

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Дмитриев Николай Николаевич
Должность: Ректор
Дата подписания: 18.07.2021 04:44:56
Уникальный программный ключ:
f7c6227919e4cdbfb4d7b682991f8553b37cafb4

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Иркутский государственный сельскохозяйственный университет

Колледж автомобильного транспорта и агротехнологий

В.М. Набока

**Курс лекций по физике
Учебно-методическое пособие**

Иркутск
2021

УДК
Б.....

Набока В.М.
Физика. Курс лекций. Учебно-методическое пособие.
Иркутск: Изд-во
ИрГАУ, 2021. - с.

Рекомендовано к печати предметно-цикловой комиссией Колледжа
автомобильного транспорта и агротехнологий (протокол № __ от
_____2021г.).

Рецензент:
Учебно-методическое пособие предназначено для изучения учебной
дисциплины физика студентами 1 курса. Учебно-методическое пособие
подготовлено на основе требований Федерального государственного
образовательного стандарта и программы дисциплины, «Физика»,
предназначенных для специальностей 36.02.01 Ветеринария , 09.02.07
Информационные системы и программирование, 13.02.11 Техническая

эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям), в качестве учебно-методического пособия к практическим занятиям и для самостоятельной работы.

© Набока В.М.

© Издательство ИрГАУ, 2021

Введение

Физика – наука о природе. Естественно- научный метод познания, его возможности и границы применимости. Моделирование физических явлений и процессов. Роль эксперимента и теории в процессе познания природы. Физические законы. Основные элементы физической картины мира.

1. Физика-наука о природе.

Много веков длится процесс познания окружающего мира. Все люди в определённой мере на работе или дома управляют машинами и механизмами. Чтобы понять, как они работают, нужно знать законы природы. Начиная с рождения, все мы за два-три года усваиваем определённый курс физики- привыкаем к простым вещам и явлениям вокруг нас. Так мы узнаём, что камень всегда падает вниз на землю, что есть твёрдые предметы, о которые можно ушибиться, что огонь может обжечь и т.д.

Однако, как ни важны подобные знания, накапливаемые человеком, они ещё не образуют науку. Это частные правила, касающиеся отдельных явлений. Они говорят нам о том, что произойдёт в обычных условиях, но не отвечают на вопрос: почему те или иные события вообще происходят и не могут ли эти события не наступить совсем? Они также не позволяют предсказать, что произойдёт при других условиях.

Людам необходимо понять окружающий мир, чтобы использовать его законы для облегчения труда, улучшения условий жизни. Именно развитие наук о природе дало в руки человека современную технику, и это привело к преобразованию окружающего нас мира. Основную роль сыграла физика-важнейшая наука, изучающая самые глубокие законы природы. Физика составляет фундамент главнейших направлений техники. Строительная техника, гидротехника, теплотехника, электротехника и энергетика, радиоэлектроника, светотехника, огромная часть военной техники выросли на основе физики. Открывая законы природы, спрятанные под покровом бесконечно многообразного мира явлений, человек научился применять их для своих целей, создать то, чего никогда не было в самой природе. Было изобретено радио, построены громадные электрические машины, освобождена внутриядерная энергия; человек вышел в космическое пространство.

Физика и другие науки

Физика-это наука, занимающаяся изучением основополагающих и вместе с тем наиболее общих свойств окружающего нас материального мира. Поэтому понятия физики и её законы лежат в основе любого раздела естествознания. В настоящее время физика очень тесно связана с астрономией, геологией, химией, биологией и другими естественными науками. Она многое объясняет в этих науках, предоставляет им мощные методы исследования. Научный метод. Какими же путями добывается научная истина? Несколько сотен лет назад были выработаны основы физического метода исследования. Он состоит в следующем: опираясь на опыт отыскивают количественные(формулируемые математически) законы природы; открытые законы проверяются практикой.

Физические величины и их измерение.

Исследование явлений начинается с их наблюдения. Но для того чтобы понять и описать происходящие события, учёные вводят целый ряд физических величин, таких как скорость, сила, давление, температура, электрический заряд и многие другие. Каждой величине надо дать точное определение, в котором указывается,

как эту величину можно измерить, как провести необходимый для такого измерения опыт. Чаще всего в определениях физических величин просто уточняют и придают количественную форму тому, что непосредственно воспринимается нашими органами чувств. Так вводят понятия силы, температуры и т.д. Есть, конечно, величины, которые не воспринимаются непосредственно нашими органами чувств (например, электрический заряд). Но они выражаются через другие величины, на которые органы чувств человека реагируют. Так, электрический заряд определяется по силам взаимодействия между заряженными телами.

Связи между физическими величинами.

Чтобы из наблюдений за физическими явлениями сделать общие выводы, найти причины этих явлений, следует установить количественные зависимости между различными физическими величинами. Для этого необходимо специально изменять условия, в которых протекает данное явление. От непосредственного наблюдения за явлением надо перейти к физическому эксперименту. Если меняются все условия сразу, то трудно уловить какие-либо закономерности. Поэтому, проводя физический эксперимент, стремятся проследить зависимость данной величины от характера изменения каждого из условий в отдельности.

Например, давление газа зависит от его массы, объёма и температуры. Чтобы исследовать эту зависимость, надо сначала изучить, как влияет на давление изменение объёма, когда температура и масса остаются неизменными. Затем нужно проследить, как давление зависит от температуры при постоянном объёме, и т. д.

Теория

Изучая количественные связи между отдельными величинами, можно выявить частные закономерности. На основе таких закономерностей развивают теорию явлений. Теория должна объяснять частные закономерности с общей точки зрения. Теория позволяет не только объяснять уже наблюдаемые явления, но и предсказать новые. Так, Д. И. Менделеев на основе открытого им периодического закона предсказал существование нескольких

химических элементов, которые в то время не были известны. Английский физик Дж. Максвелл предсказал существование электромагнитных волн и т.д. Законы природы и законы, определяющие жизнь общества. Любые изменения в природе подчиняются определённым законам. Движение тел описывается законами механики, распространение света законами оптики и т. д. Различие законов природы и, например, законов, определяющих жизнь общества, состоит прежде всего в том, что законы природы не изобретаются людьми, а открываются в процессе исследования окружающего мира. Если общественные законы могут быть нарушены или отменены, то нарушить или отменить законы природы не может никто.

1. МЕХАНИКА

Относительность механического движения. Системы отсчета. Характеристики механического движения: перемещение, скорость, ускорение. Виды движения (равномерное, равноускоренное) и их графическое описание. Движение по окружности с постоянной по модулю скоростью.

Выделим среди великого множества процессов, происходящих в природе, круг явлений, которые изучает механика. Наиболее часто встречающиеся вокруг нас изменения- это изменения положения тел относительно друг друга. Изменение положения тела или частей тела в пространстве относительно других тел с течением времени называется **механическим движением**.

1.Относительность механического движения.

Определение механического движения вы глядит просто, но эта простота обманчива. Прочтите определение ещё раз и подумайте, все ли слова вам ясны: пространство, время, относительно друг друга. Эти слова требуют пояснения.

Пространство и время. Пространство и время- наиболее общие понятия и наименее ясные. Исчерпывающих сведений о пространстве и времени мы не имеем.

Относительно других тел. Если эта часть определения

механического движения ускользнула от вашего внимания, то вы рискуете не понять самого главного. Так. Например, в купе вагона на столике лежит яблоко. Во время отправления поезда двух наблюдателей (пассажира и провожающего) просят ответить на вопрос: яблоко движется или нет? Каждый наблюдатель оценивает положение яблока по отношению к себе. Пассажир отвечает, что яблоко не совершает механического движения-оно неподвижно; провожающий говорит, что яблоко движется.

Итак, одно и то же тело одновременно движется и не движется. Возможно ли такое? Согласно определению механического движения всё так и есть. **Механика- наука об общих законах движения тел. Механическим движением называется перемещение тел или частей тел в пространстве относительно друг друга с течением времени.** Законы механики были сформулированы великим английским учёным И. Ньютоном. На протяжении многих лет учёные были уверены, что единственными основными (фундаментальными) законами природы являются законы механики Ньютона. Однако простая механическая картина мира оказалась неправильной. При исследовании электромагнитных явлений было доказано, что они не подчиняются законам Ньютона. Другой великий английский физик- Дж. Максвелл открыл новый тип фундаментальных законов. Это законы поведения электромагнитного поля, несводимые к законам Ньютона.

Было выяснено также, что законы Ньютона, как и любые другие законы не являются абсолютно точными. Они хорошо описывают движение больших тел, если их скорость мала по сравнению со скоростью света.

Механика, основанная на законах Ньютона, называется классической механикой. Для микроскопических частиц справедливы, как правило, законы квантовой механики.

Окружающие нас тела движутся сравнительно медленно. Поэтому их движения подчиняются законам Ньютона. Таким образом, область применения классической механики очень обширна.

Тема 1.1 Кинематика

По характеру решаемых задач механику делят на кинематику и динамику.

В кинематике изучают движение

тел, не рассматривая причин, определяющих эти движения. **Кинематика- это раздел механики, изучающий способы описания движений и связь между величинами, характеризующими эти движения.**

Движение точки и тела. Положение точки в пространстве.

Описать движение тела- это значит указать способ определения его положения в пространстве в любой момент времени. Самое простое- это научиться описывать движение точки. Если мы будем знать как происходит движение каждой точки тела, то мы будем знать, как движется всё тело. 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. Поэтому в данном случае обязательно надо указать физическое тело, относительно которого задаётся положение данного тела или же данной точки. Такое тело называют **телом отсчёта.**

Тело отсчёта можно выбрать произвольно. Но относительно различных точек тела отсчёта положение любого другого тела или точки тоже различно.

1.7.Способы описания движения

Система отсчёта

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

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

Координатный способ

Будем задавать положение точки с помощью координат (рис.1.1.).

Если точка движется, то её координаты изменяются с течением времени. Так как координаты точки зависят от времени, то можно сказать, что они являются функциями времени.

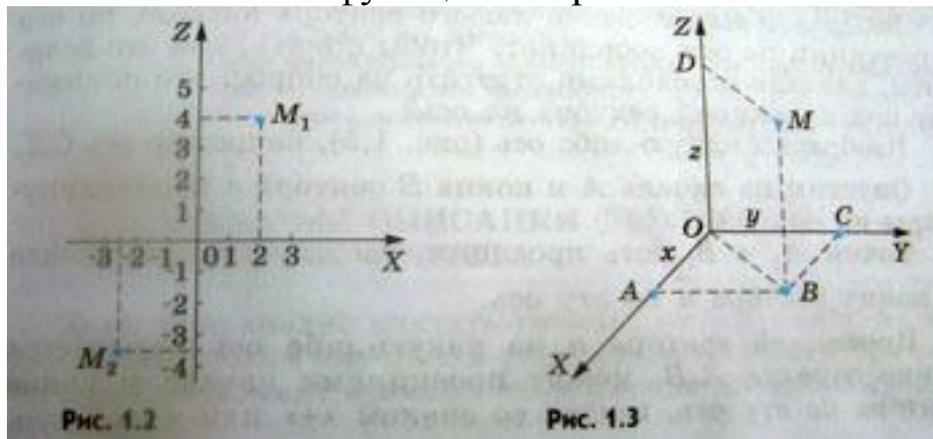


Рис.1.1

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.

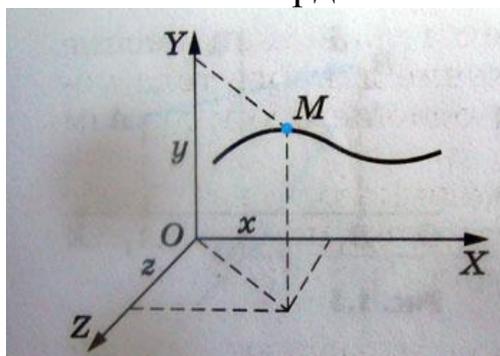


Рис.1.2.

Если они известны, то для каждого момента времени мы сможем рассчитать координаты точки, а следовательно, и её положение относительно выбранного тела отсчёта. Вид уравнений(1.1) для каждого конкретного движения будет вполне определённым.

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 её положение, с течением времени изменяется (поворачивается и меняет длину; рис.1.8), т.е. является функцией времени:

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

Последнее уравнение есть закон движения точки, записанный в векторной форме.

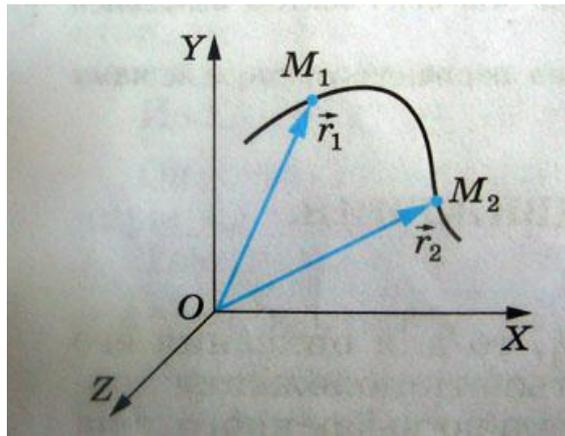


Рис.1.3

Если он известен, то мы можем для любого времени рассчитать радиус-вектор точки, а значит, определить её положение. Таким образом, задание трёх скалярных уравнений (1.1) равносильно заданию одного векторного уравнения (1.2).

Система отсчёта.

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

Таким образом, изучая движение интересующего нас тела, мы обязательно должны указать, относительно какого тела это движение рассматривается.

Тело, относительно которого рассматривается движение, называется телом отсчёта.

Чтобы рассчитать положение точки (тела) относительно выбранного тела отсчёта в зависимости от времени, надо не только связать с ним систему координат, но и суметь измерить время.

Совокупность тела отсчёта, связанной с ним системы координат и часов называют системой отсчёта.

6. Перемещение.

Пусть в какой-то момент времени движущее тело (точка) занимает положение M_1 (рис.1.4,а)

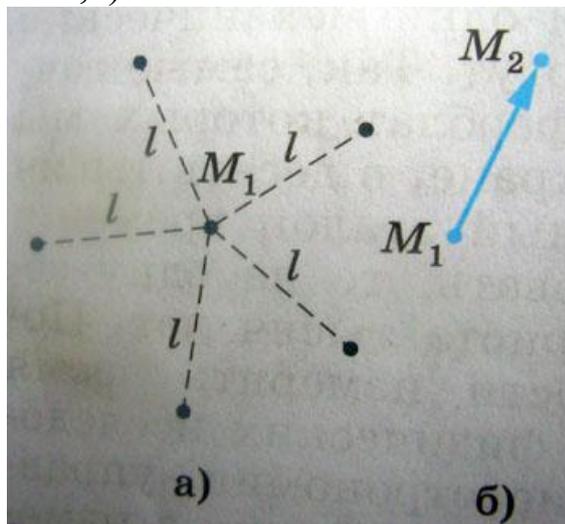


Рис1.4

Как найти его положение спустя некоторый промежуток времени после этого момента?

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 расстоянии l .

Чтобы однозначно определить новое положение тела в какой-то момент времени, то найти его новое положение можно с помощью направленного отрезка определённой длины, который следует отложить от начального положения тела. Конец этого отрезка и будет задавать новое положение тела (рис.1.4,б).

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

Поскольку перемещение- величина векторная, то перемещение, показанное на рисунке 1.4,б, можно M_1M_2 .

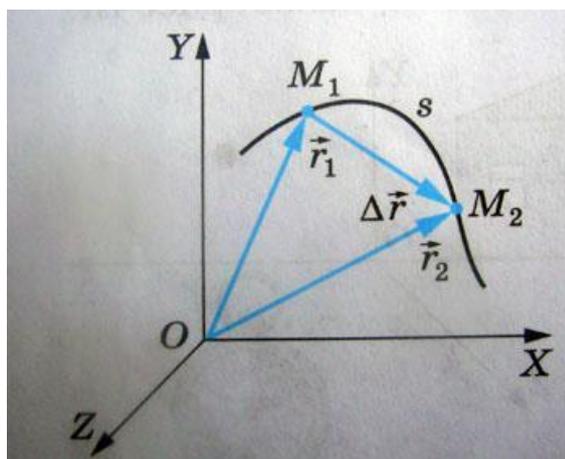


Рис.1.5

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

Пусть радиус-вектор r_1 задаёт положение тела в момент времени t_1 , а радиус-вектор r_2 - в момент времени t_2 . (рис. 1.5). Чтобы найти изменение радиус-вектора за промежуток времени

$$\Delta t = t_2 - t_1,$$

Надо из конечного его значения r_2 вычесть начальное значение r_1 . Из рисунка 1.11 видно, что перемещение, совершённое телом за промежуток времени Δt , есть изменение его радиус-вектора за это время. Следовательно, обозначив изменение радиус-вектора через Δr , можно записать:

$$\Delta r = r - r_1$$

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:

$$s > |\Delta r|.$$

Путь равен перемещению только в случае прямолинейного однонаправленного движения.

Перемещение тела $|\Delta r|$ -вектор, длина пути- скаляр, $|\Delta r| < s$.

7. Скорость равномерного прямолинейного движения.

Движение тела(точки) называется равномерным, если оно за любые равные промежутки проходит одинаковые пути.

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

кинематике.

Важной величиной, характеризующей движение тела, является его скорость. В механике рассматривают скорость как векторную величину. А это означает, что скорость можно считать известной(заданной) лишь в том случае, если известны её 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 Δr .

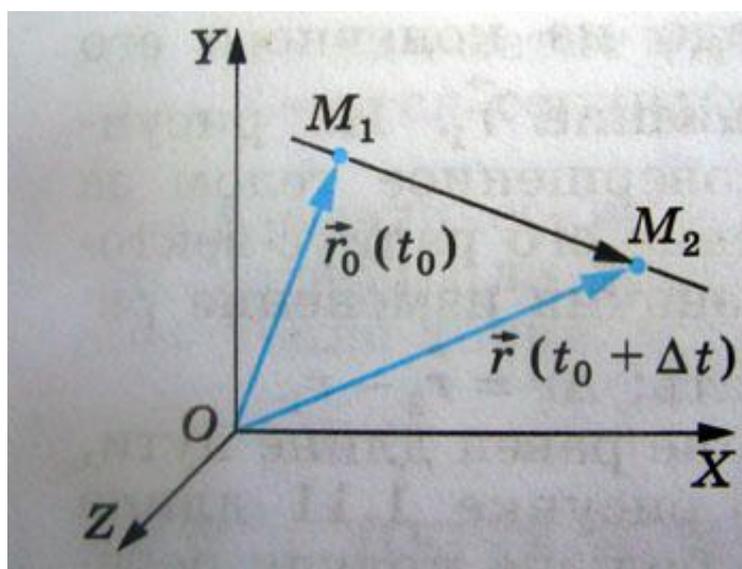


Рис. 1.6

Поделим перемещение Δr 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 U
Следовательно, можно записать

$$U = \Delta r / \Delta t$$

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 U направлена так же, как и перемещение Δr .

Выясним смысл модуля скорости¹

$$U = |\Delta r| / \Delta t.$$

Модуль перемещения $|\Delta r|$ есть расстояние пройденное телом за время Δt . А так как тело движется равномерно, то модуль отношения, а значит, и модуль скорости U , 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.

8. Уравнение равномерного прямолинейного движения.

Получим уравнение равномерного прямолинейного движения точки. Для этого воспользуемся определением скорости.

Пусть радиус-вектор r_0 задаёт положение точки в начальный момент времени t_0 , а радиус-вектор r - в момент времени t .

Тогда $\Delta t = t - t_0$, $\Delta r = r - r_0$, и выражение для скорости принимает вид:

$$U = (r - r_0) / (t - t_0)$$

Если начальный момент времени t_0 принять равным нулю, то:

$$U = r - r_0 / t$$

Отсюда

$$r = r_0 + Ut \quad (1.4)$$

Последнее уравнение и есть уравнение равномерного прямолинейного движения точки, записанного в векторной форме. Оно позволяет найти радиус-вектор точки при этом движении в

любой момент времени, если известны скорость точки и радиус-вектор, задающий её положение в начальный момент времени. Вместо векторного уравнения(1.4) можно записать три эквивалентных ему уравнения в проекциях на оси координат. Радиус-вектор r является суммой двух векторов: - радиус-вектора r_0 и вектора Ut . Следовательно, проекции радиус-вектора r на оси координат должны быть равны сумме проекций этих двух векторов на те же оси. Выберем оси координат так, чтобы тело двигалось по какой-либо оси, например по оси Ox . Тогда векторы r_0 и U будут составлять с осями Oy и Oz прямой угол. Поэтому их проекции на эти оси равны нулю. А значит, равны нулю в любой момент времени и проекции радиус-вектора r на оси Oy и Oz . Так как проекции радиус-вектора на координатные оси равны координатам его конца, то $r_x = x$ и $r_{x0} = x_0$. Поэтому в проекциях на ось Ox уравнение(1.4) можно записать в виде:

$$X = x_0 + U_x \cdot t \quad (1.5)$$

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 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 её координаты:

$$s = |x - x_1|$$

Его можно найти, зная модуль скорости $U = |U_x|$:

$$s = |U_x| \cdot t = U \cdot t. \quad (1.6)$$

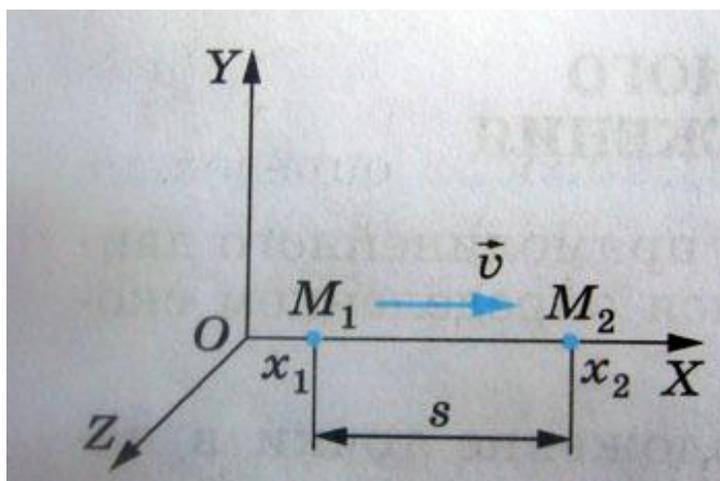


Рис.1.7

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. Но приближённо 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.1.8).

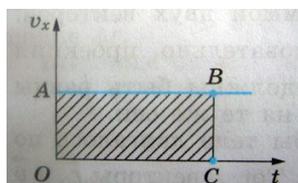


Рис.1.8

Это прямая, параллельная оси времени. Площадь прямоугольника OABC, заштрихованная на рисунке, равна изменению координаты точки за время t . Ведь сторона OA есть U_x , а сторона OC - время движения t , поэтому

$$\Delta x = U_x \cdot t$$

На рисунке 1.9 приведены примеры графиков зависимости координаты от времени для трёх различных случаев равномерного движения.

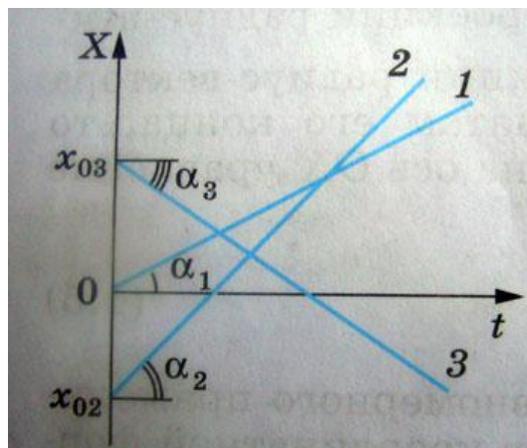


Рис 1.9

Прямая 1 соответствует случаю $x_0=0$, $U_x>0$; прямая 2- $x_0<0$, $U_x>0$, а прямая 3 – случаю $x_0>0$, $U_x<0$. 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 U_x2 , проходит большее расстояние, чем при движении со скоростью U_x1 . Во втором случае скорость U_x больше, чем в первом. Очевидно, скорость U_x численно равна тангенсу угла α .

В случае 3 $\alpha_3<0$, движение происходит в сторону, противоположную оси OX.

Получено уравнение прямолинейного равномерного движения точки. Г

Графики зависимости $U_x(t)$ и $x(t)$ позволяют легко проанализировать и сравнить движения.

9. Мгновенная скорость.

Ни одно тело не движется всё время с постоянной скоростью. Трогаясь с места, автомобиль начинает двигаться всё 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 её положение и скорость в каждый момент времени. Скорость в данный момент времени называют **мгновенной** скоростью.

Что же понимают под мгновенной скоростью?

Пусть точка, двигаясь неравномерно и криволинейно, в некоторый момент времени t занимает положение M (рис.1.10).

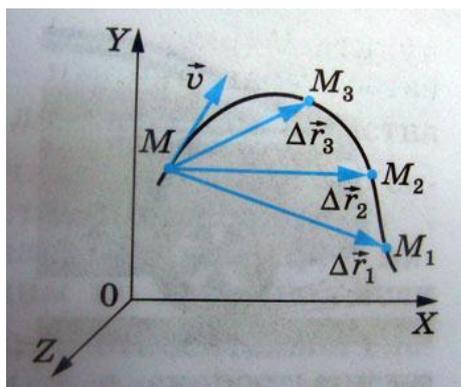


Рис. 10

По прошествии времени Δt_1 от этого момента точка займёт положение M_1 , совершив перемещение Δr_1 . Поделив вектор Δr_1 на промежуток времени Δt_1 , найдём 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 её через U_{cp1} , запишем:

$$U_{cp1} = \Delta r_1 / \Delta t_1$$

Найдём средние скорости за всё меньшие и меньшие промежутки времени:

$$U_{cp2} = \Delta r_2 / \Delta t_2, \quad U_{cp3} = \Delta r_3 / \Delta t_3.$$

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 по направлению. Но по мере приближения промежутка времени Δt к нулю средние скорости всё меньше и меньше будут отличаться друг от друга. А это означает, что при стремлении промежутка времени Δt к нулю отношение $\Delta r / \Delta t$ стремится к определённому вектору как к своему предельному значению. В механике такую величину называют скоростью точки в данный момент времени, или просто мгновенной скоростью, и обозначают U .

Мгновенная скорость точки есть величина, равная пределу отношения перемещения Δr к промежутку времени Δt , в течение которого это перемещение произошло, при стремлении промежутка времени 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 Δr .

Из рисунка 1.18 видно, что при уменьшении промежутка времени Δt вектор Δr , уменьшая свою длину, одновременно поворачивается. Чем короче становится вектор Δr , тем ближе он к касательной, проведённой к траектории в данной точке M .

Следовательно, мгновенная скорость направлена по касательной к траектории (см. рис. 1.10).

В частности, скорость точки, движущейся по окружности, направлена по касательной к этой окружности.

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

$$U_{cp} = s / t$$

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.

10. Сложение скоростей.

Пусть по реке плывёт моторная лодка и нам известна её скорость U_1 относительно воды, точнее, относительно системы отсчёта K_1 , движущейся вместе с водой.

Такую систему отсчёта можно связать, например, с мячом, выпавшим из лодки и плывущим по течению. Если известна ещё и скорость течения реки U относительно системы отсчёта K_2 , связанной с берегом, т.е. скорость системы отсчёта K_1 относительно системы отсчёта K_2 , то можно определить скорость лодки U_2 относительно берега (рис. 1.11)

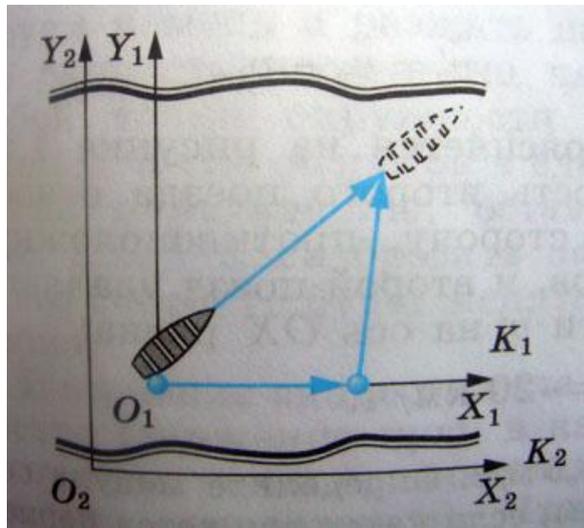


Рис. 1.11

За промежуток времени Δt перемещения лодки и мяча относительно берега равны Δr_2 и Δr_1 (рис. 1.11), а перемещение лодки относительно мяча равно Δr . Из рисунка 1.12 видно, что

$$\Delta r_2 = \Delta r_1 + \Delta r \quad (1.8)$$

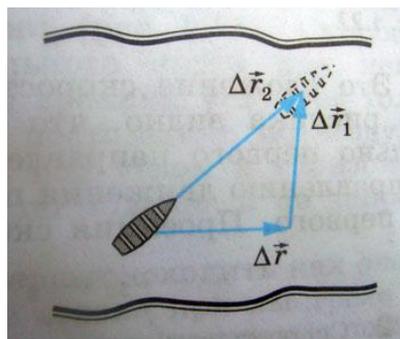


Рис.1.12

Разделим левую и правую части уравнения(1.8) на Δt , получим

$$\Delta r_2 / \Delta t = \Delta r_1 / \Delta t + \Delta r / \Delta t$$

Учтём также, что отношения перемещений к интервалу времени равны скоростям. Поэтому:

$$U_2 = U_1 + U \quad (1.9)$$

Скорости складываются геометрически, как и все другие векторы. Мы получили простой и замечательный результат, который называется законом сложения скоростей: если тело движется относительно некоторой системы отсчёта K_1 со скоростью U_1 и сама система отсчёта K_1 движется относительно другой системы отсчёта K_2 со скоростью U , то скорость тела относительно второй системы отсчёта равна геометрической сумме скоростей U_1 и U . Закон сложения скоростей справедлив и для неравномерного движения. В этом случае складываются мгновенные скорости. Как и любое векторное уравнение, уравнение (1.9) представляет собой компактную запись скалярных уравнений, в данном случае- для сложения проекций скоростей движения на плоскости:

$$U_{2x} = U_{1x} + U_x$$

$$U_{2y} = U_{1y} + U_y$$

Проекции скоростей складываются алгебраически. Закон сложения скоростей позволяет определять скорость тела относительно разных систем отсчёта, движущихся относительно друг друга.

Ускорение

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

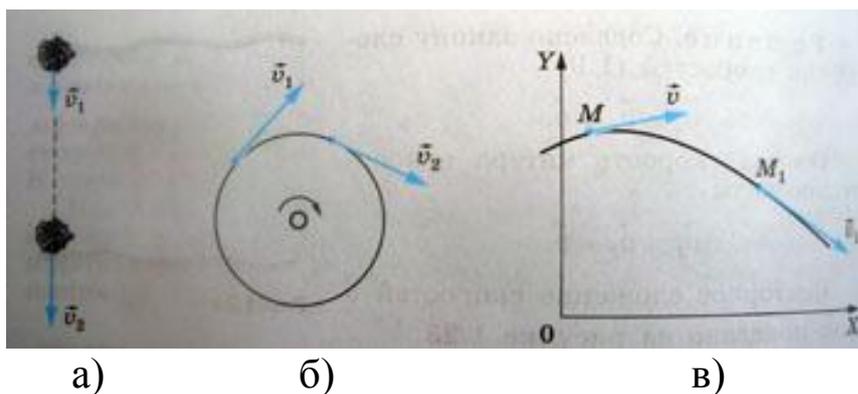


Рис.1.13

Изменение скорости тела может происходить как очень быстро, так и сравнительно медленно. Чтобы уметь находить скорость в любой момент времени, необходимо ввести величину, характеризующую быстроту изменения скорости. Эту величину называют ускорением. Ускорение—ещё одна важная физическая величина.

Рассмотрим случай криволинейного и неравномерного движения точки. В этом случае её скорость с течением времени изменяется как по модулю, так и по направлению. Пусть в некоторый момент времени t точка занимает положение M и будет иметь скорость v (рис в). По прошествии промежутка времени Δt_1 точка займёт положение M_1 и будет иметь скорость v_1 (рис в)

Чтобы найти изменение скорости за время Δt_1 , надо из вектора v_1 вычесть вектор v :

$$\Delta v_1 = v_1 - v.$$

Вычитание вектора v можно произвести путём прибавления к вектору v_1 вектора $(-v)$:

$$\Delta v_1 = v_1 - v = v_1 + (-v)$$

Согласно правилу сложения векторов, вектор изменения скорости Δv_1 направлен из начала вектора v_1 в конец вектора $(-v)$, как это показано на рисунке:

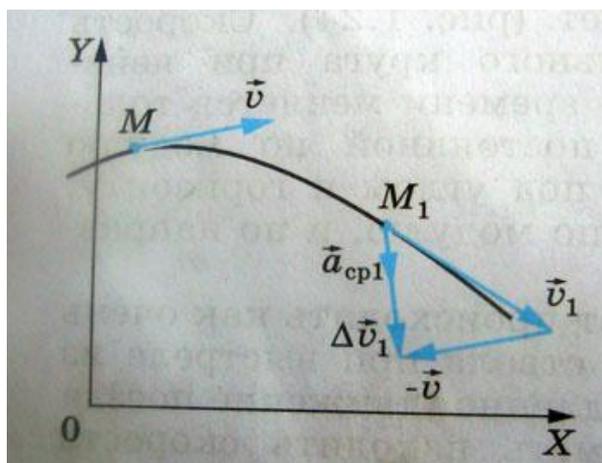


Рис.1.14

Поделив вектор Δv_1 на промежуток времени Δt_1 , получим вектор, направленный также, как и вектор изменения скорости Δv_1 . Этот вектор называют средним ускорением точки за промежуток времени Δt_1 . Обозначив его через a_{cp1} , запишем:

$$a_{cp1} = \Delta v_1 / \Delta t$$

Найдём теперь средние ускорения за всё меньшие и меньшие промежутки времени:

$$a_{cp2} = \Delta v_2 / \Delta t, \dots\dots\dots$$

При уменьшении промежутка времени Δt вектор Δv уменьшается по модулю и меняется по направлению (рис.).

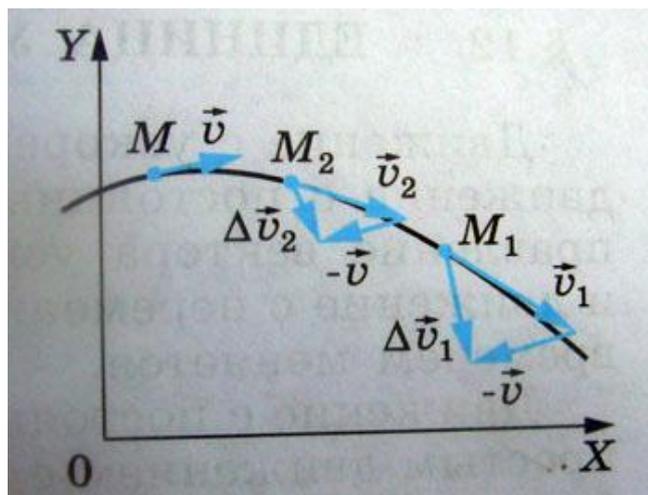


Рис.1.15

Соответственно средние ускорения также меняются по модулю и направлению. Но при стремлении промежутка времени Δt к нулю отношение изменения скорости к изменению времени стремится к

определённому вектору как к своему предельному значению. В механике эту величину называют ускорением точки в данный момент времени, или просто ускорением, и обозначают a .

Ускорением тела называется предел отношения скорости Δv 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 Δv .

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.

Единица ускорения.

Движение с ускорением можно разделить на два вида:

- движение с постоянным ускорением, когда модуль и направление вектора ускорения не меняются со временем;
- движение с переменным ускорением, когда ускорение со временем меняется.

Движение с постоянным ускорением является наиболее простым движением с переменной скоростью.

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

Обозначим через Δt некоторый промежуток времени, а через Δv — изменение скорости за этот промежуток, можно записать:

$$a = \Delta v / \Delta t$$

Так как промежуток времени Δt - величина положительная, то из этой формулы следует, что если ускорение с течением времени не изменяется, то оно направлено так же, как и вектор изменения скорости. Таким образом, если ускорение постоянно, то его можно

истолковывать как изменение скорости в единицу времени. Это позволяет установить единицы модуля ускорения и его проекций. Запишем выражение для модуля ускорения:

$$|\mathbf{a}| = a = |\Delta \mathbf{v}| / \Delta t.$$

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

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.

13. Скорость при движении с постоянным ускорением.

Выясним зависимости скорости точки от времени при её движении с постоянным ускорением. Для этого воспользуемся формулой:

$$\mathbf{a} = \Delta \mathbf{v} / \Delta t$$

Пусть v_0 - скорость точки в начальный момент времени t_0 , а v - её скорость в некоторый момент времени t .

Тогда $\Delta t = t - t_0$, $\Delta v = v - v_0$, формула для ускорения примет вид:

$$\mathbf{a} = (v - v_0) / (t - t_0)$$

Если начальный момент времени t_0 принять равным нулю, то получим

$$\mathbf{a} = (v - v_0) / t$$

Отсюда:
$$\mathbf{v} = v_0 + \mathbf{a}t. \quad (1.12)$$

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

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + a_x t \\ v_y &= v_{0y} + a_y t \end{aligned}$$

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

Итак, для определения скорости в произвольный момент времени надо знать начальную скорость v и ускорение a .

Начальную скорость нужно измерить. Ускорение, как мы увидим в дальнейшем, определяется действием на данное тело других тел и может быть вычислено. Начальная скорость зависит не от того, как действуют на данное тело другие тела в рассматриваемый момент времени, а от того, что происходило с телом в предшествующие моменты времени.

Ускорение же, наоборот, не зависит от того, что происходило с телом в предыдущие моменты, а зависит лишь от действия на него других тел в данный момент времени.

Зависимость проекции скорости от времени можно наглядно изобразить с помощью графика.

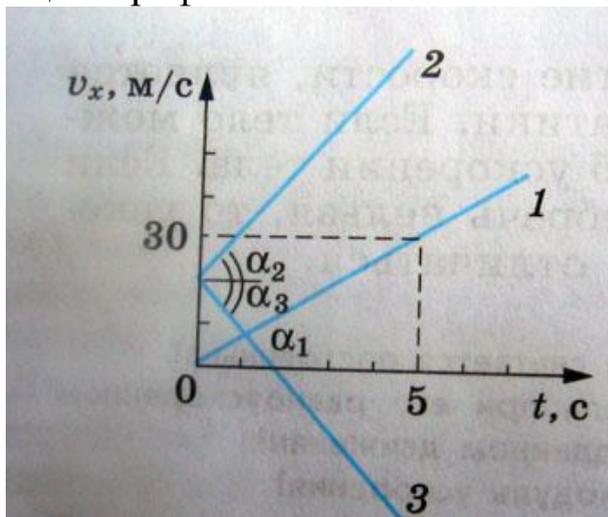


Рис.1.29

Если начальная скорость равна нулю, то график зависимости проекции скорости на ось X от времени имеет вид прямой, выходящей из начала координат. (прямая 1 для случая $a > 0$). По этому графику можно определить проекцию ускорения на ось X ;

$$a = v/t$$

Чем больше a , тем больший угол α с осью времени составляет график проекции скорости.

Если начальная скорость отлична от нуля и тело движется с большим ускорением, то график зависимости проекции скорости от

времени имеет вид прямой 2.

В случае отрицательного ускорения(равнозамедленное движение) с той же начальной скоростью график зависимости v от времени имеет вид прямой 3.

14. Движение с постоянным ускорением

Допустим, что движение с постоянным ускорением совершается в одной плоскости XOY . Если вектор начальной скорости и вектор ускорения не лежат на одной прямой, то точка будет двигаться по кривой линии. Следовательно, в этом случае с течением времени будут изменяться обе её координаты x и y .

Обозначим через x_0 и y_0 координаты в начальный момент времени t_0 , а через x и y координаты в момент времени t . Тогда за время

$\Delta t = t - t_0 = t$ изменения координат будут равны

$$\Delta x = x - x_0 \text{ и } \Delta y = y - y_0$$

Отсюда:

$$x = x_0 + \Delta x,$$

$$y = y_0 + \Delta y$$

Значит для нахождения положения точки в любой момент времени надо знать её начальные координаты и уметь находить изменения координат Δx и Δy за время движения

В случае движения, при котором проекция скорости изменяется со временем(рис.1.30, кривая 1), величину Δx за время t найдем следующим образом

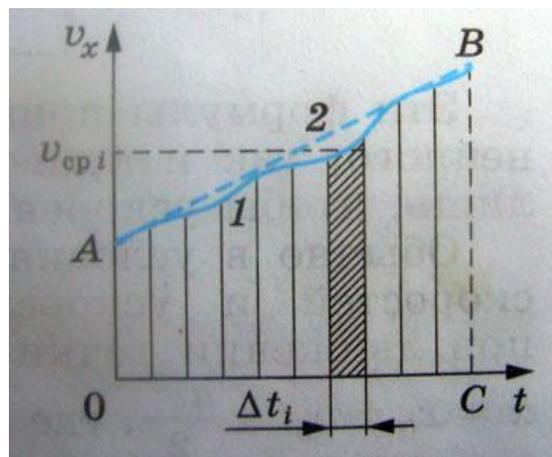


Рис. 1.30.

На рисунке длина отрезка OC численно равна времени движения.

Разделим его на малые интервалы Δt , в пределах которых проекцию скорости можно считать постоянной и равной её среднему значению.

Тогда: $\Delta x_i = v_{icp} \cdot \Delta t_i$

и, соответственно, площадь заштрихованного прямоугольника численно равна изменению координаты точки за время Δt_i

Сумма всех таких площадей численно равна изменению координаты точки за время t .

Чем меньше интервал времени Δt , тем точнее будет результат.

При стремлении Δt к нулю площадь фигуры ABCO будет стремиться к изменению координаты тела Δx .

В случае равноускоренного движения (рис. 1.30, кривая 2) изменение координаты тела Δx численно равно площади трапеции ABCO.

Длина оснований OA и BC этой трапеции численно равны проекциям начальной и конечной скоростей, а длина высоты OC - времени движения.

По формуле для площади трапеции имеем:

$$x = v_0 t + \frac{a}{2} t^2$$

Учитывая, что $v = v_0 + a t$, получим

$$\Delta x = v_0 \cdot t + \frac{a}{2} t^2$$

Мы рассмотрели случай, когда $v_0 > 0$, и $a > 0$.

Но полученная формула справедлива и тогда, когда одна из этих величин отрицательна или когда обе они отрицательны.

Изменение координаты Δy можно найти таким же способом, и оно имеет аналогичный вид:

$$\Delta y = v_0 \cdot t + \frac{a}{2} t^2$$

Подставив найденные значения изменения координат в формулы (1.14), получим выражения для координат при движении с постоянным ускорением как функции времени (их называют кинематическими уравнениями движения):

$$x = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{a}{2} t^2$$

$$y = y_0 + v_0 \cdot t + \frac{a}{2} t^2$$

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

При движении точки в плоскости XOY двум кинематическим уравнениям соответствует одно векторное уравнение:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 \cdot t + \mathbf{a} \cdot t^2 / 2$$

Полученные уравнения, совместно с формулами для проекций скорости, позволяют решать любую задачу о движении с постоянным ускорением.

Равномерное движение по окружности

Равномерное движение по окружности - простейший и наиболее важный случай криволинейного движения.

При равномерном движении по окружности скорость тела с течением времени **не изменяется по модулю, а изменяется по направлению.**

Поскольку скорость точки изменяется по направлению, то при равномерном движении по окружности тело имеет **ускорение**. Это ускорение направлено в любой момент времени к центру окружности и называется **центростремительным ускорением.**

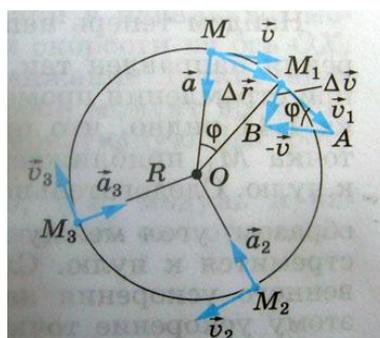


Рис.

Центростремительное ускорение \mathbf{a} определяется соотношением

$$\mathbf{a} = \mathbf{v}^2 / R$$

Для описания равномерного движения точки по окружности вводят понятие **периода и частоты вращения**

Период вращения **T**- это время, за которое тело совершает один полный оборот:

$$T=2\pi R/v=2\pi/\omega$$

Единица периода вращения в системе СИ $T=1\text{с}$.

Частота вращения **n** – это физическая величина, численно равная числу оборотов, совершаемых телом за одну секунду:

$$n=1/T=v/2\pi R=\omega/2\pi$$

Единица частоты вращения в системе СИ $n=1\text{об/с}=1\text{с}^{-1}$.

Угловую скорость ω можно выразить через T и n:

$$\omega =v/R=2\pi/T=2\pi n$$

Центростремительное ускорение **a** можно выразить через ω , T и n:

$$a =v^2/R=\omega^2 R=4\pi^2 n^2 R=4\pi^2 R/T^2$$

Если точка за время **t** совершает N оборотов, то период T и частота n вращения определяются соотношениями:

$$T=t/N$$

$$n=N/t$$

Глава 2 Кинематика твёрдого тела

2.1 Движение тел. Поступательное движение.

Описание движения тела считается полным лишь тогда, когда известно, как движется каждая его точка. До этого мы описывали движения точки. Именно для точки введены понятия координат, скорости, ускорения, траектории. В общем случае задача описания движения тел является сложной. Особенно она сложна, если тела

заметно деформируются в процессе движения. Проще описать движение тела, взаимное расположение частей которого не изменяется. Такое тело называется абсолютно твёрдым. На самом деле абсолютно твёрдых тел нет. Но в тех случаях, когда реальные тела при движении мало деформируются, их можно рассматривать как абсолютно твёрдые. Однако и движение абсолютно твёрдого тела в общем случае оказывается весьма сложным. Любое сложное движение абсолютно твёрдого тела можно представить как сумму двух независимых движений:--поступательного и вращательного.

Поступательное движение.

Поступательным называется такое движение твёрдого тела, при котором любой отрезок, соединяющий любые две точки тела, остаётся параллельным самому себе.

При поступательном движении все точки тела совершают одинаковые перемещения, описывают одинаковые траектории, проходят одинаковые пути, имеют в каждый момент времени равные скорости и ускорения. Докажем это.

Пусть тело движется поступательно.

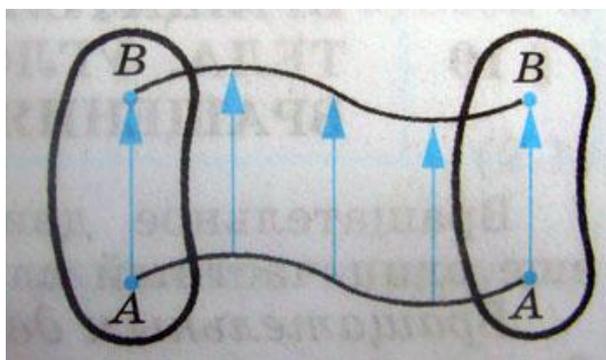


Рис.

Соединим две его произвольные точки В и А отрезком. Расстояние АВ не изменяется, так как тело абсолютно твёрдое. При поступательном движении остаются постоянными модуль и направление вектора АВ. Вследствие этого траектории точек В и А одинаковы, так как они могут быть полностью совмещены параллельным переносом на вектор АВ. Согласно рисунку перемещения точек А и В одинаковы и совершаются за одно и то же время. Следовательно, точки А и В имеют одинаковые скорости и ускорения.

