. ст. образуется столько ионов, что их суммарный заряд каждого знака в отдельности равен $3 \cdot 10^{-10}$ Кл. При этом получается примерно $2 \cdot 10^9$ пар ионов. Число образующихся ионов связано с поглощаемой веществом энергией. В практической дозиметрии можно считать 1 Р примерно эквивалентным поглощенной дозе излучения 0,01 Гр.

Характер воздействия излучения зависит не только от дозы поглощенного излучения, но и от его вида. Различие биологического воздействия видов излучения характеризуется коэффициентом качества k . За единицу принимается коэффициент качества рентгеновского и гамма-излучения. Самое большое значение коэффициента качества у α -частиц ($k = 20$), α -лучи являются самыми опасными, так как вызывают самые большие разрушения живых клеток.

Для оценки действия излучения на живые организмы вводится специальная величина — эквивалентная доза поглощенного излучения. Это произведение дозы поглощенного излучения на коэффициент качества:
$$H = D \cdot k$$

Единица эквивалентной дозы — зиверт (Зв). 1 Зв — эквивалентная доза, при которой доза поглощенного гамма-излучения равна 1 Гр.

Максимальное значение эквивалентной дозы, после которого происходит поражение организма, выражающееся в нарушении деления клетки или образовании новых клеток, 0,5 Зв.

Среднее значение эквивалентной дозы поглощенного излучения за счет естественного радиационного фона (космические лучи, радиоактивные изотопы земной коры и т. д.) составляет 2 мЗв в год.

Защита организмов от излучения. При работе с любым источником радиации (радиоактивные изотопы, реакторы и др.) необходимо принимать меры по радиационной защите всех людей, могущих попасть в зону действия излучения.

Самый простой метод защиты — это удаление персонала от источника излучения на достаточно большое расстояние. Даже без учета поглощения в воздухе интенсивность радиации убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Поэтому ампулы с радиоактивными препаратами не следует брать руками. Надо пользоваться специальными щипцами с длинной ручкой.

В тех случаях, когда удаление от источника излучения на достаточно большое расстояние невозможно, для защиты от излучения используют преграды из поглощающих материалов.

Наиболее сложна защита от γ -лучей и нейтронов из-за их большой проникающей способности. Лучшим поглотителем γ -лучей является свинец. Медленные нейтроны хорошо поглощаются бором и кадмием. Быстрые нейтроны предварительно замедляются с помощью графита. После аварии на Чернобыльской АЭС Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) по предложению нашей страны приняты рекомендации по дополнительным мерам безопасности энергетических реакторов. Установлены более строгие регламенты работ персонала АЭС.

Авария на Чернобыльской АЭС показала огромную опасность радиоактивных излучений. Все люди должны иметь представление об этой опасности и мерах защиты от нее.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультет среднего профессионального образования

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
СЕМИНАРСКИХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ПУП.03 ФИЗИКА**

Специальность 21.02.05 Земельно-имущественные отношения

Форма обучения очная

Оренбург, 2022 г.

Тема 1.1. Основы кинематики

Семинарские занятия

1. Физический диктант по теме «Механическое движение, его относительность и характеристики».
2. Решение задач на тему «Основы кинематики».

Примеры решения задач:

Задача

Из одного и того же места начали равноускоренно двигаться в одном направлении две точки, причем вторая начала свое движение через 2 с после первой. Первая точка двигалась с начальной скоростью $v_1 = 1$ м/с и ускорением $a_1 = 2$ м/с², вторая - с начальной скоростью $v_2 = 10$ м/с и ускорением $a_2 = 1$ м/с². Когда и где вторая точка догонит первую?

Дано:

$$\begin{aligned}\Delta t &= 2 && \text{с} \\ V_1 &= 1 && \text{м/с} \\ V_2 &= 10 && \text{м/с} \\ a_1 &= 2 && \text{м/с}^2 \\ a_2 &= 1 && \text{м/с}^2\end{aligned}$$

Найти:

$$t \text{ и } x?$$

Решение:

Запишем уравнения движения точек

$$\begin{aligned}x_1(t) &= V_1 \cdot t + \frac{a_1 \cdot t^2}{2} \\ x_2(t) &= V_2 \cdot (t - \Delta t) + \frac{a_2 \cdot (t - \Delta t)^2}{2}\end{aligned} \tag{1}$$

Вторая точка догоняет первую, когда их координаты становятся равными:

$$x_1(t) = x_2(t) = x$$

$$\begin{aligned}V_1 \cdot t + \frac{a_1 \cdot t^2}{2} &= V_2 \cdot (t - \Delta t) + \frac{a_2 \cdot (t - \Delta t)^2}{2} \\ t^2 \cdot \frac{(a_1 - a_2)}{2} + t \cdot (V_1 - V_2 + a_2 \cdot \Delta t) - \frac{a_2 \cdot \Delta t^2 - 2V_2 \cdot \Delta t}{2} &= 0 \\ t_1 &= \frac{-(V_1 - V_2 + a_2 \cdot \Delta t) - \sqrt{(V_1 - V_2 + a_2 \cdot \Delta t)^2 + (a_1 - a_2) \cdot (a_2 \cdot \Delta t^2 - 2V_2 \cdot \Delta t)}}{(a_1 - a_2)} \\ t_2 &= \frac{-(V_1 - V_2 + a_2 \cdot \Delta t) + \sqrt{(V_1 - V_2 + a_2 \cdot \Delta t)^2 + (a_1 - a_2) \cdot (a_2 \cdot \Delta t^2 - 2V_2 \cdot \Delta t)}}{(a_1 - a_2)}\end{aligned} \tag{2}$$

В момент времени t_1 вторая точка догоняет первую, а в момент времени t_2 первая обгоняет вторую.

$$\begin{aligned}t &= t_1 \\ t &= 3.394 && \text{с} \\ x &= x_1(t) \\ x &= 14.917 && \text{м}\end{aligned}$$

Задача

Тело, брошенное вертикально вверх, находилось на одной и той же высоте $h = 8,6$ м два раза с интервалом в 3 секунды. Пренебрегая сопротивлением воздуха, вычислить начальную скорость брошенного тела.

Дано:

$$h = 8,6 \text{ м}$$

$$t = 3 \text{ с}$$

Найти:

$$V_0$$

Решение:

Движение тела является движением с постоянным ускорением из состояния покоя:

$$h(t) = V_0 \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2}$$

Согласно условию можем записать:

$$h(t_1) = h(t_1 + t) = h$$

или

$$V_0 \cdot t_1 - \frac{g \cdot t_1^2}{2} = h$$

$$V_0 \cdot (t_1 + t) - \frac{g \cdot (t_1 + t)^2}{2} = h$$

Тем самым получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными: t_1 и V_0 .
Решение системы:

$$t_1 = \frac{\left[g \cdot (g \cdot t^2 + 8 \cdot h) \right]^{\frac{1}{2}} - g \cdot t}{2g}$$

$$V_0 = \frac{h + \frac{g \cdot t_1^2}{2}}{t_1}$$

$$V_0 = 19.612 \text{ м/с}$$

Тема 1.2. Основы динамики

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Основы динамики».
2. Тестирование по теме «Законы Ньютона».

Пример решения задач:

Задача: Два бруска массами 1 кг и 4 кг, соединенные шнуром, лежат на столе. С каким ускорением будут двигаться бруски, если к одному из них приложить силу 10 Н, направленную горизонтально? Какова будет сила натяжения шнура, соединяющего бруски, если силу 10 Н приложить к первому бруску? ко второму бруску? Трением пренебречь.

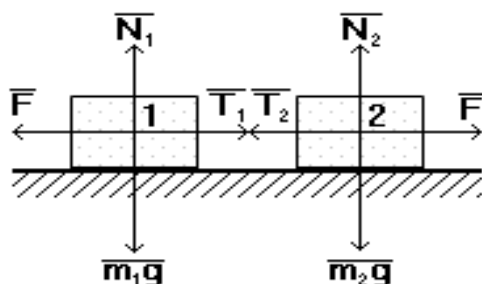
№ 2-4

Дано:

$m_1 = 1 \text{ кг}$
 $m_2 = 4 \text{ кг}$
 $F = 10 \text{ Н}$
 $N = mg = 0$

Найти:

$a - ?$
 $T_1 - ?$
 $T_2 - ?$



Решение:

Согласно 2-му закону Ньютона уравнение динамики 1-го бруска

$$m_1 a_1 = T_1 + F + m_1 g + N_1;$$

уравнение динамики 2-го бруска

$$m_2 a_2 = T_2 + F + m_2 g + N_2.$$

Поскольку в условии требуется пренебречь трением, т.е., $N = mg = 0$, уравнения динамики запишем иначе: $m_1 a_1 = T_1 + F$; $m_2 a_2 = T_2 + F$. Исходя из этих уравнений центр тяжести будет двигаться с ускорением

$$a = \frac{F}{m_1 + m_2} = \frac{10 \text{ Н}}{1 \text{ кг} + 4 \text{ кг}} = 2 \text{ м/с}^2.$$

Если силу F приложить к первому бруску, сила натяжения шнура будет $T_1 = F - m_1 a_1 = 10 \text{ Н} - 1 \text{ кг} \cdot 2 \text{ м/с}^2 = 8 \text{ Н}$.

Если силу F приложить к второму бруску, сила натяжения шнура будет $T_2 = F - m_2 a_2 = 10 \text{ Н} - 4 \text{ кг} \cdot 2 \text{ м/с}^2 = 2 \text{ Н}$.

Ответ: $a = 2 \text{ м/с}^2$; $T_1 = 8 \text{ Н}$; $T_2 = 2 \text{ Н}$.

Тема 1.3. Законы сохранения в механике

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Законы сохранения в механике».

Примеры решения задач:

Задача

В лодке массой $M = 240$ кг стоит человек массой $m = 60$ кг. Лодка плывет со скоростью $V_1 = 2$ м/с. Человек прыгает с лодки в горизонтальном направлении со скоростью $V = 4$ м/с (относительно лодки). Найти скорость u движения лодки после прыжка человека вперед по движению лодки.

Дано:

$$\begin{aligned} M &= 240 \quad \text{кг} \\ m &= 60 \quad \text{кг} \\ V_1 &= 2 \quad \text{м/с} \\ V &= 4 \quad \text{м/с} \end{aligned}$$

Найти:

$$u$$

Решение:

Скорость прыгающего человека относительно воды:

$$V_{\text{отн.в}} = u + V$$

Закон сохранения импульса:

$$(m + M) \cdot V_1 = M \cdot u + m \cdot (u + V)$$

$$u = \frac{V_1 \cdot m + V_1 \cdot M - m \cdot V}{m + M}$$

$$u = 1.2 \quad \text{м/с}$$

Задача

Камень брошен вверх под углом $\phi = 60^\circ$ к горизонту. Кинетическая энергия камня в начальный момент равна $T_0 = 20$ Дж. Определить кинетическую и потенциальную энергии камня в высшей точке его траектории. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Дано:

$$\begin{aligned} \phi &= 60^\circ \\ T_0 &= 20 \quad \text{Дж} \end{aligned}$$

Найти:

$$W_k, W_p$$

Решение:

В верхней точке траектории вертикальная составляющая скорости равна нулю. Горизонтальная составляющая

$$V = V_0 \cdot \cos(\phi)$$

Кинетическая энергия

$$W_k = \frac{m \cdot V^2}{2} = \frac{m \cdot V_0^2}{2} \cdot \cos^2(\phi) = T_0 \cdot \cos^2(\phi)$$

$$W_k = T_0 \cdot \cos^2(\phi)$$

$$W_k = 5 \quad \text{Дж}$$

Полная механическая энергия не меняется:

$$T_0 + 0 = W_k + W_p$$

$$W_p = T_0 - W_k$$

$$W_p = 15 \quad \text{Дж}$$

Тема 1.4. Механические колебания и волны

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Механические колебания и волны».

Примеры решения задач:

Задача 1. Точка струны, которая колеблется с частотой $\nu = 800$ Гц, за $t = 20$ с прошла путь $S = 64$ м. Определите амплитуду колебаний x_m .