Поэтому для описания поступательного движения твёрдого тела достаточно описать движение какой-либо одной его точки. Лишь при поступательном движении можно говорить о скорости и ускорении тела. При любом другом движении тела его точки имеют различные скорости и ускорения тела.

Вращательное движение твёрдого тела. Угловая и линейная скорости вращения.

Вращательное движение вокруг неподвижной оси- ещё один частный случай движения твёрдого тела.

Вращательным движением твёрдого тела вокруг неподвижной оси называется такое его движение, при котором все точки тела описывают окружности, центры которых находятся на одной прямой, называемой осью вращения, при этом плоскости, которым принадлежат эти окружности, перпендикулярны оси вращения.(рис.2.4)

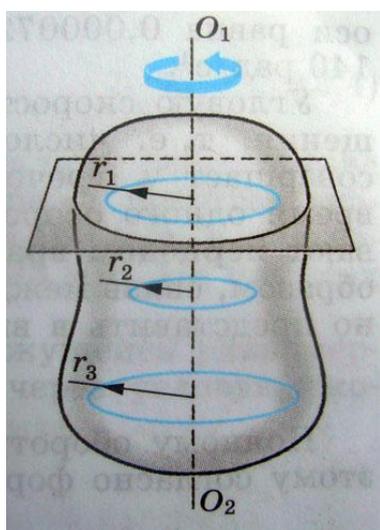


Рис.2.4

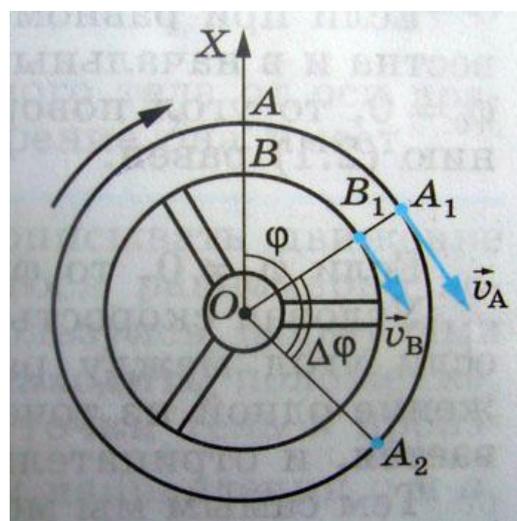


Рис.2.5

В технике такой вид движения встречается очень часто: вращение валов двигателей и генераторов, турбин и т.д.

Угловая скорость.

Каждая точка вращающегося вокруг оси тела, проходящей через точку O , движется по окружности, и различные точки проходят за время Δt разные пути.

Так, $AA > BB$, поэтому модуль скорости точки A больше, чем у точки B (рис.2.5). Но радиусы окружностей поворачиваются за время Δt на один и тот же угол $\Delta\phi$. Угол ϕ —угол между осью OX и радиус-вектором r , определяющим положение точки A (см.рис.2.5).

Пусть тело вращается равномерно, т.е. за любые равные промежутки времени поворачивается на одинаковые углы.

Быстрота вращения тела зависит от угла поворота радиус-вектора, определяющего положение одной из точек твёрдого тела за данный промежуток времени; она характеризуется угловой скоростью.

Например, если одно тело за каждую секунду поворачивается на угол $\pi/2$, а другое- на угол $\pi/4$, то мы говорим, что первое тело вращается быстрее второго в 2 раза.

Угловой скоростью тела при равномерном вращении называется величина, равная отношению угла поворота тела $\Delta\phi$ к промежутку времени Δt , за который этот поворот произошёл.

Будем обозначать угловую скорость греческой буквой ω (омега). Тогда по определению

$$\omega = \Delta\phi / \Delta t$$

Угловая скорость выражается в радианах в секунду.

рад/с

Угловую скорость можно выразить через частоту вращения, т.е. число полных оборотов за 1с.

Если тело совершает ν (греческая буква ню) оборотов за 1с, то время одного оборота равно $1/\nu$ секунд.

Это время называют **периодом вращения** и обозначают буквой T . Таким образом, связь между частотой и периодом вращения можно представить в виде:

$$T=1/\nu$$

Полному обороту тела соответствует угол $\Delta\varphi=2\pi$. Поэтому согласно формуле (2.1)

$$\omega=2\pi/T=2\pi\nu \quad (2.2)$$

Если при равномерном вращении угловая скорость известна и в начальный момент времени $t_0=0$ угол поворота $\varphi_0=0$, то угол поворота тела за время t согласно уравнению (2.1) равен:

$$\varphi=\omega t$$

Если $\varphi_0=0$, то $\varphi - \varphi_0 = \omega t$

Или $\varphi=\varphi_0+\omega t$

Угловая скорость принимает положительные значения, если угол между радиус-вектором, определяющим положение одной из точек твёрдого тела, и осью Ox увеличивается, и отрицательные, когда он уменьшается.

Тем самым мы можем описать положение точек вращающегося тела в любой момент времени.

Связь между линейной и угловой скоростями.

Скорость точки, движущейся по окружности, часто называют **линейной скоростью**, чтобы подчеркнуть её отличие от угловой скорости.

Мы уже отмечали, что при вращении твёрдого тела разные его точки имеют неодинаковые линейные скорости, но угловая скорость для всех точек одинакова.

Между линейной скоростью любой точки вращающегося тела и его угловой скоростью существует связь. Установим её. Точка, лежащая на окружности радиусом R , за один оборот пройдёт путь - $2\pi R$. Поскольку время одного оборота тела есть период T , то модуль линейной скорости точки можно найти так:

$$\nu=2\pi R/T \quad (2.3)$$

Так как $\omega=2\pi\nu$, то

$$v=\omega R$$

Из этой формулы видно, что, чем дальше расположена точка тела от оси вращения, тем большее линейная скорость.

Модуль ускорения точки тела, движущейся равномерно по окружности, можно выразить через угловую скорость тела и радиус окружности:

$$a=v^2/R, v=\omega R$$

Следовательно,

$$a= v^2/R=\omega^2 R=v\omega$$

Чем дальше расположена точка твёрдого тела от оси вращения, тем большее по модулю ускорение она имеет.

Динамика

2.1 Законы механики Ньютона.

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

Основная задача динамики- определить закон движения тела, если известны приложенные силы и начальные условия.

Обратная задача динамики- определение законов взаимодействия тел друг с другом, если закон их движения.

Вопрос о выборе системы отсчёта в динамике не является простым.

Выберем вначале систему отсчёта, связанную с земным шаром.

Движение тел вблизи поверхности Земли будем рассматривать относительно самой Земли.

Если тело начинает двигаться, то всегда по соседству можно обнаружить предмет, который толкает это тело, тянет его или действует на него на расстоянии.

Вся совокупность этих фактов говорит о том , что **изменение скорости тела(а значит, ускорения) всегда вызывается**

воздействием на него каких-либо других тел.

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

На столе лежит книга, её 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.

Скорость тела никогда не меняется, если на него ничто не действует. Изменение скорости одного тела всегда вызывается действием на него других тел.

Движение с постоянной скоростью.

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.

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 поддерживать его скорость постоянной, нужно лишь потому, что в обычных условиях всегда существует сопротивление движению со стороны земли, воздуха или воды.

Инерциальные и неинерциальные системы отсчёта.

Систему отсчёта мы связывали с Землёй, т.е. рассматривали движение относительно Земли.

В системе отсчёта, связанной с Землёй, ускорение тела определяется только действием на него других тел. Подобные системы отсчёта называют инерциальными.

Однако в других системах отсчёта может оказаться, что тело имеет ускорение даже в том случае, если на него не действуют другие тела.(пассажир-автобус-торможение-ускорение).

Если относительно какой-нибудь системы отсчёта тело движется с

ускорением, не вызванным действием на него других тел, то такую систему называют неинерциальной. Так неинерциальными являются системы отсчёта, связанные с автобусом, движущимся по отношению к Земле с ускорением.

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

В дальнейшем движение тел мы будем рассматривать только в инерциальных системах отсчёта.

Материальная точка.

Движение тел сильно зависит от их размеров и форм. Чем сложнее форма тела, тем сложнее его движение. Поэтому трудно найти какие-то общие законы движения, которые были бы справедливы для тел произвольной формы.

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

Во многих случаях размеры и форма тела не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на характер механического движения.

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

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.

Первый закон Ньютона

Первый закон механики, или закон инерции, как его часто называют, установлен ещё 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**.

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.

(Пример-создание условий, при которых влияние внешних воздействий можно сделать минимальными-гладкий лёд и камень)
Отсюда можно сделать вывод, что тело, достаточно удалённое от других тел и по этой причине не взаимодействующее с ними, будет двигаться с постоянной скоростью.

Первый закон Ньютона.

Таким образом, наблюдая за движением тел и размышляя о характере этого движения приводят к выводу о том, что свободные тела движутся с постоянной скоростью по отношению к определённым телам и связанным с ними системам отсчёта, например по отношению к Земле.

В этом и состоит главное содержание закона инерции. Поэтому **первый закон динамики** формулируется следующим образом:
Существуют системы отсчёта, 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 отсчёта. С другой стороны, он содержит утверждение о том, что инерциальные системы отсчёта существуют в действительности.

Примеры инерциальных систем отсчёта

Система отсчёта связанная с Землёй- геоцентрическая система отсчёта

Система отсчёта, в которой начало координат совмещено с центром Солнца-гелиоцентрическая система отсчёта

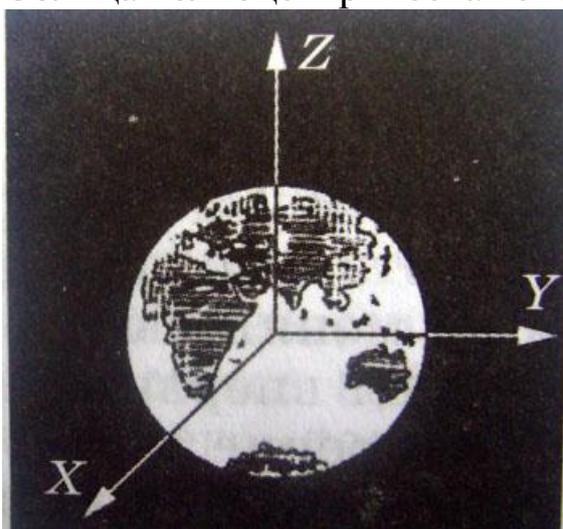


Рис. 3.3

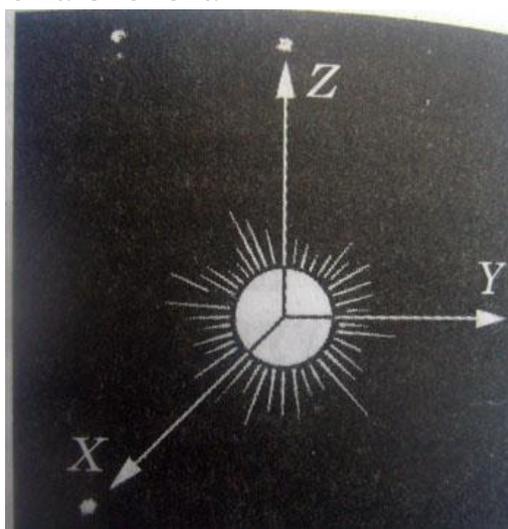


Рис. 3.4

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 качественное 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, а не к одному.

Всегда можно указать тело, на которое действует сила, и тело, со стороны которого она действует.

Сила имеет направление, т.е. сила-векторная величина.

Сравнение сил.

Для количественного определения силы мы должны уметь её измерять. Только при этом условии можно говорить о силе как об определённой физической величине

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. (динамометр)

Связь между силой и ускорением.

- экспериментальное определение зависимости ускорения от силы:

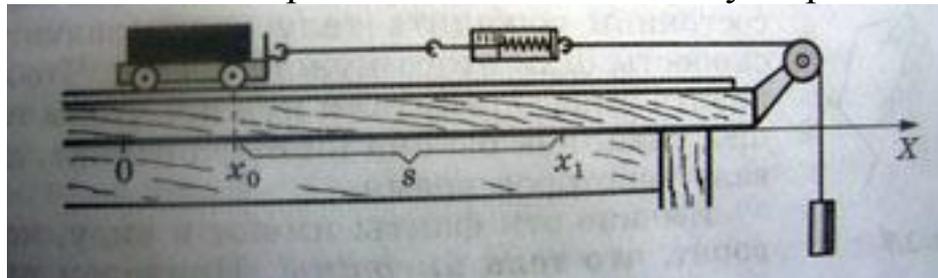


Рис.3.8.

Пусть на тележку действует постоянная сила со стороны нити, к концу которой прикреплен груз.

Модуль силы измеряется пружинным динамометром. Эта сила постоянна, но не равна при движении силе тяжести, действующей на подвешенный груз.

Предполагая, что при действии постоянной силы ускорение тоже постоянно, так как оно однозначно определяется силой, можно использовать кинематические формулы для равноускоренного движения. При начальной скорости, равной нулю,

$$s = x_1 - x_0 = at^2/2$$

где x_0 и x_1 – начальная и конечная координаты тела.

Отсюда

$$a = 2s/t^2$$

Тщательные измерения модулей сил и ускорений показывают прямую пропорциональность между ними:

a F

Векторы **a** и **F** направлены по одной прямой в одну и ту же сторону.

Если на тело одновременно действуют несколько сил, то ускорение тела будет пропорционально геометрической сумме этих сил.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_n, \text{ то } \mathbf{a} \propto \mathbf{F}.$$

Это положение называют принципом суперпозиции (наложения) сил.

Отметим, что действие каждой силы не зависит от наличия других сил.

Второй закон Ньютона. Масса.

Ускорение данного тела определяется действующей на него силой и свойствами самого тела, т.е. модуль ускорения тела зависит не только от оказываемого на него воздействия (т.е. от силы), но и от свойств самого тела.

Отсюда следует, что необходимо ввести величину, которая характеризовала бы способность того или иного тела менять свою скорость под влиянием определённой силы.

Эта величина - масса тела.

Чем больше масса тела, тем меньше получаемое телом ускорение при действии на него заданной силы.

Масса.

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

$$\mathbf{F}/\mathbf{a} = \text{const}$$

Величину \mathbf{F}/\mathbf{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 определённое 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, можно сформулировать второй закон Ньютона:

Ускорение тела прямо пропорционально силе, действующей на него, и обратно пропорционально его массе:

$$a = F/m$$

Эта формула выражает один из самых фундаментальных законов природы, которому с достаточной точностью подчиняется движение больших тел, так и мельчайших песчинок.

Для решения задач обычно пользуются другой формулировкой второго закона Ньютона.

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

$$ma = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n$$

Измерение массы.

Используя второй закон Ньютона можно определить массу тела, измерив независимо силу и ускорение:

$$m = F/a$$

На практике гораздо точнее и удобнее измерять массу иначе, с помощью весов.

Если измерить массы m_1, m_2, m_3, \dots нескольких тел, а затем соединить все эти тела вместе и измерить массу m одного объединённого тела, то будет выполняться простое соотношение: $m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots$ и наоборот.

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 А действует на тело В, то и тело В действует на тело А.

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.

Силы взаимодействия двух тел.

Выясним с помощью опыта, как связаны между собой силы взаимодействия двух тел.

Возьмём достаточно сильный магнит и железный брусок, установим их на катки для уменьшения трения

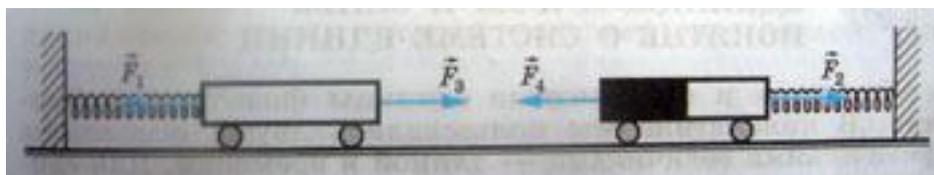


Рис.3.12.

К концам магнита и бруска прикрепим одинаковые пружины, закреплённые другими концами на столе. Магнит и брусок притянутся друг к другу и растянут пружины. Опыт показывает, что к моменту прекращения движения пружины растянуты совершенно одинаково.

Это означает, что на оба тела со стороны пружин действуют одинаковые по модулю и противоположные по направлению силы:

$$\mathbf{F1} = -\mathbf{F2}$$

Так как магнит покоится, то сила F2 равна по модулю и противоположна по направлению силе F4, с которой на него действует брусок:

$$\mathbf{F2} = -\mathbf{F4}$$

Точно так же равны по модулю и противоположны по направлению силы, действующие на брусок со стороны магнита и пружины:

$$\mathbf{F}_3 = -\mathbf{F}_1$$

Отсюда следует, что силы, с которыми взаимодействуют магнит и брусок, равны по модулям и противоположны по направлению:

$$\mathbf{F}_3 = -\mathbf{F}_4$$

На основе подобных опытов можно сформулировать 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 А со стороны тела В действует сила F_A (рис.3.13), то одновременно на тело В со стороны тела А будет действовать сила F_B , причём:

$$\mathbf{F}_A = -\mathbf{F}_B$$

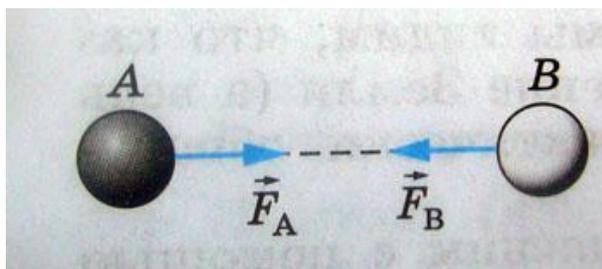


Рис.3.13

Используя второй закон Ньютона можно записать так:

$$m_1 a_1 = -m_2 a_2$$

Отсюда следует, что

$$a_1/a_2 = m_2/m_1 = \text{const},$$

т.е. отношение модулей ускорений a_1 и a_2 , взаимодействующих друг с другом тел обратно пропорционально их массам.

Единицы массы и силы.

В Международной системе единиц (СИ) единица массы – кг.

За единицу силы в Международной системе единиц принимается сила, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с²

Эта единица называется ньютоном

$$1\text{Н}=1\text{кг}\cdot 1\text{м/с}^2$$

Силы в природе

В любом веществе, в живых организмах, в атомах, в атомных ядрах и в мире элементарных частиц мы встречаемся с проявлением всего лишь четырёх типов сил:

- гравитационных;
- электромагнитных;
- сильных (ядерных);
- слабых.

Гравитационные силы, или силы всемирного тяготения, действуют между всеми телами—все тела притягиваются друг к другу.

Но это притяжение существенно лишь тогда, когда хотя бы одно из взаимодействующих тел также 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 обширна и разнообразна.

В атомах, молекулах, твёрдых, жидких и газообразных телах, живых организмах именно электромагнитные силы являются главными.

Область действия ядерных сил очень ограничена. Они заметны только внутри атомных ядер (т.е. на расстоянии примерно 10^{-14} м).

Уже на расстояниях между частицами примерно 10^{-14} м они не проявляются совсем.

Слабые взаимодействия проявляются ещё на меньших расстояниях

(примерно 10 см). Они вызывают взаимные превращения элементарных частиц, определяют радиоактивный распад ядер. 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;
- силами трения.

Силы упругости и силы трения имеют электромагнитную природу.

Силы всемирного тяготения.

Земля сообщает всем телам у поверхности одно и то же ускорение—ускорение свободного падения.

Но если земной шар сообщает телу ускорение, то согласно 2-му закону Ньютона он действует на тело с некоторой силой.

Эту силу называют силой тяжести.

В соответствии со 2-ым законом Ньютона имеем:

$$a=F/m$$

$$F=mg$$

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

$$F=mg$$

На основе формулы можно указать простой и практически удобный метод измерения масс тел путём сравнения массы данного тела с эталоном единицы массы.

Отношение масс двух тел равно отношению сил тяжести, действующих на тела:

$$m /m =F /F$$

Закон 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:

$$F=cm/R^2$$

Но поскольку, например, Земля действует на Луну с силой, пропорциональной массе Луны, то и Луна, в соответствии с 3-м законом Ньютона должна действовать на Землю с той же силой. Причём эта сила должна быть пропорциональна массе Земли. 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

$$F=G \cdot m \cdot m /R^2$$

G—гравитационная постоянная.

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

Равенство инертной и гравитационной масс.

Из закона всемирного тяготения видно, что силы пропорциональны массам обоих взаимодействующих тел:

$$F=G \cdot m \cdot m /R^2$$

Но масса тела, которая входит во второй закон Ньютона, определяет инертные свойства тела, т.е. способность приобретать определённое ускорение под действием данной силы.

Эту массу называют инертной массой m_i

Массу, определяющую способность тел притягиваться друг к другу называют гравитационной массой m_g

Опыты показывают, что:

$$m_i = m_g$$

Это равенство означает, что можно говорить просто о массе тела, как о количественной мере как инертных, так и гравитационных его свойств.

Закон всемирного тяготения является одним из самых универсальных законов природы. Он справедлив для любых тел, обладающих массой.

Силы упругости.

1. Деформация и силы упругости.

Силы упругости возникают при деформации тел и исчезают, когда она прекращается.

Под деформацией тела понимают изменение объёма или формы тела.

Значения сил упругости обычно определяются значениями этих деформаций.

2. Закон Гука.

При малых деформациях связь силы упругости тела с его деформацией очень проста. Она была установлена экспериментально английским физиком Робертом Гуком.

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

Рассмотрим это на примере растяжения резинового шнура под действием приложенной к концу шнура силы.

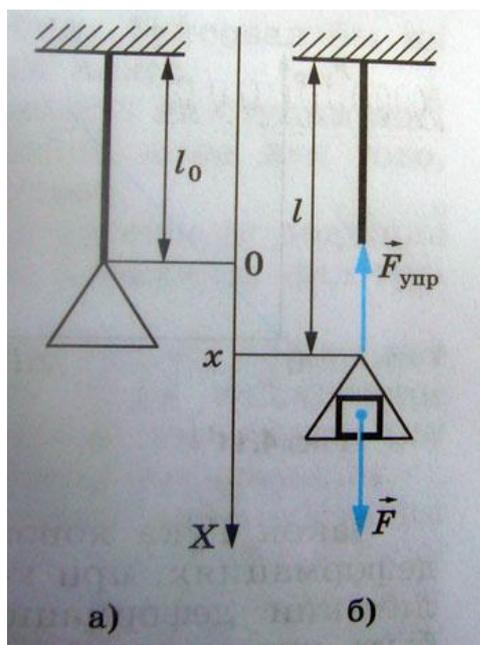


Рис.

$$\Delta l = l - l_0 = x$$

Меняя количество гирек, можно заметить, что сила упругости прямо пропорциональна изменению длины шнура.

В этом и состоит закон Гука.

При упругой деформации растяжения (или сжатия) удлинение тела прямо пропорционально приложенной силе.

$$F = k|\Delta l| = k|x|$$

k —коэффициент упругости или жёсткости.

Учитывая, что координата X и проекция силы упругости деформированного тела F_x на ось OX имеют противоположные знаки, можно записать:

$$F = -kx$$

Эта закономерность хорошо выполняется только при упругих деформациях, при которых удлинение тела X мало.

Силы трения

Силы трения действуют вдоль поверхности тел, при их непосредственном соприкосновении.

Силы трения во всех случаях препятствуют относительному

движению соприкасающихся тел.

Однако силы трения не только тормозят движение тел, в ряде случаев движения тела не может возникнуть без действия сил трения.

Силы трения зависят от состояния трущихся твёрдых поверхностей, а при движении твёрдого тела в воде или воздухе—от относительной скорости движения, от размеров и формы этого тела

Силы трения между соприкасающимися поверхностями твёрдых тел.

1 Трение покоя.

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

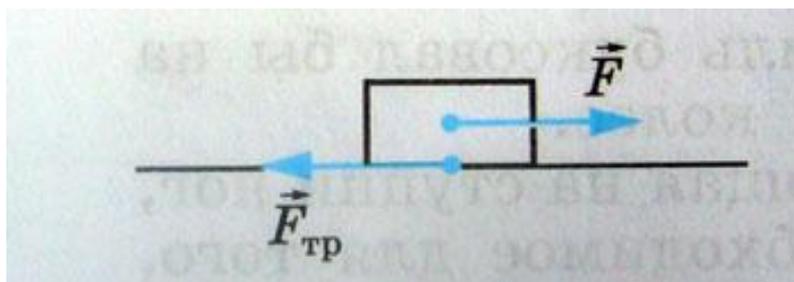


Рис.

Если на тело действует сила F , параллельная поверхности, на которой оно находится и тело при этом остаётся неподвижным, то это означает, что на него действует сила трения покоя $F_{тр}$, равная по модулю и направленная в противоположную сторону силе F .

$$F_{тр} = -F$$

Наибольшее значение силы трения, при котором скольжение ещё не наступает, называется максимальной силой трения покоя.

Для определения максимальной силы трения покоя нагрузим брусок гирей того же веса, что и сам брусок.

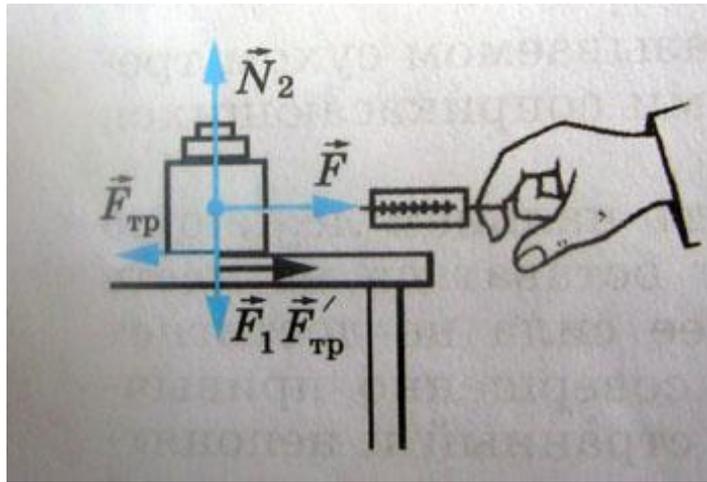


Рис.

При этом сила F_1 увеличится в два раза (сила, действующая на стол перпендикулярно поверхности стола).

Но в соответствии с 3-им законом Ньютона

$$F_1 = -N_2$$

N_2 —сила нормальной реакции опоры, действующей на брусок со стороны стола.

Соответственно и сила N_2 увеличится в два раза.

Измеряя максимальную силу трения покоя, увидим, что она увеличивается во столько раз, во сколько раз увеличилась сила N , т.е.:

-максимальное значение модуля силы трения покоя пропорционально модулю силы нормальной реакции опоры:

$$F_{\text{тр.мах}} = \mu \cdot N$$

где μ --коэффициент трения покоя.

От площади соприкосновения тел максимальная сила трения покоя не зависит.

Трение скольжения.

При скольжении сила трения зависит не только от состояния трущихся поверхностей, но и от относительной скорости движения тел, причём эта зависимость от скорости является довольно сложной.

Опыт показывает, что часто в самом начале скольжения, когда относительная скорость ещё мала, сила трения становится несколько меньше максимальной силы трения покоя.

Лишь затем, по мере увеличения скорости, она растёт и начинает превосходить $F_{\text{тр.мах}}$.

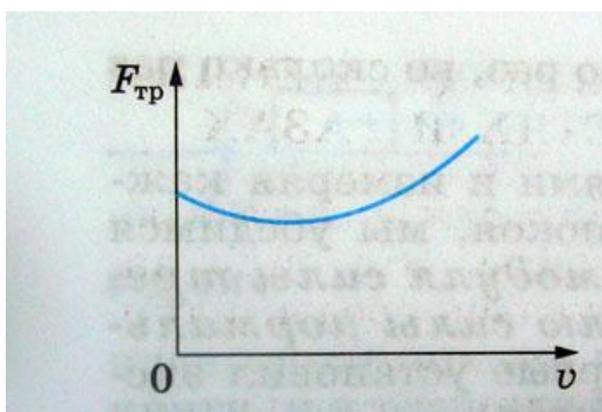


Рис.

При не слишком больших относительных скоростях движения скольжения мало чем отличается от максимальной силы трения покоя.

Поэтому приближённо можно считать её постоянной и равной максимальной силе трения покоя:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{тр.мах}} = \mu \cdot N$$

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

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

Силы сопротивления при движении твёрдых тел в жидкостях и

газах.

При движении твёрдого тела в жидкости или газе на него действует сила сопротивления среды. Эта сила направлена против скорости тела относительно среды и тормозит движение.

Главная особенность силы сопротивления состоит в том, что она появляется только при наличии относительного движения тела и окружающей среды. Сила трения покоя в жидкостях и газах полностью отсутствует:

$$F_{\text{тр.пок.}}=0$$

Пример: (тяжелое тело в воде и на суше).

Модуль силы сопротивления F_c зависит от размеров, формы и состояния поверхности тела, свойств среды (жидкости или газа), в которой тело движется и, наконец, от относительной скорости движения тела и среды.

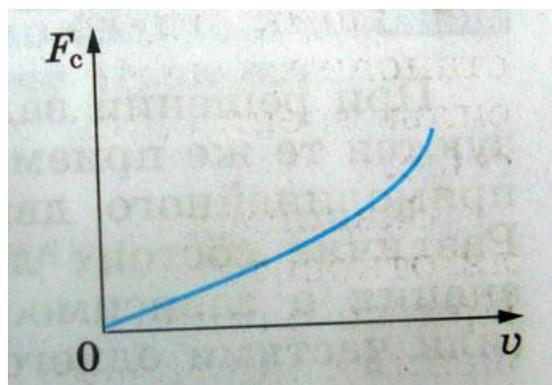


Рис.

С увеличением относительной скорости v_0 сила сопротивления F_c растёт сначала медленно, а затем всё быстрее и быстрее.

При малых скоростях движения силу сопротивления F_c можно считать прямо пропорциональной скорости движения тела относительно среды:

$$F_c=k_1 \cdot v_0$$

k_1 —коэффициент сопротивления, зависящий от формы, размеров, состояния поверхности тела и свойств среды—вязкости.
Коэффициент сопротивления k_1 определяется опытным путём.

При больших скоростях относительного движения сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости:

$$F_c = k_2 \cdot v^2$$

$$k_2 = k_1.$$

Основными особенностями силы сопротивления, действующей на тело, являются:

- отсутствие силы трения покоя;
- зависимость от относительной скорости движения.

Законы сохранения в механике.

Какую бы систему взаимодействующих тел мы не рассматривали, координаты и скорости тел непрерывно изменяются с течением времени.

Но с другой стороны у системы тел, на которые не действуют внешние силы имеется ряд величин, зависящих от координат и скоростей всех тел системы, которые при движении тел не изменяются со временем.

Таковыми сохраняющимися величинами являются:

- импульс (или количество) движения;
- механическая энергия;
- момент импульса (или момент количества движения)

В нашей программе мы будем рассматривать только два закона:

- закон сохранения импульса;
- закон сохранения механической энергии.

1. Закон сохранения импульса.

Импульс материальной точки. Другая формулировка второго

закона Ньютона.

Введём новую физическую величину—импульс материальной точки и дадим другую формулировку второго закона Ньютона
Второй закон Ньютона

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

можно записать в иной форме.

Если на тело (материальную точку) действует постоянная сила, то постоянным будет и ускорение тела

$$\mathbf{A} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1 / \Delta t$$

где v_1 и v_2 —начальное и конечное значения скорости тела.

Подставив это значение ускорения во второй закон Ньютона, получим:

$$m \cdot (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) = \mathbf{F} \Delta t$$

или:

$$m \cdot \mathbf{v}_2 - m \cdot \mathbf{v}_1 = \mathbf{F} \cdot \Delta t \quad 1$$

В этом уравнении появилась новая физическая величина—импульс тела.

Импульсом тела (материальной точки) называется величина, равная произведению массы тела на его скорость:

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$$

Из формулы видно, что импульс тела—векторная величина.

Так как $m > 0$, то импульс тела имеет такое же направление, как и скорость.

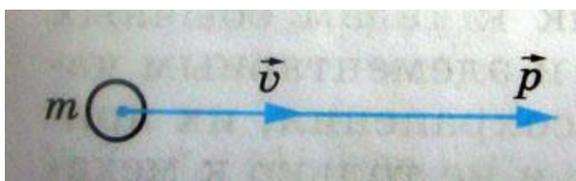


Рис.

Обозначим через $\mathbf{p}_1 = m\mathbf{v}_1$ —импульс тела в начальный момент времени, а через $\mathbf{p}_2 = m\mathbf{v}_2$ —импульс тела в конечный момент времени.

Тогда $\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 = \Delta\mathbf{p}$

Теперь уравнение 1 можно записать

$$\Delta\mathbf{p} = \mathbf{F} \cdot \Delta t \quad 2$$

Так как $\Delta t > 0$, то направления векторов $\Delta\mathbf{p}$ и \mathbf{F} совпадают.

Согласно формуле 2 –изменение импульса тела (материальной точки) пропорционально приложенной к нему силе имеет такое же направление, как и сила.

Именно так был впервые сформулирован второй закон Ньютона.

Произведение силы на время называют импульсом силы.

Поэтому можно сказать, что изменение импульса тела равно импульсу действующей на него силы.

Уравнение 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 её наименование получается из определения этой величины:

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

Закон сохранения импульса.

Закон сохранения импульса является следствием второго и третьего законов Ньютона.

Для простоты будем считать, что система состоит всего из двух тел.

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

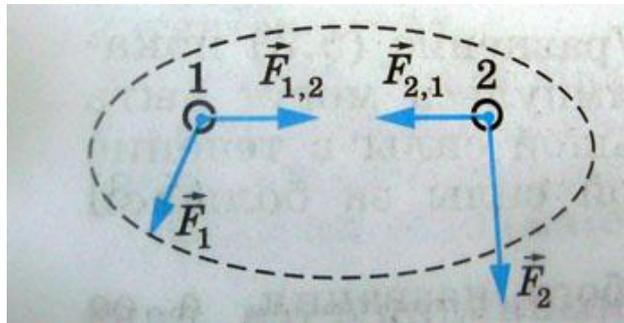


Рис.

Пусть на тела системы действуют внешние силы F_1 и F_2 . Силы, возникающие в результате взаимодействия тел, принадлежащих системе, называют внутренними силами. Обозначим их через $F_{1,2}$ и $F_{2,1}$. По третьему закону Ньютона:

$$\mathbf{F}_{1,2} = -\mathbf{F}_{2,1}$$

Отсюда следует, что сумма внутренних сил всегда равна нулю:

$$\mathbf{F}_{1,2} + \mathbf{F}_{2,1} = \mathbf{0}$$

Вследствие действия сил на тела системы их импульсы не изменяются. Если взаимодействие рассматривается за малый промежуток времени Δt , то для тел системы можно записать второй закон Ньютона в следующем виде:

$$\Delta \mathbf{p}_1 = (\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_{1,2}) \cdot \Delta t$$

$$\Delta \mathbf{p}_2 = (\mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_{2,1}) \cdot \Delta t$$

Сложив эти равенства, получим:

$$\Delta \mathbf{p}_1 + \Delta \mathbf{p}_2 = (\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2) \cdot \Delta t$$

В левой части равенства стоит сумма изменения импульсов всех тел системы, т.е. изменение импульса самой системы, в правой части

импульс внешних сил.

$$\Delta p_{\text{сист.}} = \Delta p_1 + \Delta p_2$$

$$\Delta p_{\text{сист.}} = (F_1 + F_2) \cdot \Delta t = F \cdot \Delta t$$

F —геометрическая сумма всех внешних сил, действующих на тела системы.

Мы доказали очень важное положение:

Импульс системы тел могут изменить только внешние силы, причём изменение импульса системы совпадает по направлению с суммарной внешней силой.

Внутренние силы изменяют импульсы отдельных тел системы, но изменить суммарный импульс системы они не могут.

Уравнение справедливо для любого интервала времени Δt , если сумма внешних сил остаётся постоянной.

Из уравнения вытекает закон сохранения импульса:

Если внешние силы на систему не действуют или их сумма равна нулю, то $\Delta p_{\text{сист.}} = 0$ и импульс системы остаётся неизменным, или, как говорят, сохраняется.

$$P_{\text{сист.}} = m_1 v_1 + m_2 v_2 = \text{const}$$

Закон сохранения энергии.

1. Определение работы.

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

Работой постоянной силы называется физическая величина, равная произведению модулей силы и перемещения, умноженному на косинус угла между ними:

$$A = F \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Выражение показывает, что работа является скалярной величиной и

может иметь положительное или отрицательное значение в зависимости от знака $\cos\alpha$.

Работа A , совершаемая силой, положительна, если Угол α между вектором силы F и вектором перемещения $S < 90^\circ$

При значениях $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ -- работа силы отрицательна.

Если вектор силы F перпендикулярен вектору перемещения S , то $\cos\alpha = 0$ и $A = 0$.

Единица работы — джоуль.

Джоуль равен работе, совершаемой силой 1 Н при перемещении точки её приложения на 1 м в направлении действия силы.

$$1 \text{дж} = 1 \text{н} \cdot \text{м}.$$

Мощность

Мощность N — это физическая величина, равная отношению работы к промежутку времени, в течение которого она совершена

$$N = A/t, \text{ Вт} \quad 1 \text{Вт} = 1 \text{дж/с}.$$

Кинетическая энергия

Установим связь между работой постоянной силы и изменением скорости тела.

Рассмотрим случай, когда на тело массой m действует постоянная сила F (она может быть равнодействующей нескольких сил) и векторы F и перемещение S направлены в одну сторону.

В этом случае:

$$A = F \cdot S$$

Модуль силы по второму закону Ньютона равен:

$$F = m \cdot a$$

А модуль перемещения равен:

$$S = \frac{v_2 - v_1}{2a}$$

Отсюда получаем

$$A = F \cdot S = ma \cdot \frac{v_2 - v_1}{2a}$$

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

Физическая величина, равная :

$$mv^2/2 = E_k$$

называется кинетической энергией.

$$\text{Тогда} \quad A = E_{k2} - E_{k1}$$

Работа равнодействующих сил, приложенных к телу равна изменению кинетической энергии тела.

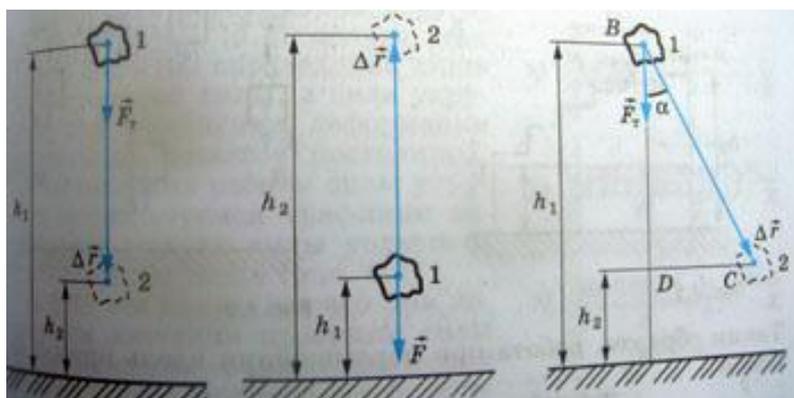
Если начальная скорость движения тела массой m равна нулю, то

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \frac{mv_2^2}{2} - 0 = \frac{mv^2}{2}$$

Потенциальная энергия

Найдём работу, совершаемую силой тяжести F_T при перемещении тела массой m вертикально вниз с высоты h_1 над поверхностью Земли до высоты h_2

$$F_T = mg$$



Так как перемещение совпадает по направлению с вектором силы тяжести, то

$$A = F \cdot S = mg(h_1 - h_2)$$

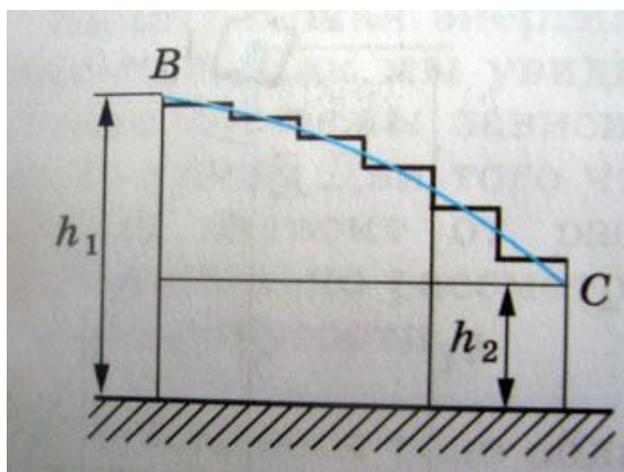
Рассмотрим теперь случай движения тела по наклонной плоскости. При перемещении тела вниз по наклонной плоскости сила тяжести

$$F_T = mg$$

совершает работу: $A = mgS \cdot \cos\alpha = mgh$

где h — высота наклонной плоскости, S — модуль перемещения, равный длине наклонной плоскости.

Движение тела из точки A в точку B по любой траектории можно представить состоящим из перемещений по участкам наклонных плоскостей с различными высотами h_1, h_2, h_3 и т.д.



Работа A силы тяжести на всём пути из точки A в точку B равна

сумме работ на отдельных участках пути

$$A=mgh_1+mgh_2+\dots+mgh_n=mg(h_1+h_2+\dots+h_n)=mg(h_1-h_2)$$

Данное равенство показывает, что работа силы тяжести не зависит от траектории движения тела и всегда равна произведению модуля силы тяжести на разность высот в начальном и конечном положениях.

При движении вниз работа силы тяжести положительна, при движении вверх—отрицательна.

Если после движения по какой-либо траектории тело возвращается в исходную точку, начальное h_1 и конечное h_2 совпадают и работа силы тяжести равна нулю.

Потенциальная энергия тела, на которое действует сила тяжести.

Равенство $A=mgh_1-mgh_2$ можно представить в виде:

$$A=-(mgh_2-mgh_1)$$

Оно показывает, что работа силы тяжести при перемещении тела массой m из точки, расположенной на высоте h_1 в точку, расположенную на высоте h_2 от поверхности Земли, по любой траектории равна изменению некоторой физической величины, равной произведению mgh , взятой с противоположным знаком.

Физическую величину, равную произведению массы тела на модуль ускорения свободного падения и на высоту, на которую поднято тело над поверхностью Земли, называют потенциальной энергией тела E_p .

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

$$A=-(E_{p2}-E_{p1})$$

Значение потенциальной энергии тела, поднятого над Землёй,

зависит от выбора нулевого уровня, т.е. высоты, на которой потенциальная энергия принимается равной нулю.

При таком выборе :

$$E_p = mgh$$

Это равенство показывает, что потенциальная энергия тела, на которое действует сила тяжести, равна работе, совершаемой силой тяжести при перемещении тела на нулевом уровне.

В отличие от кинетической энергии поступательного движения, которая может иметь только лишь положительные значения, потенциальная энергия тела может быть как положительной, так и отрицательной.

Работа силы упругости.

Если к пружине с жёсткостью k прикрепить брусок, растянуть пружину и затем отпустить брусок, то под действием силы упругости растянутой пружины брусок придёт в движение и переместится на некоторое расстояние.

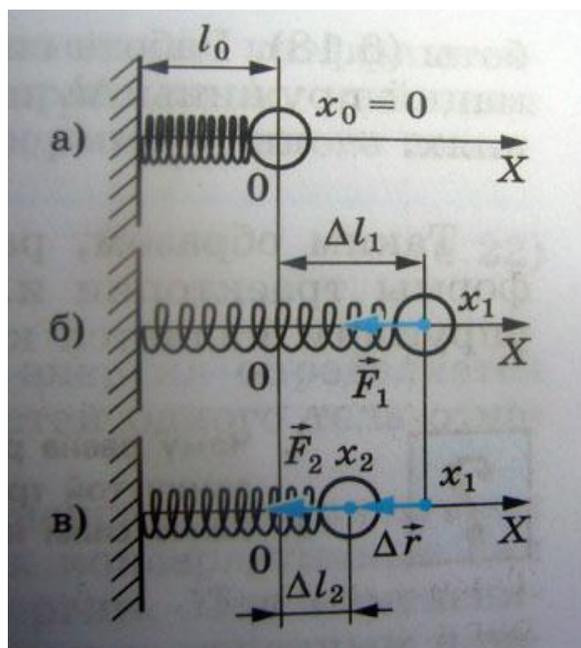


Рис.

Вычислим работу, совершаемую силой упругости при изменении

деформации (удлинения) пружины от некоторого начального значения x_1 до конечного значения x_2 .

$$A = F_{\text{упр. ср.}} \cdot (x_1 - x_2)$$

Так как сила упругости по закону Гука пропорциональна деформации пружины, среднее значение её модуля равно:

$F_{\text{упр. ср.}} = k(x_1 + x_2)/2$, отсюда следует:

$$A = k(x_1 + x_2)/2 \cdot (x_1 - x_2) = k/2 \cdot (x_1^2 - x_2^2) = -(kx_2^2/2 - kx_1^2/2)$$

$$A = -(kx_2^2/2 - kx_1^2/2)$$

Физическая величина, равная половине произведения жёсткости тела на квадрат его деформации, называется потенциальной энергией упруго деформированного тела:

$$E_p = kx^2/2$$

Из формул работы и энергии видно, что работа силы упругости равна изменению потенциальной энергии упруго деформированного тела, взятого с противоположным знаком:

$$A = -(E_{p2} - E_{p1})$$

Если $x_2 = 0$ и $x_1 = x$, то $E_p = A$, т.е. потенциальная энергия упруго деформированного тела равна работе, которую совершает сила упругости при переходе тела в состояние, в котором деформация равна нулю.

Вывод:

Из рассмотренных примеров следует:

--потенциальной энергией не может обладать одно тело, не взаимодействуя с другими телами;

Потенциальная энергия—это энергия взаимодействия тел.

Потенциальная энергия поднятого над Землёй тела—это энергия

взаимодействия тела и Земли гравитационными силами.

Потенциальная энергия упруго деформированного тела—это энергия взаимодействия отдельных частей тела между собой силами упругости.

Закон сохранения энергии в механических процессах.

Мы установили, что потенциальная энергия характеризует взаимодействующие тела, а кинетическая энергия—движущиеся тела.

И потенциальная, и кинетическая энергии изменяются только в результате такого взаимодействия тел, при котором действующие на тела силы совершают работу, отличную от нуля.

Рассмотрим теперь вопрос об изменениях энергии при взаимодействии тел, образующих замкнутую систему.

Если несколько тел взаимодействуют между собой только силами тяготения и силами упругости и никакие внешние силы на них не действуют, то при любых взаимодействиях тел работа сил упругости или сил тяготения равна изменению потенциальной энергии тел, взятому с противоположным знаком:

$$A=-(E_p2-E_p1)$$

Вместе с тем работа тех же сил равна изменению кинетической энергии:

$$A=E_{k2}-E_{k1}$$

Из сравнения равенств видно, что изменения кинетической энергии тел в замкнутой системе равно по абсолютному значению изменению потенциальной энергии системы тел и противоположно ему по знаку:

$$E_{k2}-E_{k1}=- (E_p2-E_p1)$$

или

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$$

Из равенства следует, что сумма кинетической и потенциальной энергии тел, составляющих замкнутую систему и взаимодействующих между собой силами тяготения и силами упругости, остаётся постоянной.

Это утверждение называется законом сохранения энергии в механических процессах.

Сумма кинетической и потенциальной энергии тел называется полной механической энергией.

Для полной механической энергии закон сохранения энергии имеет следующее выражение:

- Полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих силами тяготения и упругости, остаётся постоянной.

Закон сохранения энергии раскрывает физический смысл понятия работы:

-- работа сил тяготения и сил упругости с одной стороны равна увеличению кинетической энергии, а с другой стороны— уменьшению потенциальной энергии;

--следовательно, работа равна энергии, превратившейся из одного вида в другой.

Знание закона сохранения энергии упрощает решение многих задач, имеющих большое значение в практической жизни.

Коэффициент полезного действия тел.

Каждый вид энергии может превратиться полностью в любой другой вид энергии.

Однако во всех реальных энергетических машинах происходят превращения энергии, которые называются потерями энергии.

Чем меньше потерь энергии, тем совершеннее машина.

Степень совершенства машины характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД)

Коэффициентом полезного действия η (эта) машины называется отношение полезно используемой энергии $E_{\text{пол}}$ к энергии E , подводимой к данной машине:

$$\eta = E_{\text{пол}} / E$$

Раздел 2. Молекулярная физика. Тепловые явления.

Тема 2.1. Основы молекулярно-кинетической теории

Макроскопическими телами называются большие тела, состоящие из громадного количества молекул.

Предположение о том, что любое вещество состоит из мельчайших частиц- атомов, было высказано около 2500 лет назад древнегреческими философами Левклиппом и Демокритом.

Различия в свойствах тел объясняются тем, что тела состоят из различных атомов или одинаковые атомы по разному соединены между собой.

Существенный вклад в развитие молекулярно-кинетических представлений сделал в середине 18 века великий русский учёный Михаил Васильевич Ломоносов (1711- 1765гг).

Он объяснил основные свойства газа, предположив, что все молекулы газа движутся беспорядочно, хаотично и при столкновениях отталкиваются друг от друга.

Беспорядочным движением молекул М.В.Ломоносов впервые объяснил природу теплоты.

Так как скорости теплового движения молекул могут быть сколько угодно велики, температура вещества не имеет ограничений сверху. При уменьшении скорости молекул до нуля может быть достигнуто минимально возможное значение температуры вещества.

2.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории.

Молекулярно-кинетической теорией называется учение о строении и свойствах вещества, использующее представление о существовании атомов и молекул как наименьших частиц химического вещества.

Способность газов неограниченно расширяться, упругость газов, жидкостей и твёрдых тел, способность к взаимному

проникновению тел путём диффузии можно объяснить, если принять следующие положения молекулярно-кинетической теории строения вещества:

- вещество состоит из частиц- атомов и молекул;
- эти частицы хаотически движутся;
- частицы взаимодействуют друг с другом.

Движение атомов и молекул, их взаимодействия подчиняются законам механики. Это позволяет использовать законы механики для выяснения свойств тел, состоящих из большого числа хаотически движущихся малых частиц.

2.2. Взаимодействие атомов и молекул.

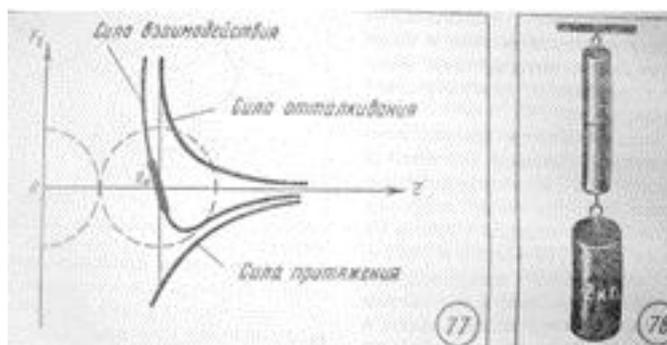


Рис.

При сближении двух атомов или молекул сначала преобладают силы притяжения. Но на некотором расстоянии r между их центрами силы отталкивания возрастают настолько, что становятся равными по модулю силам притяжения.

При дальнейшем сближении силы отталкивания превосходят силы сближения.

Силы притяжения между атомами и молекулами препятствуют растяжению твёрдого тела, силы отталкивания препятствуют его сжатию.

2.3. Тепловое движение молекул.

Молекулы и атомы в твёрдом теле совершают беспорядочные колебания относительно положений, в которых силы притяжения и отталкивания уравновешены.

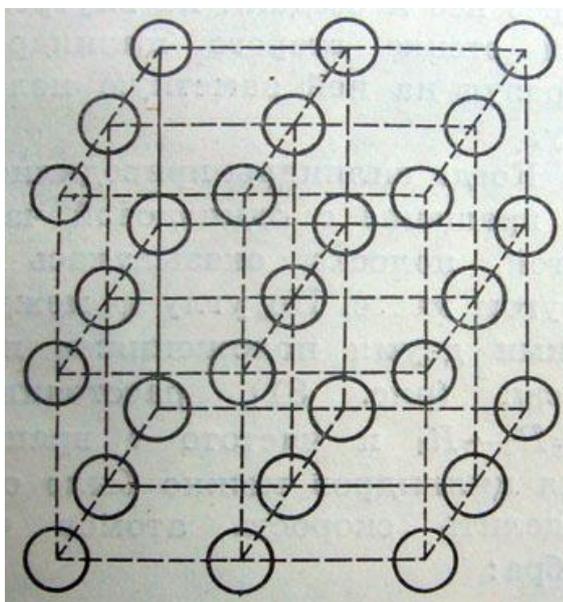


Рис.

В жидкости молекулы не только колеблются около положения равновесия, но и совершают перескоки из одного положения равновесия в соседнее, эти перескоки молекул являются причиной текучести жидкости, её способности принимать форму сосуда.

В газах обычно расстояние между молекулами и атомами в среднем значительно больше размеров молекул. Силы отталкивания на больших расстояниях не действуют,

2.3. Основы молекулярно-кинетической теории.

2.3.1. Оценка размеров молекул и число молекул.

$$V=S \cdot d; \quad d=V/S=0,001\text{см}/6000\text{см}^3=1,7 \cdot 10^{-7}\text{ см}$$

-это размер молекулы оливкового масла.

Размер молекул больше размеров атомов. Диаметр любого атома примерно равен 10^{-10} см.

Число молекул

Подсчитаем примерное количество молекул в капле воды массой 1 г, и следовательно, объёмом 1 см^3 .

Диаметр $d = 3 \cdot 10^{-10}$ см, следовательно каждая молекула воды будет занимать объём

$$V = (3 \cdot 10^{-10} \text{ см})^3$$

Можно найти число молекул в капле, разделив объём капли 1 см^3 на объём, приходящийся на одну молекулу:

$$N = 1 \text{ см}^3 / (3 \cdot 10^{-10} \text{ см})^3 = 3,7 \cdot 10^{23}$$

2.4. Масса молекул. Количество вещества.

Масса молекулы воды.

В одном грамме воды содержится $3,7 \cdot 10^{23}$ молекул. Следовательно масса одной молекулы воды (H_2O) равна:

$$m = m/N = 1 \text{ г} / 3,7 \cdot 10^{23} = 2,7 \cdot 10^{-24} \text{ г}.$$

Относительная молекулярная масса.

Так как массы молекулы очень малы, удобно использовать в расчётах не абсолютные значения масс, а относительные.

По международному соглашению массы всех атомов и молекул сравнивают с $1/12$ массы углерода.

(Сравнение атомов и молекул с $1/12$ массы углерода было принято в 1961 году. Главная причина выбора состоит в том, что углерод входит в огромное количество химических соединений. Множитель $1/12$ введён для того, чтобы относительные массы атомов были близки к целым числам.)

Относительной молекулярной (или атомной) массой вещества M называют отношение массы молекулы (или атома) m данного вещества к $1/12$ массы углерода m_{12} :

$$M_r = m / (1/12 \cdot m_{12})$$

Относительные атомные массы всех химических элементов точно измерены.

Складывая относительные атомные массы элементов, входящих в состав молекулы вещества, можно вычислить молекулярную массу вещества.

Например, относительная молекулярная масса углекислого газа $CO_2 = 44$, так как

$$m_C = 12, m_O = 16$$

Количество вещества и постоянная Авогадро.

Число молекул в любом макроскопическом теле так велико, что в расчётах используют не абсолютное число молекул, а относительное их число. В

В Международной системе единиц количество вещества выражают в **молях**.

1 моль-это количество вещества, в котором содержится столько же молекул или атомов, сколько атомов содержится в углероде массой 0,012кг.

Значит в 1 моле любого вещества содержится одно и то же количество атомов и молекул.

Это число обозначают N_A и называют постоянной Авогадро.

Для определения постоянной Авогадро надо найти массу одного атома углерода.

Приблизённая оценка массы может быть произведена так, как это было сделано для воды(наиболее точные методы основаны на отклонении пучков ионов электромагнитным полем).

Для массы атома углерода измерения дают:

$$m_C = 1,995 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

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

$$N_A = 0,012 \text{ кг/моль} \cdot 1/m = 0,012 \text{ кг/моль} \cdot 1/1,995 \cdot 10^{-26} \text{ кг} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Наименование моль указывает на то что N_A -число атомов в одном моле любого вещества.

Если, например, количество вещества $\nu = 2,5$ моль, то число молекул в теле

$$N = \nu \cdot N_A = 1,5 \cdot 10^{24}$$

Отсюда видно, что количество вещества равно отношению числу молекул N в данном теле к постоянной Авогадро N_A , т.е. к числу молекул в 1 моль вещества:

$$\nu = N/N_A \quad (8.4)$$

Огромное числовое значение постоянной Авогадро показывает, насколько малы микроскопические масштабы по сравнению с макроскопическими.

Молярная масса.

Наряду с относительной молекулярной массой M_r в физике 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:

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

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

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

Заменив N_0 и N в формуле (8.4) их выражениями из формул (8.5) и (8.6), получим:

$$v = m/M \quad (8.7)$$

Количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе.

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

$$N = v \cdot N_0 = N_0 \cdot m/M$$

Броуновское движение.

Броуновское движение—это тепловое движение взвешенных в жидкости (или газе) частиц.

Наблюдение броуновского движения. Английский ботаник Р. Броун (1773—1858) впервые наблюдал это явление в 1827 г., рассматривая в микроскоп взвешенные в воде споры плауна. Эти частички совершают беспорядочное движение. Самым поразительным и непривычным для нас является то, что это движение никогда не прекращается.

Броуновское движение — тепловое движение, и оно не может прекратиться. С увеличением температуры интенсивность его растет. На рисунке 8.3 приведена схема движения броуновских частиц. Положения частиц, отмеченные точками, определены через равные промежутки времени — 30 с. Эти точки соединены прямыми линиями. В действительности траектория частиц гораздо сложнее.

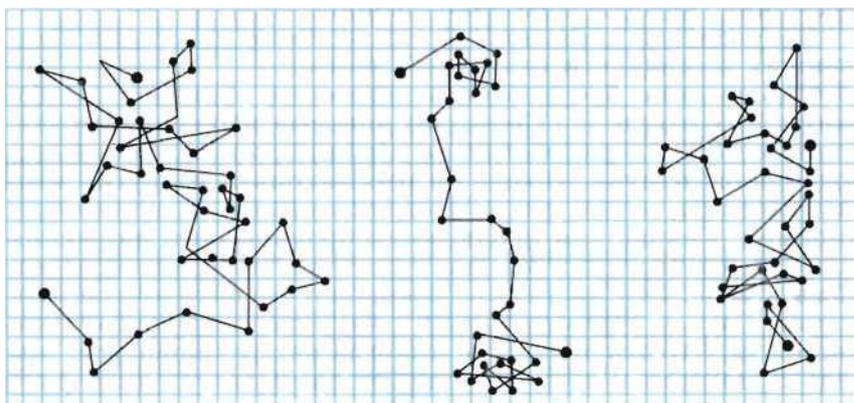


Рис. 8.3

Броуновское движение можно наблюдать и в газе. Его совершают взвешенные в воздухе частицы пыли или дыма.

В настоящее время понятие броуновское движение используется в более широком смысле. Например, броуновским движением является дрожание стрелок чувствительных измерительных приборов, которое происходит из-за теплового движения атомов деталей приборов и окружающей среды.

Объяснить броуновское движение можно только на основе молекулярно-кинетической теории. Причина броуновского движения частицы заключается в том, что удары молекул жидкости о частицу не компенсируют друг друга. На рисунке 8.4 схематически показано положение одной броуновской частицы и ближайших к ней молекул. При беспорядочном движении молекул пере даваемые ими броуновской частице импульсы, например слева и справа,

импульсы, например слева и справа, неодинаковы.

Поэтому отлична от нуля результирующая сила давления молекул жидкости на броуновскую частицу. Эта сила и вызывает изменение движения частицы.

Среднее давление имеет определенное значение как в газе, так и в жидкости. Но всегда происходят незначительные случайные отклонения от этого среднего значения. Чем меньше площадь поверхности тела, тем заметнее -относительные изменения силы давления, действующей на данную площадь. Так, например, если площадку имеет размер порядка нескольких диаметров молекулы, то действующая на нее сила давления меняется скачкообразно от

нуля до некоторого значения при попадании молекулы в эту площадку.

Молекулярно-кинетическая теория броуновского движения была создана в 1905 г. А. Эйнштейном (1879—1955).

Построение теории броуновского движения и ее экспериментальное подтверждение французским физиком Ж. Перреном окончательно завершили победу молекулярно-кинетической теории.

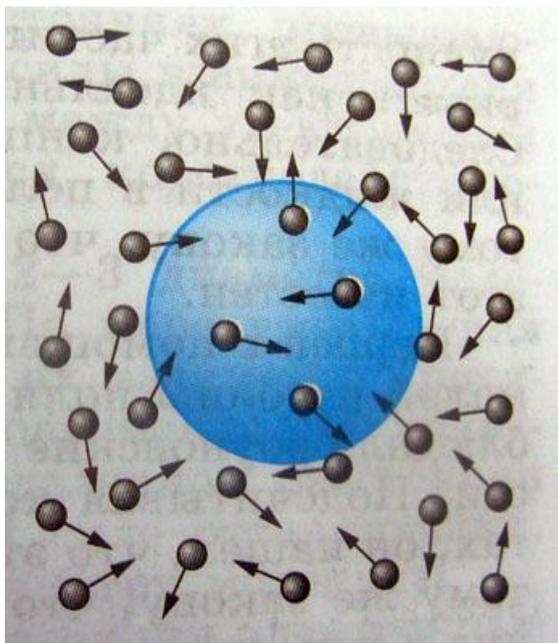


Рис.8.4

Опыты Перрена. Идея опытов Перрена состоит в следующем. Известно, что концентрация молекул газа в атмосфере уменьшается с высотой. Если бы не было теплового движения, то все молекулы упали бы на Землю и атмосфера исчезла бы. Однако если бы не было притяжения к Земле, то за счет теплового движения молекулы покидали бы Землю, так как газ способен к неограниченному расширению. В результате действия этих противоположных факторов устанавливается определенное распределение молекул по высоте, о чем сказано выше, т. е. концентрация молекул довольно быстро уменьшается с высотой. Причем, чем больше масса молекул, тем быстрее с высотой убывает их концентрация. Броуновские частицы участвуют в тепловом движении. Так как их взаимодействие пренебрежимо мало, то совокупность этих частиц в газе или жидкости можно рассматривать как идеальный газ из

очень тяжелых молекул. Следовательно, концентрация броуновских частиц в газе или жидкости в поле тяжести Земли должна убывать по тому же закону, что и концентрация молекул газа. Закон этот известен.

Перрен с помощью микроскопа большого увеличения и малой глубины поля зрения (малой глубины резкости) наблюдал броуновские частицы в очень тонких слоях жидкости. Подсчитывая концентрацию частиц на разных высотах, он нашел, что эта концентрация убывает с высотой по тому же закону, что и концентрация молекул газа. Отличие в том, что за счет большой массы броуновских частиц убывание происходит очень быстро. Более того, подсчет броуновских частиц на разных высотах позволил Перрену определить постоянную Авогадро совершенно новым методом. Значение этой постоянной совпало с известным. Все эти факты свидетельствуют о правильности теории броуновского движения и, соответственно, о том, что броуновские частицы участвуют в тепловом движении молекул.

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.

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 (рис. 8.5). 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 (рис. 8.6).

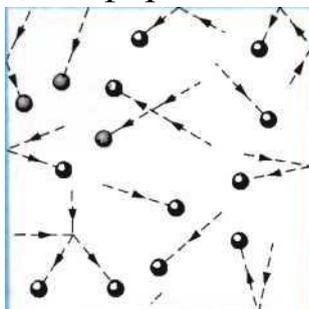


Рис.8.5

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 (рис. 8.7), 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.

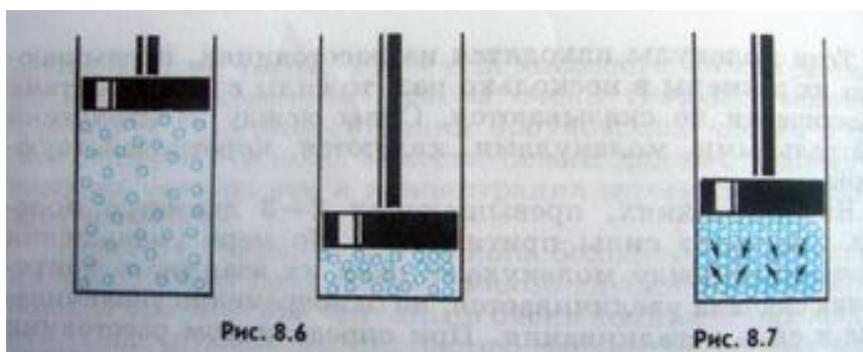


Рис.

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

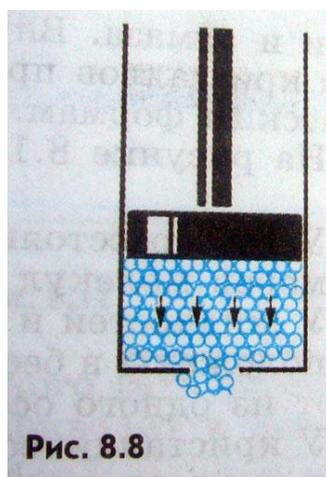
Молекулы жидкости находятся непосредственно друг возле друга.

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 (рис. 8.8).



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.

Если соединить центры положений равновесия атомов или ионов твердого тела, то получится правильная пространственная решетка, называемая кристаллической.

На рисунках 8.9 и 8.10 изображены кристаллические решетки поваренной соли и алмаза. Внутренний порядок в расположении атомов кристаллов приводит к правильным внешним геометрическим формам.

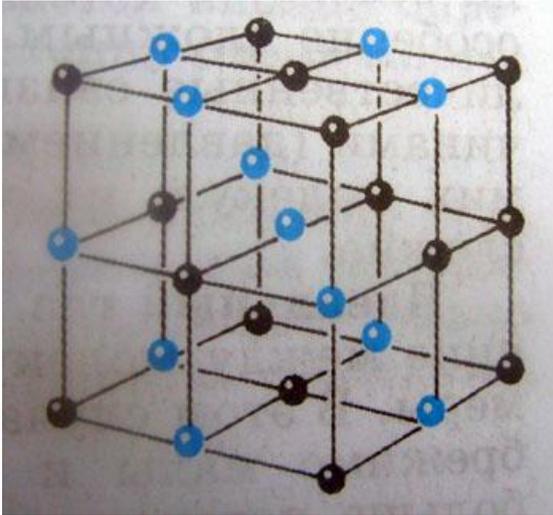


Рис.8.9

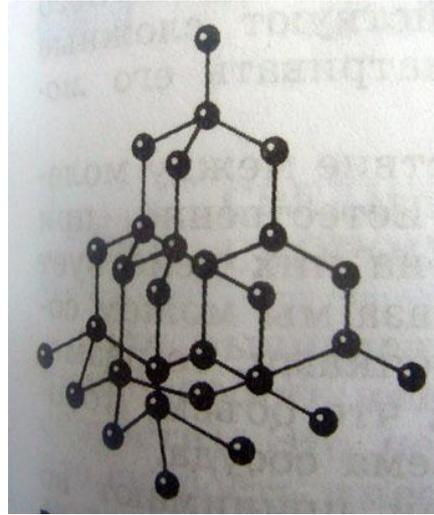


Рис.8.10

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

У жидкостей и твердых тел $l \sim r_0$. 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.

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.

Давление газа в молекулярно-кинетической теории. Пусть газ находится в закрытом сосуде. Манометр показывает давление газа p_0 . Как возникает это давление?

Каждая молекула газа, ударяясь о стенку, в течение малого промежутка времени действует на нее с некоторой силой. В результате беспорядочных ударов о стенку давление быстро меняется со временем примерно так, как показано на рисунке 8.12.

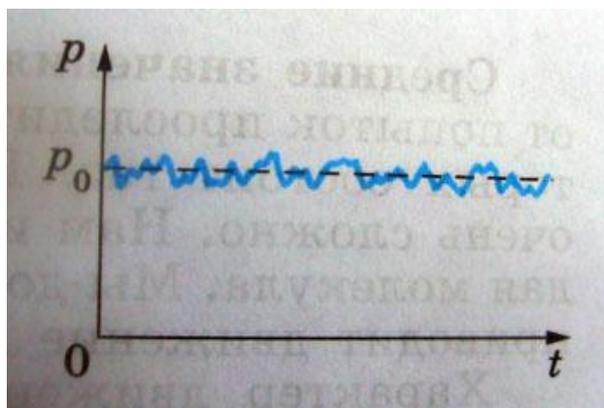


Рис.8.12

Однако действия, вызванные ударами отдельных молекул, настолько слабы, что манометром они не регистрируются. Манометр фиксирует среднюю по времени силу, действующую на каждую единицу площади поверхности его чувствительного элемента — мембраны. Несмотря на небольшие изменения давления, среднее значение давления p_0 практически оказывается вполне определенной величиной, так как ударов о стенку очень много, а массы молекул очень малы.

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. 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. 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:

$$v^2 = v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2 / N$$

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):

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (8.11)$$

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).

Так как направления трех осей Ox, Oy и Oz вследствие беспорядочного движения молекул равноправны, средние значения квадратов проекций скорости равны друг другу:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (8.12)$$

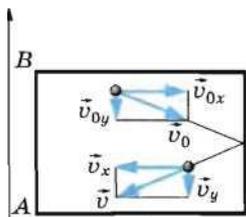
Отсюда вытекает определенная закономерность. Учитывая соотношение (8.12), подставим в формулу (8.11) v_x^2 вместо v_y^2 и v_z^2 . Тогда для среднего квадрата проекции скорости получим:

$$v_x^2 = 1/3 \cdot v^2 \quad (8.13)$$

1

т. е. средний квадрат проекции скорости равен $1/3$ среднего квадрата самой скорости. Множитель $1/3$ появляется вследствие трёхмерности 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

В этом уравнении устанавливается зависимость давления газа от средней кинетической энергии его молекул. После вывода этого уравнения в XIX в. и экспериментального доказательства его справедливости началось быстрое развитие количественной теории, продолжающееся по сегодняшний день.

Доказательство почти любого утверждения в физике, вывод любого уравнения могут быть проделаны с различной степенью строгости и убедительности: очень упрощенно, более или менее строго или же с полной строгостью, доступной современной науке.

Строгий вывод уравнения молекулярно-кинетической теории газов довольно сложен. Поэтому мы ограничимся сильно упрощенным, схематичным выводом" уравнения. Несмотря на все упрощения, результат получится верный.

Вывод основного уравнения.

Вычислим давление газа на стенку CD сосуда ABCD площадью S , перпендикулярную координатной оси OX (рис. 8.13).

При ударе молекулы о стенку ее импульс изменяется:

$\Delta p_x = m_0 (v_x - v_{0x})$. Так как модуль скорости молекул при ударе не меняется, то $\Delta p_x = 2m_0 v_x$. Согласно второму закону Ньютона изменение импульса молекулы равно импульсу подействовавшей на нее силы со стороны стенки сосуда, а согласно третьему закону Ньютона таков же по модулю импульс силы, с которой молекула подействовала на стенку. Следовательно, в результате удара молекулы на стенку подействовала сила, импульс которой равен $2m_0 |v_x$

Молекул много, и каждая из них передает стенке при столкновении такой же импульс. За секунду они передадут стенке импульс $2m_0 |v_x| Z$, где Z — число столкновений всех молекул со стенкой за это время. Число Z , очевидно, прямо пропорционально концентрации молекул, т. е. числу молекул в единице объема. Кроме того, число Z пропорционально скорости молекул $|v_x|$ Чем больше эта скорость,

тем больше молекул за секунду успеет столкнуться со стенкой. Если бы молекулы «стояли на месте», то столкновений их со стенкой не было бы совсем. Кроме того, число столкновений молекул со стенкой пропорционально площади поверхности стенки S : $Z \sim n|v_x|S$. Надо еще учесть, что в среднем только половина всех молекул движется к стенке. Другая половина движется в обратную сторону. Значит, число ударов молекул о стенку за время 1 с ,

$$Z = 1/2n|v_x|S$$

полный импульс, переданный стенке за 1 с , равен:

$$2m_0 |v_x|Z = m_0 n v_x^2 S.$$

Согласно второму закону Ньютона изменение импульса любого тела за единицу времени равно действующей на него силе:

$$F = m_0 n v_x^2 S.$$

Учтем, что не все молекулы имеют одно и то же значение квадрата скорости v_x^2 . В действительности средняя за секунду сила, действующая на стенку, пропорциональна не v_x^2 , а среднему квадрату скорости v_x^2 :

$$F = m_0 n \overline{v_x^2} S.$$

Так как согласно формуле (8.13)

$$\overline{v_x^2} = 1/3 \overline{v^2}, \text{ то } F = 1/3 m_0 n \overline{v^2} S.$$

Таким образом, давление газа на стенку сосуда равно

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

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 E обозначить среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы $E = m\overline{v^2}/2$, то уравнение (8.14) можно записать в виде

$$p = 2/3 \cdot nE \quad (8.15)$$

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

ТЕМПЕРАТУРА. ЭНЕРГИЯ ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ

ТЕМПЕРАТУРА И ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ

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 объём, имеет определенное 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 её измерения был создан прибор, называемый термометром. В его устройстве использовано свойство тел изменять объем при нагревании или охлаждении.

Тепловое равновесие. 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.

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.

Измерение температуры. Термометры. Для измерения температуры можно воспользоваться изменением любой макроскопической величины в зависимости от температуры: объема, давления, электрического сопротивления и т. д.

Чаще всего на практике используют зависимость объема жидкости (ртути или спирта) от температуры. При градуировке термометра обычно за начало отсчета (0) принимают температуру тающего льда; второй постоянной точкой (100) считают температуру кипения воды при нормальном атмосферном давлении (шкала Цельсия). Шкалу между точками 0 и 100 делят на 100 равных частей, называемых градусами (рис. 9.1). Перемещение столбика жидкости на одно деление соответствует изменению температуры на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Так как различные жидкости расширяются при нагревании неодинаково, то установленная таким образом шкала будет до некоторой степени зависеть от свойств данной жидкости, расстояния на шкале между 0 и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ будут различны. Поэтому градусы (расстояние между двумя соседними отметками) спиртового и ртутного термометров будут разными.

Какое же вещество выбрать для того, чтобы избавиться от этой зависимости?

Было замечено, что в отличие от жидкостей все разреженные газы — водород, гелий, кислород — расширяются при нагревании одинаково и одинаково меняют свое давление при изменении температуры. По этой причине в физике для установления

рациональной температурной шкалы используют изменение давления определенного количества разреженного газа при постоянном объеме или изменение объема газа при постоянном давлении. Такую шкалу иногда называют идеальной газовой шкалой температур. При ее установлении удастся избавиться еще от одного существенного недостатка шкалы Цельсия — произвольности выбора начала отсчета, т. е. нулевой температуры. Ведь за начало отсчета вместо температуры таяния льда с тем же успехом можно было бы взять температуру кипения воды. Температура позволяет отличать одно состояние теплового равновесия от другого

§ 65 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

При тепловом равновесии средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул всех газов одинакова. В этом вы скоро убедитесь.

Средняя кинетическая энергия молекул газа при тепловом равновесии. Возьмем сосуд, разделенный пополам перегородкой, проводящей тепло. В одну половину сосуда поместим кислород, а в другую — водород, имеющие разную температуру. Спустя некоторое время газы будут иметь одинаковую температуру, не зависящую от рода газа, т. е. будут находиться в состоянии теплового равновесия. Для определения температуры выясним, какая физическая величина в молекулярно-кинетической теории обладает таким же свойством.

Из курса физики известно, что, чем быстрее движутся молекулы, тем выше температура тела. При нагревании газа в замкнутом сосуде давление газа возрастает. Согласно же основному уравнению молекулярно-кинетической теории (8.15) давление газа p прямо пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения молекул:

$$p = 2/3nE.$$

При тепловом равновесии, если давление газа данной массы и его объем фиксированы, средняя кинетическая энергия молекул газа должна иметь строго определенное значение, как и температура.

Можно предположить, что при тепловом равновесии именно средние кинетические энергии молекул всех газов одинаковы. Конечно, это пока только предположение. Его нужно экспериментально проверить. Практически такую проверку произвести непосредственно невозможно, так как измерить среднюю кинетическую энергию молекул очень трудно. Но с помощью основного уравнения молекулярно-кинетической теории ее можно выразить через макроскопические параметры.

Так как концентрация молекул газа $n = N/V$, то из уравнения (8.15) получаем

$$p = \frac{2N}{3V} \cdot E \quad \text{или} \quad pV/N = \frac{2}{3}E.$$

Давление p и объем V измеряются непосредственно. Число молекул N можно определить, зная массу газа m , постоянную Авогадро N_A и молярную массу M . Согласно формуле (8.8)

$$N = \frac{m}{M} \cdot N_A$$

Если кинетическая энергия E действительно одинакова для всех газов в состоянии теплового равновесия, то и величина p должна быть тоже одинаковой для всех газов. Только опыт может подтвердить или опровергнуть данное предположение.

Газы в состоянии теплового равновесия.

Опыт можно осуществить так. Возьмем несколько сосудов, заполненных различными газами, например водородом, гелием и кислородом. Сосуды имеют определенные объемы и снабжены манометрами. Это позволяет измерить давление в каждом сосуде. Массы газов известны, тем самым известно число молекул в каждом сосуде.

Приведем газы в состояние теплового равновесия. Для этого поместим их в тающий лед и подождем, пока не установится тепловое равновесие и давление газов перестанет меняться (рис. 9.2). После этого можно утверждать, что все газы имеют одинаковую температуру 0°C . Давления газов p , их объемы V и число молекул N различны. pV

Найдем отношение для водорода. Если, к примеру, водород, количество вещества которого равно 1 моль, занимает объем $V_{H_2} = 0,1 \text{ м}^3$, то при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$ давление оказывается равным $p_{H_2} = 2,265 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Отсюда:

$$p_{H_2} \cdot V_{H_2} / N_{H_2} = 2,265 \cdot 10^4 \cdot 0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}^3 / 6,02 \cdot 10^{23} \text{ м}^2 = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} \quad (9.2)$$

Такое же значение отношения произведения давления газа на его объем к числу молекул получается и для всех других газов при температуре тающего льда. Обозначим это отношение через Q_0 . Тогда

$$p_{H_2} \cdot V_{H_2} / N_{H_2} = p_{He} \cdot V_{He} / N_{He} = p_{O_2} \cdot V_{O_2} / N_{O_2}$$

Таким образом, наше предположение оказалось верным. Правда, соотношение (9.3) не является абсолютно точным. При давлениях в сотни атмосфер, когда газы становятся весьма плотными, отношение

$$pV/N$$

перестает быть строго определенным, не зависящим от занимаемых газами объемов. Оно выполняется для газов, когда их можно считать идеальными.

Если же сосуды с газами поместить в кипящую воду при нормальном атмосферном давлении, то упомянутое отношение по-прежнему будет одним и тем же для всех газов, но больше, чем предыдущее. Как показывает опыт,

$$pV/N = Q_{100} = 5,1 \cdot 10^{-21} \quad (9.4)$$

Определение температуры.

Можно, следовательно, утверждать, что величина Q растет с повышением температуры. Более того, Q ни от чего, кроме температуры, не зависит. Ведь для идеальных газов Q не зависит ни от рода газа, ни от его объема или давления, а также от числа частиц в сосуде и формы самого сосуда. Этот опытный факт позволяет рассматривать величину Q как естественную меру температуры, определяемую через другие макроскопические параметры газа. В принципе можно было бы считать температурой



и саму величину Q и измерять температуру в энергетических единицах — джоулях. Однако, во-первых, это неудобно для практического использования (температуре $100\text{ }^\circ\text{C}$ соответствовала бы очень малая величина — порядка 10^{-21} Дж), а во-вторых, и это главное, уже давно принято выражать температуру в градусах.

Мы нашли способ получать значения температуры, не зависящие от свойств газов, которые при этом используются. Пока что температуру мы выразили в энергетических единицах.

АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА. ТЕМПЕРАТУРА — МЕРА СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ

Не все в мире относительно. Так, существует абсолютный нуль температуры. Есть и абсолютная шкала температур. Определим связь между температурой и средней кинетической энергией молекул.

Вместо температуры Q , выражаемой в энергетических единицах, введем температуру, выражаемую в привычных для нас градусах. Будем считать величину Q прямо пропорциональной температуре T , измеряемой в градусах:

$$Q = \kappa T, \quad (9.5)$$

где κ — коэффициент пропорциональности. Определенная равенством (9.5) температура называется абсолютной. Такое название, как мы сейчас увидим, имеет достаточные основания. Учитывая определение (9.5), получим

$$pV/N = \kappa T \quad (9.6)$$

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).

Больцман Людвиг (1844—1906) — великий австрийский физик, один из основоположников молекулярно-кинетической теории. В трудах Больцмана молекулярно-кинетическая теория впервые предстала как логически стройная, последовательная физическая теория. Больцман много сделал для развития и популяризации теории электромагнитного поля Максвелла.

Постоянная Больцмана.

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

Мы знаем значения величины Q при 0 °С и 100 °С (см. формулы (9.2) и (9.4)).

Обозначим абсолютную температуру при 0 °С через T_1 а при 100 °С через T_2 . Тогда согласно формуле (9.5)

$$Q_{100} - Q_0 = k(T_2 - T_1)$$

$$Q_{100} - Q_0 = k \cdot 100 \text{ К} = (5,14 - 3,76) \cdot 10^{21} \text{ Дж.}$$

Отсюда

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

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 Q в энергетических единицах с температурой T в кельвинах. Это одна из наиболее важных постоянных в молекулярно-кинетической теории.

Связь абсолютной шкалы и шкалы Цельсия.

Уравнение $pV/N=kT$ позволяет по известному значению V_0 одного моля газа при температуре 0°C и нормальном давлении $p_0=1,013 \cdot 10^5$ ПА и найденному значению k установить связь между значениями температуры $t^\circ\text{C}$ по шкале Цельсия и температуры T по абсолютной шкале:

$$T=p_0 \cdot V_0 / N_a \cdot k$$

$$T=1,013 \cdot 10^5 \text{ ПА} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/к} = 273\text{К}$$

Мы получили, что температура 0°C по шкале Цельсия соответствует температуре 273К по абсолютной шкале.

Так как единица температуры по абсолютной шкале 1К выбрана равной единице температуры по шкале Цельсия 1°C , то при любой температуре t по Цельсию значение абсолютной температуры T выше на 273° .

$$T=t+273$$

Из уравнения следует, что абсолютный нуль соответствует $273,15^\circ\text{C}$

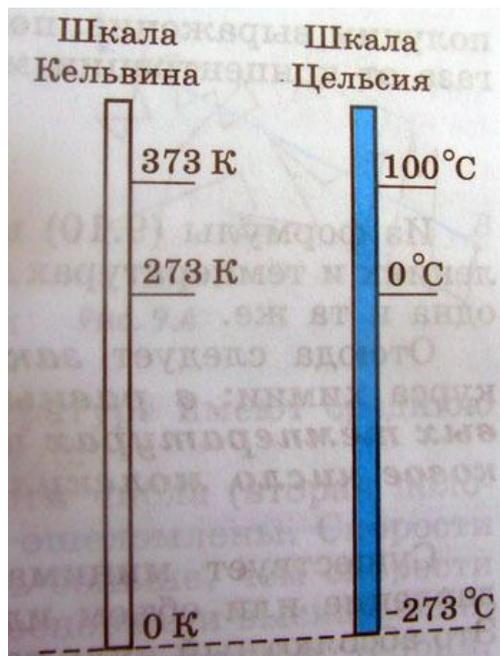


Рис.9.3

Температура — мера средней кинетической энергии молекул.

Из основного уравнения молекулярно—кинетической теории вытекает важнейшее следствие: абсолютная температура есть мера средней кинетической энергии движения молекул.

Левые части уравнений $pV/N=2/3E$ и $pV/N = kT$ одинаковы.

Значит, должны быть равны и их правые части. Отсюда вытекает связь между средней кинетической энергией поступательного движения молекулы и температурой:

$$E = 3/2kT. \quad (9.9)$$

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.

Зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры.

Учитывая, что $N/V=n$, 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.

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

$$E = m_0 v^2 / 2,$$

получим выражение для среднего квадрата скорости:

$$v^2 = 3kT/m_0 \quad (9.11)$$

Квадратный корень из этой величины называется средней квадратичной скоростью:

$$v = \sqrt{3kT/m_0} \quad (9.12)$$

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

Из-за столкновения молекул траектория каждой молекулы представляет собой запутанную ломаную линию (рис. 9.4).

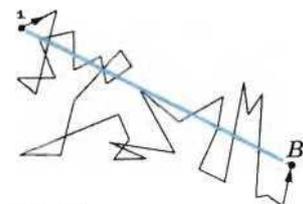


Рис. 9.4

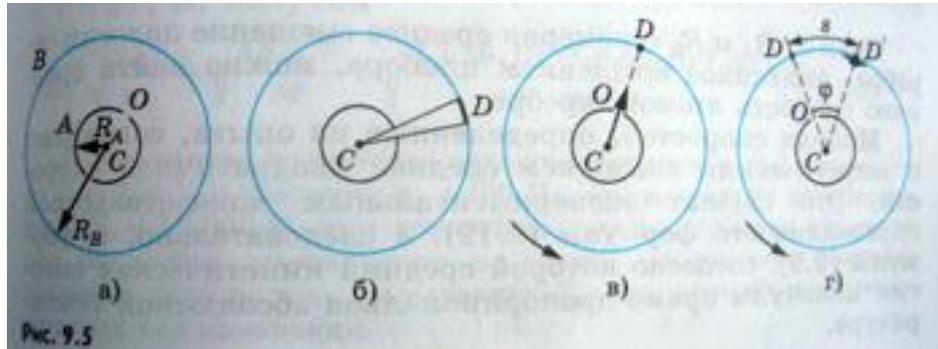
Большие скорости молекула имеет на прямолинейных отрезках ломаной. Перемещение же молекулы в каком-либо направлении в среднем невелико даже за время порядка нескольких минут. Вот и получается, что при перемещении молекулы из точки А в точку В пройденный ею путь оказывается гораздо больше расстояния АВ.

Экспериментальное определение скоростей молекул.

Опыты по определению скоростей молекул доказали справедливость формулы (9.12). Один из опытов был предложен и осуществлен О. Штерном в 1920 г.

Прибор Штерна состоит из двух коаксиальных цилиндров А и В, жестко связанных друг с другом (рис. 9.5, а). Цилиндры могут вращаться с постоянной угловой скоростью. Вдоль оси малого цилиндра натянута тонкая платиновая проволочка С, покрытая слоем серебра. По проволочке пропускают электрический ток. В стенке этого цилиндра имеется узкая щель О. Воздух из цилиндров откачан. Цилиндр В находится при комнатной температуре. Вначале прибор неподвижен. При прохождении тока по нити слой серебра испаряется и внутренний цилиндр заполняется газом из

атомов серебра. Некоторые атомы пролетают через щель O и, достигнув внутренней поверхности цилиндра B , осаждаются на ней. В результате прямо против щели образуется узкая полоска D серебра (рис. 9.5, б).



Затем цилиндры приводят во вращение с большим числом оборотов n в секунду (до 1500 1/с). Теперь за время t , необходимое атому для прохождения пути, равного разности радиусов цилиндров $R_B - R_A$, цилиндры повернутся на некоторый угол ϕ . В результате атомы, движущиеся с постоянной скоростью, попадают на внутреннюю поверхность большого цилиндра не прямо против щели O (рис. 9.5, в), а на некотором расстоянии s от конца радиуса, проходящего через середину щели (рис. 9.5, г): ведь атомы движутся прямолинейно.

Если через v обозначить модуль скорости вращения точек поверхности внешнего цилиндра, то

$$s = vt = 2\pi nR_B t. \quad (9.13)$$

В действительности не все атомы серебра имеют одну и ту же скорость. Поэтому расстояния s для различных атомов будут несколько отличаться. Под s следует понимать расстояние между участками на полосках D и D' с наибольшей концентрацией атомов серебра. Этому расстоянию будет соответствовать средняя скорость атомов, которая равна:

$$v = R_B - R_A / t.$$

Подставляя в эту формулу значение времени t из выражения (9.13), получим

$$v = 2\pi n(R_B - R_A) / s \cdot R_B$$

Зная n , R_A и R_B и измеряя среднее смещение полоски серебра, вызванное вращением прибора, можно найти среднюю скорость атомов серебра.

Модули скоростей, определенные из опыта, совпадают с теоретическим значением средней квадратичной скорости. Это служит экспериментальным доказательством справедливости формулы (9.12), а следовательно, и формулы (9.9), согласно которой средняя кинетическая энергия молекулы прямо пропорциональна абсолютной температуре.

Температура- мера средней кинетической энергии молекул.

Из уравнений $pV/N = 2/3E = \Theta$ и $pV/N = kT$ следует равенство

$$E = 3/2 kT$$

Средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.

Из уравнений

$$P = 2/3nE \quad \text{и} \quad E = 3/2kT$$

Можно получить

$$p = nkT$$

Уравнение показывает, что при одинаковых значениях температуры и концентрации молекул давление любых газов одинаково, независимо от того, из каких молекул они состоят.

Уравнение состояния идеального газа.

Используя зависимость давления идеального газа от его температуры и концентрации молекул

$$p=nkT$$

можно найти связь между основными макроскопическими параметрами газа- объёмом V , его давлением p и температурой T . Концентрация n молекул в газе равна:

$$n=N/V, \quad \text{где } N\text{-число молекул, } V\text{- объём.}$$

Число N можно выразить как произведение количества вещества ν на постоянную Авогадро N_A :

$$N=\nu \cdot N_A \quad n=\nu N_A/V$$

Подставляя в выражение для давления

$$P=\nu \cdot N_A/V \cdot kT=R/V \cdot \nu T$$

Произведение $N_A \cdot k$ называется молярной газовой постоянной R .

$$R=6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/к}=8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{к}$$

Тогда

$$pV=\nu RT$$

Количество вещества $\nu=m/M$, тогда

$$pV=m/M \cdot RT$$

Это уравнение называется уравнением состояния идеального газа.

Изопроцессы в газах.

Уравнение

$$pV=m/M \cdot RT$$

показывает, что возможно одновременное изменение пяти параметров, характеризующих состояние идеального газа.

Однако многие процессы в газах можно рассматривать приближённо как процессы, в которых изменяются лишь два параметра из пяти.

Особую роль в физике и технике играют три процесса:

- изотермический;
- изохорный;
- изобарный.

Изотермический процесс.

Изотермическим процессом называется процесс, протекающий при постоянной температуре T .

Из уравнения состояния идеального газа

$$pV = m/M \cdot RT$$

следует, что при $T = \text{const}$ и неизменных значениях массы газа m и его молярной массы M :

$$pV = \text{const}$$

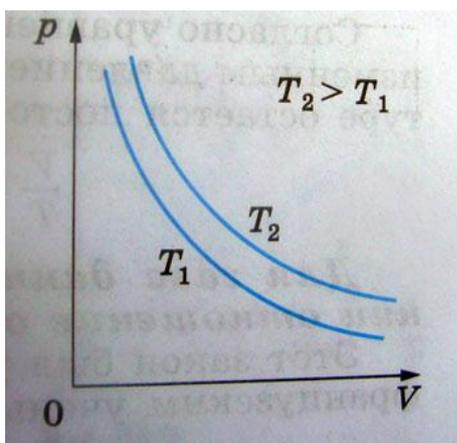


Рис.

Изотермический процесс можно осуществить изменением объёма газа при $T = \text{const}$ (график-изотерма).

Уравнение, устанавливающее связь между давлением и объёмом при $T=\text{const}$ было получено из эксперимента до создания молекулярно-кинетической теории газов в 1662 году английским физиком Робертом Бойлем (1627-1691) и в 1676 году французским физиком Эдмом Мариоттом (1620-1684).

Поэтому это уравнение называют законом Бойля-Мариотта.

Изохорный процесс.

Изохорным процессом называется процесс, протекающий при $V=\text{const}$ и условиях $m=\text{const}$ и $M=\text{const}$.

При этих условиях из уравнения состояния идеального газа для двух значений температуры T_0 и T следует:

$$p_0 \cdot V = m/M \cdot R T_0 \quad \text{и} \quad pV = m/M \cdot RT$$

или

$$p/p_0 = T/T_0 \qquad p = p_0 \cdot T/T_0$$

Если выбрать $T_0 = 273\text{K}$ (0°C), то $1/T_0 = 1/273 \cdot \text{K}$

Обозначив $1/T_0 = 1/273 \text{ K} = \alpha$, получим уравнение для изохорного процесса

$$p = p_0 \alpha T$$

где p - давление газа при абсолютной температуре T ,
 p_0 - давление газа при температуре 0°C , $\alpha = 1/273 \cdot \text{K}$ - температурный коэффициент газа. Экспериментальным путём зависимость давления газа от температуры исследовал французский физик Жак Шарль (1746-1823). Поэтому уравнение называется законом Шарля. Изохорный процесс можно получить нагреванием воздуха при постоянном объёме.

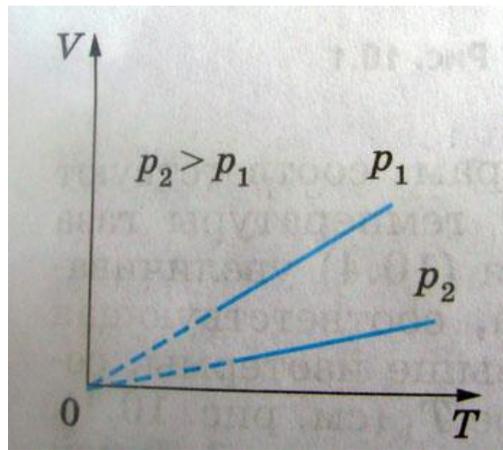


Рис.

Изобарный процесс.

Изобарным процессом называется процесс, протекающий при $p = \text{const}$ и $m = \text{const}$, $M = \text{const}$.

Таким же способом, как это было сделано для изохорного процесса можно получить для изобарного процесса уравнение:

$$V = V_0 \alpha T$$

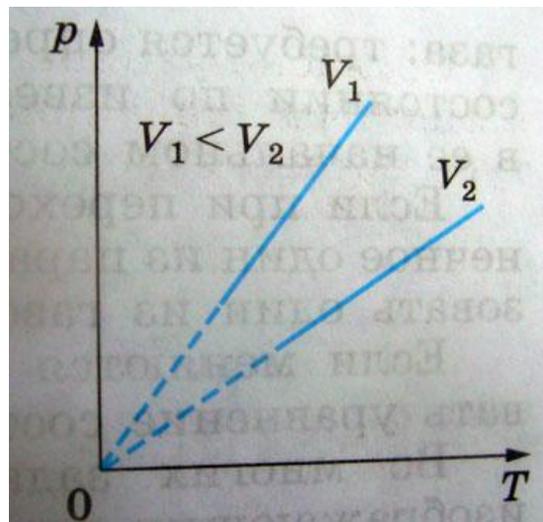


Рис.