Решение

Путь, который точка проходит за одно полное колебание, равен четырем амплитудам. Запишем, что S_1 – путь за одно колебание: $S_1(T) = 4x_m$. Это значит, что для того чтоб найти амплитуду, нужно знать S_1 – путь, который проходит струна за одно полное колебание. Обратим внимание на то, что мы знаем полный путь, пройденный струной, – это 64 м. Путь за одно колебание равен

полному пути, деленному на количество колебаний: $S_1 = \frac{S}{N}$. Таким образом, задача сводится к следующей: найти число колебаний точки струны, ведь полный путь мы уже знаем. Для нахождения числа колебаний у нас есть все: частота и время движения. Можно записать, что число колебаний равно полному времени t поделить на время одного колебания

Т: $N = \frac{t}{T}$ или $N = t\nu$. Тогда конечная формула для амплитуды будет иметь вид: $x_m = \frac{S_1}{4} = \frac{S}{4N} = \frac{S}{4t\nu} = \frac{64 \text{ м}}{4 \cdot 20 \text{ с} \cdot 800 \text{ Гц}} = 0,001 \text{ м} = 1 \text{ мм}$.

Ответ: 1 мм.

Задача 2. Подводная лодка всплыла на расстоянии $S = 200$ м от берега, вызвала волны на поверхности воды. Волны дошли до берега за $t = 40$ с, причем за следующие $\Delta t = 30$ с было $N = 60$ всплесков волн о берег. Каково расстояние между гребнями соседних волн λ ?

Решение

Вспомним формулу, которая связывает длину волны с другими характеристиками этого волнового движения. Длина волны связана со скоростью и частотой, поэтому задача разбивается на два этапа: на нахождение скорости волны и на нахождение её частоты.

Нам известно, что первая волна, как и последующие, прошла расстояние 200 м за 40 с,

поэтому $v = \frac{S}{t} = \frac{200 \text{ м}}{40 \text{ с}} = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Итак, скорость волны найдена.

Частота, если известно количество колебаний, совершенных за определенное количество времени,

имеет вид: $\nu = \frac{N}{\Delta t} = \frac{60}{30 \text{ с}} = 2 \text{ Гц}$.

Мы знаем все для нахождения длины волны: $\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ м}$.

Ответ: 2,5 м.

Тема 2.1. Молекулярно-кинетическое строение вещества. Агрегатные состояния вещества

Семинарские занятия

1. Физический диктант по теме «Молекулярно-кинетическое строение вещества. Агрегатные состояния вещества».

2. Решение задач на тему «Изопроцессы».

3. Тестирование по теме «Основы МКТ. Изопроцессы».
4. Решение задач на тему «Влажность воздуха. Поверхностное натяжение и смачивание».
5. Решение задач на тему «Свойства твердых тел».

Пример решения задач:

8.10

Сколько атомов содержится в газах массой 1 г каждый: 1) гелий, 2) углерод, 3) фтор, 4) полоний.

$$\begin{aligned} A_{\text{He}} &= 4 \\ A_{\text{C}} &= 12 \\ A_{\text{F}} &= 19 \\ A_{\text{Po}} &= 209 \\ N_A &= 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \\ m &= 1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг} \\ k &= 10^{-3} \text{ кг / моль} \end{aligned}$$

$$N_x = ?$$

Понадобятся 3 формулы из МСВ - законов идеальных газов:

$$N = \nu \cdot N_A; \quad \nu = \frac{m}{M}; \quad M = A \cdot 10^{-3}$$

Подставив соответственно каждый из газов в формулу молекулярной массы

$$M_r = \sum_i n_i A_{r,i}, \text{ а затем через связь молярной и молекулярной масс } M = M_r k \text{ получим:}$$

$$M_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{\text{C}} = 12 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{\text{F}} = 19 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{\text{Po}} = 209 \cdot 10^{-3}$$

Идём дальше и получаем:

$$\nu_{\text{He}} = \frac{m}{M_{\text{He}}} = \frac{10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \cdot 10^{-1}$$

$$\nu_{\text{C}} = \frac{m}{M_{\text{C}}} = \frac{10^{-3}}{12 \cdot 10^{-3}} = 8,3 \cdot 10^{-2}$$

$$\nu_{\text{F}} = \frac{m}{M_{\text{F}}} = \frac{10^{-3}}{19 \cdot 10^{-3}} = 5,3 \cdot 10^{-2}$$

$$\nu_{\text{Po}} = \frac{m}{M_{\text{Po}}} = \frac{10^{-3}}{209 \cdot 10^{-3}} = 4,8 \cdot 10^{-3}$$

Ну и последний рывок:

$$N_{\text{He}} = \nu_{\text{He}} \cdot N_A = 1,51 \cdot 10^{23}$$

$$N_{\text{C}} = \nu_{\text{C}} \cdot N_A = 5,02 \cdot 10^{22}$$

$$N_{\text{F}} = \nu_{\text{F}} \cdot N_A = 3,17 \cdot 10^{22}$$

$$N_{\text{Po}} = \nu_{\text{Po}} \cdot N_A = 2,88 \cdot 10^{21}$$

Си сами расставите...

Задача

При нагревании некоторой массы газа на $dT = 1\text{K}$ при постоянном давлении объем этой массы газа увеличился на $1/350$ часть первоначального объема. Найти первоначальную температуру T газа.

Дано:

$$\Delta T = 1 \quad \text{K}$$

$$n = \frac{1}{350}$$

Найти:

$$T - ?$$

Решение:

Запишем уравнение изобарного процесса

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

$$\frac{V}{T} = \frac{V \cdot (1 + n)}{T + \Delta T}$$

$$\Delta T = T \cdot n$$

$$T = \frac{\Delta T}{n} \quad (1)$$

$$T = 350 \quad \text{K}$$

8.29

Котел вместимостью $V=2$ куб.метра содержит перегретый водяной пар массой $m=10$ кг при температуре $T=500$ К. Определить давление P пара в котле.

$V = 2\text{м}^3$ $m = 10\text{кг}$ $T = 500\text{K}$ $R = 8,31\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}(\text{МПИ})$

$P=?$

Используем ур-е Менделеева-Клапейрона: $pV = \left(\frac{m}{M}\right) \cdot R \cdot T$, получим: $p = \frac{m \cdot R \cdot T}{M \cdot V}$;

$M_{\text{H}_2\text{O}} = A_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 10^{-3} = 18 \cdot 10^{-3}$, тогда, подставив всё куда следует, получим вот такое:

$$p = \frac{10 \cdot 8,31 \cdot 500}{18 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = \frac{41550}{0,036} = 1154167(\text{Па}) = 1,15(\text{МПа})$$

Задача

На сколько давление p воздуха внутри мыльного пузыря больше нормального атмосферного давления p_0 , если диаметр пузыря $d = 5$ мм?

Дано:

$$d = 5 \cdot 10^{-3} \quad \text{м}$$

$$\sigma = 0.04 \quad \text{Н/м}$$

Найти:

$$\Delta p - ?$$

Решение:

Дополнительное давление - это давление Лапласа. Давление Лапласа для поверхности с радиусом кривизны R :

$$p = \frac{2 \cdot \sigma}{R} \quad (1)$$

Для тонкого пузыря давление в 2 раза больше, т.к. поверхность и внутри и снаружи:

$$\Delta p = \frac{4 \cdot \sigma}{\frac{d}{2}}$$

$$\Delta p = 64 \quad \text{Н/м}^2$$

№ 4-52

Дано:

$$x_1 = 1 \text{ см}$$

$$F = 10 \text{ Н}$$

$$x_2 = 10 \text{ см}$$

Найти:

$$A - ?$$

Решение:

Согласно закону Гука для продольного растяжения или сжатия $F = kx_1$; отсюда $k = \frac{F}{x_1}$.

Работа, совершаемая при деформации тела равна

$$A = \frac{k x_2^2}{2} = \frac{F x_2^2}{2 x_1} = \frac{10 \text{ Н} \cdot (0.1 \text{ м})^2}{2 \cdot 0.01 \text{ м}} = \frac{5 \text{ Н} \cdot 0.01 \text{ м}^2}{0.01 \text{ м}} = 5 \text{ Дж}$$

Ответ: $A = 5 \text{ Дж}$

Тема 2.2. Основы термодинамики

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Основы термодинамики».

Примеры решения задач:

Задача

Водород массой $m=4\text{г}$ был нагрет на $\Delta T=10\text{К}$ при постоянном давлении. Определить работу A расширения газа.

Дано:

$$p = \text{const}$$

$$m = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$\Delta T = 10 \text{ К}$$

Найти:

$$A$$

Решение:

Молярная масса водорода:

$$M_{\text{H}_2} = 2 \cdot 0.001 \text{ кг/моль}$$

Работа расширения газа:

$$A = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1) = p \cdot V_2 - p \cdot V_1 \quad (1)$$

Уравнение Клапейрона-Менделеева состояния газа до и после нагрева:

$$p \cdot V_1 = \frac{m}{M_{\text{H}_2}} \cdot R \cdot T_1$$

$$p \cdot V_2 = \frac{m}{M_{\text{H}_2}} \cdot R \cdot T_2$$

Подставим полученные выражения в (1):

$$A = \frac{m}{M_{\text{H}_2}} \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

$$A = \frac{m}{M_{\text{H}_2}} \cdot R \cdot \Delta T$$

$$A = 166.2 \text{ Дж}$$

Задача

Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_1 нагревателя в четыре раза выше температуры T_2 холодильника. Какую долю количества теплоты, получаемого за один цикл от нагревателя, газ отдает холодильнику?

Дано:

$$n = 4$$

Найти:

$$\varepsilon - ?$$

Решение:

КПД цикла:

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{наг}}} \\ \eta &= 1 - \frac{1}{n}\end{aligned}\tag{1}$$

КПД цикла можно также записать через передаваемую теплоту:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{Q_{\text{наг}} - Q_{\text{хол}}}{Q_{\text{наг}}} \\ \eta &= 1 - \varepsilon \\ \varepsilon &= \frac{1}{n}\end{aligned}\tag{2}$$
$$\varepsilon = 0.25$$

Тема 3.1. Электрическое поле

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Закон Кулона».
2. Тестирование по теме «Электрический заряд. Электрическое поле».
3. Решение задач на тему «Электрическая емкость. Энергия электрического поля».

Пример решения задач:

Задача

Точечные заряды $Q_1=20$ мкКл, $Q_2=-10$ мкКл находятся на расстоянии $d=5$ см друг от друга. Определить напряженность поля в точке, удаленной на $r_1=3$ см от первого и на $r_2=4$ см от второго заряда. Определить также силу F , действующую в этой точке на точечный заряд $Q=1$ мкКл.

Дано:

$$Q_1 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$Q_2 = -10 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$d = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_1 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

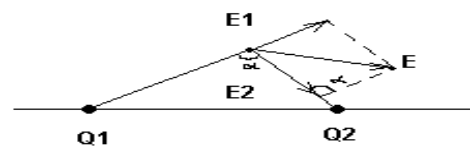
$$r_2 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$Q = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

Найти:

E, F - ?

Решение:



Напряженности, создаваемые каждым зарядом в отдельности (по модулю):

$$E_1 = \frac{|Q_1|}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_1^2} \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{|Q_2|}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_2^2} \quad (2)$$

Угол α определим с помощью теоремы косинусов:

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos(\alpha)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{d^2 - r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (3)$$

Суммарная напряженность:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos(\alpha)}$$

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \left(\frac{d^2 - r_1^2 - r_2^2}{2 \cdot r_1 \cdot r_2} \right)} \quad (4)$$

$$E = 2.075 \times 10^8 \text{ В/м}$$

Сила воздействия на заряд:

$$F = E \cdot Q \quad (5)$$

$$F = 207.472 \text{ Н}$$

Задача

Заряды 0,15 мкКл и 3 нКл находятся на расстоянии 10 см друг от друга. Какую работу совершат силы поля, если второй заряд, отталкиваясь от первого, удалится от него на расстояние 10 м?

Дано:

$$Q_1 = 0.15 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$Q_2 = 3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$d_1 = 10 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d_2 = 10 \text{ м}$$

Найти:

$$A - ?$$

Решение:

Работа сил поля совершается за счет уменьшения потенциальной энергии:

$$A = W_{p1} - W_{p2}$$

$$A = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_1} - \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_2}$$

$$A = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{d_2 - d_1}{d_1 \cdot d_2} \quad (1)$$

$$A = 4.004 \times 10^{-5} \text{ Дж}$$

(эта работа идет на увеличение кинетической энергии заряда)

Задача: В плоский конденсатор вдвинули плитку парафина толщиной 1 см, которая вплотную прилегает к его пластинам. На сколько нужно увеличить расстояние между пластинами, чтобы получить прежнюю емкость?

$$d = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$$

$$C_1 = C_2$$

$$\frac{d_2}{d_1} = ?$$

Емкость плоского конденсатора $C = \epsilon \epsilon_0 S / d$, где



$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{м}}$ - электрическая постоянная

ϵ - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между пластинами

Для парафина $\epsilon = 2,0$,

Для воздуха $\epsilon = 1,0$

Для первого случая $C_1 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d_1}$

Для второго случая $C_2 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d_2}$

Так как $C_1 = C_2$, то $\frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d_1} = \frac{\epsilon_0 S}{d_2} \cdot \frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{\epsilon}$

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} = 0,5$$

Ответ: $\frac{d_2}{d_1} = 0,5$

Тема 3.2. Постоянный электрический ток

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Постоянный электрический ток».

Примеры решения задач:

Задача: К источнику тока с ЭДС 1,5 В присоединили катушку сопротивлением 0,1 Ом. Амперметр показал силу тока 0,5 А. Когда к источнику тока присоединили последовательно еще один источник тока с такой же ЭДС, то сила тока в той же катушке оказалась равной 0,4 А. Определите внутренние сопротивления первого и второго источников тока.

19.13) Дано:
 $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 1,5 \text{ В}$
 $R = 0,1 \text{ Ом}$
 $I_1 = 0,5 \text{ А}$
 $I_2 = 0,4 \text{ А}$
 $r_1, r_2 = ?$

Решение:
 1) В 1-ом случае по 3-му Ома где всей цепи ток в цепи

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}_1}{R + r_1} \quad ; \quad R + r_1 = \frac{\mathcal{E}_1}{I_1}$$

 Внутр. сопротивление 1-го источника ЭДС!

$$r_1 = \frac{\mathcal{E}_1}{I_1} - R = \frac{1,5}{0,5} - 0,1 = 2,9 \text{ Ом}$$

 2) Во 2-ом случае общее ЭДС попутной батареей $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 1,5 + 1,5 = 3 \text{ В}$
 по 3-му Ома где всей цепи ток

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R + r_1 + r_2} \quad ; \quad r_1 + r_2 + R = \frac{\mathcal{E}}{I_2}$$

 Внутр. сопротивление 2-го источника ЭДС!

$$r_2 = \frac{\mathcal{E}}{I_2} - (r_1 + R) = \frac{3}{0,4} - (2,9 + 0,1) = 4,5 \text{ Ом}$$

19.26.
 ЭДС батареи аккумуляторов $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$, сила тока I короткого замыкания $= 5 \text{ А}$. Какую наибольшую мощность P_{max} можно получить во внешней цепи, соединенной с такой батареей?

Дано:
 $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$
 $I_{\text{кз}} = 5 \text{ А}$
 $P_{\text{max}} = ?$

$$r = \frac{\mathcal{E}}{I_{\text{кз}}} \quad ; \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{\mathcal{E}}{2r} = \frac{\mathcal{E} I_{\text{кз}}}{2} = \frac{I_{\text{кз}} \mathcal{E}}{2}$$

$$P = I \cdot U = I^2 R = I^2 r = \frac{I_{\text{кз}}^2}{4} \cdot \frac{\mathcal{E}}{I_{\text{кз}}} = \frac{I_{\text{кз}} \mathcal{E}}{4} = \frac{5 \cdot 12}{4} = 15 \text{ Вт}$$

Ответ: $P_{\text{max}} = 15 \text{ Вт}$

Тема 3.3. Магнитное поле.

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Магнитное поле».
2. Деловая игра на тему «Магнитное поле».

Примеры решения задач:

Решение задач с применением закона Ампера (и использованием выражения для силы Лоренца) аналогично решению задач механики. Кроме механических сил, надо учитывать силу Ампера (или силу Лоренца) и правильно определять ее направление.

Задача 1. Между полюсами магнита подвешен горизонтально на двух невесомых нитях прямой проводник длиной $l = 0,2$ м и массой $m = 10$ г. Вектор индукции однородного магнитного поля перпендикулярен проводнику и направлен вертикально; $B = 49$ мТл. На какой угол α от вертикали отклонятся нити, поддерживающие проводник, если по нему пропустить ток? Сила тока $I = 2$ А.

Решение. На проводник действуют следующие силы: силы упругости двух нитей $\vec{T}$, сила тяжести $m\vec{g}$ и сила Ампера $\vec{F}$ (рис. 1.30).

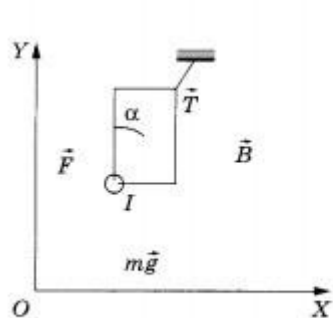


Рис. 1.30

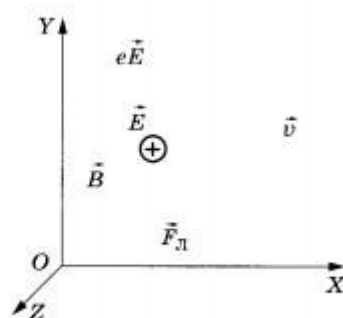


Рис. 1.31

Модуль силы Ампера $F = IBl$. При равновесии проводника суммы проекций сил на вертикальное и горизонтальное направления (с учетом их знаков) равны нулю:

$$\begin{aligned} -mg + T \cos \alpha &= 0, \\ -F + T \sin \alpha &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F}{mg} = \frac{IBl}{mg} \approx 0,2.$$

Следовательно, угол $\alpha = 11,3^\circ$.

Задача 2. В пространстве, где созданы одновременно однородные и постоянные электрическое и магнитное поля, по прямолинейной траектории движется протон.

Известно, что напряженность электрического поля равна $\vec{E}$. Определите индукцию $\vec{B}$ магнитного поля.

Решение. Прямолинейное движение протона возможно в двух случаях.

1) Вектор $\vec{E}$ направлен вдоль траектории движения протона. Тогда вектор $\vec{B}$ также должен быть направлен вдоль этой траектории, и его модуль может быть любым, так как магнитное поле не будет действовать на частицу.

2) Векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$, $\vec{v}$ взаимно перпендикулярны, и сила, действующая на протон со стороны электрического поля, равна по модулю и противоположна по направлению силе Лоренца, действующей на протон со стороны магнитного поля (рис. 1.31). Так как

$$e\vec{E} + \vec{F}_\text{Л} = 0,$$

$$eE - evB = 0 \text{ и } B = \frac{E}{v}.$$

Деловая игра на тему «Магнитное поле»

Цели: обобщить, повторить материал по теме “Магнитное поле”; расширить кругозор учащихся.

Оборудование: карточки с вопросами; жетончики с баллами “3”, “4”, “5”.

Ход урока

I. Подготовительный этап.

Перед началом урока-игры оглашаются правила. Назначаются капитаны 3 команд. Капитаны по очереди выбирают членов своей команды и пишут на листочках любое двузначное число. Команда, чей капитан обозначил наименьшее число, начинает игру. На доске подготовлена таблица с категориями:

История	Ораторство
Математика	ОбЕд
Русский язык	ПрИз
Рисование	Секрет

Каждой категории соответствуют три вопроса для каждой команды. Вопросы выписаны на отдельные карточки.

Команда, которая начинает игру, выбирает любую категорию и из каждой команды выходит по одному игроку. Учитель разъясняет, что означает данная категория, и предлагает им на выбор соответствующие карточки с вопросом. После этого учащиеся последовательно отвечают на предложенный вопрос и зарабатывают жетончики с баллами, которые соответствуют ответам на оценки “3”, “4” или “5”. Каждый участник зарабатывает себе отдельный балл и вносит вклад в суммарный балл команды. Таким образом, команда, заработавшая наибольшее количество баллов, получает дополнительную оценку, а также каждому учащемуся ставится в журнал та оценка, которую он получил за ответ.

II. Ход игры.

История (ответить на вопросы, связанные с историей физики).

1. Почему магнит назвали магнитом? В какой стране и когда его начали использовать? Какая легенда связана с магнитом?
2. Кто и когда впервые обнаружил магнитные явления и как это произошло? (Действие на компас.)
3. В каком году, как зовут ученого и какие опыты он провел по изучению действия магнитного поля на проводники с током?

Математика (записать соответствующую формулу и выразить из нее данные величины).

1. Формула силы Ампера. $I - ?$ $B - ?$ $L - ?$
2. Формула вращающего момента сил. $I - ?$ $B - ?$ $S - ?$

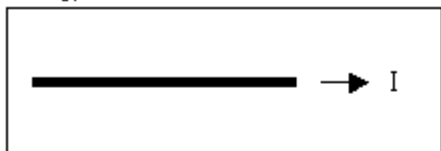
3. Формула силы Лоренца. $B - ? q - ? V - ?$

Русский язык (вставить пропущенные слова).

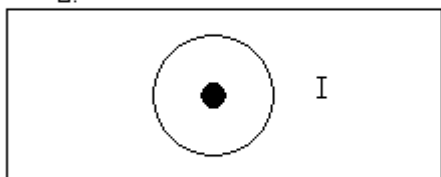
1. Вектор магнитной ... – это ... физическая величина, характеризующая
2. Магнитное ... – это особая ..., осуществляющая ... между движущимися ... частицами.
3. Линии ... индукции – это ..., касательные к которым в каждой ... совпадают с вектором

Рисование (по данному рисунку проводника с током нарисовать направление линий магнитной индукции с помощью правила буравчика или правила правой руки).

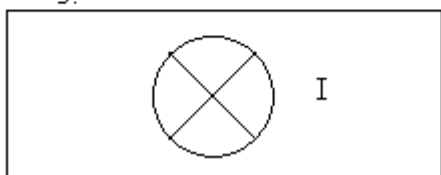
1.



2.



3.



Ораторство (громко и внятно продекламировать данное правило).

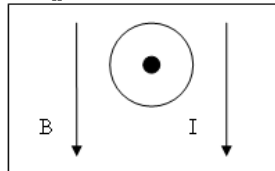
1. Правило буравчика.
2. Правило правой руки.
3. Правило левой руки.

ОбЕд (сказать **Обозначения** и **Единицы** измерения данных физических величин).

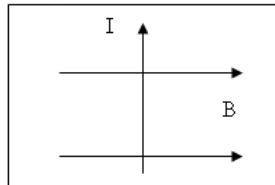
1. Вектор магнитной индукции. Сила Ампера. Длина.
2. Сила Лоренца. Площадь. Электрический заряд.
3. Вращающий момент сил. Сила тока. Скорость.

Приз (используя **Правило** левой руки **Изобразить** направление требуемой силы).

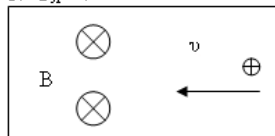
1. $F_A - ?$



2. $F_A - ?$

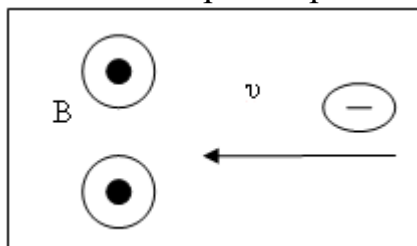


3. $F_L - ?$



Секрет (включает карточки из разных категорий).

1. Категория “Русский язык”: Сила ... – это сила, с которой ... поле оказывает ... на проводник с
2. Категория “Математика”: Формула вектора магнитной индукции. $F_A = ? I = ? L = ?$
3. Категория “ПрИз”: $F_L = ?$



III. Подведение итогов.

Подводятся итоги и выставляются оценки.

Тема 3.4. Электромагнетизм

Практические занятия

1. Решение задач на тему «Электромагнетизм».
2. Проверочная работа по теме «Явление электромагнитной индукции. Самоиндукция».