Экспериментальное исследование зависимости объёма газа от температуры провёл в 1802 году французский физик Жозеф Гей-

Люссак(1778-1850).
называется законом Гей-Люссака.

Поэтому уравнение

Изобарный процесс происходит, например, при нагревании или охлаждении воздуха в стеклянной колбе, соединённой со стеклянной трубкой, отверстие в которой закрыто небольшим столбом жидкости.

Насыщенный пар и ненасыщенный пар.

Испарение

Неравномерное распределение кинетической энергии теплового движения молекул приводит к тому, что при любой температуре кинетическая энергия некоторых молекул жидкости или твёрдого тела может превышать потенциальную энергию их связи с остальными молекулами.

Испарение- это процесс, при котором с поверхности жидкости или твёрдого тела вылетают молекулы, кинетическая энергия которых превышает потенциальную энергию взаимодействия молекул.

Испарение сопровождается охлаждением жидкости.

Насыщенный и ненасыщенный пар.

Испарение жидкости в закрытом сосуде при неизменной температуре приводит к постепенному увеличению концентрации молекул испаряющего вещества в газообразном состоянии.

Через некоторое время после начала процесса испарения концентрация вещества в газообразном состоянии достигает такого значения, при котором число молекул, возвращающихся в жидкость в единицу времени, становится равным числу молекул, покидающих поверхность жидкости за то же время.

Устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации вещества.

Вещество в газообразном состоянии, находящееся в динамическом равновесии с жидкостью называется насыщенным паром.

Пар, находящийся при давлении ниже давления насыщенного пара, называется ненасыщенным паром, т.е. если пар постепенно сжимают, а превращение его в жидкость не происходит.

$$P=nkT$$

При определённом объёме 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 не сжимали газ, он никогда не превратится в жидкость.

Максимальная температура, при которой пар ещё может превратиться в жидкость, называется критической температурой.

Состояние вещества при температуре выше критической называется газом.

При температуре ниже критической, когда у пара есть возможность в жидкость, -паром.

Каждому веществу соответствует своя критическая температура.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры.

Состояние насыщенного пара приближённо описывается уравнением состояния идеального газа, а его давление определяется формулой:

$$p_{\text{нп}} = nkT$$

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

Однако зависимость $p_{\text{нп}} = f(T)$ не является прямо пропорциональной, как у идеального газа при постоянном объёме.

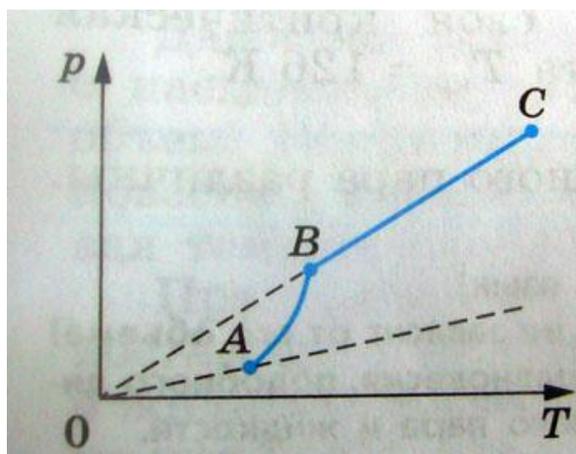


Рис.

С увеличением T давление реального насыщенного пара растёт быстрее, чем давление идеального газа (участок кривой AB).

Почему это происходит?

При нагревании жидкости в закрытом сосуде часть жидкости превращается в пар.

В результате, согласно формуле, давление насыщенного пара растёт не только вследствие увеличения T , но и вследствие увеличения концентрации молекул (плотности) пара.

Главное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара состоит в том, что при изменении температуры пара (или при изменении объёма при постоянной температуре) меняется масса пара. Жидкость частично превращается в пар и 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 объёме будет возрастать прямо пропорционально абсолютной температуре (участок кривой BC).

Кипение.

Процесс испарения может происходить не только с поверхности жидкости, но и внутри жидкости.

Пузырьки пара внутри жидкости расширяются и всплывают на поверхность, если давление насыщенного пара равно внешнему давлению или превышает его.

Этот процесс называется **кипением**.

При понижении внешнего давления температура кипения жидкости понижается, при повышении давления температура кипения повышается.

Влажность воздуха.

Вода занимает около 70,8 % поверхности земного шара. Живые организмы содержат от 50 до 99,7 % воды.

Атмосферный водяной пар влияет на погоду и климат Земли.

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

1. Плотность водяного пара в воздухе называется абсолютной влажностью (кг/м³).

2. Парциальное давление водяного пара.

Атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов и водяного пара. Каждый из газов вносит свой вклад в суммарное давление.

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 мм.рт.ст.

Атмосферное давление определяется суммой парциальных давлений компонентов сухого воздуха(кислород, азот, и т.д.)

3. Относительная влажность

По парциальному давлению водяного пара и абсолютной влажности ещё 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 насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = p/p \cdot 100\%$$

Относительная влажность воздуха обычно меньше 100 %.

Психрометр.

Влажность воздуха измеряют с помощью специальных приборов.

Один из них – психрометр.

Он состоит из двух термометров.

Рис.

Резервуар одного из них остаётся сухим и он показывает температуру воздуха. Резервуар другого окружён полоской ткани, конец которой опущен в воду. Вода испаряется, и благодаря этому термометр охлаждается.

Чем больше относительная влажность, тем менее интенсивно идёт испарение и температура, показываемая термометром, окружённым влажной тканью, ближе к температуре сухого термометра.

При относительной влажности=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.

Внутренняя энергия и работа газа.

Внутренняя энергия макроскопического тела равна сумме кинетических энергий беспорядочного движения всех молекул (атомов) тела и потенциальных энергий взаимодействия всех молекул друг с другом (но не с молекулами других тел).

Вычислить внутреннюю энергию тела, учитывая движение отдельных молекул и их положения относительно друг друга, практически невозможно из-за огромного числа молекул.

Поэтому необходимо уметь определять значение внутренней энергии (или её изменение) в зависимости от макроскопических параметров, которые можно измерить.

Кинетическая энергия беспорядочного движения частиц пропорциональна температуре T , потенциальная энергия взаимодействия зависит от расстояния между частицами тела, т.е. от объёма V тела:

$$U=U(T, V)$$

Одним из основных законов физики, установленных на основе опытов и наблюдений является закон сохранения и превращения энергии.

В термодинамике закон сохранения энергии формулируется следующим образом:

При любых процессах в изолированной термодинамической системе внутренняя энергия остаётся неизменной:

$$U=\text{const} \text{ или } \Delta U=0.$$

Внутренняя энергия идеального газа.

Вычислим внутреннюю энергию идеального газа.

Если потенциальная энергия взаимодействия молекул равна нулю, внутренняя энергия идеального газа равна сумме кинетической энергии хаотического теплового движения всех его молекул:

$$U = NE = \nu N_a \cdot 3/2 \cdot kT$$

Внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Следовательно, при изменении температуры идеального газа обязательно изменяется его внутренняя энергия; если температура постоянная, то внутренняя энергия идеального газа не изменяется. Используя уравнение состояния идеального газа

$$PV = m/M \cdot RT \quad \text{и} \quad 3/2 \cdot m/M \cdot RT$$

можно получить ещё одно уравнение для вычисления внутренней энергии идеального газа:

$$U = 3/2 \cdot PV$$

Таким образом, внутренняя энергия идеального газа прямо пропорциональна произведению давления на объём, занимаемый газом.

Работа в термодинамике.

В механике работа определяется как произведение модуля силы, модуля перемещения точки её приложения и $\cos\alpha$ между ними.

$$A = |\mathbf{F}| \cdot |\mathbf{S}| \cdot \cos\alpha$$

Под действием силы на движущееся тело работа равна изменению его кинетической энергии.

В термодинамике движение тела как целого не рассматривается, речь идёт о перемещении частей макроскопического тела друг относительно друга.

В результате может меняться объём тела, а его скорость остаётся равной нулю.

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

Изменение внутренней энергии при совершении работы.

При сжатии или расширении тела меняется его внутренняя энергия. Причина изменения температуры газа в процессе его сжатия состоит в следующем:

--при упругих соударениях молекул газа изменяется их кинетическая энергия;

--если газ расширяется, скорости молекул уменьшаются, в результате чего газ охлаждается.

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

Вычисление работы.

Вычислим работу в зависимости от изменения объёма на примере газа в цилиндре под поршнем.

Проще вначале вычислить не работу силы F , действующей на газ со стороны внешнего тела (поршня), а работу, которую совершает сила давления газа, действуя на поршень с силой F .

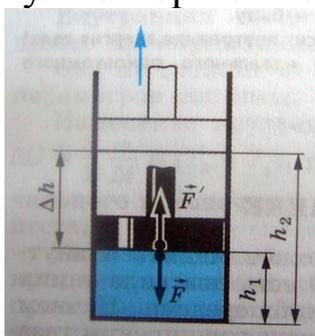


Рис.

Согласно третьему закону Ньютона

$$F = -F'$$

Модуль силы, действующей со стороны газа на поршень, равен:

$$F' = pS$$

где p —давление газа, S —площадь поверхности поршня. Пусть газ расширяется изобарно и поршень смещается в направлении силы F на малое расстояние:

$$\Delta h = h_2 - h_1$$

Так как давление газа постоянно, то работа газа равна:

$$A' = F' \cdot \Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(S h_2 - S h_1)$$

Эту работу можно выразить через изменение объёма газа.

Модель строения твёрдых тел. Механические свойства твёрдых тел.

Внешнее механическое воздействие на тело вызывает смещение атомов из равновесных положений и приводит к изменению формы и объёма тела, т.е. к его деформации.

Самые простые виды деформации:

- растяжение и сжатие.

Растяжение испытывают тросы, струны и др.

Сжатию подвергаются стены и фундаменты зданий.

Изгиб испытывают балки перекрытий.

Деформация и напряжение.

Деформацию сжатия и напряжения можно характеризовать абсолютным удлинением Δl , равным разности длин образца до растяжения l_0 и после него l .

$$\Delta l = l - l_0$$

Абсолютное удлинение Δl при растяжении положительно, а при сжатии - отрицательно.

Отношение абсолютного удлинения Δl к длине l_0 называется относительным удлинением ε

$$\varepsilon = \Delta l / l_0$$

При деформации тела возникают силы упругости.

Физическая величина, равная отношению модуля силы упругости к площади сечения тела, называется механическим напряжением σ

$$\Sigma=F/S ,$$

$$P_p=H/m$$

Принцип действия тепловых двигателей

Тепловые двигатели- это устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую.

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 счёт повышения температуры рабочего тела (газа) на сотни и 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 . В двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах повышение температуры происходит при сгорании топлива внутри самого двигателя. Температуру T_1 называют температурой нагревателя. По мере совершения работы газ теряет энергию и неизбежно охлаждается до некоторой температуры T_2 , которая обычно несколько выше температуры окружающей среды. Её обычно 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 внутреннего сгорания рабочее тело не может отдать всю свою внутреннюю энергию на совершение работы,

Часть теплоты неизбежно передаётся холодильнику (атмосфере) вместе с выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин. Эта часть внутренней энергии теряется.

Тепловой двигатель совершает работу за счёт внутренней энергии рабочего тела.

Причём в этом процессе происходит передача теплоты от более горячих тел (нагревателя) к более холодным (холодильникам).

Принципиальная схема теплового двигателя выглядит следующим образом:

Рис.

Согласно закону сохранения энергии, работа, совершаемая двигателем, равна:

$$A = \Theta_1 - \Theta_2$$

где Θ_1 - количество теплоты, получаемое от нагревателя.

Θ_2 - количество теплоты, отдаваемое холодильнику.

Электродинамика

Электродинамика—это наука о свойствах и закономерностях поведения особого вида материи—электромагнитного поля, осуществляющего взаимодействие между электрически заряженными телами или частицами.

Речь пойдёт о процессах, которые определяются движением и взаимодействием электрически заряженных частиц. Такие взаимодействия называются электромагнитными.

1. Взаимодействие заряженных тел.

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:

$$F=G \cdot m_1 \cdot m_2/R^2$$

С увеличением расстояния между частицами сила тяготения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ними.

Большинство элементарных частиц кроме того, обладают способностью взаимодействовать друг с другом с силой, которая также убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, но эта сила в огромное число раз превосходит силу тяготения:

$F > F_{\text{пр}}$ в 10 раз—для водорода.

Если частицы взаимодействуют друг с другом с силами, которые убывают с увеличением расстояния так же, как и силы всемирного тяготения, но превышают их во много раз, то эти частицы имеют электрический заряд.

Сами частицы называются заряженными.

Бывают частицы без электрического заряда, но не существует электрического заряда без частицы.

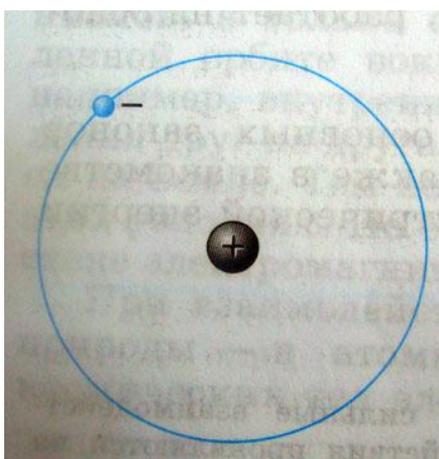


Рис.

Взаимодействия между заряженными частицами носят название электромагнитных.

Электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий, подобно тому, как масса определяет интенсивность гравитационных воздействий.

2. Электрический заряд.

Законы взаимодействия атомов и молекул удаётся понять и объяснить на основе представления о том, что в природе существуют электрические заряды.

Самое простое и повседневное явление, в котором обнаруживается факт существования в природе электрических зарядов—это электризация тел при соприкосновении.

Примеры:

- 1)-полоска бумаги и авторучка;
- 2)-две бумажные полоски и авторучка.

Взаимодействие тел, обнаруженное в этих опытах, называется электромагнитным взаимодействием.

Физическая величина, определяющая взаимодействие, называется электрическим зарядом.

Электрический заряд обозначается буквой « q ».

3. 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 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.

К частицам, не имеющим электрического заряда, относится нейтрон.

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.

4. Заряженные тела. Электризация тел.

Каким образом макроскопические тела приобретают электрический заряд. 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 нём 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. его наэлектризовать, нужно отделить часть отрицательного заряда от связанного с ним положительного. Это можно сделать с помощью трения.

При электризации трением оба тела приобретают заряды, противоположные по знаку, но одинаковые по модулю.

5. Закон сохранения электрического заряда.

Масса тел сохраняется, сохраняется также и электрический заряд. Именно заряд, а не число заряженных частиц.

Опыт с электризацией пластин показывает, что при электризации трением происходит перераспределение имеющихся зарядов между

телами, нейтральными в первый момент. Некоторая часть электронов переходит с одного тела на другое. При этом новые частицы не возникают, а существующие 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:

$$q_1+q_2+q_3+\dots\dots\dots+q_n=\text{const.}$$

Закон сохранения заряда имеет глубокий смысл. Если число заряженных элементарных частиц не меняется, то выполнение закона сохранения заряда очевидно.

Но элементарные частицы могут превращаться в друг друга, рождаться и исчезать. 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 случаях алгебраическая сумма зарядов остаётся одной и той же.

Закон Кулона.

Приступим к изучению количественных законов электромагнитных взаимодействий.

Основной закон электростатики—закон взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел.

Основной закон электростатики был экспериментально установлен Шарлем Кулоном в 1785 году 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 взаимодействие между ними.

В таком случае заряженные тела считаются точечными зарядами.

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 и в вакууме. 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.

Если обозначить модули зарядов через $|q_1|$ и $|q_2|$, а расстояние между ними через r , то закон Кулона можно записать в следующей форме:

$$F = k \cdot |q_1| \cdot |q_2| / r^2$$

Где k —коэффициент пропорциональности, численно равный силе взаимодействия единичных зарядов на расстоянии, равном единице длины.

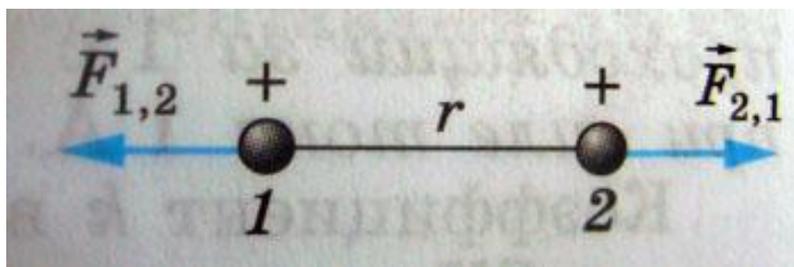


Рис.

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.

Подобные силы называют центральными.

В соответствии с третьим законом Ньютона:

$$F_{1,2} = -F_{2,1}$$

Единица заряда—кулон.

Кулон—это заряд, проходящий за 1с через поперечное сечение проводника при силе тока 1А.

Электрическая постоянная.

Коэффициент пропорциональности k в выражении закона Кулона в системе СИ равен:

$$k=9 \cdot 10^9 \text{ н} \cdot \text{м}^2 / \text{кл}^2$$

Вместо коэффициента k часто используют коэффициент, называемый электрической постоянной ϵ_0

Электрическая постоянная ϵ_0 связана с коэффициентом k выражением:

$$k=1/4\pi \epsilon_0$$

Отсюда следует: $\epsilon_0=1/4\pi k$

$$\epsilon_0=1/4 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ кл}^2 / \text{н} \cdot \text{м}^2 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ кл}^2 / \text{н} \cdot \text{м}^2$$

С использованием электрической постоянной закон Кулона имеет вид:

$$F=1/4\pi \epsilon_0 \cdot |q_1| \cdot |q_2| / r^2$$

Минимальный заряд, существующий в природе—это заряд элементарных частиц.

В единицах СИ модуль этого заряда равен:

$$e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Заряд, который можно сообщить телу, всегда кратен минимальному заряду:

$$q= N \cdot |e|, \text{ где } N\text{—целое число.}$$

Электрическое поле.

Взаимодействие зарядов по закону Кулона является экспериментально установленным фактом. Однако математическое выражение закона взаимодействия зарядов не раскрывает физической картины самого процесса взаимодействия, не отвечает на вопрос, каким путём осуществляется действие заряда q_1 на заряд q_2 .

Возможный ответ на этот вопрос давала теория дальнего действия, которая утверждала, что электрические заряды обладают способностью действовать друг на друга на расстоянии.

Теория ближнего действия, созданная на основе работ английского физика Майкла Фарадея (1791-1867г.г.), объясняет взаимодействие электрических зарядов тем, что вокруг каждого электрического заряда существует электрическое поле.

Электрическое поле заряда—материальный объект, оно непрерывно в пространстве и способно действовать на другие электрические заряды.

Согласно представлениям теории ближнего действия, взаимодействие электрических зарядов q_1 и q_2 есть результат действия поля заряда q_1 на заряд q_2 и поля заряда q_2 на заряд q_1 .

Количественное выражение электростатического взаимодействия в теории дальнего действия и в теории ближнего действия имеет тот же вид (закон Кулона).

Тот факт, что электрическое поле объективно существует, что оно материально, доказывается опытами с ускоренно движущимися зарядами.

Пока электрические заряды q_1 и q_2 неподвижны и находятся в точках А и В, на заряд q_2 со стороны заряда q_1 действует сила $F_э$, направленная вдоль прямой АВ.

Если в некоторый момент времени t_1 заряд q_1 начнёт двигаться из точки А в точку С, модуль и направление силы $F_э$, действующей на заряд q_2 должны измениться.

Согласно представлениям теории дальнего действия, эти изменения должны происходить мгновенно, т.е. в любой момент времени сила $F_э$ должна быть направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, и модуль силы $F_э$ должен определяться по закону Кулона.

Однако в действительности наблюдается другая картина. Если в некоторый момент времени t заряд q_1 выходит из состояния покоя и движется ускоренно, то изменение силы $F_э$, действующей со стороны заряда q_1 на заряд q_2 наблюдается лишь через интервал времени Δt , определяемый выражением:

$$\Delta t = l/c;$$

где l —расстояние между зарядами;

c —скорость света, равная 300000 км/с

Запаздывание изменений взаимодействия электрических зарядов при их ускоренном движении доказывает справедливость теории близкого действия, т.е. существования электрического поля как материального объекта, способного действовать на электрические заряды.

Напряжённость электрического поля.

Недостаточно утверждать, что электрическое поле существует.

Надо ввести количественную характеристику поля.

Если поочерёдно 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 создаётся точечным зарядом q_1 . Тогда согласно закону Кулона

$$F = k \cdot |q_1| \cdot |q_2| / r^2$$

на заряд q_2 действует сила, пропорциональная заряду q_1 .

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 напряжённостью электрического поля.

Подобно силе, напряжённость поля—векторная величина E . Если помещённый в поле заряд обозначить через q вместо q_2 , то напряжённость будет равна:

$$E=F/q$$

Напряжённость поля в данной точке равна отношению силы, с которой поле действует на точечный заряд, помещённый в эту точку, к этому заряду.

Отсюда сила, действующая на заряд q со стороны электрического поля, равна:

$$F=q \cdot E$$

Направление вектора E совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд.

Напряжённость поля точечного заряда.

Найдём напряжённость электрического поля, создаваемого точечным зарядом q_0 . По закону Кулона этот заряд будет действовать на положительный заряд q с силой, равной

$$F=k \cdot |q_0| \cdot q/r^2$$

Модуль напряжённости поля точечного заряда q_0 на расстоянии r от него равен:

$$\mathbf{E}=\mathbf{F}/q=k\cdot|q_0|/r^2$$

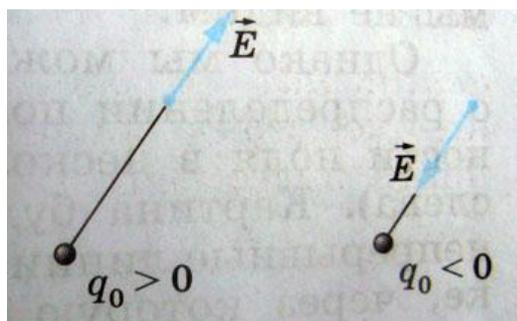


Рис.

Вектор напряжённости в любой точке электрического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд и совпадает с силой, действующей на точечный заряд, помещённый в данную точку.

Принцип суперпозиции полей.

Если на тело действует несколько сил, то согласно законам механики результирующая сила равна геометрической сумме этих сил:

$$\mathbf{F}=\mathbf{F}_1+\mathbf{F}_2+\mathbf{F}_3+\dots\dots\dots\mathbf{F}_n$$

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. Это означает, что напряжённости полей складываются геометрически.

В этом состоит принцип суперпозиции полей, который формулируется следующим образом:

--если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, напряжённости которых E_1 , E_2 , E_3 , и т.д., то результирующая напряжённость поля в этой точке равна геометрической сумме напряжённостей этих полей:

$$\mathbf{E}=\mathbf{E}_1+\mathbf{E}_2+\mathbf{E}_3+\dots+\mathbf{E}_n$$

причём напряжённость поля, создаваемая отдельным зарядом, определяется так, как будто других зарядов, создающих поле, не существует.

Благодаря принципу суперпозиции для нахождения напряжённости поля системы заряженных частиц в любой точке достаточно знать выражение для напряжённости поля точечного заряда.

$$\mathbf{E}=\mathbf{F}/q=\mathbf{k}\cdot|q_0|/r^2$$

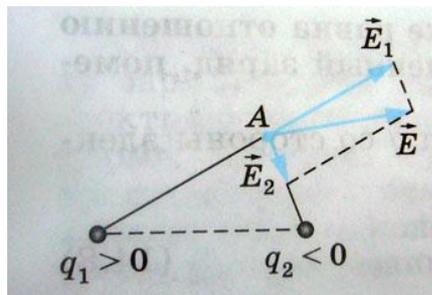


Рис.

На рисунке показано как определяется напряжённость поля \mathbf{E} в точке A , создаваемая 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 напряжённость поля, созданного зарядами, а затем по известной напряжённости определяют силы.

Потенциальная энергия заряженного тела

Заряженные тела притягивают или отталкивают друг друга.

Из механики известно, что система, способная совершить работу благодаря взаимодействию тел друг с другом, обладают потенциальной энергией.

Значит, система заряженных тел обладает потенциальной энергией, называемой электростатической или электрической.

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. Поэтому можно утверждать, что заряженное тело в электрическом поле обладает энергией. Найдём потенциальную энергию заряда в однородном электрическом поле.

Работа при перемещении заряда в однородном электрическом поле.

Однородное поле создают большие металлические пластины, имеющие заряды противоположного знака. Это поле действует на заряд q с постоянной силой:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

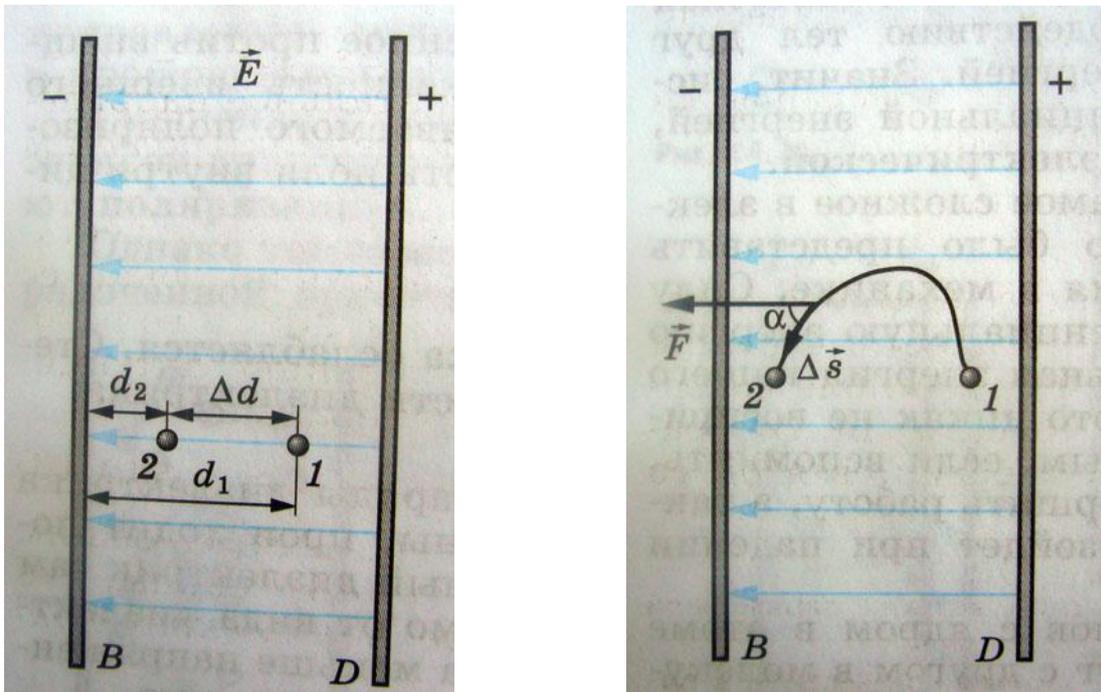


Рис.

Пусть пластины расположены вертикально, левая пластина В заряжена отрицательно, а правая Д—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 неё. Точки 1 и 2 лежат на одной силовой линии. Электрическое поле при перемещении заряда совершит положительную работу:

$$A = q \cdot E \cdot (d_1 - d_2) = q \cdot E \cdot \Delta d$$

Эта работа не зависит от формы траектории

$$\Delta A = qE |\Delta S| \cdot \cos \alpha, \quad \text{где } |\Delta S| \cdot \cos \alpha = \Delta d$$

Суммируя работу на малых перемещениях, получим:

$$A = qE \Delta d$$

Потенциальная энергия.

Поскольку работа электростатической силы не зависит от формы траектории точки её приложения, эта сила является консервативной, и её работа равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:

$$A = -(W_{п2} - W_{п1}) = -\Delta W_{п}$$

$$A = qEd$$

$$W_{п} = qEd$$

Формула энергии электростатического поля подобна формуле

$$W_{п} = mgh$$

для потенциальной энергии тела. Но заряд в отличие от массы может быть как положительным, так и отрицательным.

Если поле совершает положительную работу, то потенциальная энергия заряженного тела уменьшается: $\Delta W_{п} < 0$

Одновременно, согласно закону сохранения энергии, растёт его кинетическая энергия.

И, наоборот, если работа отрицательна, например, при движении положительно заряженной частицы в направлении, противоположном направлению вектора напряжённости поля E , то $\Delta W_{п} > 0$ —потенциальная энергия растёт, а кинетическая энергия уменьшается.

На замкнутой траектории, когда заряд возвращается в начальную точку, работа поля равна нулю:

$$A = -\Delta W_{п} = -(W_{п1} - W_{п2}) = 0$$

Потенциал поля.

В одной точке электростатического поля разные заряды могут обладать различной потенциальной энергией, но отношение

потенциальной энергии $W_{п}$ к заряду q для данной точки поля оказывается величиной постоянной.

Эту величину принимают за энергетическую характеристику данной точки поля.

Физическая величина, равная отношению потенциальной энергии электрического заряда в электрическом поле к заряду, называется потенциалом электрического поля ϕ

$$\phi = W_{п}/q$$

Отсюда потенциальная энергия $W_{п}$ заряда в электростатическом поле равна произведению заряда q на потенциал ϕ электрического поля в данной точке:

$$W_{п} = q \cdot \phi$$

Значение потенциальной энергии электрического заряда в данной точке электрического поля определяется не только характеристиками электрического поля, но и знаком заряда, помещённого в данную точку поля, и выбором нулевого уровня отсчёта потенциальной энергии.

Потенциал – величина скалярная. Если в некоторой точке пространства двумя зарядами одновременно созданы электрические поля с потенциалами ϕ_1 и ϕ_2 , то потенциал ϕ двух электрических полей равен алгебраической сумме потенциалов ϕ_1 и ϕ_2

$$\phi = \phi_1 + \phi_2$$

Аналогичным способом можно найти потенциал электрического поля, созданного любым числом электрических зарядов.

Разность потенциалов.

Мерой изменения энергии при взаимодействиях тел является работа.

При перемещении электрического заряда q работа A сил электростатического поля равна изменению потенциальной энергии

$\Delta W_{\text{п}}$ заряда, взятому с противоположным знаком, поэтому получим:

$$A = -\Delta W_{\text{п}} = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q\varphi_1 - q\varphi_2$$

$$A = qU$$

Где $U = \varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов, т.е. разность значений потенциала в начальной и конечной точках траектории.

Разность потенциалов называют также напряжением:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = A/q$$

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении положительного заряда из начальной точки в конечную к величине этого заряда.

Единица разности потенциалов.

Единицу разности потенциалов устанавливают с помощью формулы:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = A/q$$

Разность потенциалов между двумя точками численно равна единице, если при перемещении заряд в 1 Кл из одной точки в другую электрического поля совершает работу в 1 Дж.

Эту единицу называют вольт (В).

$$1\text{В} = 1\text{дж}/1\text{кл.}$$

Проводники в электрическом поле.

По электрическим свойствам тела можно разделить на проводники и диэлектрики.

Проводниками называют тела, через которые электрические заряды могут переходить от заряженного тела к незаряженному.

Способность проводников пропускать через себя электрические заряды объясняется наличием в них свободных носителей заряда

Примерами проводников могут служить металлические тела в твёрдом и жидком состоянии, жидкие растворы электролитов.

Диэлектриками или изоляторами называются такие тела, через которые электрические заряды не могут переходить от заряженного тела к незаряженному.

К диэлектрикам, например, относят воздух и стекло, плексиглас и эбонит, сухое дерево и бумагу.

Проводники.

Одной из особенностей проводников является то, что при равновесии зарядов на поверхности проводников электрическое поле внутри них отсутствует.

Чем это объясняется?

Дело в том, что в проводниках имеются свободные электрические заряды. В металлах, например, носителями таких зарядов являются электроны, потерявшие связь со своими атомами. Их принято называть свободными электронами.

Свободные электроны в металлическом проводнике, помещённом в однородное поле, под действием сил поля будут перемещаться в направлении, противоположном напряжённости поля.

На рисунке изображён проводник ABCD, помещённый в однородное поле, напряжённость которого направлена слева направо.

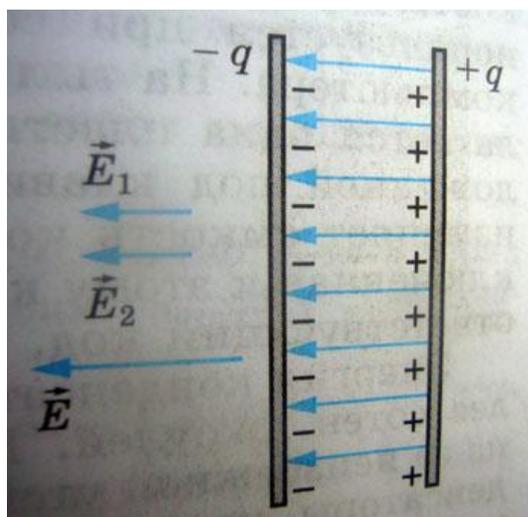


Рис.

На поверхности AD проводника появляется избыточный отрицательный заряд, а на другой, BC—избыточный положительный заряд.

Таким образом, проводник, помещённый в электрическое поле, электризуется.

Заряды, появляющиеся на поверхности проводника, создадут внутри проводника добавочное электрическое поле. Силовые линии этого поля изображены пунктиром;--они направлены противоположно силовым линиям основного поля.

Напряжённость результирующего поля в проводнике ослабится, т.е. уменьшится сила, действующая на свободные электроны и вызывающая их движение. Движение зарядов в проводнике прекратится когда напряжённость результирующего поля внутри проводника окажется равной нулю.

Внутри проводника при равновесии зарядов не только напряжённость поля равна нулю, равен нулю и заряд. Весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности.

Диэлектрики в электрическом поле.

В отличие от проводников в диэлектриках почти не существует свободных зарядов.

Внутри атомов и молекул диэлектриков отрицательно и положительно заряженные частицы связаны между собой

электрическими силами, но не абсолютно жёстко, а могут в известной мере смещаться под действием приложенных к ним сил. Отрицательные и положительные заряды каждой молекулы одинаковы, поэтому любая молекула в целом не заряжена. В любой части объёма диэлектрика общий положительный заряд равен отрицательному заряду и результирующее действие этих зарядов равно нулю.

Если поместить диэлектрик в электрическое поле, то на положительные и отрицательные заряды молекул его начнут действовать противоположно направленные силы.

Под действием этих сил заряды каждой молекулы сместятся, причём это смещение будет происходить по направлению напряжённости поля

Рис.

Силы будут растягивать молекулы и ориентировать их вдоль силовых линий.

В результате молекулы расположатся упорядоченно (см. рис.).

И в этом случае в любой части диэлектрика суммарный электрический заряд будет равен нулю. Но на поверхностях диэлектрика, ограничивающих его, появятся заряды; с одной стороны—положительные, с другой—отрицательные.

Процесс смещения зарядов в диэлектрике, помещённом в электрическое поле, называется поляризацией, а сам диэлектрик в этом состоянии—поляризованным.

Поляризация диэлектрика несколько напоминает электризацию проводника через влияние. Однако между этими явлениями существует глубокое различие.

В проводниках электризация обуславливается наличием в них свободных зарядов. Если разделить в электрическом поле проводник, заряженный через влияние, то обе части проводника

окажутся заряженными противоположно. Заряды остаются на проводнике и после удаления поля.

Иначе обстоит дело в случае диэлектрика. Если разделить диэлектрик в электрическом поле на две части, то на вновь образованных поверхностях обеих частей появятся заряды обоих знаков: на одной стороне –положительные, на другой—отрицательные. (см. рис.).

Рис.

Заряды, появляющиеся на поверхности поляризованного диэлектрика, называются связанными зарядами.

То обстоятельство, что в проводниках имеются свободные заряды, а в диэлектриках заряды связаны, обуславливает различие в действии на них электрического поля.

Диэлектрическая проницаемость.

Степень поляризуемости вещества характеризуется величиной, которая называется диэлектрической проницаемостью вещества.

Рис.

Допустим, что напряжённость однородного поля между двумя заряженными пластинами в вакууме равна E_0 .

Заполним промежуток между этими пластинами каким-либо диэлектриком. Электрические заряды, появившиеся на границе диэлектрика с проводником вследствие поляризации его, нейтрализуют действие части зарядов на пластинах. В результате

поле между пластинами изменяется. Напряжённость E этого поля становится меньше напряжённости E_0 .

Опыт показывает, что если последовательно заполнять промежуток между пластинами разными диэлектриками, то величины напряжённости оказываются разными.

Поэтому по величине отношения напряженностей полей между пластинами без диэлектрика E_0 и с диэлектриком E можно судить о поляризуемости диэлектрика, т.е. о его диэлектрической проницаемости.

Эту величину принято обозначать греческой буквой ϵ (эпсилон)

$$\epsilon = E_0 / E$$

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз напряжённость поля данных зарядов в диэлектрике (однородном) будет меньше, чем в вакууме.

Таблица диэлектрических проницаемостей некоторых веществ.

Воздух—1,0006	Фарфор--7
Парафин--2	Стекло—4-7
Плексиглас, стекло—3-4	Слюда—4-5
Эбонит--4	Вода—81

На практике диэлектрическую проницаемость воздуха принимают за единицу.

Электрическая ёмкость.

Выясним важный для практики вопрос: при каком условии можно накопить на проводниках большой электрический заряд.

При электризации двух проводников, один из которых 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 напряжённости) диэлектрик 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.

Введём физическую величину, характеризующую способность двух проводников накапливать электрический заряд. Эту величину называют ёмкостью.

Напряжение U между двумя проводниками пропорционально электрическим зарядам, которые находятся на проводниках (на одном $+q$, на другом $-q$).

Действительно, если заряды удвоить, то напряжённость электрического поля станет в два раза больше, следовательно в два раза увеличится и работа, совершаемая полем при перемещении заряда, т.е. в два раза увеличится и напряжение.

Поэтому отношение заряда q одного из проводников (на другом находится такой же по модулю заряд) к разности потенциалов между этими проводниками не зависит от заряда. Оно определяется геометрическими размерами проводников, их формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды.

Это позволяет ввести понятие ёмкости двух проводников.

Ёмкостью двух проводников называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними.

$$C=q/U$$

Чем меньше напряжение U между проводниками при сообщении им зарядов $+q$ и $-q$, тем больше ёмкость проводников.

На проводниках можно накопить большие заряды, не вызывая пробоя диэлектрика.

Но сама ёмкость не зависит ни от сообщённых проводникам зарядов, ни от возникающего между ними напряжения.

Единица ёмкости.

Формула позволяет ввести единицу ёмкости:

$$C=q/U$$

Ёмкость двух проводников численно равна единице, если при сообщении им зарядов +1кл и -1кл между ними возникает разность потенциалов 1В.

Эту единицу называют фарад (Ф).

$$1\text{Ф}=1\text{кл}/1\text{В}.$$

Из-за того, что заряд в 1кл очень велик, ёмкость 1Ф оказывается очень большой. Поэтому на практике часто используют доли этой единицы:

микрофарад (мкФ)—10⁻⁶ Ф
пикофарад (пФ) 10⁻¹² Ф.

Конденсаторы.

Конденсатор-это система из двух проводников (обкладок), разделённых слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников.

Рис.

Простейший плоский конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга.

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 всё электрическое поле сосредоточено внутри конденсатора и однородно.

Для зарядки конденсатора нужно присоединить его обкладки к полюсам источника напряжения.

Под зарядом конденсатора понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Ёмкость конденсатора определяется формулой:

$$C=q/U.$$

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 накопить:

$$q \propto S.$$

С другой стороны напряжение между пластинами согласно формуле:

$$E= U/d$$

пропорционально расстоянию d между ними.

Поэтому ёмкость

$$C=q/U \propto S/d$$

Кроме того, ёмкость конденсатора зависит от свойств диэлектрика между пластинами. Так как диэлектрик ослабляет поле, то при наличии диэлектрика ёмкость увеличивается.

Энергия заряженного конденсатора. Применение конденсаторов.

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.

Рис.

Энергия конденсатора превращается в тепло и энергию света. Выведем формулу для энергии плоского конденсатора. Напряжённость поля, созданного зарядом одной из пластин, равна $E/2$, где E —напряжённость поля в конденсаторе. В однородном поле одной пластины находится заряд q , распределённый по поверхности другой пластины. Согласно формуле:

$$W_{\text{п}}=qEd$$

для потенциальной энергии заряда в однородном поле энергия конденсатора равна:

$$W_{\text{п}}=q \cdot E/2 \cdot d$$

где q —заряд конденсатора, d —расстояние между пластинами. Так как $Ed=U$, энергия равна:

$$W_{\text{п}}=qU/2=q^2/2C=CU^2/2/$$

Эта формула справедлива для любого конденсатора.

Виды конденсаторов

Конденсаторы можно классифицировать по следующим признакам и свойствам:

- по форме обкладок различают конденсаторы плоские, сферические, цилиндрические и др.;
- по типу диэлектрика (рис. 1) —бумажные (а), воздушные (б), слюдяные, керамические, электролитические (в) и т.д.;
- по рабочему напряжению — низковольтные (напряжение пробоя до 100 В) и высоковольтные (выше 100 В);
- по возможности изменения своей емкости — постоянной емкости (см. рис. 1, а, в), переменной емкости (см. рис. 1, б), подстроечные (рис. 2).

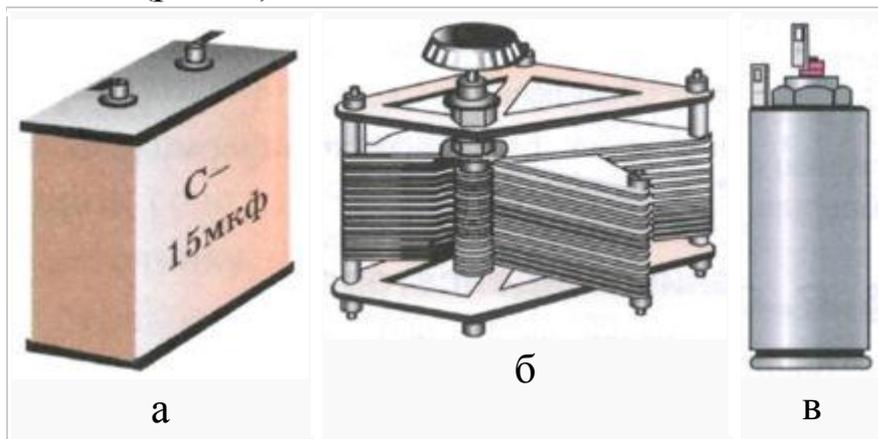


Рис. 1



Рис. 2



Рис. 3

Другие виды конденсаторов показаны на рисунке 3.

Емкость плоского конденсатора C зависит от площади обкладок S , расстояния между ними d и диэлектрической проницаемости диэлектрика ϵ , заполняющего пространство между обкладками конденсатора, но не зависит от материала, из которого эти пластины изготовлены

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}.$$

Применение конденсаторов

Конденсаторы находят широкое применение во многих областях радио- и электротехники.

- При быстром разряде конденсатора можно получить импульс большой мощности, например, в фотовспышках, электромагнитных ускорителях, импульсных лазерах и т. п.
- Так как конденсатор способен длительное время сохранять заряд, то его можно использовать в качестве элемента памяти или устройства хранения электрической энергии.
- Емкость конденсатора заметно изменяется при малейших изменениях параметра конденсатора. Так малое изменение расстояния между обкладками учитывается в измерителях малых перемещений, изменение состава диэлектрика при изменении влажности фиксируется в измерителях влажности, учет изменения высоты диэлектрика между обкладками конденсатора позволяет измерять уровень жидкости и т.п.
- Конденсаторы (совместно с катушками индуктивности и/или резисторами) используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т. п.

Соединения конденсаторов

Для получения необходимой емкости конденсаторы соединяют между собой в батареи, применяя при этом параллельное, последовательное и смешанное соединения.

Параллельное соединение

При *параллельном соединении* конденсаторов одни обкладки всех конденсаторов соединяются в один узел, другие — в другой узел (рис. 5).

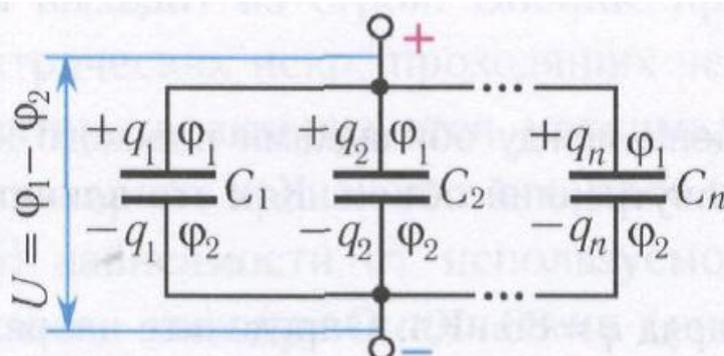


Рис. 5

Общий заряд равен алгебраической сумме зарядов каждой из обкладок отдельных конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + q_3.$$

Так как соединенные обкладки представляют собой один проводник, то потенциалы всех соединенных в один узел обкладок одинаковы и разность потенциалов между обкладками всех конденсаторов одинакова:

$$U_1 = U_2 = U_3.$$

Так как $q = CU$, $q_1 = C_1U$, $q_2 = C_2U$, $q_3 = C_3U$, то $CU = C_1U + C_2U + C_3U \Rightarrow$

$$C = C_1 + C_2 + C_3, \quad C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.

Если параллельно соединяют n одинаковых конденсаторов, то

$$C = nC_1.$$

Последовательное соединение

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 6) потенциал соединенных между собой обкладок конденсаторов одинаков.

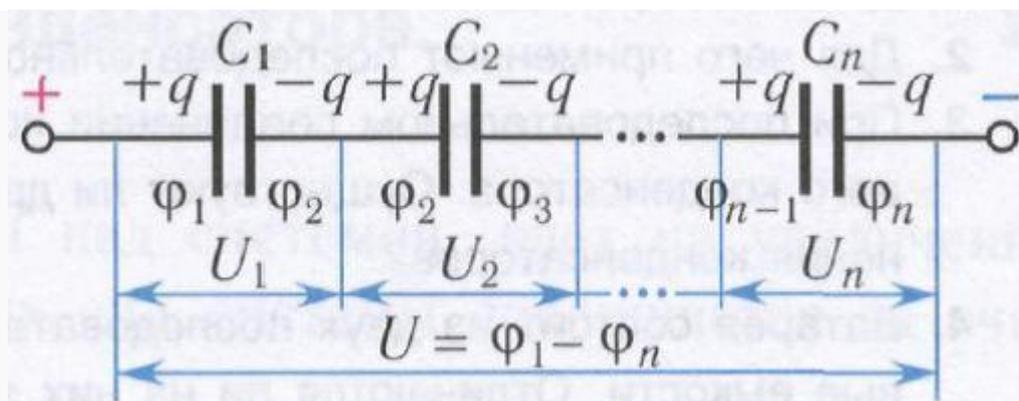


Рис. 6

Если сообщить одной из обкладок первого конденсатора заряд $+q$, то у второй обкладки будет заряд $-q$, у соседней обкладки второго конденсатора заряд $+q$ и т.д. Следовательно,

$$q = q_1 = q_2 = q_3.$$

Напряжение на батарее равно сумме напряжений на всех конденсаторах:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Так как $U = \frac{q}{C}$; $U_1 = \frac{q}{C_1}$; $U_2 = \frac{q}{C_2}$; $U_3 = \frac{q}{C_3}$, то

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

Величина, обратная емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов, равна сумме величин, обратных емкостям отдельных конденсаторов.