Примеры решения задач:

Задача 1. Прямоугольный контур ABCD перемещается поступательно в магнитном поле тока, идущего по прямолинейному длинному проводнику (рис. 2.20). Определите направление тока, индуцированного в контуре, если контур удаляется от провода. Какие силы действуют на контур?

Решение. Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ магнитного поля тока I направлен перпендикулярно плоскости контура от нас. При удалении контура от провода магнитный поток через площадку ABCD убывает ($\Delta\Phi < 0$). Следовательно, вектор магнитной индукции $\vec{B}'$ магнитного поля тока I_i согласно правилу Ленца направлен от нас, как и вектор $\vec{B}$. Применяя правило буравчика, находим, что индукционный ток в контуре направлен по часовой стрелке. Взаимодействие тока в контуре с прямолинейным током приводит к появлению сил, действующих на проводники контура. Применив правило левой руки, можно выяснить, что эти силы, во-первых, растягивают рамку, стремясь увеличить площадь контура, и, во-вторых, создают результирующую силу, направленную к прямолинейному проводнику. Оба действия будут препятствовать уменьшению магнитного потока через контур.

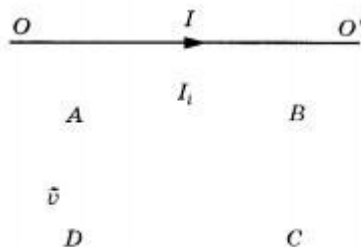


Рис. 2.20

Задача 2. Кольцо из сверхпроводника помещено в однородное магнитное поле, индукция которого нарастает от нуля до B_0 . Плоскость кольца перпендикулярна линиям индукции поля. Определите силу индукционного тока, возникающего в кольце. Радиус кольца r , индуктивность L .

Решение. Так как сопротивление кольца равно нулю, то и суммарная электродвижущая сила в нем должна быть равна нулю. Иначе сила тока согласно закону Ома станет бесконечной. Следовательно, изменение магнитного потока внешнего магнитного поля равно по модулю и противоположно по знаку изменению магнитного потока, созданного индукционным током: $\Delta\Phi = L\Delta I$. Учитывая, что поток Φ_0 нарастает от 0 до $\pi r^2 B_0$, а сила индукционного тока меняется при этом от 0 до I , получаем $\pi r^2 B_0 = LI$. Отсюда $I = \frac{\pi r^2 B_0}{L}$.

Тема 4.1. Электромагнитные колебания

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Электромагнитные колебания».
2. Проверочная работа по теме «Электромагнитные колебания».

Примеры решения задач:

Задача 1. Максимальный заряд на обкладках конденсатора колебательного контура $q_m = 10^{-6}$ Кл. Амплитудное значение силы тока и контуре $I_m = 10^{-3}$ А. Определите период колебаний. (Потерями на нагревание проводников можно пренебречь.)

Решение. Амплитудные значения силы тока и заряда связаны соотношением:

$$I_m = \omega_0 q_m,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{I_m}{q_m}.$$

Следовательно,

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \frac{q_m}{I_m} \approx 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}.$$

Задача 2. Рамка площадью $S = 3000 \text{ см}^2$ имеет $N = 200$ витков и вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Тл. Максимальная ЭДС в рамке $\mathcal{E}_m = 1,5$ В. Определите время одного оборота.

Решение. Магнитный поток, пронизывающий рамку, равен:

$$\Phi = BSN \cos \omega t.$$

Согласно закону электромагнитной индукции:

$$\mathcal{E} = - \Phi' = BSN \omega \sin \omega t.$$

Амплитуда ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_m = BSN \omega.$$

Отсюда

$$\omega = \frac{\mathcal{E}_m}{BSN}.$$

Время одного оборота рамки равно:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi BSN}{\mathcal{E}_m} \approx 3,8 \text{ (с)}.$$

Задача 3. В цепь переменного тока с частотой $\nu = 500$ Гц включена катушка индуктивностью $L = 10$ мГн. Определите емкость конденсатора, который надо включить в эту цепь, чтобы наступил резонанс.

Решение. Электрическая цепь согласно условию задачи представляет собой колебательный контур. Резонанс в этой цепи наступит, когда частота переменного тока будет равна собственной частоте колебательного контура ($\nu = \nu_0$).

Но

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Отсюда

$$C = \frac{1}{4\pi^2 L \nu^2} \approx 10^{-5} \text{ Ф} = 10 \text{ мкФ}.$$

Тема 4.2. Электромагнитные волны

Семинарское занятие

1. Решение задач на тему «Электромагнитные волны».

Примеры решения задач:

Задача 1: Каков период колебаний в открытом колебательном контуре, излучающем радиоволны с длиной волны 300 м:

Решение: Длина электромагнитной волны $\lambda = \nu T$, где ν - скорость распространения электромагнитной волны в данной среде, а T – период ее колебаний. Полагая скорость распространения электромагнитных волн в воздухе равной скорости света в вакууме $\nu = c$, получаем $T = \lambda/c = 300/3 \cdot 10^8 = 10^{-6} \text{ с} = 1 \text{ мкс}$.

Задача 2. На каком расстоянии от антенны радиолокатора находится объект, если отраженный от него радиосигнал возвратился обратно через 200 мкс?

Решение: Радиосигнал локатора прошел путь $2l$, где l – расстояние до объекта со скоростью c , где c – скорость света в воздухе. $2l = ct$, $l = ct/2 = 3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-4}/2 = 30 \text{ км}$.

Тема 4.3. Световые волны

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Световые волны. Линзы».
2. Тестирование по теме «Линзы. Оптические приборы».
3. Решение задач на тему «Интерференция и дифракция света».

Примеры решения задач:

Задача 1: Под каким углом должен падать луч света на плоское зеркало, чтобы угол между отраженным и падающим лучами был равен 70° ?

Решение: Угол падения α – это угол между падающим лучом и нормалью к зеркалу. Угол отражения β – это угол между отраженным лучом и нормалью. По условию $\alpha + \beta = 70^\circ$. Кроме того, угол падения равен углу отражения: $\alpha = \beta$. Отсюда $2\alpha = 70^\circ$ и $\alpha = 35^\circ$.

Задача 2: Найти показатель преломления рубина, если предельный угол полного отражения для рубина равен 34° .

Решение: Из соотношения для угла полного внутреннего отражения $\sin \beta = 1/n$. Отсюда $n = 1/\sin \beta = 1/\sin 34^\circ = 1/0,56 = 1,8$.

Задача 3. В опыте Юнга по дифракции световых волн расстояние между щелями $d = 0,07$ мм, а расстояние от двойной щели до экрана $D = 2$ м. При освещении прибора зеленым светом расстояние между соседними светлыми дифракционными полосами оказалось равным $\Delta h = 16$ мм. Определите длину волны.

Решение. В некоторой точке C экрана (рис. 8.65) будет наблюдаться максимум освещенности, если выполнено условие

$$d_2 - d_1 = k\lambda,$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ — целые числа.

Применим теорему Пифагора к треугольникам S_1CE и S_2CB :

$$d_2^2 = D^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$d_1^2 = D^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2.$$

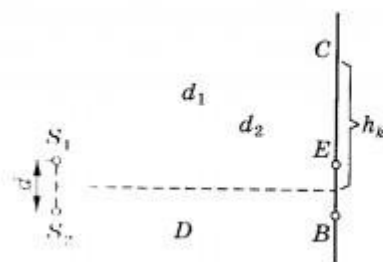


Рис. 8.65

Вычитая почленно из первого равенства второе, получаем:

$$d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d,$$

или

$$(d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_k d.$$

Так как $d \ll D$, то $d_1 + d_2 \approx 2D$. Следовательно,

$$d_2 - d_1 \approx \frac{h_k d}{D}.$$

Учитывая, что $d_2 - d_1 = k\lambda$, можем записать:

$$k\lambda \approx \frac{h_k d}{D}.$$

Отсюда находим расстояние k -й светлой полосы от центра экрана:

$$h_k \approx \frac{k\lambda D}{d}.$$

Расстояние между соседними полосами равно:

$$\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \frac{\lambda D}{d}.$$

Отсюда

$$\lambda \approx \frac{d\Delta h}{D} \approx 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ (см)}.$$

Задача 4. На дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на 1 мм, падает плоская монохроматическая волна ($\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см). Определите наибольший порядок спектра k , который можно наблюдать при нормальном падении лучей на решетку.

Решение. Максимальному k соответствует $\sin \varphi = 1$.

$$k = \frac{d}{\lambda} = 4.$$

Следовательно,

Тема 5.1. Квантовые свойства света. Физика атома

Семинарские занятия

1. Защита презентаций на темы «Технические устройства, основанные на использовании фотоэффекта».
2. Решение задач на тему «Фотоэффект».
3. Решение задач на тему «Физика атома».

Примеры решения задач:

Задача 1: При облучении алюминиевой пластины фотоэффект начинается при наименьшей частоте 1,03 ПГц. Найти работу выхода электронов из алюминия.

Решение: Работа выхода электронов из алюминия равна энергии фотонов, соответствующих красной границе фотоэффекта.

$$A = h\nu_0 = 4,136 \cdot 10^{-15} \cdot 1,03 \cdot 10^{15} = 4,26 \text{ эВ}.$$

Задача 2: Какую максимальную кинетическую энергию имеют электроны, вырванные

из оксида бария, при облучении светом частотой 1 ПГц?

Решение: Из уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта, максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов равна: $E_{\text{кин}} = h\nu - A$, где $h\nu$ – энергия фотонов и A – работа выхода фотоэлектронов. Отсюда: $E_{\text{кин}} = 4,136 \cdot 10^{-15} \cdot 10^{15} - 1 = 3,136$ эВ.

Тема 5.2. Физика атомного ядра

Семинарские занятия

1. Решение задач на тему «Физика атомного ядра».
2. Проверочная работа на тему «Строение атома и квантовая физика»
3. Групповая дискуссия на тему «Ядерная энергетика».

Примеры решения задач:

Задача 1: В результате какого радиоактивного распада плутоний $^{239}_{94}\text{Pu}$ превращается в уран $^{235}_{92}\text{U}$?

Решение: При радиоактивных распадах выполняются два закона – закон сохранения электрического заряда Z и закон сохранения массового числа A : заряд (массовое число) исходного ядра равен сумме зарядов (массовых чисел) возникающих ядер и частиц. В соответствии с этими законами запишем реакцию: $^{239}_{94}\text{Pu} \rightarrow ^{235}_{92}\text{U} + ^A_Z\text{Y}$, где Y – неизвестное ядро с массовым числом A и зарядом Z . По законам сохранения $239 = 235 + A$ и $94 = 92 + Z$. Следовательно, $A = 4$ и $Z = 2$. Искомое ядро ^A_ZY – ядро гелия ^4_2He (порядковый номер Z в таблице Менделеева). Значит ядро плутония превратилось в ядро урана в результате α -распада.

Задача 2: Ввиду большой энергии связи, приходящейся на нуклон ядра гелия, возможны экзоэнергетические реакции деления легких ядер. Найти, какая энергия выделяется при бомбардировке бора $^{11}_5\text{B}$ протонами с образованием трех α -частиц.

Решение: Уравнение ядерной реакции имеет вид: $^{11}_5\text{B} + ^1_1\text{H} = 3\ ^4_2\text{He}$. Дефект масс составит: $\Delta m = 11,00931 + 1,00783 - 3 \cdot 4,00260 = 0,00134$ а.е.м. Выделившаяся энергия равна: $E = \Delta mc^2 = 0,00134 \cdot 931,5 = 8,7$ МэВ.

Групповая дискуссия на тему «Ядерная энергетика»

Цель занятия: используя знания по физике, проанализировать проблемы ядерной энергетики и сделать вывод о целесообразности ее развития.

Задачи занятия:

1. образовательные:

- систематизировать знания по данной теме;
- выявить преимущества и недостатки использования энергии атома;
- научить анализировать информацию с последующей ее обработкой путем восприятия и самостоятельного анализа фактов;

2. развивающие:

- развивать навыки самостоятельности, творческой активности, коммуникативные способности студентов;

- развивать познавательный интерес к физике, умение осмысленно воспроизводить подобранный материал в ходе подготовки и проведения занятия, умение слушать и слышать;

3. воспитательные:

- воспитывать чувство сострадания, бережливости, предоставив материал о биологическом действии радиации;
- воспитывать чувство гражданской ответственности за свое будущее, за будущее своей малой родины, своей страны.