Если последовательно соединены n одинаковых конденсаторов, то

$$C = \frac{C_1}{n}.$$

Постоянный электрический ток.

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.

За направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов.

Электрические заряды могут двигаться упорядоченно под действием электрического поля. Поэтому достаточным условием для существования электрического поля является наличие электрического поля и свободных носителей электрического заряда.

Электрическое поле может быть создано, например, двумя разноименно заряженными телами. Соединяя проводником разноименно заряженные тела, можно получить электрический ток, протекающий в течение короткого интервала времени.

Так как за направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц, то из этого следует, что направление тока совпадает с направлением вектора напряжённости электрического поля.

Действие тока.

Движение частиц в проводнике мы непосредственно не видим. О наличии электрического тока мы судим по тем действиям и явлениям, которые его сопровождают:

1. Проводник, по которому течёт ток, нагревается.
2. Электрический ток может изменять химический состав проводника, например выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса).
3. Ток оказывает силовое воздействие на соседние токи и намагниченные тела. Так, магнитная стрелка вблизи проводника с током поворачивается.

Сила тока.

Если в цепи устанавливается электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника всё время переносится электрический заряд.

Заряд, перенесённый 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:

$$I = \Delta q / \Delta t$$

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 электрический ток называют постоянным током.

Связь силы тока со скоростью направленного движения частиц.

Пусть цилиндрический проводник имеет поперечное сечение S .

Рис.

За положительное направление в проводнике примем направление слева направо. Заряд каждой частицы будем считать равным q_0 . В объеме проводника, ограниченном поперечными сечениями 1 и 2 с расстоянием Δl между ними, содержится $nS\Delta l$ частиц, где: n —концентрация частиц (носителей тока).

Их общий заряд в выбранном объеме равен:

$$q = q_0 \cdot nS\Delta l$$

Если частицы движутся слева направо со средней скоростью v , то за время

$$\Delta t = \Delta l / v$$

все частицы, заключённые в рассматриваемом объеме, пройдут через поперечное сечение 2.

Поэтому сила тока равна:

$$I = \Delta q / \Delta t = q_0 n S \Delta l v / \Delta l = q_0 n S v$$

В системе СИ единицей силы тока является ампер (А).
Измеряют силу тока амперметрами.

Закон Ома для участка цепи.

Ранее было установлено, что для существования тока в проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах.

Сила тока определяется разностью потенциалов. Чем больше разность потенциалов, тем больше напряжённость электрического поля в проводнике и, следовательно тем большую скорость приобретают заряженные частицы.

Согласно формуле: $I = q \cdot n \cdot S \cdot v$ это означает увеличение силы тока. Для каждого проводника—твёрдого, жидкого и газообразного—существует определённая зависимость силы тока от приложенной разности потенциалов на концах проводника.

Эту зависимость выражает вольт-амперная характеристика проводника.

Наиболее простой вид имеет вольт-амперная характеристика металлических проводников и растворов электролитов.

Впервые её установил немецкий учёный Георг Ом, поэтому зависимость силы тока от напряжения носит название закона Ома.

Рис.

На участке цепи, изображённой на рисунке, ток направлен от точки 1 к точке 2.

Разность потенциалов (напряжение) на концах проводника равна:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

Так как ток направлен слева направо, то напряжённость электрического поля направлена в ту же сторону и $\varphi_1 > \varphi_2$. Закон Ома для участка цепи будет определяться:

$$I = U/R$$

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка R .

Отсюда следует, что напряжение на участке цепи

$$U=IR$$

прямо пропорционально произведению силе тока и сопротивления участка цепи.

Сопротивление.

Основная 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 можно определить сопротивление проводника:

$$R=U/I$$

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:

$$R=\rho \cdot l/S$$

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 1 м и площадью поперечного сечения 1 м²

Единицу сопротивления проводника называют омом (Ом). Проводник имеет сопротивление 1 Ом, если при разности потенциалов 1В сила тока в нём 1А.

Единицей удельного сопротивления является 1 Ом·м.

Удельное сопротивление металлов очень мало. А вот диэлектрики обладают очень большим удельным сопротивлением.

Значение закона Ома.

Закон Ома—основа всей электротехники постоянных токов.

Формулу:

$$I=U/R$$

надо хорошо понять и твёрдо запомнить.

Закон Ома для участка цепи определяет силу тока на участке электрической цепи при заданном напряжении между его концами и известном сопротивлении.

Он позволяет рассчитать тепловые, химические и магнитные действия тока, так как они зависят от силы тока.

Электрические цепи.

От источника тока энергия может быть передана по проводам к устройствам, потребляющим энергию: электрической лампе, радиоприёмнику 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.

При последовательном соединении проводников конец первого проводника соединяется с началом второго и т.д. При этом сила тока одинакова во всех проводниках, а напряжение U на концах всей цепи равно сумме напряжений на всех последовательно включённых проводниках.

Например, для трёх последовательно включённых проводников 1, 2, 3 с электрическими сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 получим

$$U=U_1+U_2+U_3 \quad 1$$

Рис.

По закону Ома для участка цепи:

$$U_1=IR_1 \quad U_2=IR_2 \quad U_3=IR_3 \quad U=IR \quad 2$$

где R —полное сопротивление участка цепи из последовательно включённых проводников. Из записанных выше выражений будем иметь:

$$IR=I(R_1+R_2+R_3) \quad 3$$

Таким образом:

$$R=R_1+R_2+R_3 \quad 4$$

При последовательном соединении проводников их общее сопротивление равно сумме электрических сопротивлений всех проводников.

Из соотношения 2 следует, что напряжения на последовательно включённых проводниках прямо пропорционально их сопротивлениям:

$$U_1/U_2=R_1/R_2 \quad 5$$

Параллельное соединение.

При параллельном соединении проводников 1.2.3 их начала и концы имеют общие точки подключения к источнику тока.

Рис.

При этом напряжение U на всех проводниках одинаково, а сила тока I в неразветвлённой цепи равна сумме токов во всех параллельно включённых проводниках:

$$I_1=U/R_1 \quad I_2=U/R_2 \quad I_3=U/R_3 \quad (6)$$

Обозначив общее сопротивление участка цепи через R для силы тока в неразветвлённой цепи, получим:

$$I=U/R \quad (7)$$

Так как $I=I_1+I_2+I_3$, (8) то из выражений 6, 7 и 8 следует, что:

$$1/R=1/R_1+1/R_2+1/R_3 \quad (9)$$

При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям всех параллельно включённых проводников. Напряжения на параллельно соединённых проводниках равны:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3$$

Следовательно

$$I_1 / I_2 = R_2 / R_1$$

Работа и мощность электрического тока.

При упорядоченном движении заряженных частиц в проводнике электрическое поле совершает работу. Её принято называть работой тока.

Рассмотрим произвольный участок цепи:

Рис.

Это может быть однородный проводник, например, лампы накаливания, обмотка ЭД и т.д.

Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника проходит заряд Δq .

Электрическое поле совершит при этом работу:

$$A = \Delta q \cdot U$$

U —напряжение между концами проводника.

Так как сила тока равна:

$$I = \Delta q / \Delta t$$

то

$$A = IU \Delta t$$

Работа тока на участке цепи равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого протекал ток.

Согласно закону сохранения энергии эта работа должна быть равна изменению энергии рассматриваемого участка цепи. Поэтому энергия, выделяемая на данном участке цепи за время Δt , равна работе силы тока.

Если в формуле $A=IU\Delta t$ выразить либо напряжение через силу тока, либо силу тока через напряжение с помощью закона Ома для участка цепи, то получим три эквивалентные формулы:

$$A=IU\Delta t=I^2R\Delta t=U^2/R\cdot\Delta t=Q$$

Формулой $A=I^2R\Delta t$ удобно пользоваться в случае последовательного соединения проводников, т.к. сила тока в этом случае одинакова во всех проводниках. При параллельном соединении проводников удобна формула $A=U^2/R\cdot\Delta t$, т.к. напряжение во всех проводниках одинаково.

Мощность тока.

Любой электрический прибор (лампа, ЭД и т.д.) рассчитан на потребление определённой энергии в единицу времени. Поэтому наряду с работой силы тока, очень важное значение имеет понятие мощность тока.

Мощность тока равна отношению работы силы тока ко времени прохождения тока.

$$P=A/\Delta t, \text{ Вт}$$

Это выражение можно переписать в нескольких эквивалентных формулах:

$$P=A/\Delta t=IU=I^2R=U^2/R$$

Тепловое действие электрического тока. Закон Джоуля-Ленца.

Если на участке цепи не совершается механическая работа и ток не производит химических действий, то происходит только нагревание проводника. Нагретый проводник отдаёт тепло окружающим телам.

Нагревание проводника происходит следующим образом. Электрическое поле ускоряет электроны. После столкновения с ионами кристаллической решётки они передают ионам свою энергию. В результате энергия беспорядочного движения ионов около положений равновесия возрастает. Это и означает увеличение внутренней энергии. Температура проводника при этом повышается и он начинает передавать тепло окружающим телам. Спустя некоторое время после замыкания цепи процесс устанавливается, и температура перестаёт изменяться со временем. К проводнику за счёт работы электрического поля непрерывно поступает энергия. Но его внутренняя энергия остаётся неизменной, так как проводник передаёт окружающим телам количество теплоты, равное работе силы тока. Таким образом формула для работы силы тока:

$$A=IU\Delta t=I^2R\Delta t=U^2/R\cdot\Delta t=Q$$

Определяет количество теплоты, передаваемое проводником другим телам.

Закон Джоуля—Ленца.

Закон, определяющий количество теплоты, которое выделяет проводник с током в окружающую среду, был впервые установлен экспериментально английским учёным Д.Джоулем (1818—1889) и русским учёным З.Х.Ленцем (1804—1865).

Закон Джоуля—Ленца формулируется следующим образом:

Количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока по проводнику:

$$Q= I^2R\Delta t$$

ЭДС источника тока.

Любой источник тока характеризуется электродвижущей силой (ЭДС).

Для того, чтобы ток был постоянным, надо поддерживать постоянное напряжение между телами. Для этого необходимо устройство (источник тока), которое перемещало бы заряды от одного тела к другому в направлении, противоположном направлению сил, действующих на эти заряды со стороны электрического поля тел. В таком устройстве на заряды, кроме электрических сил, должны действовать силы неэлектрического происхождения.

Любые силы, действующие на электрически заряженные частицы, за исключением сил электростатического происхождения (т.е. кулоновских сил), называются сторонними силами.

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри всех источников тока:

--в генераторах—силы, действующие со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике;

--в гальванических элементах—химические силы.

ЭДС источника тока равна отношению работы сторонних сил при перемещении заряда по замкнутому контуру к величине этого заряда.

$$E = A_{ст}/q, \text{ В.}$$

Закон Ома для полной цепи.

Рассмотрим простейшую полную (т.е. замкнутую) цепь, состоящую из источника тока и резистора R .

Рис.

Источник тока имеет ЭДС E и сопротивление r .

Сопротивление источника ещё называют внутренним сопротивлением—в отличие от внешнего сопротивления R цепи. В генераторе внутреннее сопротивление r —это сопротивление обмоток, в гальванических элементах—сопротивление раствора электролита и электродов.

Закон Ома для замкнутой цепи связывает силу тока в цепи и полное сопротивление цепи $R+r$.

Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника проходит электрический заряд Δq . Тогда работу сторонних сил при перемещении заряда Δq можно записать:

$$A = E \cdot \Delta q$$

Согласно определению силы тока

$$\Delta q = I \Delta t, \text{ тогда } A = E I \Delta t.$$

При совершении этой работы на внутреннем и внешнем участках цепи, сопротивления которых r и R , выделяется некоторое количество теплоты. По закону Джоуля—Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t$$

По закону сохранения энергии $A_{\text{ст.}} = Q$, откуда получим:

$$E = IR + Ir \rightarrow I = E / (R + r)$$

Сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника тока к полному сопротивлению цепи.

Сила тока в цепи зависит от трёх величин:

- ЭДС источника тока— E ;
- сопротивления внешней цепи— R ;
- внутреннего сопротивления цепи— r .

Напряжение равно:

$$U = E - Ir$$

Если $R \gg r$, то $U \approx E$.

Электрический ток в различных средах.

Электрический ток проводят твёрдые, жидкие и газообразные тела. Кроме проводников и диэлектриков имеется группа веществ, проводимость которых занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

Они получили название полупроводников.

Зависимость сопротивления проводника от температуры.

Если пропустить через стальную спираль ток, а затем начинать нагревать её, то амперметр покажет уменьшение силы тока. Это означает, что с изменением температуры сопротивление проводника меняется.

Если при температуре, равной 0°C , сопротивление проводника равно R_0 , а при температуре $t^\circ\text{C}$ оно равно R , то относительное изменение сопротивления прямо пропорционально изменению температуры $t^\circ\text{C}$:

$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha t \quad 1$$

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 1К.

Для всех металлических проводников $\alpha > 0$ и изменяется незначительно с изменением температуры.

У чистых металлов $\alpha \approx 1/273 \text{ 1/К}$

У растворов электролитов сопротивление с ростом температуры не увеличивается, а уменьшается.

Для них $\alpha < 0$.

При нагревании проводника его геометрические размеры меняются незначительно. Сопротивление проводника меняется в основном за счёт изменения его удельного сопротивления. Можно найти зависимость этого удельного сопротивления от температуры, если в формулу 1 подставить значения:

$$R = \rho l / S \quad \text{и} \quad R_0 = \rho_0 l / S$$

$$\text{то получим} \quad \rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

Так как α мало меняется при изменении температуры проводника, то можно считать, что удельное сопротивление проводника линейно зависит от температуры.

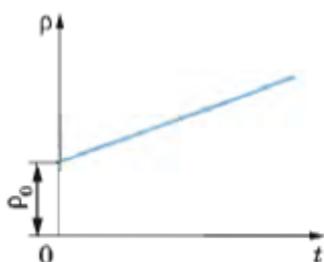


Рис. 16.2

311

Увеличение сопротивления можно объяснить тем, что при повышении температуры увеличивается амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решётки, поэтому свободные электроны сталкиваются с ними чаще, теряя при этом направленность движения.

Сверхпроводимость.

Сопротивление металлов уменьшается с уменьшением температуры. Что произойдёт при стремлении температуры к абсолютному нулю.

В 1911 году голландский физик Камерлинг Оннес открыл замечательное явление—сверхпроводимость.

Он обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии её сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,1К очень резко падает до нуля.

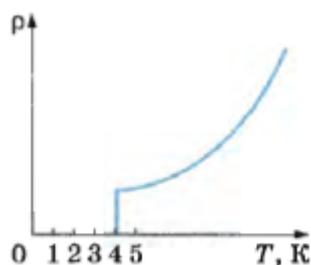


Рис.

Температура, при которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние, называется критической температурой.

Сверхпроводимость многих металлов и сплавов наблюдается при очень низких температурах—начиная примерно с 25К.

Если в кольцевом проводнике, находящемся в сверхпроводящем состоянии, создать ток, а затем устранить источник тока, то сила этого тока не меняется сколь угодно долго.

Сверхпроводники находят широкое применение:

--мощные электромагниты со сверхпроводящей обмоткой, которые создают магнитное поле на протяжении длительных интервалов времени без затрат энергии, так как выделения тепла в сверхпроводящей обмотке не происходит.

Если бы удалось создать сверхпроводящие материалы при температурах, близких к комнатным, то была бы решена важнейшая техническая проблема—передача энергии по проводам без потерь.

Электрический ток в полупроводниках.

Отличие полупроводников от проводников проявляется при анализе зависимости их электропроводимости от температуры.

У ряда элементов (кремний, германий, селен и др.) и соединений (PbS, CdS, GaAs, и др.) удельное сопротивление с увеличением температуры не растёт, как у металлов, а резко уменьшается

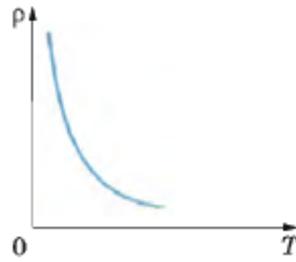


Рис.

Из графика видно, что при температурах, близких к абсолютному нулю, удельное сопротивление полупроводников очень велико. При низких температурах полупроводник ведёт себя как диэлектрик. По мере повышения температуры его удельное сопротивление быстро уменьшается.

Строение полупроводников.

Рассмотрим для примера кристалл кремния. Кремний— четырёхвалентный элемент. Это означает, что во внешней оболочке его атома имеется четыре электрона, сравнительно слабо связанные с ядром. Число ближайших соседей каждого атома кремния также равно четырём.

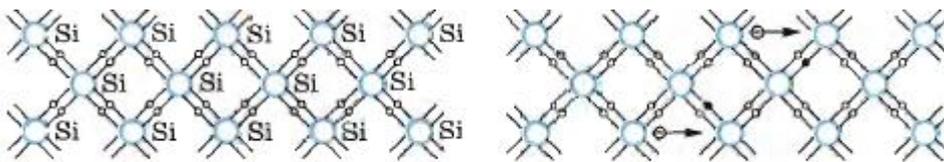


Рис.

Схема структуры кристалла кремния изображена на рисунке. Взаимодействие пары соседних атомов осуществляется с помощью парноэлектронной связи, называемой ковалентной связью. В образовании этой связи участвует по одному валентному электрону, которые отделяются от атома, которому они принадлежат и при своём движении большую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами. Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы кремния друг возле друга.

Коллективированная пара электронов принадлежит не только двум атомам. Каждый атом образует четыре связи с соседними, и любой валентный электрон может двигаться по одной из них.

Дойдя до соседнего атома, он может перейти к следующему, а затем дальше вдоль всего кристалла.

Валентные электроны принадлежат всему кристаллу.

Парноэлектронные связи в кристалле кремния достаточно прочны и при низких температурах не разрываются. Поэтому кремний при низкой температуре не проводит электрический ток.

Аналогичное строение имеет кристалл германия.

Электронная проводимость.

При нагревании кремния кинетическая энергия повышается, и наступает разрыв отдельных связей. Некоторые электроны покидают свои «проторенные пути» и становятся свободными, подобно электронам в металле.

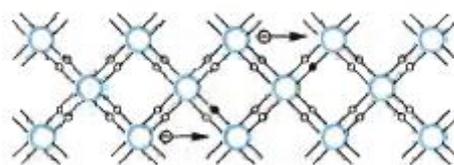


Рис.

В электрическом поле они перемещаются между узлами решётки, создавая электрический ток, см. рисунок.

Проводимость полупроводников, обусловленную наличием у них свободных электронов, называют электронной проводимостью.

При повышении температуры число разорванных связей, а значит, и свободных электронов увеличивается. Это приводит к уменьшению сопротивления.

Дырочная проводимость.

При разрыве связи между атомами полупроводника образуется вакантное место с недостающим электроном. Его называют дыркой.

В дырке имеется избыточный положительный заряд по сравнению с остальными, не разорванными связями.

Положение дырки в кристалле не является неизменным.

Непрерывно происходит следующий процесс. Один из электронов, обеспечивающих связь атомов, перескакивает на место образовавшейся дырки и восстанавливает здесь парноэлектронную связь, а там, откуда перескочил этот электрон, образуется новая дырка. Таким образом, дырка может перемещаться по всему кристаллу.

Если напряжённость электрического поля равна нулю, то перемещение дырок, равноценное перемещению положительных зарядов, происходит беспорядочно и поэтому не создаёт электрического тока. При наличии электрического поля возникает упорядоченное перемещение дырок, и таким образом, к электрическому току свободных электронов добавляется электрический ток, связанный с перемещением дырок.

Направление движения дырок противоположно направлению движения электронов.

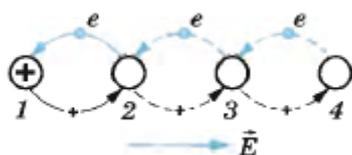


Рис.

В отсутствие внешнего поля на один свободный электрон (-) приходится одна дырка (+).

При наличии поля свободный электрон смещается против напряжённости электрического поля. В этом направлении перемещается также один из связанных электронов. Это выглядит как перемещение дырки в направлении поля.

Итак, в полупроводниках имеются носители заряда двух типов: --электроны и дырки.

Поэтому полупроводники обладают не только электронной, но и дырочной проводимостью.

Мы рассмотрели механизм проводимости чистых полупроводников. Проводимость при этих условиях называют собственной проводимостью полупроводников.

Электронная проводимость полупроводников при наличии примесей.

Проводимость полупроводников очень сильно зависит от примесей. Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как мало число свободных электронов: -например в германии при комнатной температуре $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, в то же время число атомов германия в 1 см^3 примерно равно 10^{23}

Таким образом, число свободных электронов составляет примерно одну десяти миллиардную часть от общего числа атомов.

Существенная особенность полупроводников состоит в том, что в них при наличии примесей наряду с собственной проводимостью возникает дополнительная—примесная проводимость.

Изменяя концентрацию примеси, можно значительно изменять число носителей заряда того или иного знака. Благодаря этому можно создавать полупроводники с преимущественной концентрацией одного из носителей тока:

--электронов или дырок.

Донорные примеси.

Примеси, легко отдающие свои электроны и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов, называются донорными (отдающими) примесями.

При добавлении 1/10 доли атомов мышьяка концентрация свободных электронов становится равной 10^{17} см^{-3} . Это в тысячу раз больше концентрации свободных электронов в чистом полупроводнике.

Поскольку полупроводники, имеющие донорные примеси, обладают большим числом электронов (по сравнению с числом дырок), их называют полупроводниками **n-типа** (negative—отрицательный).

В полупроводнике **n-типа** электроны являются основными носителями заряда, а дырки—неосновными.

Акцепторные примеси.

Если в качестве примеси использовать индий, атомы которого трёхвалентны, то характер проводимости полупроводника меняется.

Теперь для образования нормальных парноэлектронных связей с соседями атому индия недостаёт одного электрона.

В результате образуется дырка. Число дырок в кристалле равно числу атомов примеси. Такого рода примеси называют акцепторными (принимающими).

При наличии электрического поля дырки перемещаются по полю и возникает дырочная проводимость.

Полупроводники с преобладанием дырочной проводимости над электронной называют полупроводниками **p-типа** (positive—положительный). Основными носителями заряда в полупроводнике **p-типа** являются дырки, а неосновными—электроны.

Полупроводниковые приборы.

1.) Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры и освещения.

а) Терморезисторы.

Опыты показывают, что при нагревании электрическое сопротивление полупроводниковых кристаллов уменьшается.

Рис.

Уменьшение электрического сопротивления полупроводников при нагревании объясняется тем, что с повышением температуры число освобождающихся электронов в кристалле возрастает.

Зависимость электрического сопротивления полупроводниковых материалов от температуры используется в специальных полупроводниковых приборах—**терморезисторах**.

б) Фоторезисторы.

Электрическое сопротивление полупроводниковых материалов изменяется не только при нагревании, но и при освещении. При увеличении освещения электрическое сопротивление полупроводниковых материалов уменьшается.

Рис.

Приборы, в которых используется свойство полупроводниковых кристаллов изменять своё сопротивление при освещении светом, называют **фоторезисторами**.

Полупроводниковый диод.

1. Электрический ток через контакт полупроводника p-n типа

На рисунке изображена схема полупроводника, правая часть которого содержит донорные примеси и поэтому является полупроводником **n типа**, а левая—акцепторные примеси и представляет собой полупроводник **p-типа**.

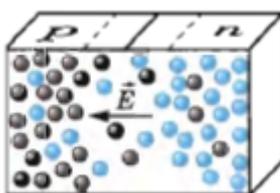


Рис.

Между ними-- зона перехода—зона, обеднённая зарядами. В ней происходит рекомбинация электронов и дырок. Контакт двух полупроводников называют **p-n** или **n-p** переходом.

При образовании контакта электроны частично переходят из полупроводника **n типа** в полупроводник **p-типа**, а дырки в обратном направлении.

В результате полупроводник **n типа** заряжается положительно, а **p-типа**—отрицательно.

Диффузия прекращается после того, как электрическое поле, возникающее в зоне перехода, начинает препятствовать дальнейшему перемещению электронов и дырок.

Включим полупроводник с **p-n** переходом в электрическую цепь

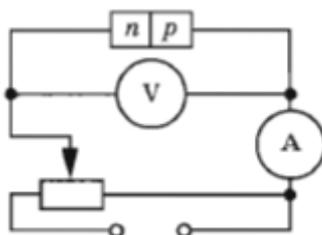


Рис.

Подключим сначала источник питания так, чтобы потенциал полупроводника **p-типа** был положительным, а **n типа** — отрицательным.

При этом ток через **p-n** переход создаётся основными носителями: из области **n** в область **p**—электронами, а из области **p** в область **n**—дырками.

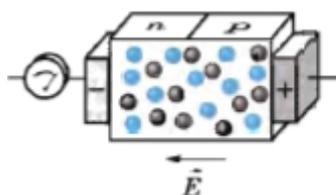


Рис.

Вследствие этого проводимость всего образца велика, а сопротивление мало.

Рассмотренный переход называется прямым.

Зависимость силы тока от разности потенциалов—вольтамперная характеристика прямого перехода изображена на графике сплошной линией.

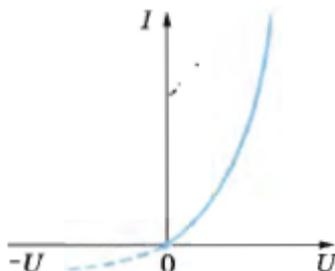


Рис.

Изменим теперь полярность подключения источника питания.

Тогда, при той же разности потенциалов сила тока в цепи окажется значительно меньше, чем при прямом переходе. Это обусловлено следующим:--электроны через контакт идут теперь из области **p** в область **n**, а дырки—из области **n** в область **p**.

Но ведь в полупроводнике **p-типа** мало свободных электронов, а в полупроводнике **n-типа** мало дырок.

Теперь переход через контакт осуществляется неосновными носителями зарядов, число которых мало, что показано на рисунке.

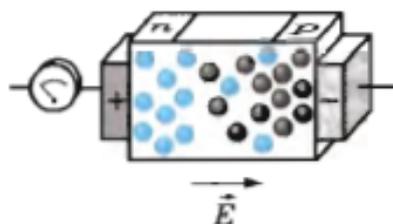


Рис.

Вследствие этого проводимость образца оказывается незначительной, а сопротивление большим. Образуется так называемый запирающий слой. Такой переход называется обратным.

Вольтамперная характеристика обратного перехода изображена на графике штриховой линией.

Таким образом, **p-n** переход можно использовать для выпрямления электрического тока.

Такое устройство называют полупроводниковым диодом.

Полупроводниковые диоды изготавливают из германия, кремния, селена и др. веществ.

Технология изготовления диода и его схемное обозначение показаны на рисунке.



Рис.

Транзистор.

Рассмотрим один из видов транзисторов из кремния или германия, с введёнными в них донорными или акцепторными примесями. Распределение примесей таково, что создаётся очень тонкая (толщиной порядка нескольких микрон) прослойка полупроводника **n-типа** между двумя слоями полупроводника **p-типа**. Эту тонкую прослойку называют основанием или базой.

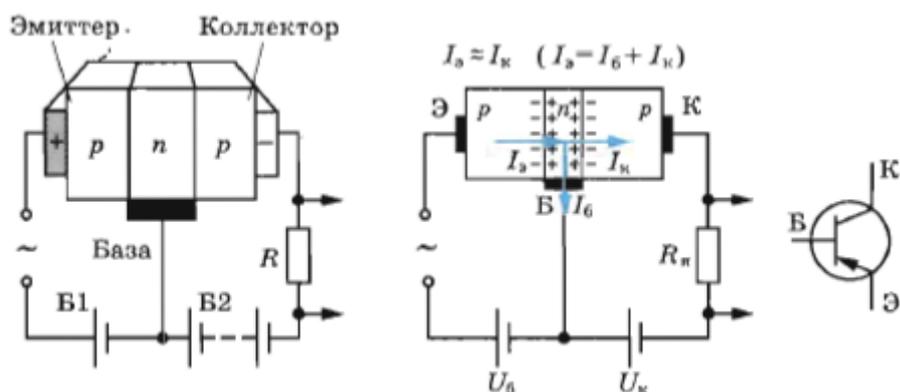


Рис.

В кристалле образуются два **p-n** перехода, прямые направления которых противоположны.

Три вывода от областей с различными типами проводимости позволяют включить транзистор в схему, показанную на рисунке. В данной схеме левый **p-n** переход является прямым и отделяет базу от области с проводимостью **p-типа**, называемую эмиттером. Если бы не было правого **p-n** перехода, в цепи эмиттер-база существовал бы ток, зависящий от напряжений источников (батареи Б1 и источника переменного напряжения и сопротивления цепи, включая малое сопротивление прямого перехода эмиттер-база).

Батарея Б2 включена так, что правый **p-n** переход в схеме является обратным. Он отделяет базу от правой области с проводимостью **p-типа**, называемый коллектором.

Если бы не было левого **p-n** перехода, сила тока в цепи коллектора была бы близка к нулю, так как сопротивление обратного перехода очень велико. При существовании же тока в левом **p-n** переходе появляется ток и в цепи коллектора, причём сила тока в коллекторе лишь немного меньше силы тока в эмиттере:

$$I_{\epsilon} \approx I_{\kappa} \quad (I_{\epsilon} = I_{\text{б}} + I_{\kappa}).$$

Сила тока в коллекторе, почти равная силе тока в эмиттере, изменяется вместе с током через эмиттер.

Сопротивление резистора R мало влияет на ток в коллекторе, и это сопротивление можно сделать большим. Управляя током эмиттера с помощью источника переменного напряжения, мы получим синхронное изменение напряжения на резисторе R.

При большом сопротивлении резистора R изменение напряжения на нём может в десятки тысяч раз превышать изменение сигнала в цепи эмиттера.

Магнитное поле.

Рассматривая взаимодействие наэлектризованных тел, мы ознакомились с существованием вокруг электрических зарядов электрического поля.

При изучении явлений, сопровождающих прохождение электрического тока по проводникам, мы встречаемся с такими свойствами электрических зарядов, которые присущи им только в состоянии движения.

Одним из важнейших свойств движущихся зарядов проявляется во взаимодействии проводников, по которым проходит электрический ток.

Ознакомимся с этим явлением на опыте:



Рис.

Расположим два гибких проводника параллельно друг другу. При пропускании тока по проводникам они будут взаимодействовать между собой—притягиваться или отталкиваться.

Притягиваются проводники тогда, когда токи в них направлены в одну сторону и отталкиваются при противоположных направлениях токов.

Рассмотрим сначала, не является ли наблюдаемое нами взаимодействие результатом взаимодействия электрических зарядов, находящихся в проводниках.

Проверим наше предположение на следующем опыте:--Соединим один из проводников с положительным полюсом источника тока, а другой—с отрицательным, цепь же разомкнём.

На проводниках, при этом сосредоточатся разноимённые электрические заряды, вокруг которых будет существовать электрическое поле. Электрическое взаимодействие между проводниками столь мало, что его невозможно обнаружить глазом. Но стоит замкнуть цепь, т.е. пропустить ток по проводникам, как мы сразу обнаружим отталкивание проводников друг от друга. Следовательно, взаимодействие проводников с токами не есть результат взаимодействия покоящихся электрических зарядов, оно имеет иной характер.

Чтобы выяснить причину этого взаимодействия, проведём ещё два опыта:

--Повесим вертикально гибкий проводник и расположим его между полюсами магнита

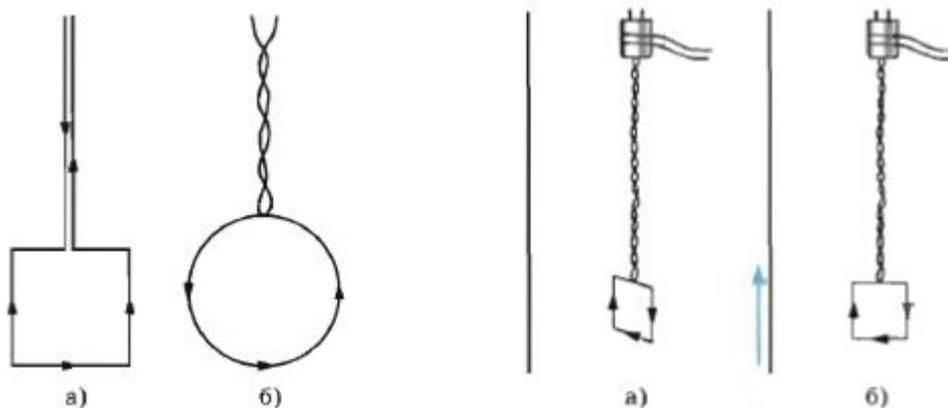


Рис.

Пропуская через проводник ток сверху вниз, мы заметим, что проводник отклоняется вправо.

Если переменить направление тока, то и отклонение проводника изменится на противоположное.

Также при перемене местами полюсов магнита проводник отклонится влево.

Выполним ещё один опыт:

Возьмём магнитную стрелку, установленную на острие и расположим вдоль её оси проводник

Рис.

При пропускании по нему тока, стрелка отклоняется от своего первоначального положения.

Впервые данные опыты, обнаружившие связь, существующую между электрическими и магнитными явлениями, были проделаны датским учёным Эрстедом в 1820 году.

Все эти опыты приводят к заключению, что силы, которые проявляются при взаимодействии токов, при действии магнита на ток или тока на магнит, имеют одну и ту же природу.

Их называют магнитными силами. Источником магнитных сил является магнитное поле, существующее в пространстве, окружающем магнит и проводники с токами.

Итак, между движущимися электрическими зарядами, кроме электрических сил, действуют ещё и магнитные силы.

Вывод: -Всюду, где есть электрический ток, т.е. движущиеся электрические заряды, существует и магнитное поле.

Электрический ток и магнитное поле неотделимы друг от друга.

Направление магнитного поля.

Расположим проволочную катушку вблизи магнитной стрелки так, чтобы ось стрелки была перпендикулярна оси катушки.

Рис.

Пропустив по катушке ток, мы заметим, что под действием сил поля магнитная стрелка повернётся и установится вдоль оси катушки.

Перемещая стрелку вокруг катушки стоком, мы обнаружим, что в разных точках магнитного поля стрелка ориентируется по разному. Ориентирующее действие магнитного поля указывает на его направленность.

Изменим направление тока в катушке. Стрелка также изменит своё направление на противоположное, т.е. на 180° .

Следовательно, направление магнитного поля зависит от направления электрического тока, вокруг которого поле возникает. Магнитное поле создаётся не только электрическим током, но и постоянными магнитами. Если мы подвесим на гибких проводах рамку с током между полюсами магнита, то рамка будет поворачиваться до тех пор, пока плоскость её не установится перпендикулярно к линии, соединяющей полюса магнитов. Таким образом, магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие.

Вектор магнитной индукции.

Электрическое поле характеризуется векторной величиной— напряжённостью электрического поля. Надо ввести величину, характеризующую магнитное поле количественно.

Характеристику магнитного поля называют вектором магнитной индукции и обозначают буквой **B**.

Сначала мы рассмотрим только направление вектора магнитной индукции **B**.

Ориентирующее действие магнитного поля на магнитную стрелку или рамку с током можно использовать для определения направления вектора магнитной индукции.

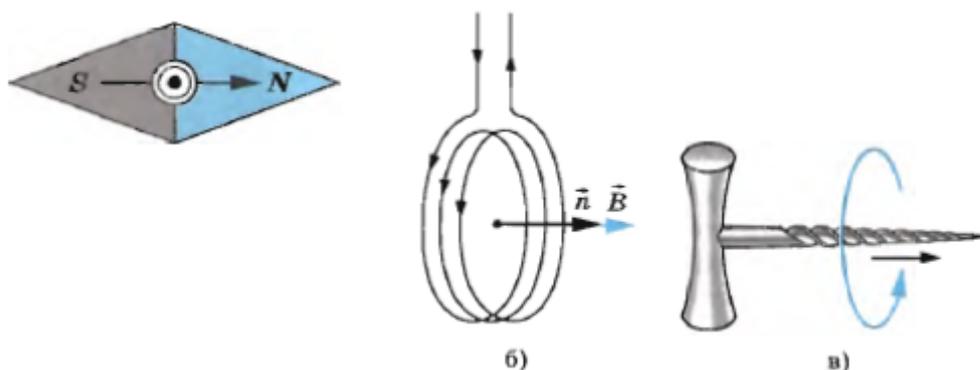


Рис.

За направление вектора магнитной индукции принимается направление от южного полюса S к северному 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, если его вращать по направлению тока в рамке.

Располагая рамку с током или магнитной стрелкой, можно определить направление вектора магнитной индукции в любой точке поля.

В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитная стрелка устанавливается по касательной к окружности.



Рис.

Плоскость окружности перпендикулярна проводу, а центр её лежит на оси провода.

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 совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

Линии магнитной индукции.

Наглядную картину магнитного поля можно получить, если построить так называемые линии магнитной индукции.

Линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым направлены так же, как и вектор магнитной индукции \mathbf{B} в данной точке поля.

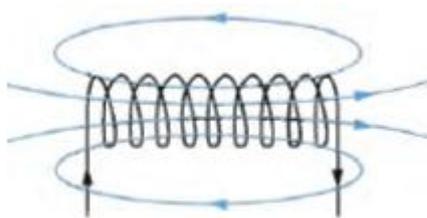


Рис.

В этом отношении линии магнитной индукции аналогичны линиям напряжённости электростатического поля.

Построим линии магнитной индукции прямолинейного проводника с током.

Линии магнитной индукции в данном случае—концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной этому проводнику с током.

Рис.

Центры окружностей находятся на оси проводника. Стрелки на линиях указывают, в какую сторону направлен вектор магнитной индукции, касательный к данной линии.

Приведём картину магнитного поля катушки с током (соленоида). Картина линий магнитной индукции, построенная с помощью магнитных стрелок или малых контуров с током показана на рисунке:

Рис.

Если длина соленоида много больше его диаметра, то магнитное поле внутри соленоида можно считать однородным. Линии магнитной индукции такого поля параллельны.

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 заканчиваются на отрицательных.

Поля с замкнутыми силовыми 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 нет.**

Модуль вектора магнитной индукции.

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 участок проводника, был установлен в 1820 году А. Ампером.

Так как создать обособленный элемент тока нельзя, то Ампер проводил опыты с замкнутыми проводниками. Меняя форму проводников и их расположение, Ампер сумел установить выражение для силы, действующей на отдельный элемент тока.

Свободно подвешенный горизонтальный проводник находится в поле постоянного подковообразного магнита, Поле магнита сосредоточено в основном между его полюсами, поэтому магнитная сила действует практически только на часть проводника длиной Δl , расположенную непосредственно между полюсами.

Сила измеряется с помощью специальных весов, связанных с проводником двумя стержнями. Она направлена горизонтально перпендикулярно проводнику и линиям магнитной индукции.

Увеличивая силу тока в 2 раза, можно заметить, что и действующая сила также увеличивается в 2 раза.

Прибавив ещё один магнит, мы в два раза увеличим размер области, где существует магнитное поле, и тем самым в 2 раза увеличим длину участка проводника, на которую действует магнитное поле. Сила при этом также увеличивается в 2 раза.

И наконец, сила Ампера зависит от угла, образованного вектором \mathbf{B} с проводником.

В этом можно убедиться, меняя наклон подставки, на которой находятся магниты, так, чтобы изменялся угол между проводником и линиями магнитной индукции.

Сила достигает максимального значения F_m , когда магнитная индукция перпендикулярна проводнику.

Итак, максимальная сила, действующая на участок проводника длиной Δl , по которому идёт ток I , прямо пропорциональна произведению силы тока I на длину участка Δl

$$F \sim I \cdot \Delta l$$

Этот опытный факт можно использовать для определения модуля вектора магнитной индукции. В самом деле, поскольку

$$F \sim I \cdot \Delta l,$$

то отношение $F_m / I \Delta l$ не будет зависеть ни от силы тока в проводнике, ни от длины участка проводника.

Именно поэтому это отношение можно принять за характеристику магнитного поля в том месте, где расположен участок проводника.

Модулем вектора магнитной индукции называется отношение максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на участок проводника с током, к произведению силы тока на длину этого участка.

$$B = F_m / I \Delta l$$

Магнитное поле полностью характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} .

В каждой точке магнитного поля могут быть определены направление вектора магнитной индукции и его модуль с помощью измерения силы, действующей на участок проводника с током.

Модуль силы Ампера.

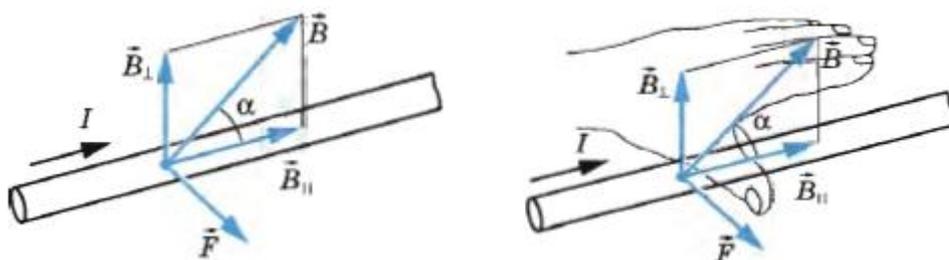


Рис.

Пусть вектор магнитной индукции \vec{B} составляет угол α с направлением отрезка проводника с током. Опыт показывает, что

магнитное поле, вектор индукции которого направлен вдоль проводника с током, не оказывает никакого воздействия на ток. Поэтому модуль силы зависит лишь от модуля составляющей вектора \mathbf{B} , перпендикулярной проводнику, т.е. от

$$B = B \cdot \sin\alpha$$

и не зависит от составляющей \mathbf{B} , направленной вдоль проводника. Максимальная сила Ампера равна:

$$F_m = I \Delta l B,$$

ей соответствует угол $\alpha = \pi/2$.

При произвольном значении угла α сила пропорциональна не B , а составляющей:

$$B = B \cdot \sin\alpha$$

Поэтому выражение для модуля силы F , действующей на малый отрезок проводника Δl , по которому течёт ток I , со стороны магнитного поля с индукцией \mathbf{B} , составляющей с элементом тока угол α имеет вид:

$$F = B \cdot |I| \cdot \Delta l \cdot \sin\alpha$$

Это выражение называют законом Ампера.

Сила Ампера равна произведению вектора магнитной индукции на силу тока, длину участка проводника и на синус угла между магнитной индукцией и участком проводника.

Направление силы Ампера.

В рассмотренном опыте вектор \mathbf{F} перпендикулярен элементу тока и вектору \mathbf{B} .

Его направление определяется правилом левой руки:

-если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора магнитной индукции \mathbf{B}

входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы действующей на отрезок проводника. (рис 2).

Единица магнитной индукции.

Мы ввели новую величину—магнитную индукцию.

За единицу магнитной индукции можно принять магнитную индукцию однородного поля, в котором на участок проводника длиной 1 м при силе тока в нём 1 А действует со стороны поля максимальная сила $F_m=1\text{Н}$.

Согласно формуле единица магнитной индукции равна: $1\text{Н}/\text{А}\cdot\text{м}$.

Единица магнитной индукции получила название **тесла (Тл)** в честь югославского учёного электротехника Н. Тесла (1856-1943).

Электроизмерительные приборы.

Ориентирующее действие магнитного поля на контур с током используют в электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы—амперметрах и вольтметрах. Измерительный прибор магнитоэлектрической системы устроен следующим образом:



Рис.

На лёгкой алюминиевой рамке 2 прямоугольной формы с прикреплённой к ней стрелкой 4 намотана катушка.

Рамка укреплена на двух полюсах ОО1.

В положении равновесия её удерживают две тонкие спиральные пружины 3. Силы упругости со стороны пружин, возвращающие катушку в положение равновесия, пропорциональны углу отклонения стрелки от положения равновесия. Катушку помещают между полюсами постоянного магнита М с наконечниками специальной формы.

Внутри катушки расположен цилиндр из мягкого железа 1.

Такая конструкция обеспечивает радиальное направление линий магнитной индукции в той области, где находятся витки катушки.

В результате при любом положении катушки силы, действующие на неё со стороны магнитного поля, максимальны и при неизменной силе тока постоянны.

Векторы \mathbf{F} и $-\mathbf{F}$ изображают силы, действующие на катушку со стороны магнитного поля и поворачивают её.

Катушки стоком поворачиваются до тех пор, пока силы упругости со стороны пружины не уравновесят силы, действующие на рамку со стороны магнитного поля.

Увеличивая силу тока в 2 раза, мы обнаружим, что стрелка поворачивается на угол, вдвое больший и т.д.

Это происходит потому, что силы, действующие на катушку со стороны магнитного поля, прямо пропорциональны силе тока:

$$F_m \sim I$$

Благодаря этому можно определить силу тока по углу поворота катушки, если проградуировать прибор. Для этого надо установить, каким углам поворота стрелки соответствуют известные значения силы тока.

Такой же прибор может измерять напряжение. Для этого нужно градуировать прибор так, чтобы угол поворота стрелки соответствовал определённым значениям напряжения.

Кроме того, сопротивление вольтметра должно быть много больше сопротивления амперметра.

Электромагнитная индукция.

До этого мы рассматривали электрические и магнитные поля, не изменяющиеся с течением времени. Было выяснено, что электростатическое поле создаётся неподвижными заряженными частицами, а магнитное—движущимися, т.е. электрическим током. Теперь перейдём к знакомству с электрическим и магнитным полям, которые меняются со временем.

Самый важный факт, который удалось обнаружить—это теснейшая взаимосвязь между электрическим и магнитным полями.

Изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле, а изменяющееся электрическое поле порождает магнитное поле.

Решающий шаг в открытии новых свойств электромагнитной индукции был сделан основоположником представлений об электромагнитном поле –М. Фарадеем (1791-1867).

В 1831 году М. Фарадей обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного поля возникает электрический ток. Этот ток назвали индукционным током.

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.

Индукционный ток в катушке из металлической проволоки возникает при выдвигании магнита внутрь катушки и при выдвигании магнита из катушки, а также при изменении силы тока во второй катушке, магнитное поле которой пронизывает первую катушку.

Явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного поля, пронизывающего контур, называется электромагнитной индукцией.

Появление электрического тока в замкнутом контуре при изменениях магнитного поля, пронизывающего контур,

свидетельствует о действии в контуре сторонних сил неэлектрической природы или о возникновении ЭДС индукции. Количественное описание явления электромагнитной индукции даётся на основе установления связи между ЭДС индукции и физической величиной, называемой магнитным потоком.

Магнитный поток.

Вектор магнитной индукции. \mathbf{B} характеризует магнитное поле в каждой точке пространства.

Введём ещё одну величину, зависящую от значений вектора \mathbf{B} не в одной точке, а во всех точках поверхности, ограниченной плоским замкнутым контуром.