Тип занятия: обобщение изученного материала.

Форма занятия: практическое занятие – конференция.

Методы преподавания: словесный – беседа, рассказ, практический – решение задач, наглядный – использование компьютерной презентации, раздаточного материала.

Оборудование: мультимедийный проектор, ПК, презентация Microsoft Power Point, плакаты ученых-физиков, раздаточный материал.

В ходе данного занятия студент должен:

Уметь: понимать роль физики в формировании кругозора и функциональной грамотности человека для решения практических задач; уверенно пользоваться физической терминологией и символикой; решать физические задачи; применять полученные знания для объяснения условий протекания физических явлений в природе и для принятия практических решений в повседневной жизни.

Знать: представление о роли и месте физики в современной научной картине мира; собственную позицию по отношению к физической информации, получаемой из разных источников; о наиболее важных открытиях и достижениях в области физики, повлиявших на эволюцию представлений о природе, на развитие техники и технологий; вклад великих ученых в формирование современной научной картины мира.

Технологическая карта занятия

Этапы занятия	Действия участников занятия	
	Преподаватель	Студенты
1. Подготовительный этап	1. отбирает материалы к занятию 2. составляет структуру занятия 3. подбирает практические задания 4. постановка проблемного вопроса	1. готовят индивидуальные доклады с презентациями по выбранным темам
2. Организационный этап	1. приветствует студентов 2. отмечает отсутствующих 3. проверяет готовность студентов к занятию 4. настраивает студентов на работу	1. приветствуют преподавателя, слушают
3. Этап актуализации знаний	1. называет тему занятия 2. ставит цели и задачи 3. объясняет план занятия	1. слушают
4. Основной этап	1. дает вступительное слово 2. обращает внимание студентов на эпиграф, портреты, задает вопросы 3. организует выступления с докладами и презентациями 4. организует работу по решению	1. слушают 2. отвечают 3. слушают, работают с вопросами по докладам 4. оформляют задачу в

	практической задачи 5. организует работу по заполнению таблицы	тетради 5. заполняют таблицы
5. Заключительный этап, рефлексия	1. возвращает студентов к проблемному вопросу 2. подводит студентов к выводу 3. организует работу по подготовке к контрольной работе (дополнительные задания) 4. выставляет и комментирует оценки	1. высказывают свое мнение, обосновывают его 2. делают вывод 3. решают, отвечают 4. слушают
6. Домашнее задание	1. задает	1. слушают, записывают

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультет среднего профессионального образования

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ПУП.03 ФИЗИКА**

Специальность 21.02.05 Земельно-имущественные отношения

Форма обучения очная

Оренбург, 2022 г.

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие предназначено для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Физика» и рассматривает несколько тем.

Цель учебно-методического пособия – способствовать приобретению студентами необходимых умений и навыков в проведении физического эксперимента, формированию умения применять теоретические знания для выполнения лабораторных работ и решения конкретных задач.

Пособие содержит правила выполнения и оформления лабораторных работ по физике, а также перечень самих лабораторных работ с их описанием и порядком выполнения. В каждой из них представлены вопросы, которые предназначены для самостоятельного изучения студентами теоретического материала работы. После каждой лабораторной работы представлены дополнительные, практические или теоретические задания, позволяющие проверить уровень усвоения изучаемого материала. Дополнительные задания в основном предназначены для сильных студентов, которые смогут предложить метод проведения работы. В пособии имеются справочные данные, используемые только для данных лабораторных работ и заданий к ним.

Учебно-методическое пособие рекомендовано для студентов специальности «Земельно-имущественные отношения» 1 курса, обучающихся на базе основного общего образования, изучающих дисциплину «Физика».

Данное пособие составлено в соответствии с современными требованиям, базируется на требованиях федерального государственного образовательного стандарта СПО и рабочей программы по дисциплине. Оно охватывает следующие темы по физике:

1. Основы кинематики.
2. Основы динамики.
3. Механические колебания и волны.
4. Агрегатные состояния вещества и фазовые переходы между ними.
5. Постоянный электрический ток.
6. Электромагнетизм.
7. Световые волны.

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ

Главное назначение лабораторных занятий по физике – приобретение студентами необходимых умений и навыков в проведении физического эксперимента. При этом студенты должны проверить основные физические закономерности явлений, познакомиться с методами измерений и правилами обработки результатов измерений, научиться обращению с физическими приборами.

Каждому занятию предшествует предварительная подготовка студента, которая включает в себя:

- а) ознакомление с содержанием лабораторной работы по методическим указаниям к ней;
- б) проработку теоретической части по лекционным материалам или учебникам, рекомендованным в методических указаниях;
- в) составление отчета по лабораторной работе в соответствии с правилами оформления.

Отчет выполняется в тетрадях для лабораторных работ или на листах стандартного размера 297×210 мм (формат А4) (можно взять развернутый лист обычной тетради в клетку). Записи на оборотной стороне листа не допускаются.

Отчет должен содержать:

- 1) название лабораторной работы;
- 2) цель;
- 3) приборы и материалы;
- 4) таблицу для занесения показаний физических величин;
- 5) график зависимости физических величин по полученным измерениям (если он входит в содержание лабораторной работы);
- 6) решения (ответы) на все предложенные задачи (вопросы);
- 7) вывод по проделанной работе;
- 8) решения и ответы на дополнительные задания.

Теоретическую подготовку к каждой лабораторной работе необходимо осуществлять с помощью лекционных материалов или учебной литературы.

Формальным признаком готовности студента к занятию является наличие у него начатого отчета по предстоящей работе. Во время выполнения лабораторных работ необходимо строго соблюдать правила техники безопасности. Студенты работают группами по два – четыре человека. Отчет у каждого студента должен быть индивидуальным. Не сделанные без уважительной причины работы выполняются с разрешения преподавателя в специально отведенное время.

Первый этап практической части работы – ознакомление студентов с предложенными приборами и материалами. При этом особое внимание

уделяется определению метрологических характеристик измерительных приборов, в которые входят: диапазон измерений, цена делений, класс точности (для стрелочных электроизмерительных приборов), погрешность измерений.

Следующий этап выполнения работы – монтаж, наладка экспериментальной установки (если это необходимо). Монтаж установки, выполненный студентом, должен быть проверен преподавателем. Только после этой проверки студент приступает к самостоятельному выполнению работы. При первых наблюдениях никаких отчетов и записей производить не следует. Лишь после того, как студент несколько раз проследит явление, научится управлять установкой и проведет так называемые «прицелочные измерения», можно приступить к записи показаний приборов.

Результаты измерений в тех единицах, в которых снимаются показания приборов (это не обязательно единицы СИ), заносятся в таблицу, представленную в методических указаниях. При этом в таблицу записываются обозначения и единицы измерения каждой физической величины. Полученные результаты представляются преподавателю. Затем с разрешения преподавателя нужно выключить установку.

По окончании практической части работы студент завершает оформление отчета по лабораторной работе.

Для того чтобы отчет был четким и аккуратным, студент должен иметь рабочую (черновую) тетрадь, в которой проводится расчет искомых физических величин, и т.д. Все этапы этих расчетов необходимо кратко отразить в отчете.

Выводы отчета должны опираться на анализ выявленных в работе закономерностей, связей между различными физическими величинами, сравнение полученных результатов с теоретическими и табличными.

В конце занятия полностью оформленный отчет по лабораторной работе сдается преподавателю. Перенос оформления отчета на дом делается в исключительных случаях.

Возможны ситуации, когда на лабораторном занятии студенты работают по темам, которые еще не освещались в лекциях и не изучались на практических занятиях. В связи с этим важна и ответственна роль учебников, учебных пособий и справочной литературы, которые должны иметь студенты на занятиях.

По окончании занятия студенты приводят в порядок рабочие места, а приборы и материалы к лабораторной работе сдают преподавателю.

ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа №1

Определение ускорения тела при равноускоренном движении

Цель: научиться измерять ускорение тела, скатывающегося по наклонной плоскости.

Приборы и материалы: металлический желоб (или любая плоскость), стальной шарик или любой маленький мячик, любой металлический предмет, измерительная лента, секундомер или часы с секундной стрелкой.

Вопросы для самоподготовки:

1. Что называют ускорением?
2. Какое движение называют равноускоренным?
3. Какие вы знаете формулы, описывающие равноускоренное движение?
4. Как по графику скорости равноускоренного движения можно определить ускорение и путь, пройденный телом в этом движении?

Описание работы

Движение шарика, скатывающегося по желобу, приближенно можно считать равноускоренным. При равноускоренном движении без начальной скорости модуль перемещения S , модуль ускорения a и время движения t

связаны соотношением $S = \frac{at^2}{2}$. Поэтому, измерив S и t , мы можем найти

ускорение a по формуле $a = \frac{2S}{t^2}$. Чтобы повысить точность измерения, ставят

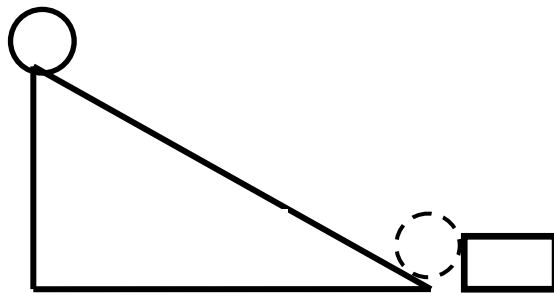
опыт несколько раз, а затем вычисляют средние значения измеряемых величин.

Порядок выполнения работы

1. Соберите установку, изображенную на рисунке (верхний конец желоба должен быть на несколько сантиметров выше нижнего).

Положите у нижнего конца желоба металлический предмет. Когда шарик, скатившись, ударится о предмет, звук удара поможет точнее определить время движения шарика.

2. Измерьте расстояние между верхним и нижним концами желоба (модуль перемещения S шарика) и результат измерения запишите в



таблицу:

№ опыта	$S, м$	$t, с$	$t_{cp}, с$	$a, м/с^2$
1				
2				
3				
4				
5				

- Отпустите шарик без толчка у верхнего конца желоба и измерьте время до удара шарика о предмет.
- Повторите опыт 5 раз, записывая в таблицу результаты измерений. При проведении каждого опыта пускайте шарик из одного и того же начального положения.
- Вычислите среднее значение времени t_{cp} по формуле

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$$

и результат занесите в таблицу.

- Вычислите ускорение, с которым скатывался шарик, по формуле

$$a = \frac{2S}{t_{cp}^2}.$$

Результат вычисления запишите в таблицу.

- Сделайте вывод.

Задания для самостоятельной работы

- На рисунке 1 приведен график зависимости скорости движения тела от времени. Определите характер движения на участках AB , BC , CD .
- На рисунке 2 изображен график скорости некоторого тела. Определите характер движения; начальную скорость и ускорение на участках графика AB , BC и CD .
- Чем отличаются движения, графики скорости которых указаны на рисунке 3?

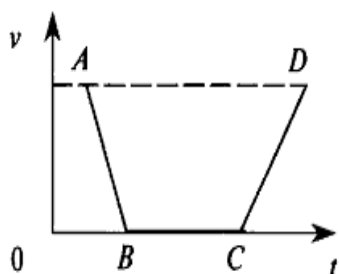


Рис. 1

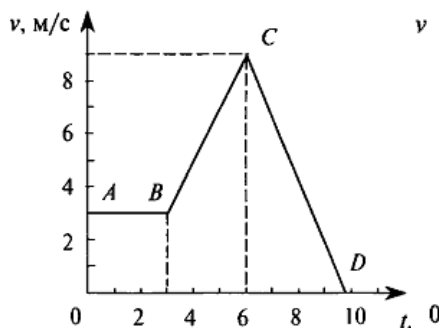


Рис. 2

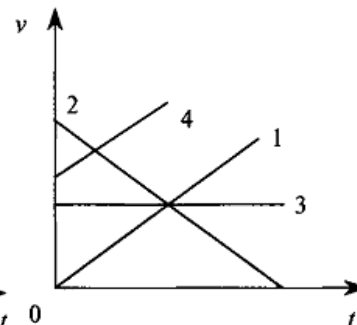


Рис. 3

Лабораторная работа №2

Исследование зависимости силы трения от веса тела

Цель: научиться исследовать зависимость силы трения от веса тела.