Для этого рассмотрим плоский замкнутый проводник (контур) с площадью поверхности S , помещённый в однородное магнитное поле.

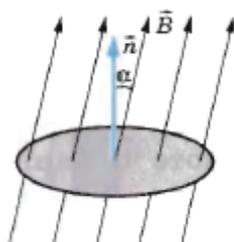


Рис.

Нормаль \mathbf{n} к плоскости проводника составляет угол α с направлением вектора магнитной индукции \mathbf{B}

Магнитным потоком Φ (потоком магнитной индукции) через поверхность площадью S называют величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции \mathbf{B} на площадь S и косинус угла α между векторами \mathbf{B} и \mathbf{n} .

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Произведение $B \cos \alpha = B$ представляет собой проекцию вектора магнитной индукции на нормаль к плоскости контура. Поэтому

$$\Phi = B S$$

Магнитный поток наглядно можно истолковать как величину, пропорциональную числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S .
Единицей магнитного потока является «вебер»

Магнитный поток в 1вб создаётся однородным магнитным полем с индукцией 1Тл через поверхность площадью 1м^2 , расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции.

Поток магнитной индукции характеризует распределение магнитного поля по поверхности, ограниченной контуром.

Направление индукционного тока. Правило Ленца.

Присоединив катушку, в которой возникает индукционный ток, к гальванометру, обнаружим, что направление этого тока зависит от того, приближается ли магнит к катушке или удаляется от неё.

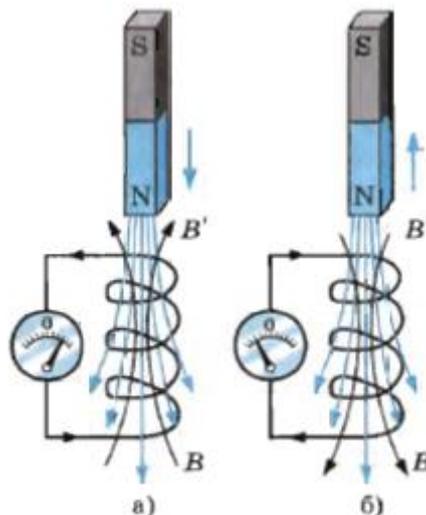


Рис.

Возникающий индукционный ток того или иного направления как-то взаимодействует с магнитом (притягивает или отталкивает).

Катушка с протекающим по ней током подобна магниту с двумя полюсами—северным и южным.

Направление индукционного тока определяет, какой конец катушки играет роль северного полюса (линии магнитной индукции выходят из него).

Опираясь на закон сохранения энергии, можно предсказать, в каких случаях катушка будет притягивать магнит, а в каких—отталкивать.

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, обращённому одноимённым полюсом к приближающему к ней магниту. Одноимённые же полюсы отталкиваются.

При удалении магнита, наоборот, в соответствии с законом сохранения энергии требуется, чтобы появилась сила притяжения.

Правило Ленца.

Исходя из сказанного выше мы подошли к главному:

--при увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует нарастанию магнитного потока через витки катушки. Ведь линии индукции **\mathbf{B}** этого поля направлены против линий индукции **\mathbf{B}** поля, изменение которого порождает электрический ток. Если же магнитный поток через катушку ослабевает, то индукционный ток создаёт магнитное поле с индукцией **\mathbf{B}** , увеличивающее магнитный поток через витки катушки.

В этом 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.

Применять правило Ленца для нахождения направления индукционного тока \mathbf{I}_i в контуре надо так:

1. Установить направление линий магнитной индукции \mathbf{B} внешнего магнитного поля.
2. Выяснить, увеличивается ли поток магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ($\Delta\Phi > 0$), или уменьшается ($\Delta\Phi < 0$).
3. Установить направление линий магнитной индукции \mathbf{B} магнитного поля индукционного тока \mathbf{I}_i . Эти линии должны быть согласно правилу Ленца противоположно направлены линиям \mathbf{B} при $\Delta\Phi > 0$ и иметь одинаковое с ним направление при $\Delta\Phi < 0$.
4. Зная направление линий магнитной индукции \mathbf{B} найти направление индукционного тока \mathbf{I}_i , пользуясь правилом буравчика.

Закон электромагнитной индукции.

Сформулируем закон электромагнитной индукции количественно. Опыты Фарадея показали, что сила индукционного тока \mathbf{I}_i в проводящем контуре пропорциональна скорости изменения числа линий магнитной индукции \mathbf{B} пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром.

Боле точно это утверждение можно сформулировать, используя понятие «магнитный поток».

Магнитный поток наглядно истолковывается как число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S . Поэтому скорость изменения этого числа есть не что иное, как скорость изменения магнитного потока.

Если за малое время Δt магнитный поток меняется на $\Delta\Phi$, то скорость изменения магнитного потока равна:

$$\Delta\Phi/\Delta t$$

Поэтому утверждение, вытекающее из опыта, можно сформулировать так:

--сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром

$$I_i \sim \Delta\Phi/\Delta t$$

ЭДС индукции

Известно, что в цепи появляется электрический ток в том случае, когда на свободные заряды проводника действуют сторонние силы.

Работу этих сил при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура называют ЭДС.

Следовательно, при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в последнем появляются сторонние силы, действие которых характеризуется ЭДС, называемой ЭДС индукции. Обозначают её буквой E_i .

Согласно закону Ома для замкнутой цепи

$$I_i = E_i/R$$

Сопротивление проводника не зависит от изменения магнитного потока.

Следовательно, соотношение

$$I_i \sim \Delta\Phi/\Delta t$$

Справедливо только потому, что ЭДС индукции пропорциональна $\Delta\Phi/\Delta t$

Закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС, а не для силы тока. При такой формулировке закон выражает

сущность явления, не зависящую от свойств проводников, в которых возникает индукционный ток.

Согласно закону электромагнитной индукции:

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

$$\mathcal{E}_i = |\Delta\Phi/\Delta t|$$

Как в законе электромагнитной индукции учесть направление индукционного тока (или знак ЭДС индукции) в соответствии с правилом Ленца?

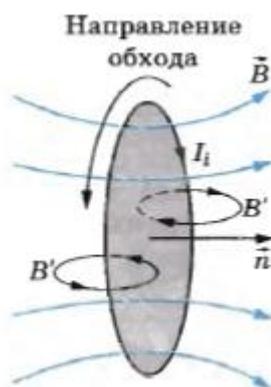


Рис.

На рисунке изображён замкнутый контур. Будем считать положительным направлением обхода контура против часовой стрелки.

Нормаль к контуру \mathbf{n} образует правый винт с направлением обхода. Пусть магнитная индукция B внешнего поля направлена вдоль нормали к контуру и возрастает со временем. Тогда:

$$\Phi > 0 \text{ и } \Delta\Phi/\Delta t > 0$$

Согласно правилу Ленца индукционный ток создаёт магнитный поток $\Phi^1 < 0$

Линии индукции B^1 магнитного поля индукционного тока изображены на рисунке.

Следовательно, индукционный ток I_i , согласно правилу буравчика направлен по часовой стрелке (против направления положительного обхода) и ЭДС индукции отрицательна. Поэтому в законе электромагнитной индукции должен стоять знак «--», указывающий на то, что E_i и $\Delta\Phi/\Delta t$ имеют разные знаки.

$$E_i = -\Delta\Phi/\Delta t$$

Вихревое электрическое поле.

ЭДС индукции возникает либо в неподвижном проводнике, помещённом в изменяющееся во времени поле, либо в проводнике, движущемся в магнитном поле, которое может и не меняться со временем.

Значение ЭДС в обоих случаях определяется законом

$$E_i = -\Delta\Phi/\Delta t,$$

но происхождение ЭДС различно.

Рассмотрим сначала первый случай.

Пусть перед нами стоит трансформатор—две катушки, надетые на сердечник.

Включив одну из обмоток в сеть переменного тока, мы получим ток в другой обмотке, если она замкнута. Электроны в проводах вторичной обмотки придут в движение. Но какие силы заставляют их двигаться?

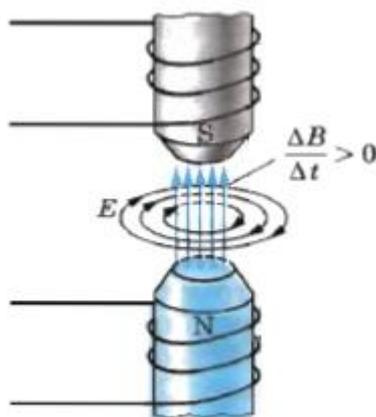


Рис.

Само магнитное поле, пронизывающее катушку, этого сделать не может, т.к. магнитное поле действует исключительно на движущиеся заряды (этим-то оно и отличается от электрического), а проводник с находящимися в нём электронами неподвижен. Кроме магнитного поля, на заряды, причём как на движущиеся, так и на неподвижные действует ещё поле электрическое. Но ведь те поля, о которых пока шла речь (электростатические) создаются электрическими зарядами, а индукционный ток появляется в результате действия переменного магнитного поля.

Это заставляет предположить, что электроны в неподвижном проводнике приводятся в движение электрическим полем и это поле непосредственно порождается переменным магнитным полем. Тем самым утверждается новое фундаментальное свойство поля: **--изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое поле.**

К этому выводу впервые пришёл Дж. Максвелл.

Теперь явление электромагнитной индукции предстаёт перед нами в новом свете.

Главное в нём—это процесс порождения магнитным полем поля электрического. При этом наличие проводящего контура, например катушки, не меняет существа дела.

Электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, имеет совсем другую структуру, чем электростатическое. Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами и его линии напряжённости не могут на них начинаться и кончаться. Они вообще нигде не начинаются и не кончаются, а представляют собой замкнутые линии, подобные линиям индукции магнитного поля. Это так называемое вихревое электрическое поле.

Направление силовых линий напряжённости \mathbf{E} совпадает с направлением индукционного тока. Сила, действующая со стороны вихревого электрического поля на заряд q (сторонняя сила), по-прежнему равна:

$$\mathbf{F}=q\mathbf{E}$$

Но в отличие от стационарного электрического поля работа вихревого тока на замкнутом пути не равна нулю. Ведь при перемещении заряда вдоль замкнутой линии напряжённости

электрического поля работа на всех участках пути имеет один и тот же знак, так как сила и перемещение совпадают по направлению. Работа вихревого электрического поля при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.

ЭДС индукции в движущихся проводниках.

Явление электромагнитной индукции наблюдается и тех случаях, когда магнитное поле не изменяется во времени, но магнитный поток через контур изменяется из-за движения проводников контура в магнитном поле. В этом случае причиной возникновения ЭДС индукции является не вихревое электрическое поле, а сила Лоренца.

Рассмотрим прямоугольный контур в однородном магнитном поле, вектор индукции \mathbf{B} которого перпендикулярен плоскости контура. Если провод скользит с постоянной скоростью \mathbf{v} по двум проводникам контура (см. рис.), то за время Δt изменяется на величину:

$$\Delta S = -lv\Delta t$$

А магнитный поток через контур-на:

$$\Delta \Phi = -Biv\Delta t$$

Поэтому ЭДС индукции в контуре будет равна:

$$E_i = -\Delta \Phi / \Delta t = vBi$$

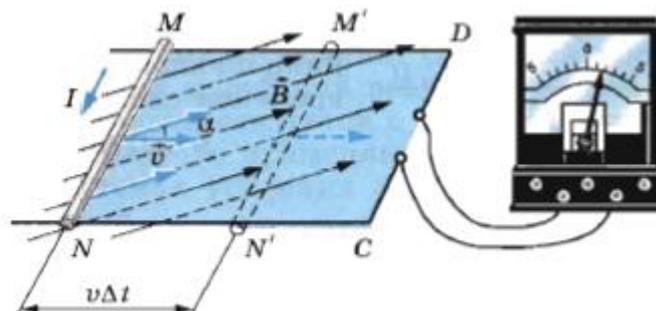


Рис.

В проводнике, движущемся в магнитном поле, на электрический заряд q действует сила Лоренца:

$$\mathbf{F}_l = q\mathbf{v}\mathbf{B}$$

Вычислим работу силы Лоренца, действующей на электрический заряд q за время полного обхода контура.

На пути длиной l работа силы Лоренца равна:

$$A = \mathbf{F}_l \cdot \mathbf{l} = q\mathbf{v}\mathbf{B}l$$

В неподвижных частях контура сила Лоренца равна нулю, поэтому полная работа силы Лоренца при обходе контура зарядом q равна работе силы Лоренца на движущемся участке контура.

Рассматривая работу силы Лоренца как работу сторонних сил в контуре, мы получим выражение для ЭДС сторонних сил:

$$\mathbf{E} = A/q = \mathbf{v}\mathbf{B}l \quad 2$$

Совпадение выражений 1 и 2 показывает, что причиной возникновения ЭДС индукции в контуре в этом случае является действие силы Лоренца на заряды в движущемся проводнике.

Самоиндукция.

Если по катушке протекает переменный ток, то магнитный поток, пронизывающий катушку, меняется.

Поэтому возникает ЭДС индукции в том же проводнике, по которому протекает переменный ток.

Это явление называют самоиндукцией.

При самоиндукции проводящий контур играет двойную роль: --по нему протекает ток, вызывающий индукцию, и в нём же появляется ЭДС индукции E_{is} .

По правилу Ленца в момент нарастания тока напряжённость вихревого электрического поля направлена против тока.

Следовательно, в этот момент вихревое поле препятствует нарастанию тока.

Наоборот, в момент уменьшения тока вихревое поле поддерживает его.

Это приводит к тому, что при замыкании цепи, содержащей источник постоянной ЭДС, определённое значение силы тока устанавливается не сразу, а постепенно, с течением времени. (смотри график).

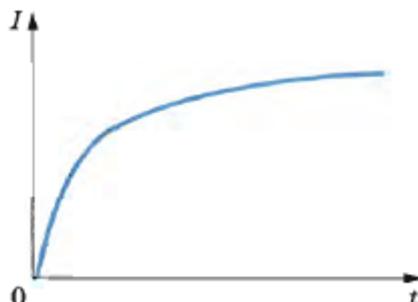


Рис.

С другой стороны, при отключении источника ток в замкнутых контурах прекращается не мгновенно. Возникающая при этом ЭДС самоиндукции может превышать ЭДС источника, так как изменение тока и его магнитного поля при отключении источника происходит очень быстро.

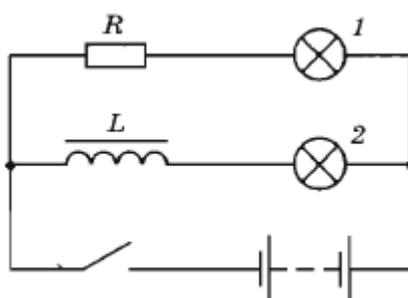


Рис.

Явление самоиндукции можно наблюдать на простых опытах. На рисунке показана схема параллельного соединения двух одинаковых ламп. Одну из них подключим к источнику через резистор R , а вторую—последовательно с катушкой L с железным сердечником.

При замыкании ключа первая лампа загорается сразу, а вторая—с заметным запозданием. ЭДС самоиндукции в цепи этой лампы

велика, и сила тока не сразу достигает своего максимального значения.

Появление ЭДС самоиндукции при размыкании можно наблюдать на опыте с цепью, схематически показанной на рисунке.

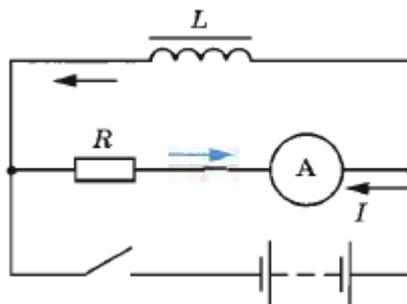


Рис.

При размыкании ключа в катушке L , возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая первоначальный ток. В результате через гальванометр в момент размыкания (стрелка Π), направленный против начального тока до размыкания (стрелка i).

Сила тока при размыкании цепи может превосходить силу тока, проходящего через гальванометр при замкнутом ключе.

Это означает, что ЭДС самоиндукции E_{is} больше ЭДС E батареи элементов.

Индуктивность.

Модуль вектора \mathbf{B} индукции магнитного поля, созданного током, пропорционален силе тока. Так как магнитный поток Φ пропорционален \mathbf{B} , то:

$$\Phi \sim B \sim I$$

Можно следовательно утверждать, что:

$$\Phi = LI,$$

Где L —коэффициент пропорциональности между током в проводящем контуре и магнитным потоком, пронизывающим этот контур.

Величину L называют индуктивностью контура или его коэффициентом самоиндукции.

Используя закон электромагнитной индукции и выражение

$$\Phi = LI,$$

получим равенство:

$$E_{is} = -\Delta\Phi/\Delta t = -L\Delta I/\Delta t,$$

если считать, что форма контура остаётся неизменной и поток меняется только за счёт изменения силы тока.

Из формулы видно, что индуктивность, --это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1А за время 1с.

Индуктивность, подобно ёмкости, 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.

Единицу индуктивности в СИ называют «Генри» (Гн).

Индуктивность проводника равна 1Гн, если в нём при изменении силы тока на 1А за 1с возникает ЭДС самоиндукции в 1В.

$$1\text{Гн} = 1\text{В}/1\text{А}/\text{с} = 1\text{В}\cdot\text{с}/\text{А}$$

Явление самоиндукции играет очень важную роль в электротехнике и радиотехнике. Индуктивность цепи оказывает существенное влияние на прохождение по цепи переменного электрического тока.

Вывод:--при изменении силы тока в проводнике, в последнем возникает вихревое электрическое поле. Это поле тормозит электроны при возрастании силы тока и ускоряет при убывании.

Колебательный контур. Превращение электрической энергии при электромагнитных колебаниях.

Простейшая система, в которой могут происходить свободные электромагнитные колебания, состоит из конденсатора и катушки,

присоединённой к его обкладкам. Такая система называется контуром.

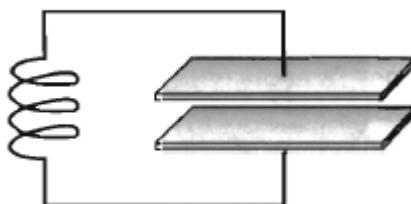


Рис.

Рассмотрим, почему в контуре возникают колебания. Зарядим конденсатор, присоединив его на некоторое время к батарее.

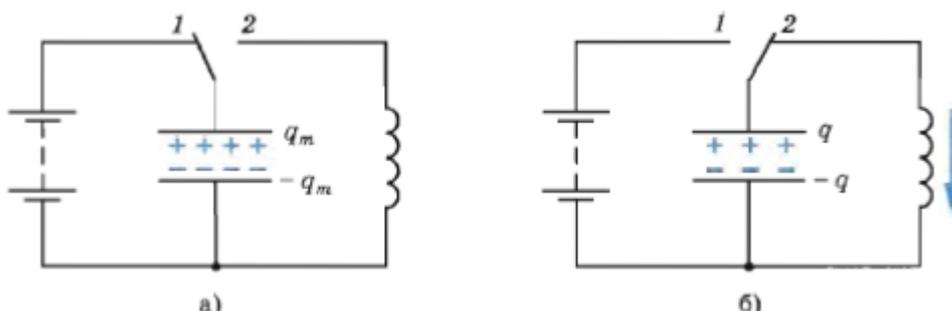


Рис.

При этом конденсатор получит энергию:

$$W_p = q^2 m / 2C \quad U = q / C$$

Где q_m —заряд конденсатора, а C —ёмкость.

Между обкладками конденсатора возникает разность потенциалов U_m .

Переведём переключатель в положение 2. Конденсатор начнёт разряжаться, и в цепи появится электрический ток.

Сила тока не сразу достигнет максимального значения, а увеличивается постепенно. Это обусловлено явлением самоиндукции.

При появлении тока возникает переменное магнитное поле. Это переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле в проводнике, которое при нарастании магнитного поля действует против тока и препятствует его мгновенному увеличению.

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля тока, которая определяется по формуле:

$$W_m = Li^2/2$$

Где i —сила переменного тока, а L —индуктивность катушки. Полная энергия W электромагнитного поля контура равна сумме энергий магнитного и электрического полей:

$$W = Li^2/2 + q^2/2C$$

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 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 вихревое электрическое поле, которое поддерживает ток.

В результате конденсатор перезаряжается до тех пор, пока сила тока, постепенно уменьшаясь, не станет равной нулю. Энергия магнитного поля в этот момент также будет равна нулю, а энергия электрического поля конденсатора опять станет максимальной. После этого конденсатор вновь начнёт 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, и её значение в любой момент времени было бы равно максимальной энергии электрического поля или максимальной энергии магнитного поля:

$$W = Li^2/2 + q^2/2C = q^2m/2C = LI_m^2/2$$

Но в действительности потери энергии неизбежны. Так, в частности, катушка и соединительные провода обладают сопротивлением R , и это ведёт к постепенному превращению энергии электромагнитного поля во внутреннюю энергию проводника.

Уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре.

Рассмотрим колебательный контур, сопротивлением R которого можно пренебречь.

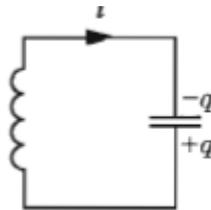


Рис.

Уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре, можно получить с помощью закона сохранения энергии. Полная электромагнитная энергия W контура в любой момент времени равна сумме энергий магнитного и электрического полей:

$$W = Li^2/2 + q^2/2C$$

Эта энергия не меняется с течением времени, если сопротивление R контура равно нулю.

Производная полной энергии по времени равна нулю, так как полная энергия постоянна.

Следовательно, равна нулю сумма производных по времени от энергий магнитного и электрического полей:

$$(Li^2/2)' + (q^2/2C)' = 0$$

или:

$$(Li^2/2)' = -(q^2/2C)'$$

Физический смысл последнего уравнения состоит в том, что скорость изменения энергии магнитного поля по модулю равна скорости изменения энергии электрического поля; знак «минус» указывает на то, что, когда энергия электрического поля возрастает, энергия магнитного поля убывает (и наоборот). Именно благодаря этому полная энергия не меняется.
Вычисляя обе производные этого уравнения, получим:

$$L2i' / 2 = -1/2C \cdot 2qq'$$

Но производная заряда по времени представляет собой силу тока в данный момент времени:

$$i = \lim \Delta q / \Delta t = q'$$

Поэтому уравнение можно записать в следующем виде:

$$Lii' = -qi/C$$

Производная силы тока по времени есть не что иное, как вторая производная заряда по времени.

Подставив в уравнение $i' = q''$ и разделив левую и правую части этого уравнения на Li , получим основное уравнение, описывающее свободные электромагнитные колебания в контуре:

$$q'' = -1/LC \cdot q.$$

Решение уравнения, описывающего свободные колебания.

Если просто считать, что $q = q_m \cos t$ или $q = q_m \sin t$, то в этом случае вместо:

$$q'' = -1/LC \cdot q$$

получилось бы равенство:

$$q'' = -q \cos t = -q.$$

Но небольшое усложнение формы решения сразу приведёт к цели. Чтобы в выражении второй производной был множитель

$$1/LC,$$

запишем решение уравнения в следующем виде:

$$q = q_m \cos(1/LC)^{1/2} t$$

В этом случае первая производная принимает вид:

$$q' = -(1/LC)^{1/2} q_m \sin(1/LC)^{1/2} t$$

а вторая производная будет равна:

$$q'' = -1/LC \cdot q_m \cdot \cos(1/LC)^{1/2} t = -1/LC \cdot q$$

Таким образом мы получили в точности основное уравнение. Следовательно функция

$$q = q_m \cos(1/LC)^{1/2} t$$

и есть решение исходного уравнения.

Обозначив постоянную величину

$(1/LC)^{1/2}$, зависящую от свойств системы, через $\omega_0 = (1/LC)^{1/2}$,

Тогда решение уравнения $q = q_m \cos(1/LC)^{1/2} t$ можно записать в более компактной форме:

$$q = q_m \cos \omega_0 t$$

Само же уравнение, описывающее свободные электромагнитные колебания, примет следующий вид:

$$q'' = -\omega_0^2 q$$

График зависимости заряда от времени представляет собой косинусоиду

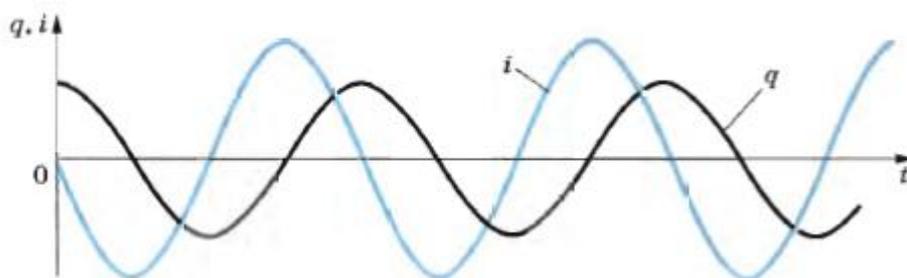


Рис.

Период и частота гармонических колебаний.

Выясним физический смысл величины ω .

При колебаниях значения заряда периодически повторяются. Минимальный промежуток времени T , через который процесс полностью повторяется, называется периодом колебаний.

Зная период, можно определить частоту колебаний, т.е. число колебаний в единицу времени, например в секунду.

Если одно колебание совершается за время T , то число колебаний за 1с ν определяется так:

$$\nu = 1/T$$

В Международной системе СИ частота колебаний равна единице, если за 1с совершается одно колебание.

Единица частоты называется герцем (Гц) в честь немецкого физика Генриха Герца.

Через промежуток времени, равный периоду T , т.е. при увеличении аргумента косинуса на ωT , значение заряда повторяется и косинус принимает прежнее значение. Из курса математики известно, что наименьший период косинуса равен 2π .

Следовательно,

$$\omega T = 2\pi$$

Откуда

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$$

Таким образом, величина ω_0 —это число колебаний, но не за 1с, а за 2π с. Она называется циклической или круговой частотой. Частоту свободных колебаний называют собственной частотой колебательной системы.

Формула Томсона.

Квадрат циклической частоты колебаний заряда равен:

$$\omega_0^2 = 1/LC$$

Период свободных колебаний в контуре равен:

$$T = 2\pi / \omega_0 = 2\pi(LC)^{1/2}$$

Формула называется формулой Томсона в честь английского физика, который её впервые вывел.

Увеличение периода колебаний с ростом L и C наглядно можно объяснить так. При увеличении индуктивности, ток медленнее нарастает со временем и медленнее падает до нуля. А чем больше ёмкость, тем большее время требуется для перезарядки конденсатора.

В реальном колебательном контуре ($R \neq 0$) свободные электромагнитные колебания являются затухающими.

Рис.

Чем больше сопротивление R контура, тем больше период колебаний. При достаточно большом сопротивлении колебания совсем не возникают.

Фаза колебаний.

При заданной амплитуде гармонических колебаний заряд конденсатора в любой момент времени однозначно определяется аргументом косинуса (или синуса):

$$\varphi = \omega t$$

Величину φ , стоящую под знаком косинуса или синуса, называют фазой колебаний, описываемых этими функциями. Выражается фаза в угловых единицах—радианах.

Фаза определяет значение не только заряда, но и других физических величин, например силы тока и напряжения, изменяющихся также по гармоническому закону.

Поэтому можно сказать, что фаза определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени. В этом состоит значение понятия «фаза».

Колебания с одинаковыми амплитудами и частотами могут отличаться друг от друга фазами.

Так как

$$\omega = 2\pi/T$$

то

$$\varphi = \omega t = 2\pi t/T$$

Отношение t/T показывает, какая часть периода прошла от момента начала колебаний.

Переменный электрический ток.

Переменный электрический ток представляет собой не что иное, как вынужденные электромагнитные колебания.

Сила тока и напряжение меняются со временем по гармоническому закону.

Частота переменного тока – это число колебаний в 1с. Стандартная частота промышленного переменного тока—50Гц.

Это означает, что на протяжении 1с ток 50 раз течёт в одну сторону и 50 раз в противоположную.

Если напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону, то напряжённость электрического поля внутри проводников будет также изменяться гармонически. Эти гармонические изменения напряжённости поля вызовут гармонические колебания скорости упорядоченного движения заряженных частиц и, следовательно, гармонические колебания силы тока.

Проволочную рамку, вращающуюся в постоянном однородном магнитном поле можно рассматривать как простейшую модель генератора переменного тока.

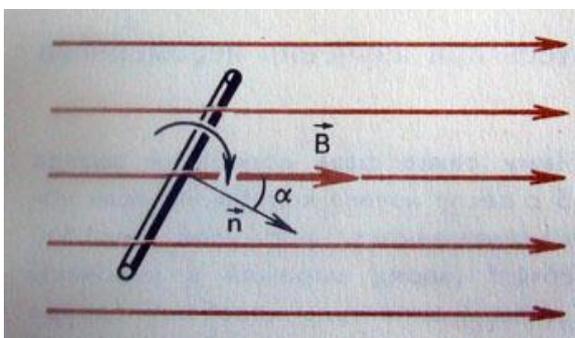


Рис.

Поток магнитной индукции Φ , пронизывающий проволочную рамку площадью S , пропорциональную косинусу угла α между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции:

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

При равномерном вращении рамки угол α увеличивается прямо пропорционально времени:

$$\alpha = 2\pi nt$$

где n – частота вращения.

Поэтому поток магнитной индукции меняется гармонически:

$$\Phi = BS \cos 2\pi n t$$

Множитель $2\pi n$ представляет собой число колебаний магнитного потока за 2π с. Это не что иное, как циклическая частота колебаний

$$\omega = 2\pi n$$

Следовательно

$$\Phi = BS \cos \omega t$$

Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС индукции в рамке равна взятой со знаком «--» скорости изменения потока магнитной индукции, т.е. производной потока магнитной индукции по времени:

$$e = -\dot{\Phi} = -BS(\cos \omega t)' = BS\omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

где $E_m = BS\omega$ — амплитуда ЭДС индукции.

Вынужденные электрические колебания, происходящие в цепях под действием напряжения, меняющегося с частотой ω по синусоидальному или косинусоидальному закону:

$$u = U_m \sin \omega t \quad \text{или} \quad u = U_m \cos \omega t$$

где U_m — максимальное значение по модулю амплитуды напряжений.

Если напряжение меняется с частотой ω , то сила тока в цепи будет меняться с той же частотой. Но колебания силы тока не обязательно должны совпадать по фазе с колебаниями напряжения. Поэтому в общем случае сила тока в любой момент времени (мгновенное значение силы тока) i определяется по формуле:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

где I_m —максимальное значение по модулю амплитуды тока;
 φ —разность (сдвиг) фаз между колебаниями силы тока и напряжения.

Активное сопротивление. Действующие значения силы тока и напряжения.

Пусть цепь состоит из соединительных проводов и нагрузки с малой индуктивностью и значительным сопротивлением R .

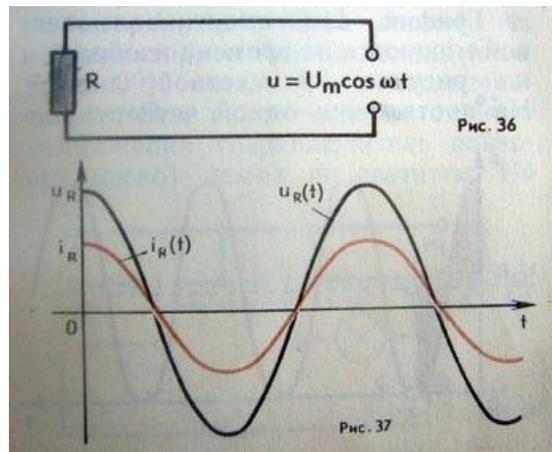


Рис.

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:

$$i = U/R = U_m \cos \omega t / R = I_m \cos \omega t$$

В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения, а амплитуда силы тока определяется равенством:

$$I_m = U_m / R$$

Мощность в цепи постоянного тока на участке цепи сопротивлением R определяется формулой:

$$P = I^2 R$$

На протяжении очень малого промежутка времени переменный ток можно считать неизменным. Поэтому мгновенная мощность в цепи переменного тока на участке, имеющем активное сопротивление R , определяется формулой:

$$p = i^2 R$$

Найдём среднее значение мощности за период. Для этого сначала преобразуем формулу, подставляя в неё выражение для силы тока:

$$i = I_m \cos \omega t$$

и используя соотношение:

$$\cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}$$

получим:

$$P = I_m^2 / 2R (1 + \cos 2\omega t) = I_m^2 / 2R + I_m^2 / 2R \cos 2\omega t$$

График зависимости мгновенной мощности от времени будет иметь следующий вид:

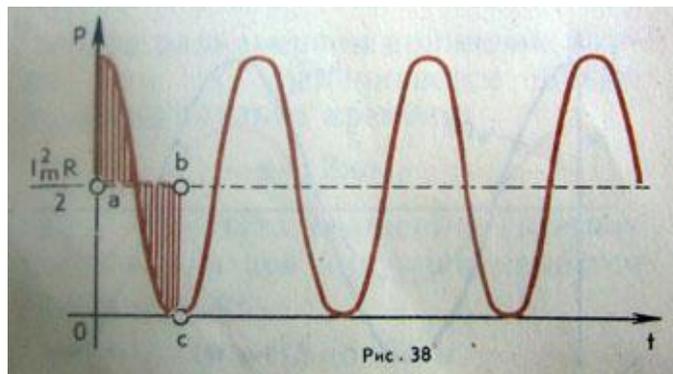


Рис.

На протяжении одной четверти периода, когда $\cos 2\omega t > 0$, мощность в любой момент времени больше величины $I^2 m R / 2$.

Зато на протяжении следующей четверти периода, когда $\cos 2\omega t < 0$, мощность в любой момент времени меньше величины:

$$I^2 m R / 2$$

Среднее значение за период: $\cos 2\omega t = 0$

На протяжении одной четверти периода эта функция пробегает ряд положительных значений, а на протяжении следующей четверти периода—такой же ряд отрицательных явлений.

В результате средняя за период мощность равна:

$$I^2 m R / 2,$$

а энергия, выделяемая за половину периода численно равна площади прямоугольника OABC.

Итак средняя мощность P за период равна первому члену в формуле:

$$P = i^2 R = I^2 m R / 2$$

Действующее значение силы тока и напряжения.

Из формулы $P = I^2 m R / 2$ видно, что величина $I^2 m / 2$ есть среднее значение за период времени значение квадрата силы тока:

$$i^2 = I^2 m / 2$$

Величина, равная квадратному корню из среднего значения квадрата силы тока, называется действующим значением силы переменного тока.

Действующее значение силы переменного тока:

$$I = (i^2)^{1/2} = I m / 2^{1/2}$$

Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, выделяющего в проводнике то же количество теплоты, что и переменный ток за то же время.

Действующее значение переменного напряжения определяется аналогично:

$$U=(u^2)^{1/2}=U_m/2^{1/2}$$

Заменяя в формуле $I_m=U_m/R$ амплитудные значения силы тока и напряжения через действующие значения, получим:

$$I=U/R$$

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 и средняя мощность. Именно действующие значения силы тока и напряжения регистрируют амперметры и вольтметры переменного тока.

Кроме того, действующие значения удобнее и потому, что именно они непосредственно определяют среднее значение p мощности переменного тока, или, как принято говорить, мощность переменного тока P на участке цепи:

$$P=UI=I^2R=U^2/R.$$

Колебания силы тока в цепи с резистором совпадают по фазе с колебаниями напряжения. Мощность в цепи переменного тока определяется действующими значениями силы тока и напряжения.

Конденсатор в цепи переменного тока.

Постоянный ток не может существовать в цепи, содержащей конденсатор. Ведь фактически при этом цепь оказывается разомкнутой, так как обкладки конденсатора разделены диэлектриком.

Переменный же ток способен течь в цепи, содержащей конденсатор. В этом можно убедиться с помощью простого опыта.

Пусть имеются источники постоянного и переменного напряжений, причём постоянное напряжение на зажимах источника равно действующему значению переменного напряжения.

Цепь состоит из конденсатора и лампы накаливания, соединённых последовательно

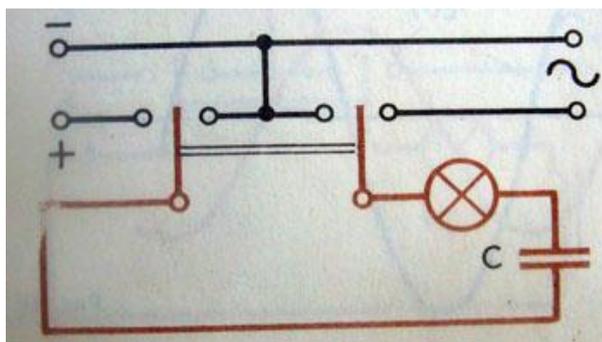


Рис.

При включении постоянного напряжения (переключатель повернут влево) лампа не светится. Но при включении переменного напряжения (переключатель повернут вправо) лампа загорается, если ёмкость конденсатора достаточно велика.

Как же переменный ток может течь по цепи, если она фактически разомкнута (между пластинами конденсатора заряды перемещаться не могут) ?

А происходит периодическая зарядка и разрядка конденсатора под действием переменного напряжения. Ток, текущий в цепи при перезарядке конденсатора, нагревает нить лампы.

Найдём, как меняется со временем сила тока в цепи, содержащей только конденсатор, если сопротивлением проводов и обкладок конденсатора можно пренебречь.

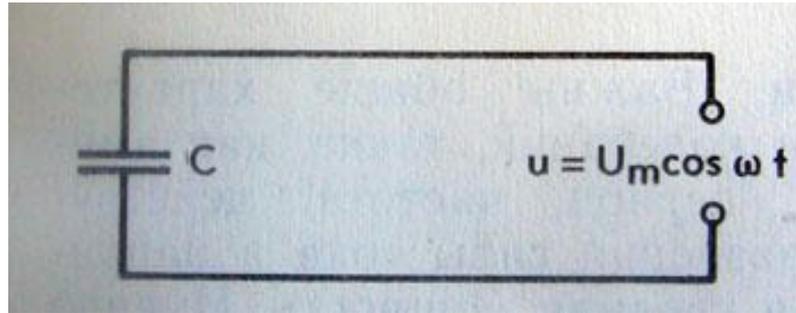


Рис.

Напряжение на конденсаторе

$$u = \phi_1 - \phi_2 = q/C$$

будет равно напряжению на концах цепи. Следовательно,

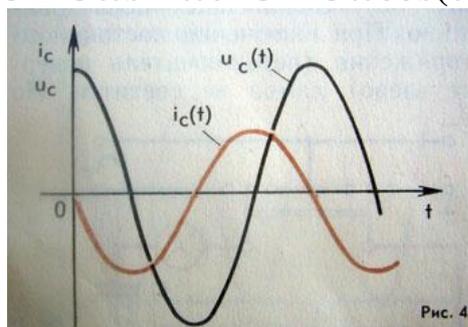
$$q/C = U_m \cos \omega t$$

Заряд конденсатора меняется по гармоническому закону:

$$q = C U_m \cos \omega t$$

Сила тока, представляющая собой производную заряда по времени, равна:

$$i = q' = -U_m C \omega \sin \omega t = U_m C \omega \cos(\omega t + \pi/2).$$



Следовательно, колебания силы тока опережают колебания напряжения на конденсаторе на $\pi/2$.

Это означает, что в момент, когда конденсатор начинает заряжаться, сила тока максимальна, а напряжение равно нулю.

После того как напряжение достигнет максимума, сила тока становится равной нулю и т.д.

Амплитуда силы тока равна:

$$I_m = U_m C \omega$$

Если ввести обозначение: $1/\omega C = X_c$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим:

$$I = U / X_c$$

Величину X_c , обратную произведению циклической частоты на электрическую ёмкость конденсатора, называют ёмкостным сопротивлением. Роль этой величины аналогична роли активного сопротивления R в законе Ома.

Действующее значение силы тока связано с действующим значением напряжения на конденсаторе точно также, 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 (ёмкостное сопротивление).

Чем больше ёмкость конденсатора, тем больше согласно формуле

$$I_m = U_m C \omega$$

ток перезарядки. Это легко обнаружить по увеличению накала лампы при увеличении ёмкости конденсатора.

В то время как сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико, его сопротивление переменному току имеет конечное значение X_c . С ростом ёмкости оно уменьшается.

Уменьшается оно и с увеличением частоты.

Это можно увидеть, если для питания цепи, изображённой на рисунке, использовать генератор переменного тока регулируемой частоты. Плавно увеличивая частоту переменного тока, можно обнаружить увеличение накала лампы. Оно вызвано увеличением силы тока за счёт уменьшения ёмкостного сопротивления X_c конденсатора.

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.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока.

Индуктивность в цепи влияет на силу переменного тока. Это можно доказать с помощью простого опыта.

Составим цепь из катушки индуктивности и электрической лампы накаливания.

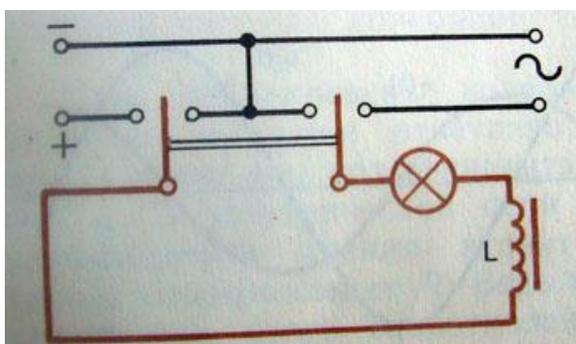


Рис.

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 между собой. Опыт показывает, что лампа светит 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 нарастании силы тока 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 достигать тех значений, которые она бы приобрела 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.

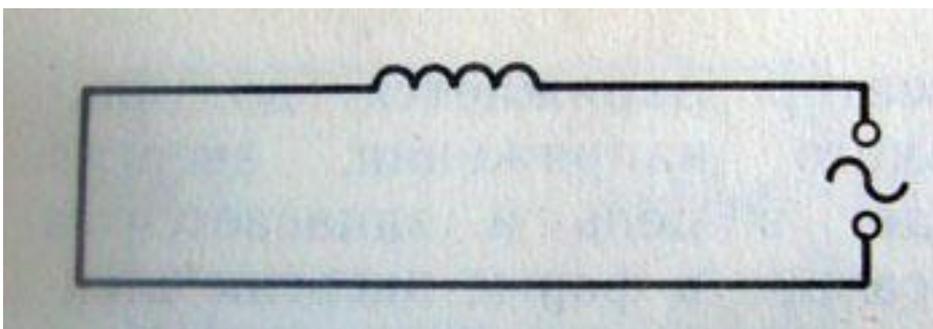


Рис.

Для этого предварительно найдём связь между напряжением на катушке и ЭДС самоиндукции в ней. Если сопротивление катушки равно нулю, то и напряжённость электрического поля в любой момент времени должна равняться нулю. Иначе сила тока согласно закону Ома была бы бесконечно большой. Равенство нулю напряжённости поля оказывается возможным потому, что напряжённость вихревого электрического поля E_i , порождаемого переменным магнитным полем, в каждой точке равна по модулю и противоположна по направлению напряжённости кулоновского поля E_k , создаваемого в проводнике зарядами, расположенными на зажимах источника и в проводах цепи.

Из равенства $E_i = -E_k$ следует, что удельная работа вихревого поля (т.е. ЭДС самоиндукции) равна по модулю и противоположна по знаку удельной работе кулоновского поля. Учитывая, что удельная работа кулоновского поля равна напряжению на концах катушки, можно записать:

$$e_i = -u$$

При изменении силы тока по гармоническому закону:

$$i = I_m \sin \omega t$$

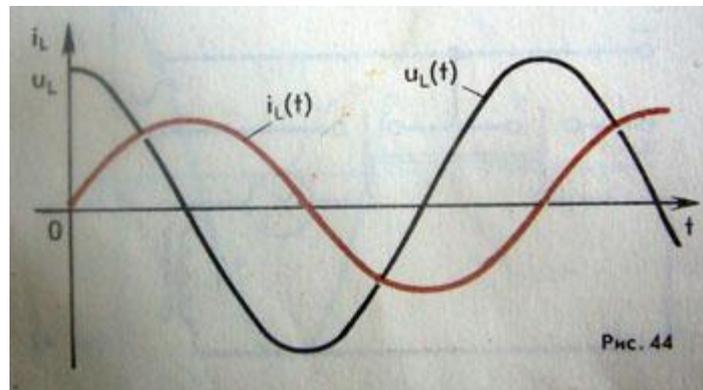
ЭДС самоиндукции равна:

$$e_i = -L i' = -L \omega I_m \cos \omega t.$$

Так как $u = -e_i$, то напряжение на концах катушки будет равным:

$$u = L \omega I_m \cos \omega t = L \omega I_m \sin(\omega t + \pi/2) = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$$

$U_m = L \omega I_m$ — амплитуда напряжения.



Следовательно, колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока на $\pi/2$, или, что то же самое, колебания силы тока отстают от колебаний напряжения на $\pi/2$.

В момент, когда напряжение на катушке достигает максимума, сила тока равна нулю.

В момент, когда напряжение становится равным нулю, сила тока максимальна по модулю.

Амплитуда силы тока в катушке равна:

$$I_m = U_m / \omega L$$

Если ввести обозначение $\omega L = X_L$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим:

$$I = U / X_L$$

Величину X_l , равную произведению циклической частоты на индуктивность, называют индуктивным сопротивлением. Индуктивное сопротивление зависит от частоты. 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. При увеличении частоты или индуктивности сила тока в цепи уменьшается. Это свидетельствует об увеличении сопротивления цепи с ростом **L** и **ω** .

Резонанс в электрической цепи.

Резонанс возникает в том случае, когда собственная частота колебаний системы совпадает с частотой изменения внешней силы. При механических колебаниях резонанс выражен отчётливо при малых значениях коэффициента трения μ . В электрической цепи роль коэффициента трения играет активное сопротивление R . Ведь именно наличие этого сопротивления в цепи приводит к превращению энергии тока во внутреннюю энергию проводника. Поэтому резонанс в электрическом колебательном контуре должен быть отчётливо выражен при малом значении R . Если R мало, то собственная частота колебаний в контуре определяется формулой:

$$\omega_0 = 1/(LC)^{1/2}$$

Сила тока при вынужденных колебаниях должна достигать максимальных значений, когда частота переменного напряжения, приложенного к контуру, равна собственной частоте колебательного контура:

$$\omega = \omega_0 = 1/(LC)^{1/2}$$

Резонансом в электрическом колебательном контуре называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний

силы тока при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура.

Амплитуда силы тока при резонансе.

При резонансе в колебательном контуре создаются оптимальные условия для поступления энергии от внешнего источника в контур. Мощность в контуре максимальна в том случае, когда сила тока совпадает по фазе с напряжением.

Установление колебаний происходит постепенно. Амплитуда колебаний силы тока нарастает до тех пор, пока энергия, выделяющаяся за период на резисторе, не сравняется с энергией, поступающей в контур за это же время:

$$I_m^2 R / 2 = U_m I_m / 2$$

После упрощения это уравнение примет следующий вид:

$$I_m R = U_m$$

Отсюда амплитуда установившихся колебаний силы тока при резонансе определяется уравнением:

$$I_m = U_m / R$$

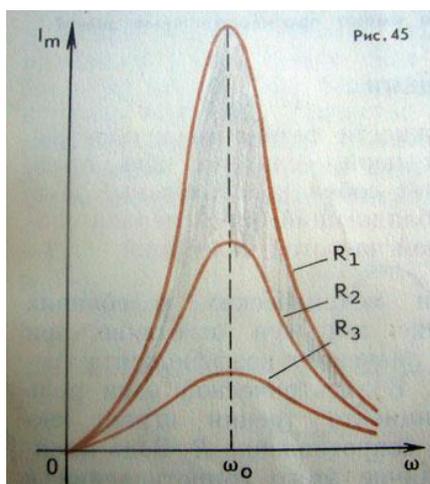


Рис.