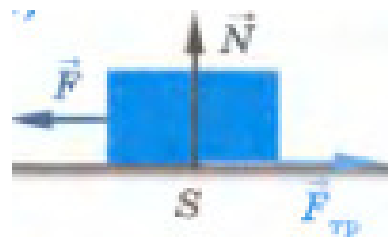
Приборы и материалы: динамометр, набор грузов, деревянный брусок, деревянная линейка.

Вопросы для самоподготовки:

1. Сформулируйте определение силы трения, перечислите возможные виды трения.
2. Чему равна сила трения покоя?
3. Куда направлена сила трения скольжения и чему она равна?
4. Что называют весом тела?
5. В чем различие между силой тяжести и весом тела, действующим на тело?
6. В каком случае сила тяжести и вес тела равны?

Описание работы

Если тянуть брусок с грузом по горизонтальной поверхности так, чтобы брусок двигался равномерно, прикладываемая к бруску горизонтальная сила равна по модулю силе трения скольжения $F_{\text{тр}}$, действующей на брусок со стороны поверхности. Модуль силы трения $F_{\text{тр}}$ связан с модулем силы нормального давления N соотношением $F_{\text{тр}} = \mu N$.



В данном случае сила нормального давления N равна весу P бруска с грузом.

Измерив $F_{\text{тр}}$ и P , можно определить зависимость силы трения от силы нормального давления и найти коэффициент трения μ по формуле $\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{P}$.

Порядок выполнения работы

1. Положите брусок на горизонтально расположенную деревянную линейку. На брусок поставьте груз P_1 .
2. Прикрепив к бруску динамометр, как можно более равномерно тяните его вдоль линейки. Заметьте при этом показание динамометра.
3. Взвесьте брусок и груз.
4. К первому грузу добавьте второй P_2 , третий P_3 , затем четвертый P_4 грузы, каждый раз взвешивая брусок и грузы и измеряя силу трения.
5. По результатам измерений заполните таблицу:

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
F _{тр} , Н				
P, Н				

- Постройте график зависимости силы трения от веса тела, используя данные таблицы. Через начало отсчета проведите прямую линию так, чтобы число точек над прямой равнялось числу точек под прямой.
- Сделайте вывод.

Дополнительное задание 1: Найдите коэффициент трения скольжения μ как тангенс угла наклона прямой линии к оси абсцисс. Для этого выберите произвольную точку с координатами (P; F_{тр}) на прямой и найдите μ как отношение

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{P}.$$

Дополнительное задание 2: Измерить силу трения динамометром тела на парте, на глянцева́й бумаге и на обычной бумаге. Где сила трения будет максимальной?

Дополнительное задание 3: Докажите, что сила трения скольжения не зависит от площади трущихся поверхностей.

- Деревянный брусок равномерно тяните динамометром по горизонтальной линейке, измеряя силу тяги.
- Опыт повторите при перестановке бруска на другие грани с различной площадью поверхности.
- Убедитесь, что сила трения скольжения не зависит от площади трущихся поверхностей, и сделайте вывод.

Задания для самостоятельной работы

Ответьте на предложенные вопросы.

- Приведите примеры полезного действия сил трения.
- Зачем на губках тисков и плоскогубцев делают насечки?
- Для чего на автомобильных шинах делают рельефный рисунок (протектор)?
- Что должен сделать водитель машины, подъезжая к крутому повороту? Почему водитель должен быть особенно внимательным в сырую погоду, во время листопада или при гололеде?

Лабораторная работа №3

Изучение зависимости периода колебаний нитяного маятника от длины нити

Цель: изучить зависимость периода колебаний нитяного маятника от длины нити.

Приборы и материалы: грузик на нити, линейка (измерительная лента), секундомер.

Вопросы для самоподготовки:

1. Что такое механические колебания? Какие колебания называются свободными и вынужденными? Приведите примеры.
2. Что называют амплитудой колебаний?
3. Дайте определения периода и частоты колебаний, запишите их формулы.
4. Какие виды маятников вы знаете? Дайте их определения.
5. По каким формулам рассчитывают период колебаний этих маятников?
6. Зависит ли период колебаний маятников от амплитуды?

Описание работы

Период колебаний математического (нитяного) маятника определяется по формуле $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$,

где T – период колебаний;

l – длина маятника;

g – ускорение свободного падения.

Период измеряют с помощью секундомера. Необходимо замерить время t , за которое маятник совершает N полных колебаний. Тогда период колебаний равен $T = \frac{t}{N}$.

Необходимо заметить, что максимальный угол отклонения маятника от положения равновесия не должен превышать 5° .

Таким образом, измерив длину маятника l и определив период колебаний T , можно исследовать зависимость периода колебаний от длины нити и найти ускорение свободного падения по формуле $g = \frac{4\pi^2}{T^2}l$.



Порядок выполнения работы

1. Установите на краю стола нить. К нити подвесьте грузик.
2. Отклоните грузик на 4 – 5 см от положения равновесия и отпустите.

3. Измерьте время t , за которое маятник сделает определенное количество полных колебаний.
4. Вычислите период и частоту колебаний.
5. Повторите опыт несколько раз, изменяя длину нити.
6. По результатам измерений заполните таблицу:

№ опыта	Измерения			Вычисления	
	Длина нити	Промежуток времени	Число колебаний	Период	Частота
				$T = t/N$	$\nu = 1/T$
	$l, \text{см}$	$t, \text{с}$	N	$T, \text{с}$	$\nu, \text{Гц}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

7. Постройте графики зависимости периода от длины нити и частоты от длины нити.
8. Вычислите период колебаний нитяного маятника по формуле математического маятника для любого номера опыта и сравните с данным периодом.
9. Найдите ускорение свободного падения по формуле $g = \frac{4\pi^2}{T^2}l$.
10. Сделайте вывод.

Задания для самостоятельной работы

Гармоническое колебание задано уравнением. Найдите амплитуду, период и частоту колебаний.

- 1) $x = 2\sin 10\pi t$.
- 2) $x = 3\cos 2\pi t$.

Лабораторная работа №4

Изучение изобарного процесса

Цель: проверить справедливость закона Гей-Люссака.

Приборы и материалы: сосуды с горячей (70–80 °С) и холодной водой, прозрачная резиновая трубка (закрытая с одного конца), термометр, линейка.

Вопросы для самоподготовки:

1. Какие процессы называют изопроцессами?
2. Охарактеризуйте изопроцессы по плану:
 - а) какой параметр процесса постоянен;
 - б) формула (закон) процесса;
 - в) формулировка закона;
 - г) как на опыте осуществить процесс?

Описание работы

В работе проверяют справедливость закона Гей-Люссака, то есть над газом проводят изобарный процесс и измеряют его начальные и конечные параметры.

Вначале трубку с воздухом помещают в сосуд с горячей водой. При нагревании газ расширяется и часть его выходит наружу. Затем открытый конец трубки затыкают и переносят трубку в холодную воду. Газ охлаждается и сжимается, и под действием атмосферного давления вода поступает в трубку.

Масса воздуха, оставшегося в трубке, остается постоянной; давление в трубке поддерживается равным атмосферному (давлением воды над трубкой по сравнению с атмосферным можно пренебречь). Таким образом, условия изобарного процесса выполнены: $m = \text{const}$ и $p = \text{const}$.

Необходимо проверить справедливость соотношения

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (1)$$

где V_1, T_1 – объем и абсолютная температура воздуха в горячей воде;
 V_2, T_2 – в холодной.

Поскольку $V = S \cdot l$, S – сечение трубки, l – высота столба воздуха в ней, то пропорцию (1) можно записать так:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (2)$$

где l_1 – начальная высота столба воздуха (равна длине трубки);

l_2 – конечная (меньше длины трубки на длину столба залившейся воды).

Порядок выполнения работы

1. Опустите в сосуд с горячей водой трубку и термометр на несколько минут до установления теплового равновесия. (При этом из открытого конца трубки перестанут выходить пузыри воздуха.)
2. По термометру снимите показания температуры t_1 .
3. Закройте открытый конец трубки, перенесите ее и термометр в сосуд с холодной водой.
4. Снимите показания температуры t_2 , когда трубка перестанет заполняться водой.
5. Выньте трубку, измерьте линейкой ее длину l_1 и высоту столба воздуха l_2 .
6. Рассчитайте значения T_1 и T_2 по формуле: $T = t + 273$.
7. Рассчитайте отношения:

$$C_1 = \frac{V_1}{V_2} = \frac{l_1}{l_2} ; C_T = \frac{T_1}{T_2} .$$

8. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу:

Измеренные величины	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$l_1, \text{м}$	$l_2, \text{м}$
Рассчитанные величины	$T_1, \text{К}$	$T_2, \text{К}$	C_1	C_T

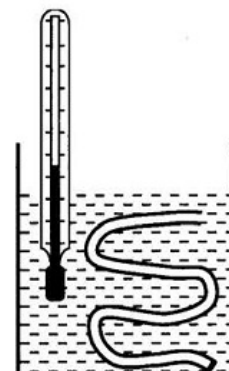
9. Ответьте на вопросы:

а) Зависимость между какими величинами вы наблюдали на опыте?

б) Изменялись ли давление и масса воздуха в трубке во время опыта?

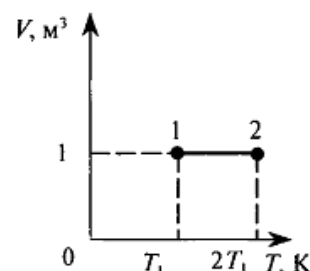
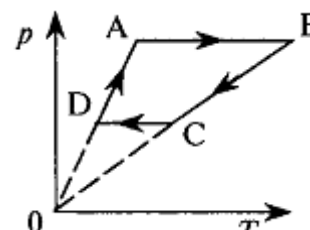
в) Что можно сказать о зависимости объема данной массы воздуха от температуры при постоянном давлении? (Сравните значения C_1 и C_T .)

10. Сделайте вывод.



Задания для самостоятельной работы

1. Определите, какие процессы соответствуют участкам AB , BC , CD и DA графика зависимости давления газа от температуры, представленного на рисунке, и как изменяются термодинамические величины (p , V , T) в каждом случае.
2. На рисунке в координатных осях V , T изображен график процесса состояния идеального газа.



Зарисуйте графики в координатных осях p , V и соответствующие данному процессу.

p , T ,

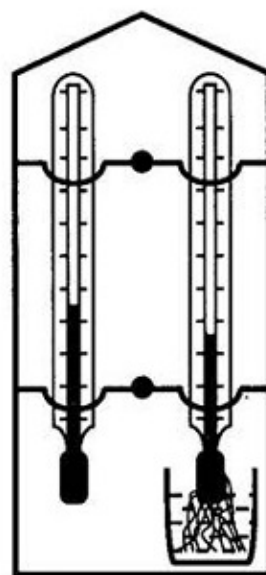
Лабораторная работа №5 **Измерение относительной влажности воздуха** **при помощи термометра**

Цель: научиться измерять относительную влажность воздуха в аудитории при помощи термометра.

Приборы и материалы: термометр, кусочек марли или ваты, стакан с водой комнатной температуры, таблица психрометрическая.

Вопросы для самоподготовки:

1. Что называют испарением?
2. Почему при испарении температура жидкости понижается?
3. Какой пар называют насыщенным?
4. Давление насыщенного или ненасыщенного пара больше?
5. Что называют относительной влажностью? Какова формула для ее расчета?
6. С помощью каких приборов определяют влажность воздуха?



Описание работы

Психрометр Августа состоит из двух термометров, конец одного из них обернут полоской влажной ткани. Сухой термометр показывает температуру воздуха $t_{\text{сух}}$. За счет испарения воды с ткани второй термометр охлаждается. При этом чем меньше водяных паров в воздухе (низкая влажность), тем интенсивнее испарение, а значит, ниже температура влажного термометра $t_{\text{вл}}$. Используя психрометрическую таблицу можно по значениям температур $t_{\text{сух}}$ и $t_{\text{вл}}$ определить относительную влажность ϕ .

Порядок выполнения работы

1. Измерьте температуру воздуха в аудитории.
2. Смочите кусочек марли или ваты водой и оберните им резервуар термометра. Подержите влажный термометр некоторое время в воздухе. Как только понижение температуры прекратится, запишите его показания.

3. Найдите разность температур «сухого» и «влажного» термометров и с помощью психрометрической таблицы определите относительную влажность воздуха в аудитории.
4. Результаты измерений и вычислений запишите в тетрадь.
5. Ответьте на вопросы:
 - Почему температура «влажного» термометра ниже, чем «сухого»?
 - От чего зависит разность температур обоих термометров?
 - В каком случае температура «влажного» термометра будет равна температуре «сухого»?
 - Как зависит разность температур обоих термометров от давления водяного пара в воздухе? Почему?
6. Сделайте вывод.

Задания для самостоятельной работы

1. Определите относительную влажность воздуха, если парциальное давление пара в нем 14 кПа, а температура 60°C.
2. По гигрометру обнаружено появление росы при температуре 10°C. Какова относительная влажность воздуха, если его температура 15°C?
3. Показания сухого термометра в психрометре 16°C, влажного – 12°C. Определите относительную влажность воздуха.
4. Относительная влажность воздуха 48%, температура 28°C. Что должен показывать смоченный термометр психрометра?
5. Относительная влажность воздуха 73%. Что показывают сухой и смоченный термометры психрометра, если разность их показаний равна 2°C?
6. Почему температура воды в открытых водоемах жарким летним днем ниже температуры окружающей среды?
7. Почему вода гасит огонь? Что быстрее потушит пламя – кипяток или холодная вода?
8. Почему купающемуся не становится холодно, когда он выходит из реки во время теплого летнего дождя?

Лабораторная работа №6
Изучение капиллярных явлений, обусловленных
поверхностным натяжением жидкости

Цель: научиться измерять средний диаметр капилляров.

Приборы и материалы: сосуд с подкрашенной водой, полоска фильтровальной бумаги размером 120×10 мм, полоска хлопчатобумажной ткани размером 120×10 мм, линейка измерительная.

Вопросы для самоподготовки:

1. Охарактеризуйте явление смачивания. При каких условиях жидкость смачивает (не смачивает) поверхность твердого тела?
2. Что такое капилляр? Как ведет себя жидкость в капилляре?
3. По какой формуле вычисляется высота подъема жидкости в капилляре?

Описание работы

В случае смачивающей жидкости силы притяжения между молекулами жидкости и твердого тела (стенки капилляра) превосходят силы взаимодействия между молекулами жидкости.

Жидкость втягивается внутрь капилляра. Подъем жидкости в капилляре происходит до тех пор, пока результирующая сила F_B , действующая на жидкость вверх, не уравнивается силой тяжести mg столба жидкости высотой h :

$$F_B = mg.$$

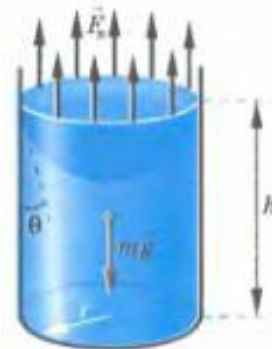
По третьему закону Ньютона сила F_B , действующая на жидкость, равна силе поверхностного натяжения $F_{нов}$, действующей на стенку по линии соприкосновения ее с жидкостью:

$$F_B = F_{нов}.$$

Таким образом, при равновесии жидкости в капилляре: $F_{нов} = mg$, где масса столба жидкости определяется по формуле $m = \rho \pi r^2 h$. С другой стороны, сила поверхностного натяжения находится по формуле $F_{нов} = 4\pi d \sigma$.

Тогда, согласно условию равновесия жидкости в капилляре, диаметр капилляра определяется по формуле:

$$d = \frac{4\sigma}{\rho g h}.$$



Таким образом, измерив высоту подъема жидкости h линейкой и используя табличные данные постоянных величин ρ (плотность воды), σ (коэффициент поверхностного натяжения воды) и g (ускорение свободного падения на Земле), можно найти диаметр капилляра.

Порядок выполнения работы

1. Полосками фильтровальной бумаги и хлопчатобумажной ткани одновременно прикоснитесь к поверхности подкрашенной воды в стакане, наблюдая поднятие воды в полосках.
2. Как только прекратится подъем воды, полоски выньте и измерьте линейкой высоты h_1 и h_2 поднятия в них воды.
3. Рассчитайте диаметр капилляров по формуле:

$$d = \frac{4\sigma}{\rho gh}.$$

4. Сделайте вывод, указав, как высота подъема жидкости в капиллярах зависит от их диаметра.

Задания для самостоятельной работы

Ответьте на вопросы:

- 1) За счет какого источника энергии поднимается жидкость в капилляре?
- 2) Как изменится высота подъема уровня воды в капилляре, если при прочих равных условиях:
 - понизить температуру воды?
 - взять капилляр вдвое меньшего радиуса?
 - перенести опыт на Луну?
 - воспользоваться вместо воды керосином?

Лабораторная работа №7

Измерение удельного сопротивления проводника

Цель: научиться измерять удельное сопротивление проволоки.

Приборы и материалы: проволока из материала с большим удельным сопротивлением длиной 65 – 70 см и диаметром около 0,5 мм, линейка, измерительная лента, амперметр, вольтметр, источник тока (батарейка), соединительные провода.

Вопросы для самоподготовки:

1. Что называют сопротивлением проводника?
2. По какой формуле определяется зависимость сопротивления от геометрических параметров проводника?
3. Каков физический смысл удельного сопротивления материала?

Описание работы

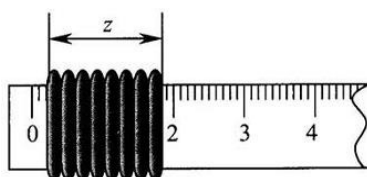
В работе определяют удельное сопротивление материала, из которого изготовлена проволока. Оно может быть найдено из формулы $R = \frac{\rho l}{S}$,

где ρ – удельное сопротивление материала;

R – сопротивление проволоки;

l – ее длина;

S – площадь ее сечения.



Длину проволоки легко измерить линейкой. Площадь сечения находится через ее диаметр d :

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

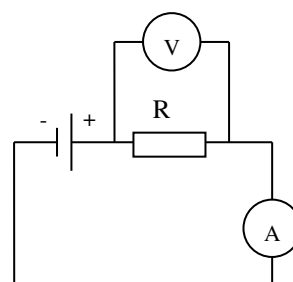
Поскольку диаметр мал, то непосредственно измерить его линейкой трудно. Поэтому можно воспользоваться следующим способом. На линейку наматывают N витков проволоки и измеряют толщину полученного мотка z . Тогда диаметр равен

$$d = \frac{z}{N}.$$

Сопротивление проволоки рассчитывают на основании закона Ома для участка цепи. Для этого следует собрать цепь, как показано на рисунке, и измерить силу тока I и напряжение U .

Порядок выполнения работы

1. Измерьте лентой длину проволоки между точками ее подключения в цепь.
2. Соберите электрическую цепь по схеме.
3. Снимите показания амперметра и вольтметра.
4. Рассчитайте сопротивление проволоки по закону Ома.
5. Намотайте N витков (вплотную) на линейку и измерьте толщину мотка z ($N > 10$).
6. Рассчитайте диаметр проволоки и площадь ее сечения по формулам:



$$d = \frac{z}{N}; \quad S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

7. Из формулы сопротивления проволоки $R = \frac{\rho l}{S}$ выразите удельное сопротивление и рассчитайте его по получившейся формуле.
8. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу:

Измеренные величины	$l, м$	$I, А$	$U, В$	N	$z, м$
Рассчитанные величины	$R, Ом$	$d, м$	$S, м^2$	$\rho, Ом \cdot м$	материал

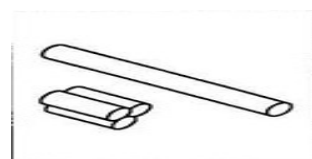
9. По табличным данным определите материал проводника и запишите в таблицу.
10. Сделайте вывод.

Дополнительное задание 1: Катушка медного провода намотана во много слоев. Как определить число витков катушки, не разматывая ее?

Дополнительное задание 2: Имеется моток тонкой медной проволоки. Как, имея весы и омметр, найти длину проволоки и площадь поперечного сечения?

Задания для самостоятельной работы

Ответьте на предложенные вопросы:



1. Проводник разрезали на три равные части и соединили их (смотрите рисунок). Во сколько раз изменилось его сопротивление?
2. Медный и алюминиевый проводники имеют одинаковые массы и сопротивления. Какой проводник длиннее и во сколько раз?
3. Почему спирали электронагревательных приборов делают из материала с большим удельным сопротивлением?

Лабораторная работа №8 **Измерение силы тока и напряжения** **в электрической цепи**

Цель: научиться измерять силу тока и напряжение в электрической цепи.

Приборы и материалы: амперметр, вольтметр, лампочка, батарейка, соединительные провода.

Вопросы для самоподготовки:

1. Что называют электрическим током? Какими частицами создается ток в металле? Что принято за направление тока?
2. Каковы условия существования тока?
3. Что называют силой тока? По какой формуле ее определяют?
4. Дайте определение напряжения. Во сколько раз изменится сила тока в проводнике при увеличении приложенного к нему напряжения вдвое?
5. Сформулируйте закон Ома для однородного проводника.
6. Что такое вольт-амперная характеристика проводника?

Описание работы

Для измерения силы электрического тока и напряжения используются следующие электроизмерительные приборы – амперметр и вольтметр. Причем амперметр включается в цепь последовательно, чтобы через него проходил весь измеряемый ток, а вольтметр включается параллельно тому участку цепи, напряжение на котором измеряется. Пример включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь показан на рисунке.

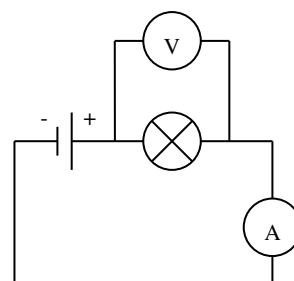
По показаниям амперметра и вольтметра можно определить сопротивление цепи, используя закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения называют вольт-амперной характеристикой. При построении графика данной характеристики получается линейная зависимость.

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме.
2. Измерьте силу тока и напряжения в данной цепи.



3. Результаты измерений занесите в таблицу:

Сила тока I , А	Напряжение U , В

- По данным таблицы постройте вольт-амперную характеристику – график зависимости силы тока I от напряжения U (по оси абсцисс отложите напряжение, по оси ординат – силу тока).
- По закону Ома для участка цепи определите сопротивление цепи R для данных значений схемы.
- Ответьте на вопрос: зависит ли сопротивление от силы тока и напряжения?
- По данным рисункам определите, на каких приборах измеряет вольтметр напряжение?

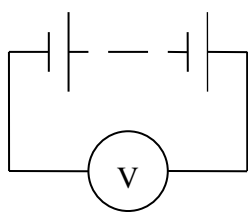


Рис. 1

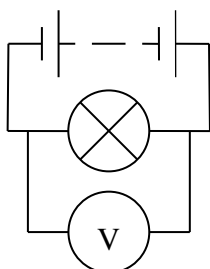


Рис. 2

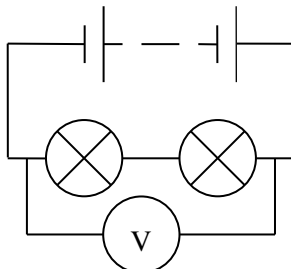


Рис. 3

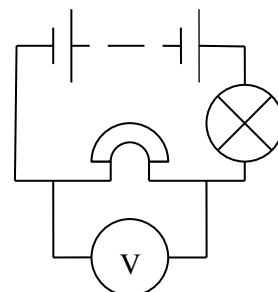


Рис. 4

8. Сделайте вывод.

Задания для самостоятельной работы

Нарисовать одну из предложенных схем цепи.

- Изобразить схему цепи, состоящую из источника питания, трех последовательно включенных резисторов, причем в этой цепи измеряется ток.
- Изобразить схему цепи, состоящую из источника питания, двух параллельно включенных лампочек, причем в этой цепи измеряется ток.
- Изобразить схему цепи, состоящую из источника питания, трех резисторов, включенных смешанно, причем в этой цепи измеряется напряжение.
- Изобразить схему цепи, состоящую из источника питания, двух последовательно включенных лампочек, причем в этой цепи измеряется напряжение.
- Изобразить схему цепи, состоящую из источника питания, трех параллельно включенных резисторов, причем в этой цепи измеряется напряжение.
- Изобразить схему цепи, состоящую из источника питания, трех

последовательно включенных лампочек, причем в этой цепи измеряется ток.