При $R=0$ резонансное значение силы тока неограниченно возрастает: $(I_m)_{рез} \rightarrow \infty$

При увеличении R максимальное значение силы тока уменьшается и при больших значениях R говорить уже о резонансе не имеет смысла.

Одновременно с ростом силы тока при резонансе резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Эти напряжения при малом активном сопротивлении во много раз превосходят внешнее напряжение.

Использование резонанса в радиосвязи.

Явление электрического резонанса используется при осуществлении радиосвязи. Радиоволны от различных передающих станций возбуждают в антенне радиоприёмника переменные токи различных частот, так как каждая передающая радиостанция работает на своей частоте. С антенной связан колебательный контур.

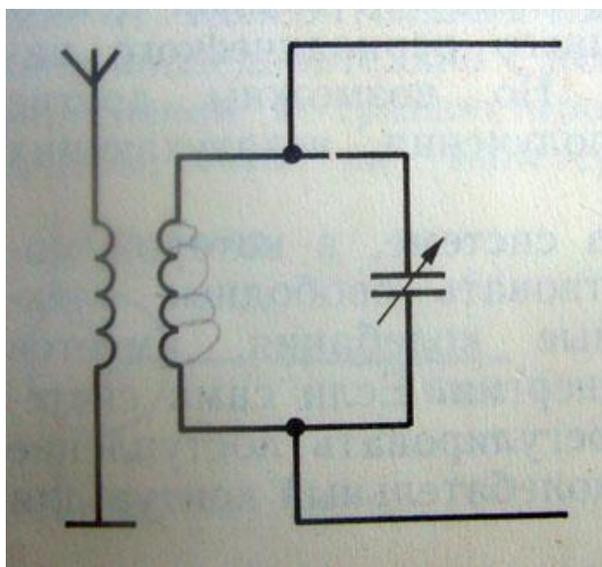


Рис.

Вследствие электромагнитной индукции в контурной катушке возникают переменные ЭДС соответствующих частот и вынужденные колебания силы тока этих же частот. Но только при резонансе колебания силы тока в контуре напряжения в контуре

будут значительными. Из колебаний всех частот, возбуждённых в антенне, контур выделяет только колебания, частота которых равна собственной частоте контура. Настройка контура на нужную частоту ω_0 обычно осуществляется путём изменения ёмкости конденсатора.

Генерирование электрической энергии.

Электрический ток вырабатывается в генераторах—устройствах, преобразующих энергию того или иного вида в электрическую энергию.

Преобладающую роль играют электромеханические индукционные генераторы переменного тока. В этих генераторах механическая энергия преобразуется в электрическую. Их действие основано на явлении электромагнитной индукции.

Такие генераторы имеют сравнительно простое устройство и позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении.

ЭДС мощных генераторов электростанций довольно велика. Между тем в практике чаще всего нужно не слишком высокое напряжение. Преобразование переменного тока, при котором напряжение увеличивается или уменьшается в несколько раз практически без потери мощности, осуществляется с помощью трансформаторов.

Трансформаторы.

Впервые трансформаторы были использованы в 1878 году русским учёным П.Н. Яблочковым

Трансформатор—это устройство, преобразующее электрическую энергию переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного напряжения другого напряжения.

Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, собранного из пластин, на которые надеты две (иногда и более) катушки с проволочными обмотками. Одна из обмоток, называемая первичной, подключается к источнику переменного напряжения. Вторая обмотка, к которой присоединяют «нагрузку», т.е. приборы и устройства, называют вторичной.

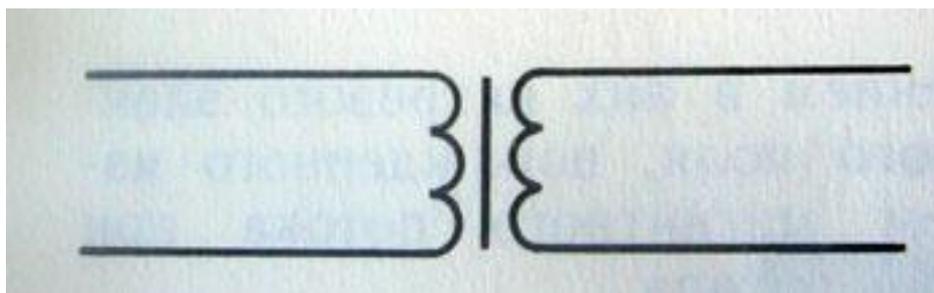


Рис.

Работа трансформатора на холостом ходу.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При прохождении переменного тока по первичной обмотке в сердечнике появляется переменный магнитный поток, который возбуждает ЭДС индукции в каждой обмотке. Сердечник из трансформаторной стали концентрирует магнитное поле так, что магнитный поток существует практически только внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях.

Мгновенное значение ЭДС индукции « e » в любом витке первичной или вторичной обмотки одинаково.

Согласно закону Фарадея оно определяется формулой:

$$e = -\Phi'$$

где Φ' —производная потока магнитной индукции во времени.

Если $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, то $\Phi' = -\omega \Phi_m \sin \omega t$

Следовательно:

$$e = \omega \Phi_m \sin \omega t \quad \text{или} \quad e = E_m \sin \omega t$$

где $E_m = \omega \Phi_m$ — амплитуда ЭДС в одном витке.

В первичной обмотке, имеющей N_1 витков, полная ЭДС индукции равна:

$$e_1 = N_1 e$$

Во вторичной обмотке полная ЭДС равна:

$$e_2 = N_2 e$$

Отсюда следует

$$e_1/e_2 = N_1/N_2 \quad 1$$

Обычно активное сопротивление обмоток трансформатора мало, и им можно пренебречь. В этом случае модуль напряжения на зажимах обмотки приблизительно равен модулю ЭДС индукции:

$$|u_1| = |e_1| \quad 2$$

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора ток в ней не течёт и имеет место соотношение:

$$|u_2| = |e_2| \quad 3$$

Мгновенные значения ЭДС e_1 и e_2 синфазно (одновременно достигают максимума и одновременно проходят через ноль). Поэтому их отношение в формуле 1 можно заменить отношением действующих значений E_1 и E_2 этих ЭДС, или, учитывая равенства 2 и 3, отношением действующих значений напряжений U_1 и U_2 .

$$U_1/U_2 = E_1/E_2 = N_1/N_2 = k$$

Величина k называется коэффициентом трансформации. При $k > 1$ трансформатор является понижающим, а при $k < 1$ — повышающим.

Работа нагруженного трансформатора.

Если к концам вторичной обмотки подсоединить нагрузку, то сила тока во вторичной обмотке уже не будет равной нулю.

Рис.

Появившийся ток создаёт в сердечнике свой переменный магнитный поток, который по правилу Ленца должен уменьшить изменения магнитного потока в сердечнике. Но уменьшение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока должно в свою очередь уменьшить ЭДС индукции в первичной обмотке. Однако это невозможно, так как согласно формуле 2

$$|u_1| = |e_1|.$$

Поэтому при замыкании вторичной обмотки автоматически увеличивается сила тока в первичной обмотке. Его амплитуда

возрастает таким образом, чтобы восстановить прежнее значение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока.

Увеличение силы тока в цепи первичной обмотки происходит в соответствии с законом сохранения энергии:--отдача электроэнергии в цепь, присоединённую ко вторичной обмотке трансформатора, сопровождается потреблением от сети такой же энергии первичной обмоткой.

Мощность в первичной цепи при нагрузке трансформатора, близкой к номинальной, приблизительно равна мощности во вторичной цепи:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \text{-----} U_1 / U_2 = I_2 / I_1$$

Это означает, что, повышая с помощью трансформатора напряжение в несколько раз, мы во столько же раз уменьшаем силу тока (и наоборот).

Электромагнитные волны.

Английский учёный Джеймс Максвелл (1831—1879) на основании изучения экспериментальных работ Фарадея по электричеству и магнетизму в 1864 году высказал гипотезу о существовании в природе особых волн, способных распространяться в вакууме. Эти волны Максвелл назвал электромагнитными волнами.

Основания для выдвижения гипотезы о возможности возникновения электромагнитных волн:

--(1831—Фарадей)—любое изменение магнитного потока в контуре вызывает появление в нём индукционного тока, обусловленного возникновением вихревого электрического поля при любом изменении магнитного поля;

--электрическое поле обладает такими же свойствами—при любом изменении электрического поля в окружающем пространстве возникает вихревое магнитное поле.

Начавшийся процесс взаимного порождения магнитного и электрического полей должен далее непрерывно продолжаться и захватывать всё новые и новые области в окружающем пространстве.

Процесс распространения переменных магнитного и электрического полей и есть электромагнитная волна.

Электрическое и магнитное поля могут существовать не только в веществе, но и в вакууме.

Условие возникновения электромагнитных волн.

Изменения магнитного поля происходят при изменении силы тока в проводнике, а сила тока в проводнике изменяется при изменении скорости движения электрических зарядов в нём, т.е. при движении зарядов с ускорением. Следовательно, электромагнитные волны должны возникать при ускоренном движении зарядов.

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме по расчётам Максвелла должна быть равной примерно скорости света: $\approx 300000 \text{ км/с}$.

$$v = \lambda \cdot T \quad \lambda = v \cdot T \quad T = 1/v$$

Итак, электромагнитной волной называется распространяющееся в пространстве электромагнитное поле.

Электромагнитная волна характеризуется векторами E напряжённости электрического и B индукции магнитного полей, составляющих единое электромагнитное поле.

Электромагнитные волны подразделяются на радиоволны и световые волны.

Существование электромагнитных волн обусловлено связью между переменными электрическими и магнитными полями.

На рисунках а) и в) показаны возникновение электрического E и магнитного B вихревых полей соответственно при изменениях магнитного и электрического полей.

а)

в)

Рис.

Скорость распространения электромагнитных волн.

Скорость (фазовая скорость) v электромагнитной волны в среде определяется из формулы:

$$v = c / (\epsilon \cdot \mu)^{1/2}$$

где ϵ и μ —относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды.

c —скорость света в вакууме;

$n=(\epsilon \cdot \mu)^{1/2}$ --показатель преломления среды.

Скорость распространения электромагнитных волн в данной среде совпадает со скоростью света в этой среде.

Это совпадение не случайно и является одним из подтверждений электромагнитной природы света.

Электромагнитные волны являются поперечными волнами. В электромагнитной волне колебания векторов E напряжённости переменного электрического поля и B индукции переменного магнитного поля взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору v скорости распространения волны.

Рис.

Векторы v , E и B образуют правовинтовую систему.

Электромагнитная волна называется монохроматической, если её векторы E и B совершают гармонические колебания постоянной одинаковой частоты, называемой частотой волны.

Модули векторов E и B плоской электромагнитной волны связаны соотношением:

$$\epsilon_0 \epsilon E^2 = B^2 / \mu_0 \mu$$

В вакууме $\epsilon = \mu = 1$ и $B = (\epsilon_0 \mu_0)^{1/2} \cdot E = E/c$

где $c = 1/(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}$.

c —скорость света в вакууме;

ϵ_0 , μ_0 —электрическая и магнитная постоянные.

Взаимно перпендикулярные векторы E и B в электромагнитной волне, распространяющейся в свободном пространстве, колеблются

в одинаковой фазе—они одновременно обращаются в ноль и одновременно достигают максимальных значений:

$$E_0 = |E_{\max}|, \quad B_0 = (\epsilon_0 \mu_0)^{1/2} \cdot E_0$$

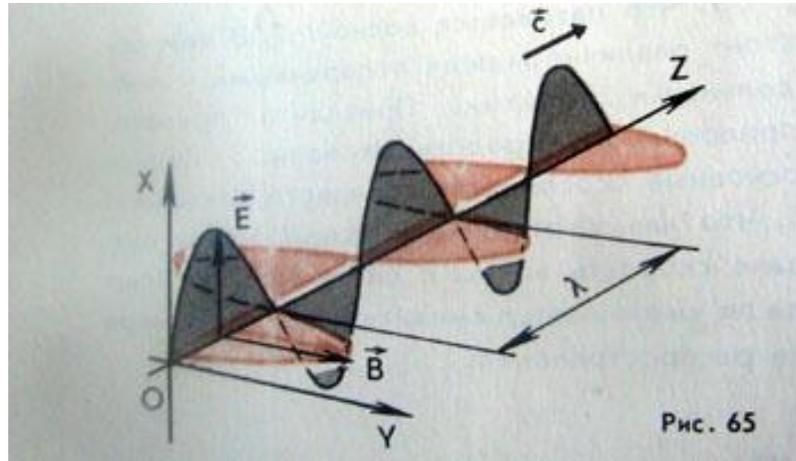
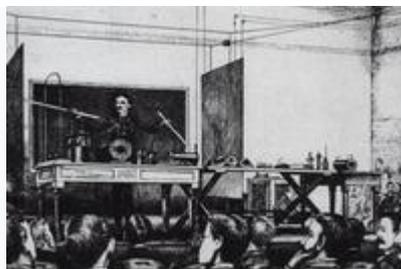


Рис.

Распространение электромагнитных волн связано с переносом энергии электромагнитного поля, подобно тому как распространение упругих волн в веществе связано с переносом механической энергии. Энергия переносится в направлении распространения волны, т.е. в направлении вектора \mathbf{v}

Принцип радиосвязи.

История и изобретение радио



Никола Тесла на лекции демонстрирует принципы радиосвязи, 1891 г.



Приёмник Маркони с когерером

Первый патент на беспроводную связь получил в 1872 г. Малон Лумис, заявивший в 1866 г. о том, что он открыл способ беспроволочной связи; в США изобретателем радио считают Дэвида Хьюза (1878), а также Томаса Эдисона (1875; патент 1885) и Николу Теслу (патент на передающее устройство с резонанс-трансформатором в 1891 году^[2]); в Германии — Генриха Герца (1888); во Франции — Эдуарда Бранли (1890); в США и ряде балканских стран — Николу Теслу (1891); в Бразилии — Ланделя де Муру (1893—1894); в Англии — Оливера Джозефа Лоджа (1894); в Индии — Джагадиша Чандру Боше (1894 или 1895); в России — А. С. Попова (1895) и Якова Наркевича-Иодко (1890).

Создателем первой успешной системы обмена информацией с помощью радиоволн (радиотелеграфии) на западе считается итальянский инженер Гульельмо Маркони (1895)^{[3][4][5]}.

В СССР и в бывших союзных республиках изобретателем радиотелеграфии считается А. С. Попов^{[4][6]}. В опытах по радиосвязи, проведённых в физическом кабинете, а затем в саду Минного офицерского класса, прибор А. С. Попова обнаруживал излучение радиосигналов, посылаемых передатчиком, на расстоянии до 60 м. На заседании Русского физико-химического общества в Петербурге 25 апреля (7 мая) 1895 года А. С. Попов продемонстрировал, как указано в протоколе заседания, «прибор, предназначенный для показывания быстрых колебаний в атмосферном электричестве»^[7]. В СССР, с 1945 года, 7 мая стали отмечать как День радио.



Приёмник Попова

Далее радиосвязь была установлена на расстоянии 250 м. Работая над своим изобретением, Попов вскоре добился дальности связи более 600 м. Затем на манёврах Черноморского флота в 1899 г. учёный установил радиосвязь на расстоянии свыше 20 км, а в 1901 г. дальность радиосвязи была уже 150 км. Важную роль в этом сыграла новая конструкция *передатчика*: искровой промежуток был размещён в колебательном контуре, индуктивно связанном с передающей антенной и настроенном с ней в резонанс. Существенно изменились и способы *регистрации сигнала*: параллельно звонку был включён телеграфный аппарат, позволивший вести автоматическую запись сигналов. В 1899 г. была обнаружена возможность приёма сигналов с помощью телефона. В начале 1900 г. радиосвязь была успешно использована во время спасательных работ в Финском заливе. При участии А. С. Попова началось внедрение радиосвязи на флоте и в армии России.

7 мая 1895 года на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге Александр Степанович Попов (1859-1906) продемонстрировал действие своего прибора, явившегося по сути дела, первым в мире радиоприёмником.

7 мая стал днём рождения радио.

Вначале радиосвязь была установлена на расстояние 250 м, затем на 600 м.

В 1899 году связь была установлена на расстояние свыше 20 км, а в 1901 году—на 150 км.

Принцип радиосвязи заключается в следующем:--переменный электрический ток высокой частоты, созданный в передающей

антенне, вызывает в окружающем пространстве быстро меняющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитной волны. Достигая приёмной антенны, электромагнитная волна вызывает в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик. Важнейшим этапом в развитии радиосвязи было создание (в 1913г) генератора незатухающих электромагнитных колебаний.



Рис. Блок-схема

При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Но колебания звуковой частоты представляют собой сравнительно медленные колебания, а электромагнитные волны низкой (звуковой) частоты почти совсем не излучаются.

Модуляция.

Для осуществления радиотелефонной связи необходимо использовать высокочастотные колебания, интенсивно излучаемые антенной. Незатухающие гармонические колебания высокой частоты вырабатывает генератор.

Для передачи звука эти высокочастотные колебания изменяют, или модулируют, с помощью электрических колебаний низкой (звуковой) частоты.

Можно изменять со звуковой частотой амплитуду высокочастотных колебаний. Этот способ называют амплитудной модуляцией.

На рисунках показаны три графика, показывающих принцип модуляции.

График колебаний высокой частоты (несущая частота)

График колебаний звуковой частоты.

График модулированных по амплитуде колебаний.

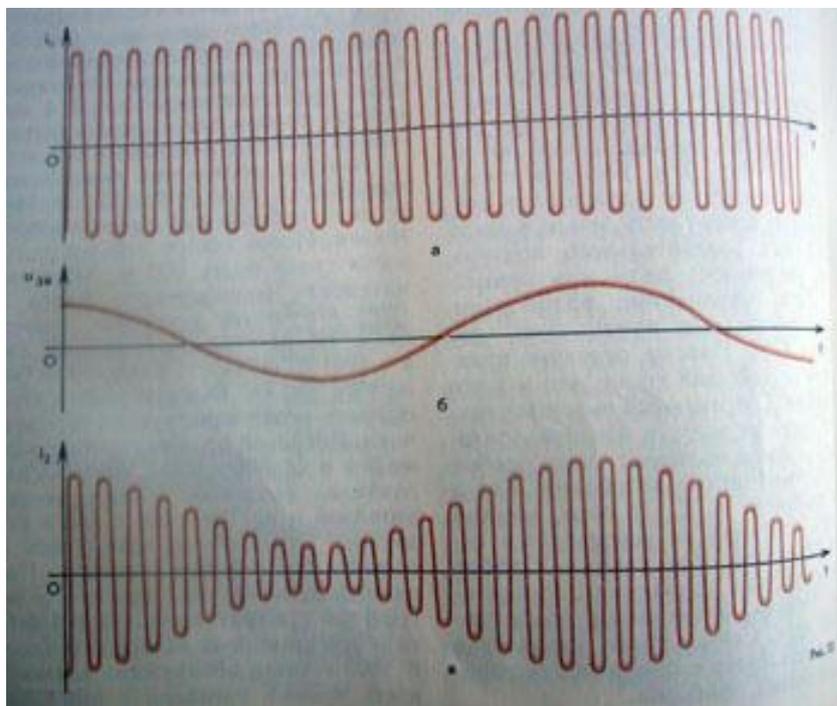


Рис. Схема амплитудной модуляции

Модуляция—это 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 приёмнике 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.

Детектирование осуществляется устройством, содержащим элемент с односторонней проводимостью—детектор. Таким элементом может быть полупроводниковый диод.

Рассмотрим работу полупроводникового детектора.

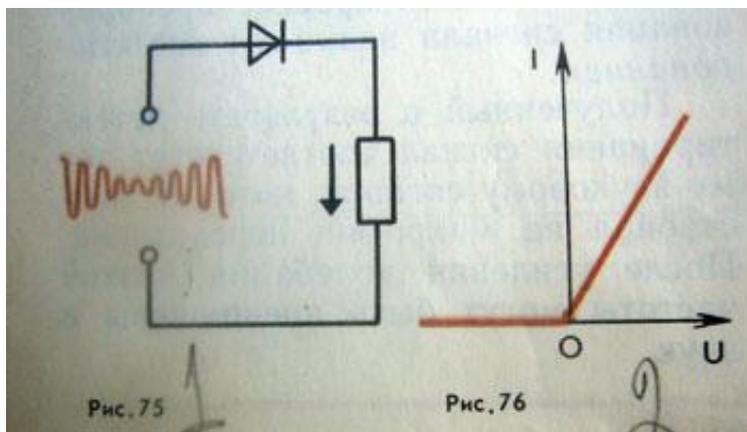
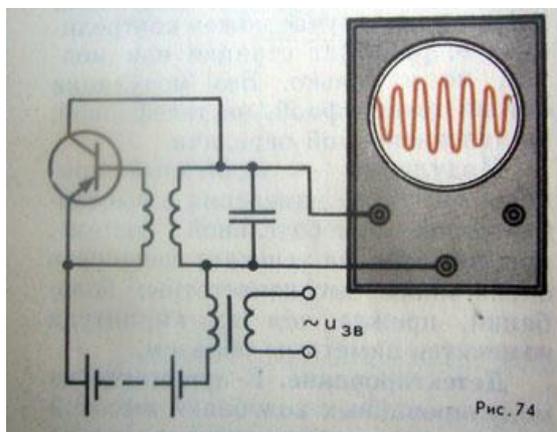


Рис.

Пусть этот прибор включён последовательно в цепь с источником модулированных колебаний и нагрузкой.

Ток в цепи будет протекать в направлении стрелки, так как сопротивление диода в прямом направлении намного меньше, чем в обратном. Вольт-амперную характеристику можно представить в виде ломаной, состоящей из двух прямолинейных участков. В цепи будет протекать пульсирующий ток, график которого показан на рисунке.

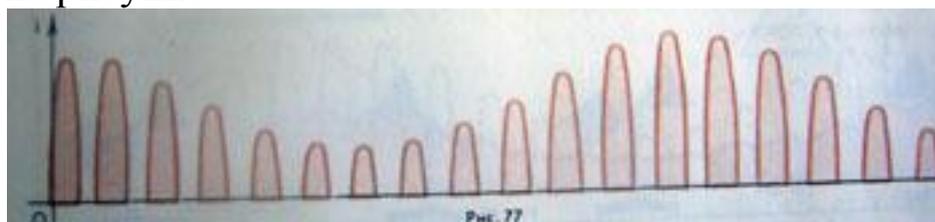


Рис.

Этот пульсирующий ток сглаживается с помощью фильтра. Простейший фильтр представляет собой конденсатор, присоединённый к нагрузке.

В те моменты времени, когда диод пропускает ток, часть его проходит через нагрузку, а другая часть ответвляется на конденсатор, заряжая его (см. сплошные стрелки).

Разветвление тока уменьшает пульсации тока, проходящего через нагрузку.

Поэтому в интервале времени между импульсами ток через нагрузку течёт в ту же сторону (пунктирная стрелка).
Каждый новый импульс подзаряжает конденсатор.
В результате этого через нагрузку течёт ток звуковой частоты, форма колебаний которого почти точно воспроизводит форму низкочастотного сигнала на передающей станции. (рис. 79)

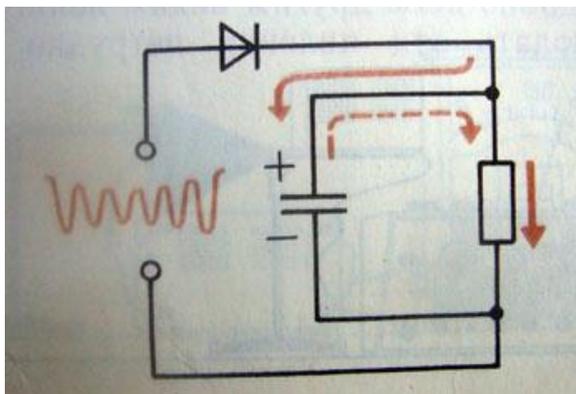


Рис.

Простейший радиоприёмник.

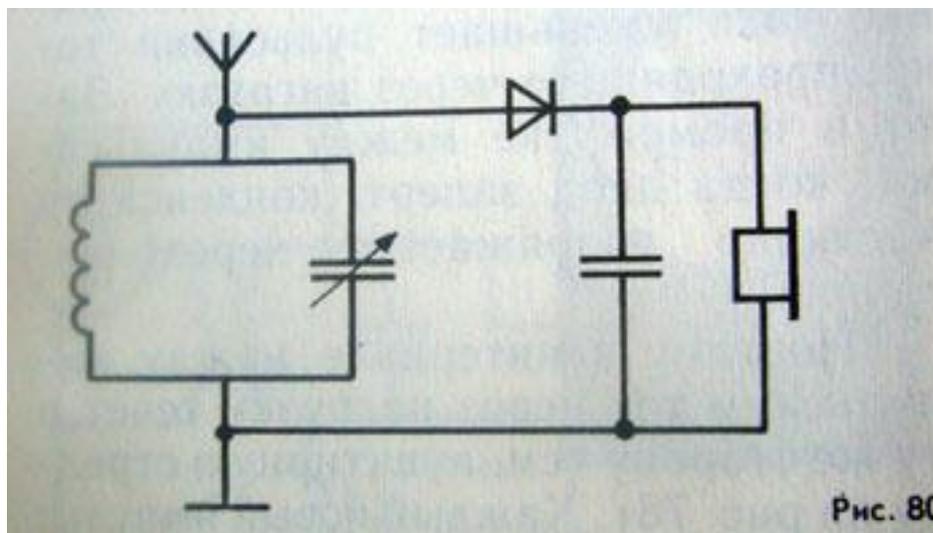


Рис.

Простейший радиоприёмник состоит из колебательного контура, связанного с антенной, и присоединённой к контуру цепи, состоящей из детектора, конденсатора и телефона.

Свойства электромагнитных волн.

Электромагнитные волны поглощаются, отражаются и преломляются подобно всем другим видам волн.

1. Поглощение.

При размещении между рупорами различных диэлектрических тел, громкость изменяется.



2. Отражение.

Если диэлектрик заменить металлической пластиной, то звук перестанет быть слышимым. Волны не достигают приёмника вследствие отражения. Отражение происходит под углом, равным углу падения, как и в случае световых и механических волн.

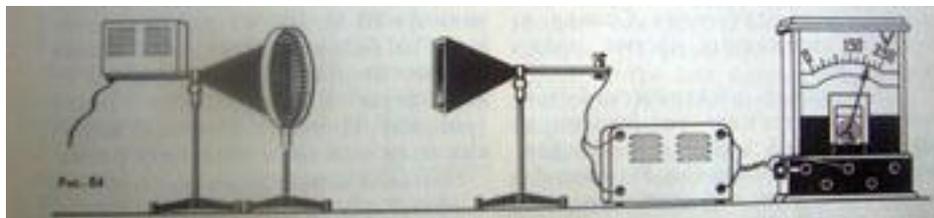


3. Преломление.

Электромагнитные волны изменяют своё направление (преломляются) на границе диэлектрика.

4. Поперечность электромагнитных волн.

Электромагнитные волны являются поперечными волнами. Это означает, что векторы E и B электромагнитного поля волны перпендикулярны к направлению. Волны с определённым направлением колебаний называются поляризованными.



Понятие о телевидении.

Принцип передачи изображений на расстояние состоит в следующем. На передающей станции производится преобразование изображения в последовательность электрических сигналов. Этими сигналами модулируют затем колебания, вырабатываемые генератором высокой частоты. Модулированная электромагнитная волна переносит информацию на большие расстояния. В приёмнике производится обратное преобразование. Высокочастотные модулированные колебания детектируются, а полученный сигнал преобразуется в видимое изображение.

Для передачи движения используют следующий принцип:-- отличающиеся друг от друга изображения движущегося объекта (кадры) передают десятки раз в секунду (в нашем телевидении-50 раз).

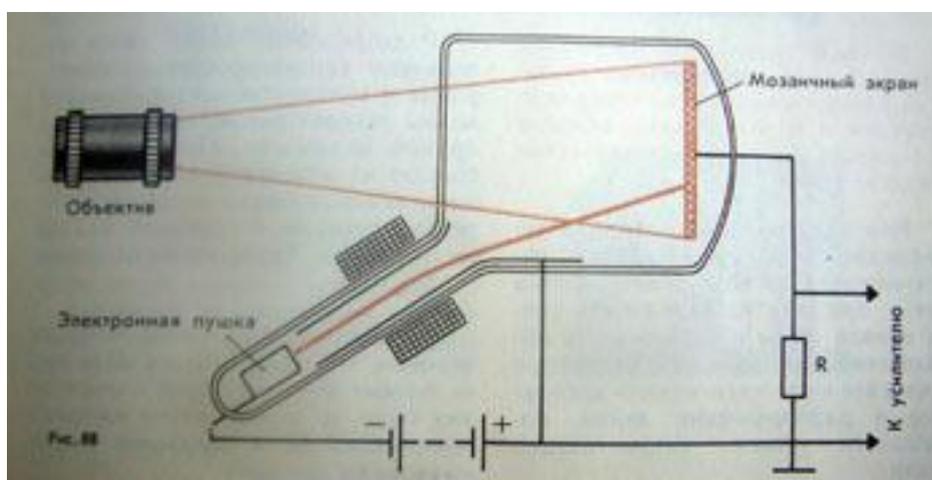


Рис.

Изображение кадра преобразуется с помощью вакуумной электронной трубки—иконоскопа в серию электрических сигналов. Кроме иконоскопа, существуют и другие передающие устройства. Внутри иконоскопа расположен мозаичный экран, на который с помощью оптической системы проецируется изображение объекта. Каждая ячейка мозаики заряжается, причём её заряд зависит от интенсивности падающего на ячейку света. Этот заряд меняется при попадании на ячейку электронного пучка, создаваемого электронной пушкой. Электронный пучок последовательно попадает на все элементы сначала одной строки мозаики, затем другой строки и т.д. (всего 625 строк).

От того, насколько сильно меняется заряд ячейки, зависит сила тока в резисторе R .

Поэтому напряжение на резисторе изменяется пропорционально изменению освещённости вдоль строк кадра.

Такой же сигнал получается в телевизионном приёмнике после детектирования. После детектирования мы получаем видеосигнал. Он преобразуется в видимое изображение на экране приёмной вакуумной электронной трубки—кинескопа. Электронная пушка такой трубки снабжена электродом, управляющим числом электронов в пучке и, следовательно, свечением экрана в месте попадания луча. Системы катушек горизонтального и вертикального отклонения заставляют электронный луч обегать весь экран точно таким же образом, как электронный обегал мозаичный экран иконоскопа.

Синхронность движения лучей в передающей и приёмной трубках достигается посылкой специальных синхронизирующих сигналов.

Свет как электромагнитная волна.

В этом разделе мы продолжим изучение электромагнитных волн, но только более коротких. Такие волны называют светом.

Одним из наиболее трудных для волновой теории света был вопрос о том, что же колеблется при распространении световых волн, в какой среде они распространяются.

На вопрос о природе света и механизме его распространения давала гипотеза Максвелла.

На основании совпадения экспериментально измеренного значения скорости света в вакууме со значением скорости распространения электромагнитных волн Максвелл высказал предположение, что свет—это электромагнитные волны.

Представлениям электромагнитной теории света полностью соответствуют экспериментально открытые законы отражения и преломления света, явления интерференции, дифракции и поляризации света.

Но с другой стороны, законы фотоэффекта, явления взаимодействия света с веществом электромагнитная теория объяснить не может.

В 20 веке в физике утвердились представления о корпускулярно-волновом дуализме свойств света.

Тот факт, что свет в одних опытах обнаруживает волновые свойства, а в других—корпускулярные, означает, что природа света более сложна, чем природа привычных нам тел окружающего мира.

В любых световых явлениях при глубоком их изучении обнаруживается неразрывная связь корпускулярных и волновых свойств света.

Законы отражения и преломления света.

Закон отражения.

Наблюдения показывают, что в однородной среде свет распространяется прямолинейно.

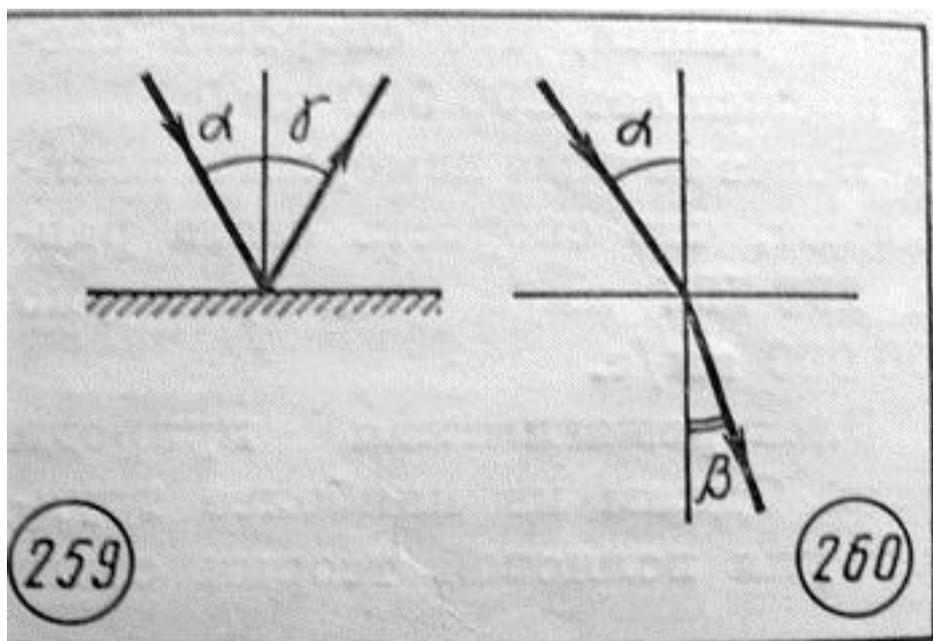
Прямая, указывающая направление распространения света, называется световым лучом.

На границе раздела двух сред свет может частично отразиться и распространяться в первой среде по новому направлению, а также частично пройти через границу раздела и распространится во второй среде.

В большей или меньшей мере отражение света происходит от любых предметов, поэтому мы видим все освещённые тела.

Как показывает наблюдения, при отражении света всегда выполняется закон отражения:

--луч, падающий, луч отражённый и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; угол отражения γ равен углу падения α



Этот закон совпадает с законом отражения для волн любой природы и может быть получен как следствие принципа Гюйгенса

(каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн).

Может показаться, что закон отражения может быть успешно объяснён и корпускулярной теорией света. Но эта гипотеза не может объяснить, почему свет почти не испытывает отражения от поверхности твёрдого стекла или алмаза, но полностью отражается тончайшей плёнкой серебра или жидкой ртутью.

Электромагнитная теория света объясняет эти факты. Стекло и алмаз—диэлектрики, а диэлектрики прозрачны для электромагнитных волн. Тонкий слой серебра или другого металла, нанесённый на лист стекла, делает этот лист непрозрачным для электромагнитных волн.

Падающая электромагнитная волна возбуждает в проводящем слое вынужденные колебания свободных электронов с частотой, равной частоте колебаний вектора напряжённости электрического поля в электромагнитной волне.

Эти колебания электронов и порождают отражённую электромагнитную волну. Таким образом объясняется способность зеркала отражать падающий на него свет.

Закон преломления.

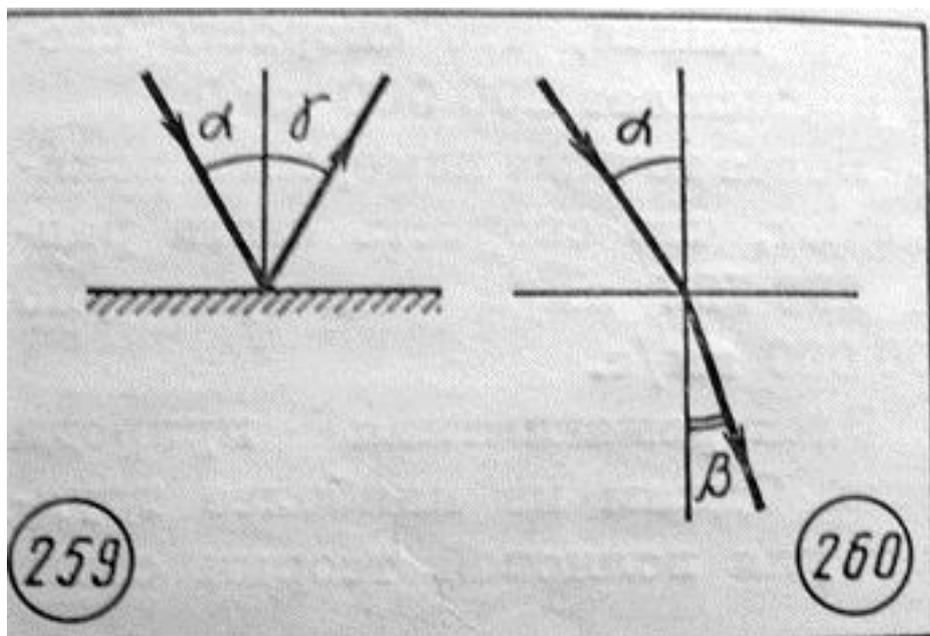
Волновая теория света объяснила и явление преломления света.

Наблюдения показывают, что при переходе света из одной среды в другую может происходить изменение направления распространения света—преломление света.

В 17 веке был экспериментально установлен закон преломления света.

Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости;

-отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред.



Обозначив угол падения α , угол преломления β , тогда закон преломления света будет равен:

$$\sin\alpha/\sin\beta=n$$

где n —постоянная величина для двух данных сред, называемая относительным показателем преломления второй среды относительно первой.

Согласно волновым представлениям преломление является следствием изменения скорости распространения волн при переходе из одной среды в другую, а физический смысл показателя преломления—это отношение скорости распространения волн в первой среде v_1 к скорости распространения во второй среде v_2 :

$$n= v_1/ v_2$$

Показатель преломления n среды относительно вакуума называется абсолютным показателем преломления этой среды:

$$n=c/v$$

где c —скорость света в вакууме;
 v —скорость света в данной среде.

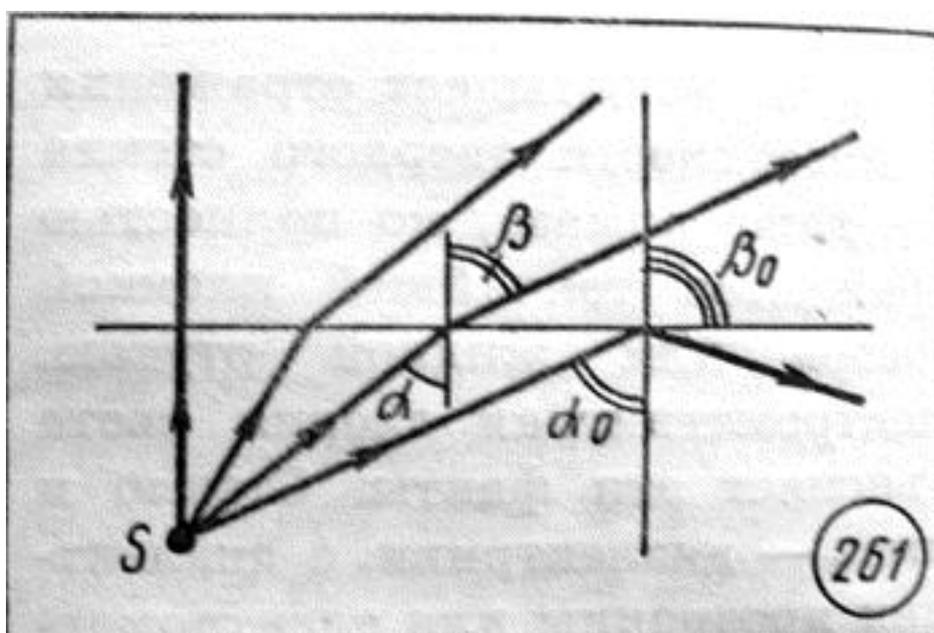
Абсолютные показатели преломления всех веществ больше единицы. Это значит, что скорость распространения света в любом веществе меньше скорости распространения света в вакууме. Для двух сред с абсолютными показателями преломления n_1 и n_2 относительный показатель преломления n равен отношению абсолютного показателя преломления второй среды к абсолютному показателю преломления первой среды:

$$n_1 = c/v_1; \quad n_2 = c/v_2; \quad n = v_1/v_2; \quad n = n_1/n_2.$$

Из двух сред та среда, которая обладает меньшим значением абсолютного показателя преломления, называется менее плотной средой.

Если свет переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду, то угол преломления β меньше угла падения α .

При переходе из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду угол преломления β оказывается больше угла падения α .



Полное отражение.

При наблюдении явления преломления света можно заметить, что наряду с преломлением происходит и отражение света от границы раздела двух сред; при увеличении угла падения интенсивность отражённого луча увеличивается.

В случае перехода света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, например из стекла в воздух, при постепенном увеличении угла падения можно достигнуть такого его значения α_0 , при котором угол преломления должен стать равным: $\beta=90^\circ$.

При этом выполняется равенство: $\alpha_0=\arcsin 1/n$.

Опыт показывает, что при достижении такого значения угла падения интенсивность преломленного луча становится равной нулю: --свет, падающий на границу раздела двух сред, полностью отражается от неё.

Угол падения α_0 , при котором наступает полное отражение света, называется предельным углом полного отражения.

При всех углах падения, больших и равных α_0 , происходит полное отражение света.

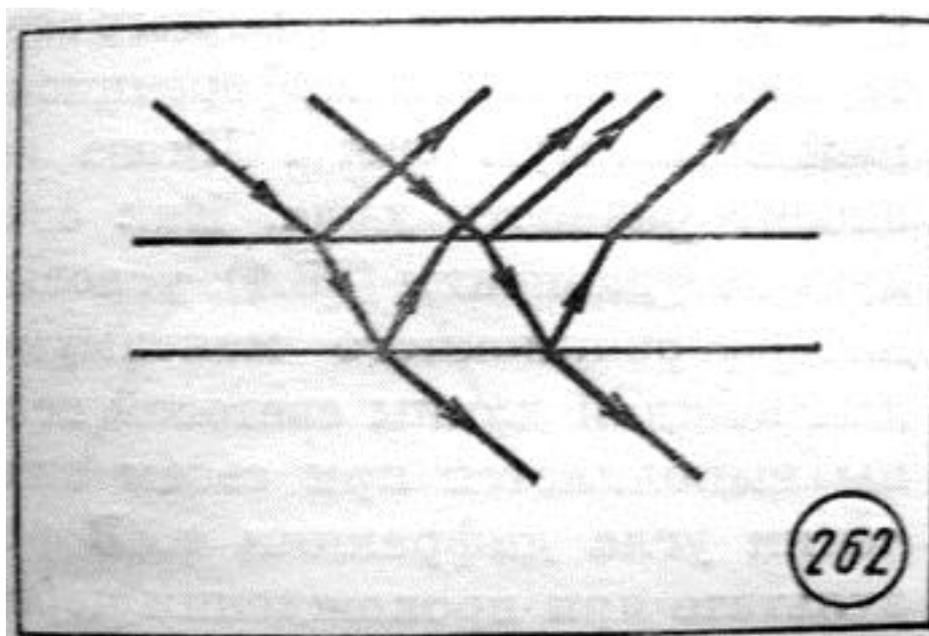
Волновые свойства света.

Интерференция света.

Явление увеличения или уменьшения амплитуды результирующей волны при сложении двух или нескольких волн с одинаковыми периодами колебаний называется интерференцией волн.

Интерференцией света объясняется окраска мыльных пузырей и тонких масляных плёнок на воде, хотя мыльный раствор и масло бесцветные.

Световые волны частично отражаются от поверхности тонкой плёнки, частично проходят в неё. На второй границе плёнки вновь происходит частичное отражение волн.



Световые волны, отражённые двумя поверхностями тонкой плёнки, распространяются в одном направлении, но проходят разные пути. При разности хода волн Δl , кратной чётному числу длин волн:

$$\Delta l = 2k \cdot \lambda / 2$$

наблюдается интерференционный максимум.

При разности Δl , кратной нечётному числу полуволен

$$\Delta l = (2k+1) \cdot \lambda / 2$$

наблюдается интерференционный минимум.

Когда выполняется условие максимума для одной длины световой волны, то оно не выполняется для других длин волн. Поэтому освещаемая белым светом тонкая бесцветная прозрачная плёнка кажется окрашенной.

При изменении толщины плёнки или угла падения световых волн разность хода изменяется и условие максимума выполняется для света с другой длиной волны.

Явление интерференции в тонких плёнках применяется для контроля качества обработки поверхностей, просветления оптики.

Дифракция света.

Отклонение от прямолинейного распространения волн, огибание волнами препятствий, называется дифракцией.

Дифракция присуща любому волновому процессу. При дифракции происходит искривление волновых поверхностей у краёв препятствий. Дифракция волн проявляется отчётливо в случаях, когда размеры препятствий меньше длины волны или сравнимы с ней.

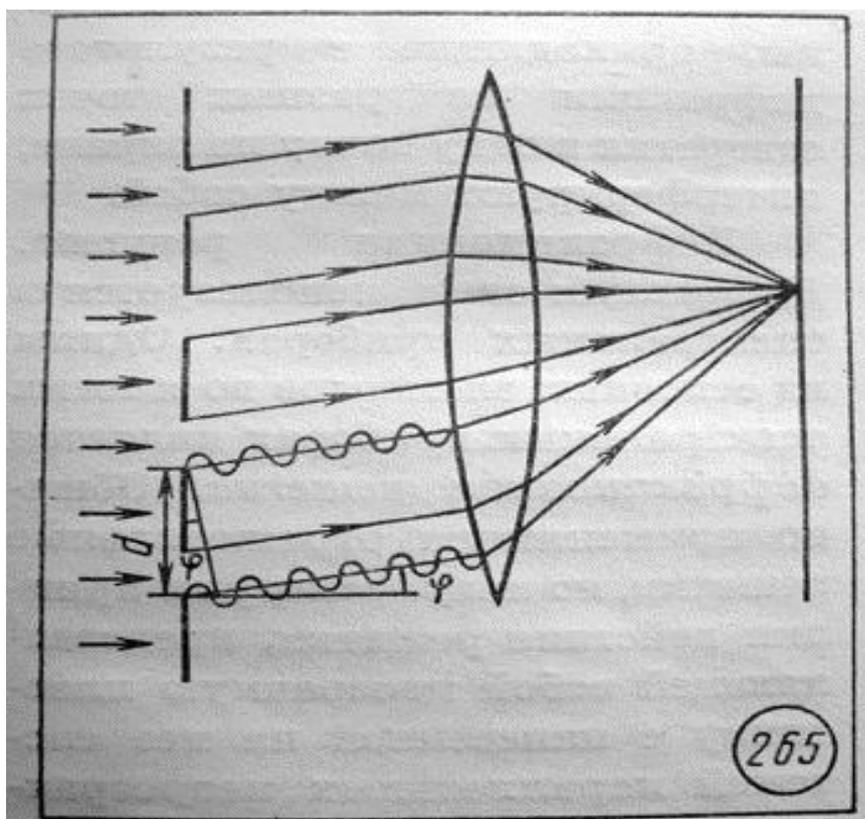
При прохождении света через малое круглое отверстие на экране вокруг центрального светлого пятна наблюдаются чередующиеся тёмные и светлые кольца. Если свет проходит через узкую щель, то получается картина чередующихся светлых и тёмных полос.