Лабораторная работа №9

Изучение явления электромагнитной индукции

Цель: пронаблюдать явление электромагнитной индукции.

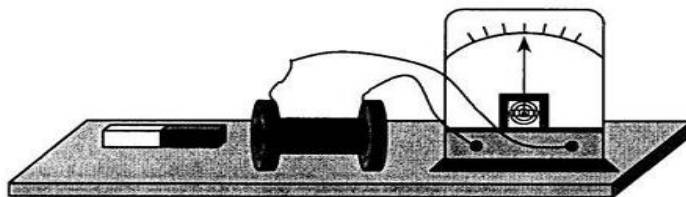
Приборы и материалы: амперметр, катушка, соединительные провода, магнит.

Вопросы для самоподготовки:

1. Что называется явлением электромагнитной индукции?
2. Что называют магнитным потоком?
3. На основании опытов Фарадея объясните, от чего зависит величина и направление индукционного тока?
4. Сформулируйте закон электромагнитной индукции и запишите его формулу.
5. Сформулируйте правило Ленца.

Описание работы

В работе наблюдается явление электромагнитной индукции. Через полость катушки перемещают магнит и определяют при этом направление индукционного тока по отклонению стрелки амперметра.

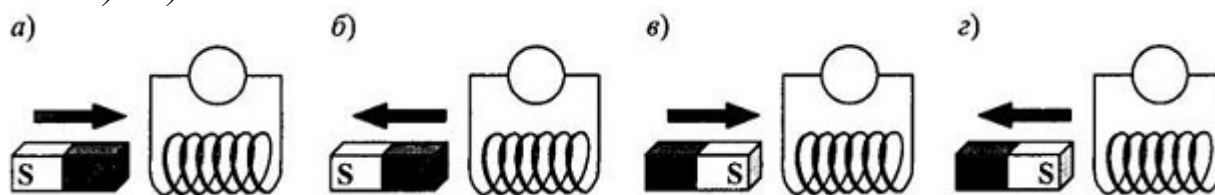


Направление индукционного тока можно определить и по правилу Ленца. В работе его можно применить так:

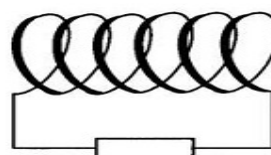
- определить расположение магнитных полюсов катушки при движении магнита (к магниту обращен полюс, который препятствует его движению);
- определить (по правилу магнитной стрелки) направление вектора $\vec{B}$ магнитного поля, созданного током в катушке;
- определить (по правилу буравчика) направление тока в катушке.

Порядок выполнения работы

1. Присоедините катушку к амперметру.
2. Передвигайте магнит через полость катушки, как показано на рисунках а) – з).



3. Отметьте в каждом случае показания стрелки амперметра (направление тока).
4. Для одного из четырех случаев (полюс магнита и направление его движения задает преподаватель) определите направление тока в катушке по правилу Ленца.
5. Для катушки укажите полюса N и S , направление вектора $\vec{B}$, направление тока I .

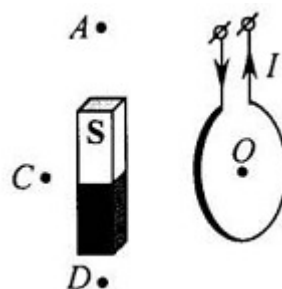


6. Сделайте вывод.

Задания для самостоятельной работы

Ответьте на предложенные вопросы.

1. Будет ли возникать индукционный ток в круговом витке, находящемся в однородном магнитном поле, если:
 - а) перемещать виток поступательно;
 - б) вращать виток вокруг оси, проходящей через его центр перпендикулярно плоскости витка;
 - в) вращать виток вокруг оси, лежащей в его плоскости?



2. Постройте векторы $\vec{B}$ в точках A , C , D и O .
3. Три одинаковых полосовых магнита падают в вертикальном положении одновременно с одной высоты. Первый падает свободно, второй во время падения проходит сквозь незамкнутый соленоид, третий – сквозь замкнутый соленоид. Сравните время падения магнитов. Ответы обосновать на основании правила Ленца и закона сохранения энергии.
4. Почему колебания стрелки компаса быстрее затухают, если корпус прибора латунный, и медленнее затухают, если корпус прибора пластмассовый?

Лабораторная работа №10

Наблюдение интерференции и дифракции света

Цель: научиться наблюдать интерференцию и дифракцию света.

Приборы и материалы: стеклянные пластины – 2 шт., лоскуты капроновые, засвеченная фотопленка с прорезью, сделанной лезвием бритвы, грампластинка или компакт-диск, штангенциркуль, источник света (лампочка, свеча).

Вопросы для самоподготовки:

1. Что называют длиной волны? Какие волны называют когерентными?
2. Что называют интерференцией света? Запишите условия максимума и минимума интерференции.
3. Что называют дифракцией света? Как сказывается дифракция на образовании тени от предмета?

Описание работы

В работе наблюдают интерференционные и дифракционные картины. Для этого выполняют несколько экспериментов с предложенными приборами и материалами.

Для наблюдения интерференции используют чистые стеклянные пластинки. При наложении их друг на друга в отраженном свете на темном фоне ищут цветные интерференционные картины (особенно по краям).

Дифракцию наблюдают при помощи штангенциркуля, лоскута капрона и грампластинки. Чтобы увидеть дифракционную картину, необходимо у штангенциркуля установить узкую щель и смотреть на пламя свечи сквозь нее. Тогда по обе стороны от пламени можно будет увидеть радужные полосы. Это и есть дифракционные спектры. Аналогично проводят наблюдение с помощью лоскута капрона или батиста. С помощью грампластинки наблюдают дифракцию в отраженном свете.

Порядок выполнения работы

Наблюдение интерференции

1. Стеклянные пластинки тщательно протрите, сложите вместе и сожмите пальцами.
2. Рассмотрите пластины в отраженном свете на темном фоне (расположить их надо так, чтобы на поверхности стекла не образовались слишком яркие блики от окон или белых стен).

3. В отдельных местах соприкосновения пластин наблюдайте яркие радужные кольцеобразные или неправильной формы полосы.
4. Заметьте изменения формы и расположения полученных интерференционных полос с изменением нажима.
5. Попытайтесь увидеть интерференционную картину в проходящем свете.
6. Сделайте схематический рисунок.
7. Ответьте на вопросы:
 - 1) Зависит ли результат интерференции от угла падения света на пластину, ее толщины и длины волны?
 - 2) С какой физической характеристикой световых волн связано различие в цвете колец, полученных в результате опыта?
 - 3) Как изменяются форма и расположение полученных интерференционных полос при изменении нажима на пластины?

Наблюдение дифракции

8. Установите между губками штангенциркуля щель шириной 0,5 мм.
9. Приставьте щель вплотную к глазу, расположив ее вертикально.
10. Смотри сквозь щель на вертикально расположенную светящуюся нить лампы (или пламя свечи), наблюдайте по обе стороны нити (пламени) радужные полосы (дифракционные спектры).
11. Изменяя ширину щели от 0,5 до 0,8 мм, заметьте, как это изменение влияет на дифракционные спектры.
12. Наблюдайте дифракционные спектры в проходящем свете с помощью лоскутов капрона, засвеченной фотопленки с прорезью.
13. Проведите наблюдение дифракционного спектра в отраженном свете с помощью грампластинки (компакт-диска).
14. Сделайте схематические рисунки.
15. Ответьте на вопросы:
 - 1) Для чего мы устанавливаем такую маленькую щель штангенциркуля?
 - 2) Что происходит с дифракционными спектрами при увеличении ширины щели штангенциркуля?
16. Сделайте вывод по проделанной работе.

Задания для самостоятельной работы

Ответьте на предложенные вопросы.

1. Можно ли наблюдать интерференцию от двух лампочек и почему?
2. Перечислите явления (в природе и технике), объясняемые интерференцией световых волн.
3. При изготовлении искусственных перламутровых пуговиц на их поверхность наносят мельчайшую штриховку. Почему после такой обработки пуговица имеет радужную окраску?

4. На каком явлении основано просветление оптических стекол?

СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

В таблицах указаны только те величины, которые используются в лабораторных работах и заданиях к ним.

Таблица 1 – Множители для образования десятичных кратных и дольных единиц

Множитель	Приставка	Обозначение приставки		Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское			международное	русское
10^{18}	экса	E	Э	10^{-1}	деци	d	д
10^{15}	пета	P	П	10^{-2}	санتي	c	с
10^{12}	тера	T	Т	10^{-3}	мили	m	м
10^9	гига	G	Г	10^{-6}	микро	μ	мк
10^6	мега	M	М	10^{-9}	нано	n	н
10^3	кило	k	к	10^{-12}	пико	p	п
10^2	гекто	h	г	10^{-15}	фемто	f	ф
10^1	дека	da	да	10^{-18}	атто	a	а

Таблица 2 – Значения некоторых физических величин

Физическая величина	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения на Земле	g	9,8 м/с ²
Ускорение свободного падения на Луне	g	1,6 м/с ²
Молярная масса углерода С	μ	0,012 кг/моль
Молярная масса водорода Н	μ	0,001 кг/моль
Коэффициент поверхностного натяжения воды	δ	$73 \cdot 10^{-3}$ Н/м
Плотность воды	ρ	10^3 кг/м ³
Плотность керосина	ρ	$0,8 \cdot 10^3$ кг/м ³

Таблица 3 – Удельное сопротивление проводников (при 0°C), $\cdot 10^{-6}$ Ом·м

Алюминий	0,025	Нихром	1,00
Графит	0,039	Ртуть	0,94
Железо	0,087	Свинец	0,22
Медь	0,017	Сталь	0,10

Таблица 4 – Зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	15	16	17	18	19	20	21	22
$p_n, \text{кПа}$	1,706	1,813	1,933	2,066	2,199	2,333	2,493	2,639
$t, ^\circ\text{C}$	23	24	25	26	27	28	29	30
$p_n, \text{кПа}$	2,813	2,986	3,173	3,359	3,559	3,786	3,999	4,239

Таблица 5 – Психрометрическая таблица

$t_{\text{сух}},$ °C	Относительна влажность φ , %, при $\Delta t = t_{\text{сух}} - t_{\text{вл}},$ °C											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12	5
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15	8
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17	10
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20	13
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	15
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	18
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	20
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	22
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30	24
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	26
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	27
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34	29
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36	30
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37	32
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38	33
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	34

ЛИТЕРАТУРА

1. Касьянов, В.А. Физика: учебник для 10 кл. общеобразовательных учреждений / В.А. Касьянов. – М.: Дрофа, 2008.
2. Касьянов, В.А. Физика: учебник для 11 кл. общеобразовательных учреждений / В.А. Касьянов. – М.: АСТ: Астрель, 2008.
3. <http://www.alleng.ru/d/phys/phys210.htm>.
4. <http://www.alleng.ru/d/phys/phys211.htm>.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ.....	4
ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	6
<i>Лабораторная работа №1</i> Измерение ускорения тела при равноускоренном движении.....	6
<i>Лабораторная работа №2</i> Исследование зависимости силы трения от веса тела.....	8
<i>Лабораторная работа №3</i> Изучение зависимости периода колебаний нитяного маятника от длины нити.....	10
<i>Лабораторная работа №4</i> Изучение изобарного процесса.....	12
<i>Лабораторная работа №5</i> Измерение относительной влажности	

воздуха при помощи термометра.....	14
<i>Лабораторная работа №6</i> Изучение капиллярных явлений, обусловленных поверхностным натяжением жидкости.....	16
<i>Лабораторная работа №7</i> Измерение удельного сопротивления проводника.....	18
<i>Лабораторная работа №8</i> Измерение силы тока и напряжения в электрической цепи.....	20
<i>Лабораторная работа №9</i> Изучение явления электромагнитной индукции.....	22
<i>Лабораторная работа №10</i> Наблюдение интерференции и дифракции света.....	24
СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ.....	26
ЛИТЕРАТУРА.....	28