Появление чередующихся светлых и тёмных колец или полос в области геометрической тени французский учёный Френель объяснил тем, что световые волны, приходящие в результате дифракции из разных точек отверстия в одну точку на экране, интерферируют между собой

Дифракционная решётка.

Дифракция света используется в спектральных приборах. Одним из основных элементов во многих спектральных приборах является дифракционная решётка.

Обычно применяются отражательные решётки, но мы рассмотрим принцип действия решётки, представляющей собой прозрачную пластину с нанесённой на неё системой параллельных непрозрачных полос, расположенных на одинаковых расстояниях « d » друг от друга.



Пусть на решётку падает монохроматическая волна с плоским волновым фронтом. В результате дифракции на каждой щели свет распространяется не только в первоначальном направлении, но и по всем другим направлениям.

Если за решёткой поставить собирающую линзу, то на экране в фокальной плоскости параллельные лучи от всех щелей соберутся в одну полосу.

Параллельные лучи, идущие от краёв двух соседних щелей имеют разность хода:

$$\Delta l = d \cdot \sin \varphi \quad (1),$$

где d —расстояние между соответствующими краями соседних щелей, называемое периодом решётки;

φ —угол отклонения световых лучей от перпендикуляра к плоскости решётки.

При равенстве разности хода Δl целому числу длин волн:

$$d \cdot \sin \varphi = k \lambda \quad (2)$$

(где λ —длина волны падающего света),

наблюдается интерференционный максимум света. Линза не вносит разности хода. Как следует из уравнения (2), условие интерференционного максимума для каждой длины световой волны выполняется при своём значении угла дифракции φ .

В результате при прохождении через дифракционную решётку пучок белого света разлагается в спектр.

Угол дифракции имеет наибольшее значение для красного света, так как длина волны красного света больше от всех остальных в области видимого света.

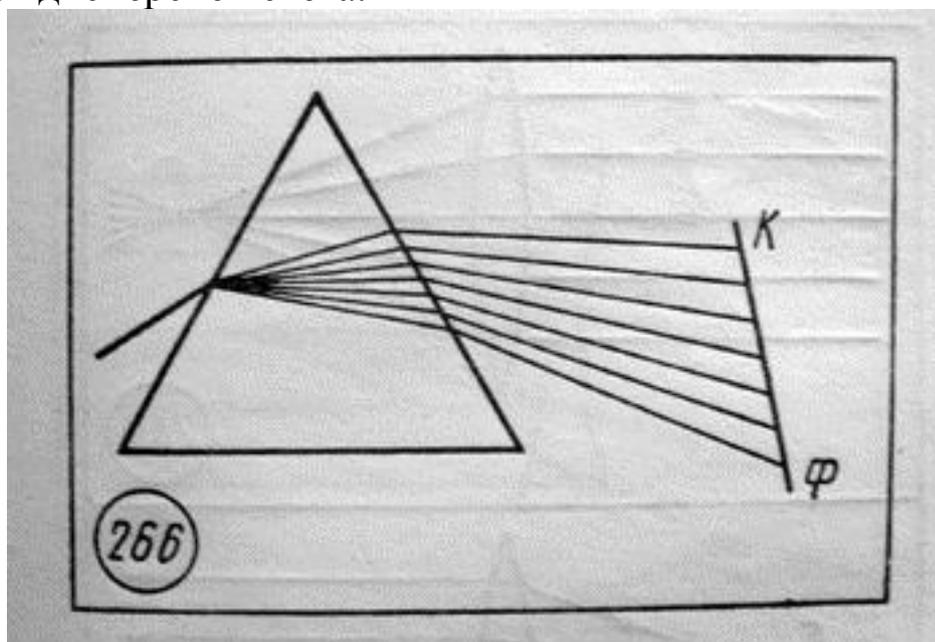
Наименьшее значение угол дифракции φ имеет для фиолетового света.

Дифракция света. Сплошной спектр.

Узкий параллельный пучок белого света при прохождении через стеклянную призму разлагается на пучки разного цвета.

Цветную полоску на экране называют сплошным спектром.

Явление зависимости скорости света от длины волны (или частоты) называют дисперсией света.



Сплошной спектр наблюдается при разложении света, излучаемого нагретыми и жидкими телами.

Дисперсия света была открыта И.Ньютоном.

Объясняется разложение белого света тем, что белый свет состоит из электромагнитных волн с разной длиной волны и показатель преломления света зависит от его длины волны.

Наибольшее значение он имеет для света с самой короткой длиной волны—фиолетового света. Наименьший показателем преломления обладает самый длинноволновый свет—красный.

Абсолютный показатель преломления света определяется отношением скорости света c в вакууме к скорости света v в среде

$$n=c/v$$

Опыты показали, что в вакууме скорость света одинакова для света с любой длиной волны.

Отсюда следует, что разложение света в стеклянной призме обусловлено зависимостью скорости распространения света в среде от длины световой волны.

Оптические приборы.

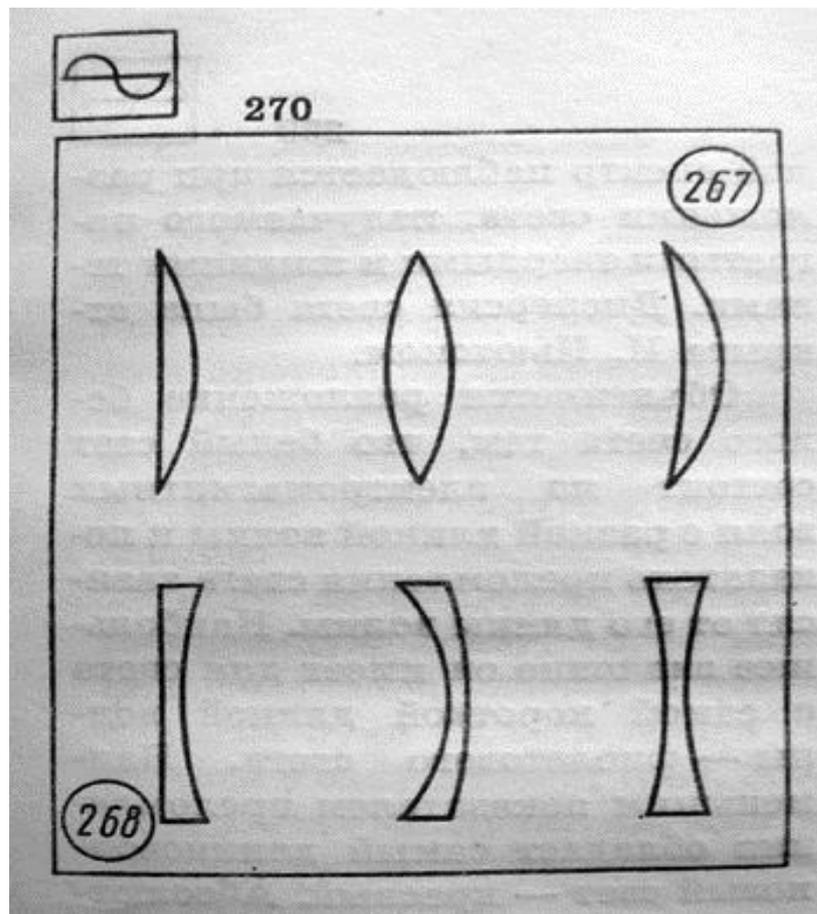
Ход лучей в линзах.

Линзой называют прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями.

Линзы обычно изготавливают из стекла.

Тонкой называется линза, толщина которой значительно меньше радиусов ограничивающих её сферических поверхностей.

Линза, которая в середине толще чем у краёв, называется выпуклой линзой.



Линза, которая у краёв толще, чем в середине, называется вогнутой линзой.

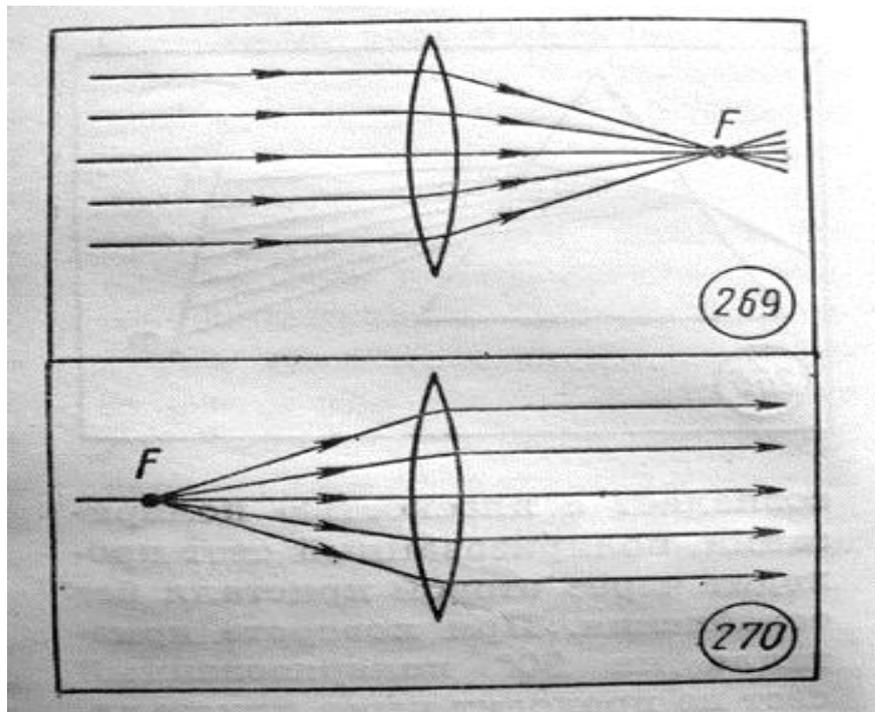
Прямая, проходящая через центры O_1 и O_2 сферических поверхностей линзы, называется главной оптической осью линзы.

Если толщина линзы пренебрежительно мала, то можно считать, что главная оптическая ось пересекается с линзой в одной точке.

Точка пересечения O главной оптической оси с тонкой линзой называется оптическим центром линзы.

Опыт показывает, что луч света, идущий вдоль главной оптической оси, проходит через линзу без изменения направления распространения.

В воздухе или вакууме все лучи, параллельные главной оптической оси выпуклой линзы отклоняются к оси и проходят через одну точку F на главной оптической оси.



Поэтому выпуклые линзы называются собирающими линзами.

Точка F называется главным фокусом линзы.

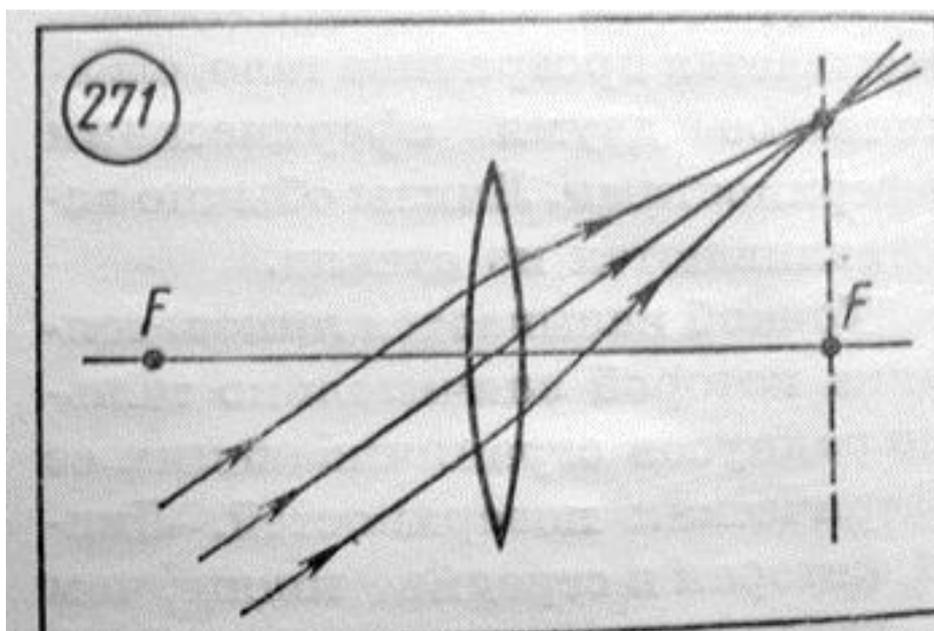
Плоскость, проходящая через главный фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется фокальной плоскостью.

У линзы два главных фокуса в однородной среде расположены на одинаковых расстояниях от её оптического центра.

Расстояние от оптического центра линзы до главного фокуса называется фокусным расстоянием F линзы.

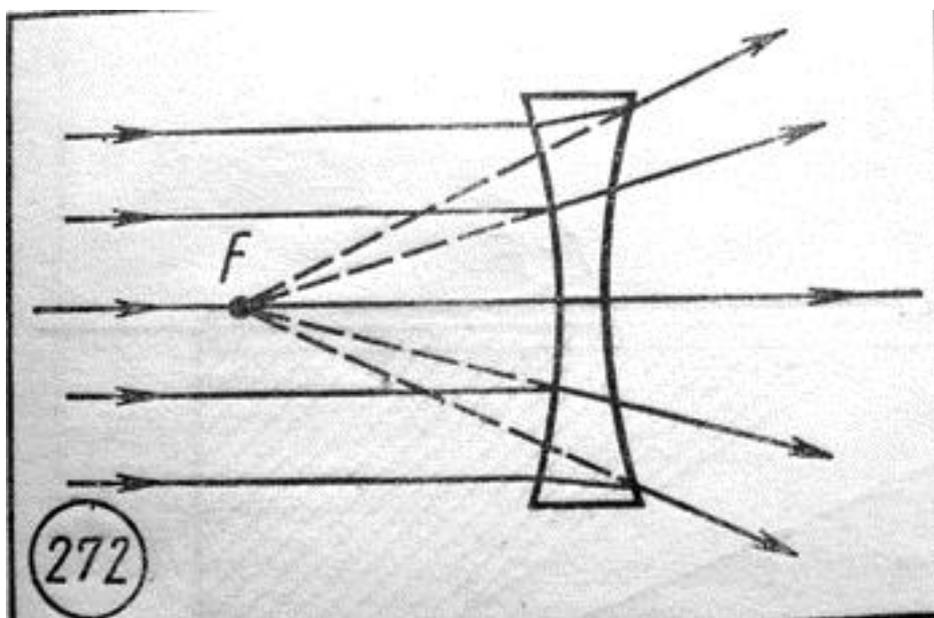
Все лучи, проходящие через один из её главных фокусов, выходят из линзы параллельно главной оптической оси.

Любая прямая, проходящая через оптический центр линзы и не совпадающая с главной оптической осью, называется побочной оптической осью.



Световые лучи, параллельные побочной оптической оси собирающей линзы, проходят через точку пересечения побочной оптической оси с фокальной плоскостью.

В воздухе или в вакууме все лучи, параллельные главной оптической оси вогнутой линзы, отклоняются от оптической оси, поэтому вогнутые линзы называются рассеивающими линзами.



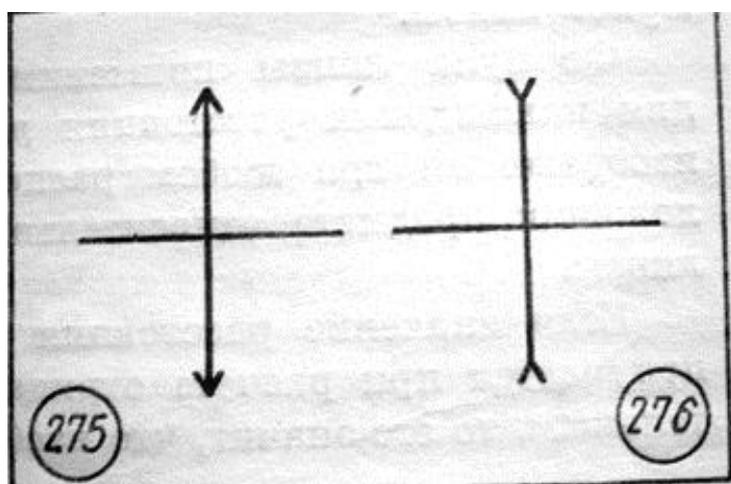
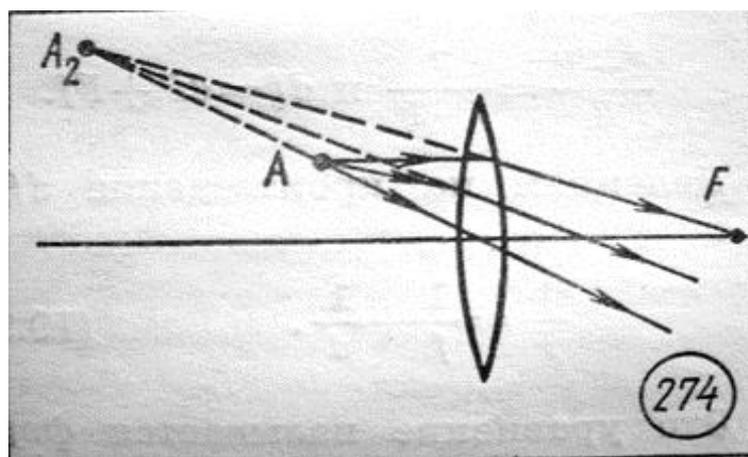
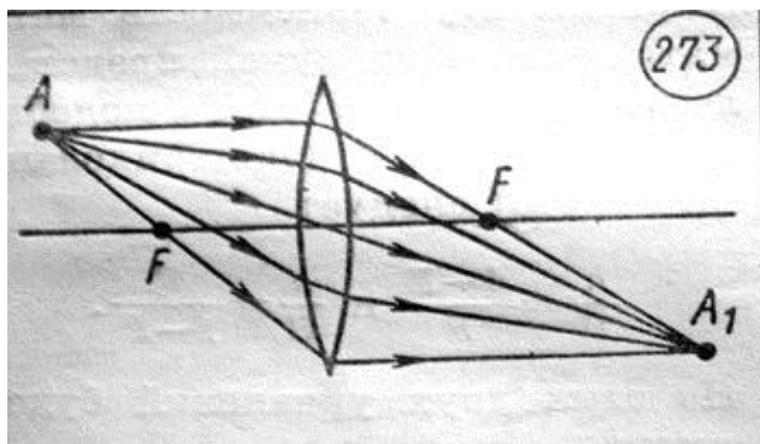
Продолжение лучей в противоположную сторону сходятся в одной точке F на главной оптической оси перед линзой.

Эта точка называется главным фокусом рассеивающей линзы.

Главный фокус рассеивающей линзы мнимый, так как в действительности лучи света в нём не собираются.

Построение изображений в тонких линзах.

Основное свойство линз, используемое в оптических приборах, заключается в том, что все лучи, исходящие из одной точки A перед линзой, собираются в другой точке A_1 , за линзой или кажутся исходящими из одной точки A_2 перед линзой.



В первом случае изображение точки А называется действительным, во втором—мнимым.

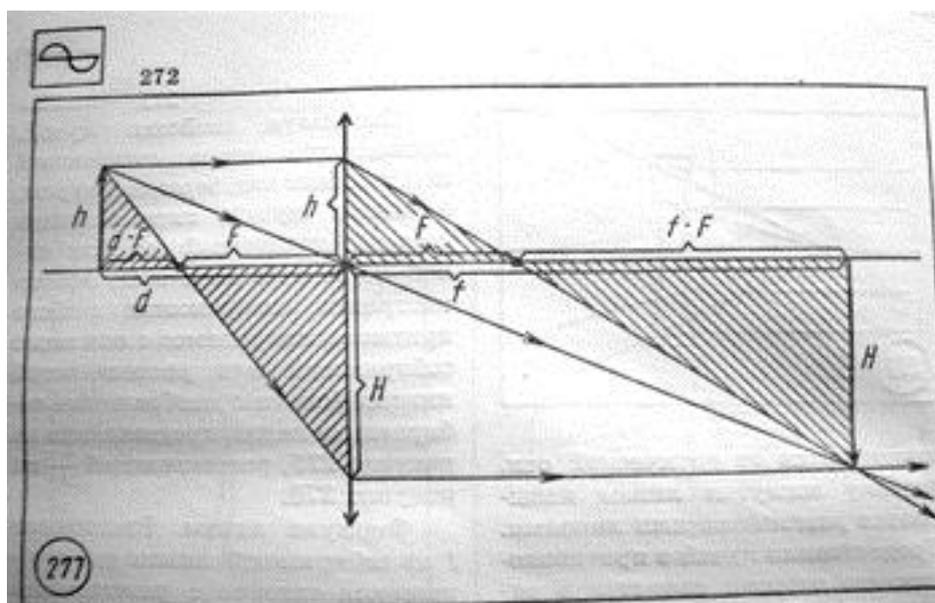
Замечательным свойством световых лучей является свойство обратимости:--луч, направленный противоположно лучу, выходящему из любой оптической системы, пройдет через неё в обратном направлении точно по тому же пути, по какому прошёл её в прямом направлении первый луч.

Используя свойства лучей, проходящих через оптический центр линзы или через её фокусы, а также лучей, параллельных главной оптической оси или одной из её побочных осей, можно построить изображение любого предмета, получаемого с помощью собирающей или рассеивающей линзы.

Условное изображение собирающей линзы показано на рисунке 3, а рассеивающей—на рисунке 4.

Формула линзы.

Расстояние f от собирающей линзы до изображения связано с расстоянием d от предмета до линзы и фокусным расстоянием F линзы. Выразим эту зависимость математически. Ход лучей показан на рисунке.



Из подобия одинаково заштрихованных треугольников следует:

$$\mathbf{h/H=d-F/F} \quad \mathbf{и} \quad \mathbf{h/H=F/f-F}$$

Из этих двух уравнений будем иметь:

$$d \cdot F/F = F/f - F \quad \text{или} \quad df = dF + Ff \quad / : dfF$$

$$1/F = 1/f + 1/d$$

Это уравнение называется формулой линзы.

Формула линзы применима для нахождения расстояния до изображения при любом расположении предмета относительно линзы.

Если значение расстояния f получается при расчёте отрицательным, то это значит, что изображение предмета мнимое и находится по ту же сторону от линзы, что и предмет.

Для рассеивающей линзы значение фокусного расстояния в расчётах нужно брать со знаком «--» и, так как изображение предмета получаем мнимым, расстояние f до изображения всегда должно быть со знаком «-«.

Оптическая сила линзы.

Величина, обратная фокусному расстоянию F называется оптической силой линзы D .

$$D = 1/F$$

Оптическая сила выражается в диоптриях (дптр).

Линза с фокусным расстоянием 1 м обладает оптической силой в 1 диоптрий

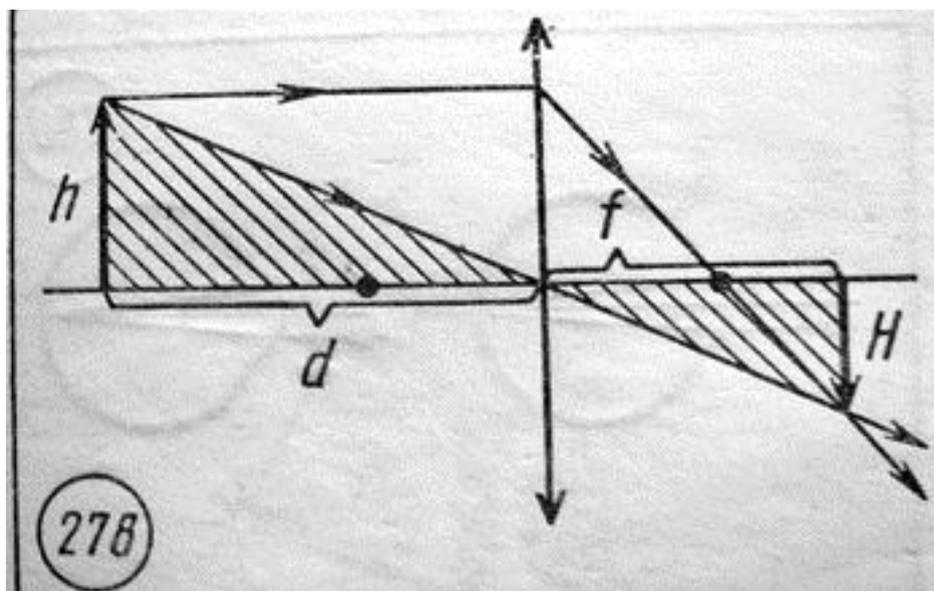
Оптическая сила собирающей линзы положительна, оптическая сила рассеивающей линзы отрицательна.

Линейное увеличение.

В зависимости от положения предметов относительно линзы линейные размеры изображения изменяются.

Отношение линейных размеров H изображения к линейным размерам h называется линейным увеличением Γ .

$$\Gamma = H/h$$



Из подобия треугольников следует:

$$H/h = f/d, \text{ или } \Gamma = f/d$$

Разрешающая способность оптических приборов.

Действие оптических приборов описывается законами геометрической оптики. Согласно этим законам мы можем различать с помощью микроскопа сколь угодно малые детали объекта; с помощью телескопа можно установить существование двух звёзд при любых, как угодно малых угловых расстояниях между ними. Однако в действительности это не так, и лишь волновая теория света позволяет разобраться в причинах предела разрешающей способности оптических приборов.

Волновая природа света налагает предел на возможность различения деталей предмета или очень мелких предметов при их наблюдении.

Дифракция не позволяет получить отчётливые изображения мелких предметов, так как свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Из-за этого изображения предметов получаются «размытыми». Это происходит, когда линейные размеры предметов меньше длины световой волны.

Дифракция налагает также предел на разрешающую способность телескопа. Вследствие дифракции волн у края оправы объектива

изображением звезды будет не точка, а система светлых и тёмных колец.

Если две звезды находятся на малом угловом расстоянии друг от друга, то эти кольца налагаются друг на друга и глаз не в состоянии различить, имеются ли две светящиеся точки или одна.

Предельное угловое расстояние между светящимися точками, при которых их можно различать, определяется отношением длины волны к диаметру объектива.

Раздел №4

Тема: Квантовая физика.

Попытки объяснить наблюдаемые на опытах закономерности распределения энергии в спектрах теплового излучения (электромагнитного излучения нагретого тела) оказались несостоятельными.

Электродинамика Максвелла приводила к бессмысленному выводу, согласно которому нагретое тело, непрерывно теряя энергию вследствие излучения электромагнитных волн, должно охладиться до абсолютного нуля.

Согласно классической теории тепловое равновесие между веществом и излучением невозможно.

Однако опыты показывают, что ничего подобного в действительности нет. Нагретое тело не расходует всю свою энергию на излучение электромагнитных волн.

В поисках выхода из этого противоречия между теорией и опытом немецкий физик Макс Планк предположил, что атомы испускают электромагнитную теорию отдельными порциями—квантами.

Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте γ —излучения:

$$E=h \gamma$$

Коэффициент пропорциональности h получил название постоянной Планка.

По известному из опытов распределению энергии по частотам было определено значение постоянной Планка. Оно оказалось очень малым:

$$h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Законы фотоэффекта.

Квантовым законам подчиняется поведение всех микрочастиц. Но впервые квантовые свойства материи были обнаружены при исследовании излучения и поглощения света.

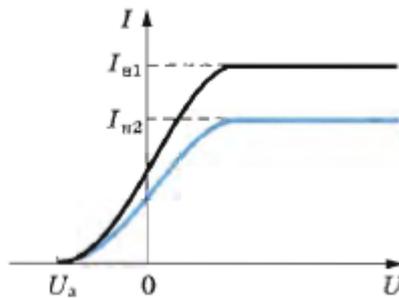
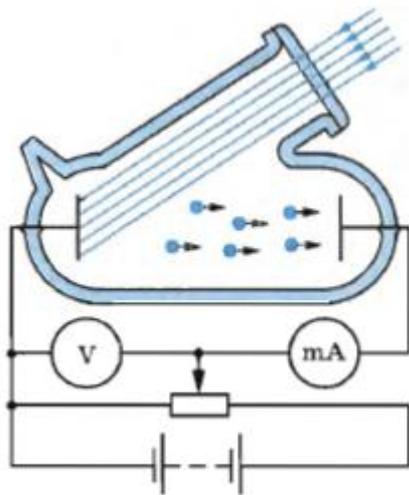
В развитии представлений о природе света важный шаг был сделан при изучении одного замечательного явления, открытого Г. Герцем и тщательно исследованного выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым. Явление это получило название фотоэффекта.

Фотоэффектом называют вырывание электронов из вещества под действием света.

В результате экспериментов было установлено, что :

--количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1с, прямо пропорционально поглощаемой за это время энергии световой волны.

Из графика видно, что сила фототока отлична от нуля и при нулевом напряжении. Это означает, что часть вырванных светом электронов доходит до электрода и при отсутствии напряжения. Если изменить полярность батареи, то сила тока уменьшится и при некотором напряжении U , обратной полярности она стане равной нулю. Это значит, что электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки, а затем возвращает их на электрод.



Задерживающее напряжение U_z зависит от максимальной кинетической энергии, которую имеют электроны, вырванные светом. Изменяя задерживающее напряжение, можно найти максимальное значение кинетической энергии электронов:

$$mv^2/2 = eU_z$$

При изменении интенсивности света задерживающее напряжение, как показали опыты, не меняется. Это означает, что не меняется. Это означает, что 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. **Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.** Если частота света меньше определённой для данного вещества минимальной частоты γ_{\min} , то фотоэффект не происходит.

Теория фотоэффекта.

Объяснение фотоэффекта было дано в 1905 году Эйнштейном, развившим идеи Планка о прерывистом испускании света.

В экспериментальных законах фотоэффекта Эйнштейн увидел убедительное доказательство того, что свет имеет прерывистую структуру и поглощается отдельными порциями.

Энергия E каждой порции излучения в соответствии с гипотезой Планка пропорциональна частоте:

$$E = h \nu \quad (1)$$

Где h – постоянная Планка.

Кинетическую энергию фотоэлектрона можно найти, применив закон сохранения энергии. Энергия порции света « $h \nu$ » идёт на совершение работы выхода A , т.е. работы, которую можно совершить для извлечения электрона из металла, и на сообщение электрону кинетической энергии.

Следовательно:

$$h \nu = A + \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

Это уравнение объясняет основные факты, касающиеся фотоэффекта.

Интенсивность света, по Эйнштейну, пропорциональна числу квантов (порций) энергии в световом пучке и поэтому определяет число электронов, вырванных из металла.

Скорость же электронов согласно формуле 2 определяется только частотой света и работой выхода, зависящей от рода металла и состояния его поверхности. От интенсивности света она не зависит. Для каждого вещества фотоэффект наблюдается лишь в том случае, если частота ν света больше минимального значения ν_0

Ведь чтобы вырвать электрон из металла даже без сообщения ему кинетической энергии, нужно совершить работу выхода A .

Следовательно, энергия кванта должна быть больше этой работы:

$$h\nu > A$$

Предельную частоту ν_0 называют красной границей фотоэффекта:

$$\nu_0 = A/h$$

Работа выхода A зависит от рода вещества. Поэтому и предельная частота γ фотоэффекта (красная граница) для разных веществ различна.

Пользуясь уравнением Эйнштейна (2), можно найти постоянную Планка h . Для этого нужно экспериментально определить частоту света γ , работу выхода A и измерить кинетическую энергию фотоэлектронов. Такого рода измерения и расчёты дают

$$h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Точно такое же значение было найдено Планком при теоретическом изучении совершенно другого явления—теплового излучения. Совпадение значений постоянной Планка, полученных различными методами, подтверждает правильность предположения о прерывистом характере излучения и поглощения света веществом.

Фотоны. Энергия и импульс фотона.

При испускании и поглощении свет ведёт себя подобно потоку частиц с энергией

$$E=h\gamma$$

зависящей от частоты.

Порция света оказалась неожиданно очень похожей на то, что принято называть частицей. Свойства света, обнаруживаемые при излучении и поглощении, называют корпускулярными. Сама же световая частица была названа фотоном или квантом электромагнитного излучения.

Фотон подобно частицам обладает определённой порцией энергии $h\gamma$. Энергию фотона часто выражают не через частоту γ , а через циклическую частоту

$$\omega=2\pi\gamma.$$

При этом в качестве коэффициента пропорциональности вместо величины h используют величину

$$h=h/2\pi,$$

равную

$$h=1,0545887 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Тогда энергия фотона выражается так:

$$E=h\nu=h\omega$$

Согласно теории относительности энергия всегда связана с массой соотношением

$$E=mc^2$$

Так как энергия фотона равна $h\nu$, то, следовательно, его масса получается равной:

$$m= h\nu/c^2 \quad (5)$$

Фотон лишён массы покоя m_0 , т.е. он не существует в состоянии покоя, и при рождении сразу имеет скорость «с».

Масса, определяемая формулой (5) –это масса движущегося фотона. По известной массе и скорости фотона можно найти его импульс:

$$p=mc=h\nu/c=h/\lambda.$$

Направлен импульс фотона по световому лучу.

Чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем отчётливее выражены корпускулярные свойства света.

Из-за того, что постоянная Планка мала, энергия фотонов видимого излучения крайне незначительна. Фотоны, соответствующие зелёному свету, имеют энергию $4 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Применение фотоэффекта.

Простейшим прибором, работающим на основе использования фотоэффекта, является вакуумный фотоэлемент.

Вакуумный фотоэлемент состоит из стеклянной колбы, снабжённой двумя электрическими выводами.

Внутренняя поверхность колбы частично покрыта тонким слоем металла. Это покрытие служит катодом фотоэлемента. В центре баллона расположен анод. Выводы катода и анода подключаются к источнику постоянного напряжения. При освещении катода с его поверхности вырываются электроны. Этот процесс называется внешним фотоэффектом. Электроны движутся под действием электрического поля к аноду.

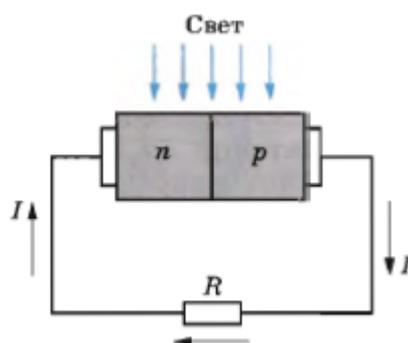
В цепи фотоэлемента возникает электрический ток, сила которого пропорциональна мощности светового излучения.

Таким образом фотоэлемент преобразует энергию светового излучения в энергию электрического тока.

Для преобразования энергии светового излучения в энергию электрического тока широко используются и полупроводниковые фотоэлементы.



Полупроводниковый диод имеет следующее устройство—в плоском кристалле кремния или другого полупроводника с дырочной проводимостью создаётся тонкий слой полупроводника с электронной проводимостью. На границе раздела этих слоёв возникает p-n переход.



При освещении полупроводникового кристалла в результате поглощения света происходит изменение распределения

электронов и дырок по энергиям. Это процесс называется внутренним фотоэффектом. В результате внутреннего фотоэффекта увеличивается количество свободных электронов и в полупроводнике, происходит их разделение на границе p-n перехода.

При соединении противоположных слоёв полупроводникового фотоэлемента проводником в цепи возникает электрический ток— сила тока в цепи пропорциональна мощности светового потока излучения, падающего на фотоэлемент.

Включение фотоэлемента последовательно с обмоткой электромагнитного реле позволяет автоматически включать или выключать исполнительные устройства при попадании света на фотоэлемент.

Фотоэлементы используются в кино для звукового сопровождения, записанного на киноленту в виде звуковой дорожки и т.д.

Атомная физика.

Английский учёный Эрнест Резерфорд исследовал рассеяние α —частиц веществом и открыл в 1911 году атомное ядро—массивное образование, в десятки тысяч раз меньшее по размерам, чем атом.

Опыты Резерфорда.

Масса электронов в несколько тысяч раз меньше массы атомов. Так как атом в целом нейтрален, то, следовательно, основная масса атома приходится на его положительно заряженную часть.

Для экспериментального исследования распределения положительного заряда, а значит, и массы внутри атома Резерфорд предложил в 1906 году применить зондирование атома с помощью α —частиц. Эти частицы возникают при распаде радия и некоторых других элементов. Их масса примерно в 8000 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен по модулю удвоенному заряду электрона. Это не что иное, как полностью ионизированные атомы гелия.

Скорость α —частиц очень велика, она примерно равна $1/15$ скорости света.

Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжёлых элементов. Электроны вследствие своей малой массы не могут заметно изменить траекторию α —частиц.

Рассеяние (изменение направления движения) α —частиц может вызвать только положительно заряженная часть атома.

Таким образом, по рассеянию α —частиц можно определить характер распределения положительного заряда и массы внутри атома.

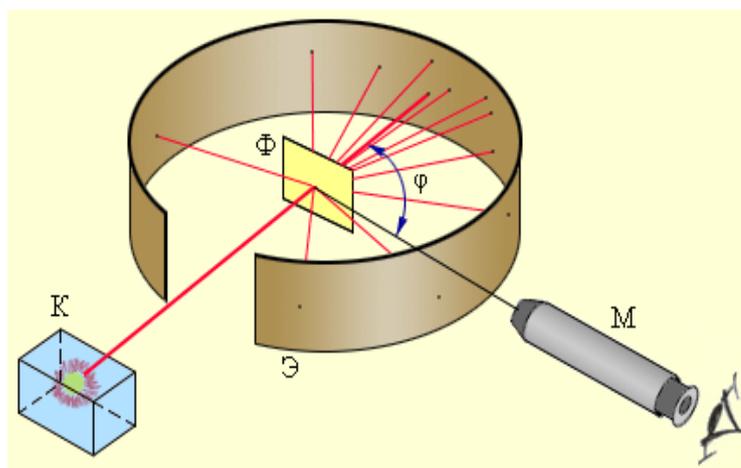


Рис.2.2.

Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц.

К – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом,
 Э – экран, покрытый сернистым цинком, Ф – золотая фольга,
 М – микроскоп.

Радиоактивный препарат (радий) помещался внутрь свинцового цилиндра 1, вдоль которого был высверлен узкий канал. Пучок α -частиц из канала падал на тонкую фольгу 2 из исследуемого материала (медь, золото и др.).

После рассеяния α -частицы попадали на полупрозрачный экран 3, покрытый сульфидом цинка.

Столкновение каждой частицы с экраном сопровождалось вспышкой света, которую можно наблюдать в микроскоп 4.

Весь прибор размещался в сосуде, из которого был откачан воздух.

При хорошем вакууме внутри прибора в отсутствие фольги на экране возникал светлый кружок, вызванный тонким пучком α -частиц.

Но когда на пути пучка помещали фольгу, α -частицы из-за рассеяния распределялись по кругу большей площади.

Небольшое количество α -частиц отклонилось на углы, большие 90° .

При распределении по всему атому положительный заряд не может создать достаточно интенсивное электрическое поле, способное отбросить α -частицу назад.

Максимальная сила отталкивания определяется по закону Кулона:

$$F_{\max} = q_{\alpha} \cdot q / 4\pi\epsilon_0 R^2$$

где q_α —заряд α —частицы, q —положительный заряд атома, R —его радиус, ϵ_0 —электрическая постоянная.

Напряжённость электрического поля равномерно заряженного шара максимальна на поверхности шара и убывает до нуля по мере приближения к центру.

Поэтому, чем меньше радиус R , тем больше сила, отталкивающая α —частицы.

α —частица могла быть отброшена назад лишь только в том случае, если положительный заряд атома и его масса сконцентрированы в очень малой области пространства.

Так Резерфорд пришёл к идее атомного ядра—тела малых размеров, в котором сконцентрированы почти вся масса и весь положительный заряд атома.

На рисунке показаны траектории α —частиц, пролетающих на различных расстояниях от ядра.

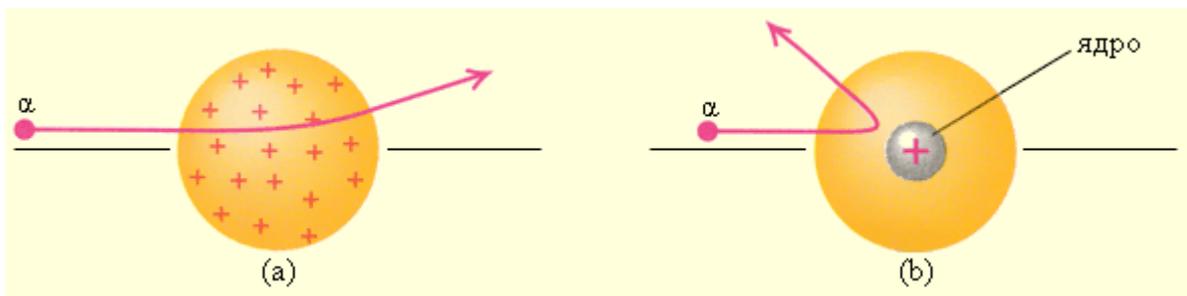


Рис.

Определение размеров атомного ядра.

Подсчитывая число α —частиц, рассеянных на различные углы Резерфорд смог оценить размеры ядра.

Оказалось, что ядро имеет диаметр порядка 10^{-12} -- 10^{-13} см (у разных ядер диаметры различны).

Размер же самого атома 10^{-7} см, т.е. 10—100 тысяч раз превышает размеры ядра.

Впоследствии удалось определить и заряд ядра. При условии, что заряд электрона принят за единицу, заряд ядра равен номеру данного химического элемента в периодической системе Менделеева.

Планетарная модель атома.

Из опытов Резерфорда непосредственно вытекает планетарная модель атома.

В центре расположено заряженное атомное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. 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 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—это радиус орбиты его электрона.

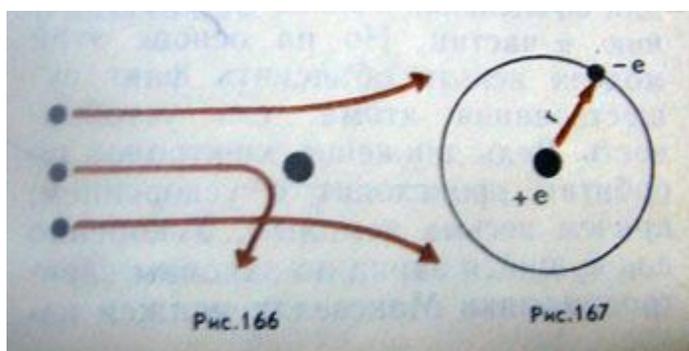


Рис.

Простая и наглядная планетарная модель атома имеет прямое экспериментальное обоснование. Она необходима 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, причём 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. Как показывают строгие расчёты, электрон должен за ничтожно малое время (порядка 10^{-11} с) упасть на ядро. Атом должен прекратить своё существование. В действительности ничего подобного не происходит. Атомы устойчивы и в невозбуждённом состоянии могут существовать неограниченно долго, не излучая электромагнитные волны.

Квантовые постулаты Бора.

Выход из затруднительного положения в теории атома был найден в 1913 году датским физиком Нильсом Бором.

Первый постулат Бора:

--атомная система может находиться только в особых стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определённая энергия E ;

В стационарном состоянии атом не излучает.

Этот постулат противоречит классической механике, согласно которой энергия движущихся электронов может быть любой.

Противоречит он и электродинамике Максвелла, т.к. допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн.

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 стационарного состояния

$$h\nu_{к.п.} = E_k - E_n$$

Отсюда частоту излучения можно выразить так:

$$\nu_{к.п.} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}$$

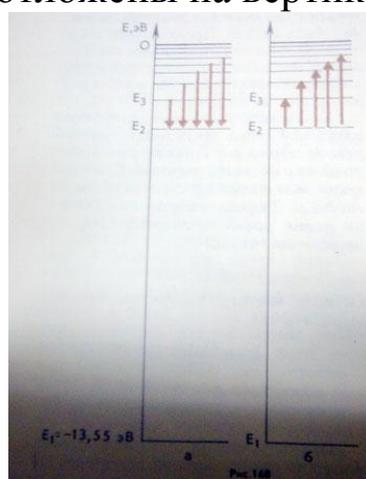
При поглощении света атом переходит из стационарного с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Свои постулаты Н. Бор применил для построения теории простейшей атомной системы—атома водорода.

Модель атома водорода по Бору.

Используя законы механики и правило квантования, отбирающее возможные стационарные состояния, Бор смог вычислить допустимые радиусы орбит электрона и энергии стационарных состояний.

Минимальный радиус орбиты определяет размеры атома. На рисунке (а, б) значения энергий стационарных состояний (в электрон—вольтах) отложены на вертикальных осях.



а) б)

Рис.

Переходы в первое возбуждённое состояние (на второй энергетический уровень) с верхних уровней образует серию Бальмера:

$$E_3 \rightarrow E_2, E_4 \rightarrow E_2, E_5 \rightarrow E_2, E_6 \rightarrow E_2.$$

Данная серия названа по имени швейцарского учителя И. Бальмера, который ещё в 1885 году на основе эксперимента установил 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 рисунке (б) стрелками изображены переходы атома из одних состояний в другие с поглощением света.

Лазеры.

Индукцированное излучение.

В 1917 году Эйнштейн предсказал возможность так называемого индуцированного (вынужденного) излучения света атомами. Под индуцированным излучением понимается излучение возбуждённых атомов под действием падающего на них света. Замечательной особенностью этого излучения является то, что возникшая при индуцированном излучении световая волна не отличается от волны, падающей на атом, ни частотой, ни фазой, ни поляризацией.

На языке квантовой теории вынужденное излучение означает переход атома из высшего энергетического состояния в низшее, но не самопроизвольно, как при обычном излучении, а под влиянием внешнего воздействия.

В 1940 году советский физик В. А. Фабрикант указал на возможность использования явления вынужденного излучения для усиления электромагнитных волн.

В 1954 году советские учёные Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и независимо от них американский физик Ч. Таунс использовали явление индуцированного излучения для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны $\lambda=1.27$ см.

За разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн Н. Г. Басову и А. М. Прохорову была в 1959 году присуждена Ленинская премия

В 1963 году Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и американский физик Ч. Таунс были удостоены Нобелевской премии.

В 1960 году в США был создан первый лазер—квантовый генератор электромагнитных волн в видимом диапазоне спектра.

Свойства лазерного излучения.

Лазерные источники света обладают рядом преимуществ по сравнению с другими источниками света:

1. Лазеры способны создавать пучки света с очень малым углом расхождения (около 10^{-7} рад.). На Луне такой пучок, испущенный с Земли, даёт пятно 3 км.
2. Свет лазера обладает исключительной монохроматичностью. В отличие от обычных источников света, атомы которых излучают свет независимо друг от друга, в лазерах атомы излучают свет согласованно. Поэтому фаза волны не испытывает нерегулярных изменений.
3. Лазеры являются самыми мощными источниками света. В узком интервале спектра кратковременно (в течение промежутка времени продолжительностью порядка 10^{-11} с) у некоторых типов лазеров достигается мощность излучения 10^1 Вт/см², в то время как мощность излучения Солнца равна только $7 \cdot 10^3$ Вт/см², причём суммарно по всему спектру.

Принцип действия лазера.

В обычных условиях большинство атомов находится в низшем энергетическом состоянии. Поэтому при низких температурах вещества не светятся.

При прохождении электромагнитной волны сквозь вещество её энергия поглощается. За счёт поглощённой энергии волны часть атомов возбуждается, т. е. переходит в высшее энергетическое состояние. При этом от светового пучка отнимается энергия:

$$h\nu = E_2 - E_1,$$

равная разности энергий между уровнями 2 и 1.

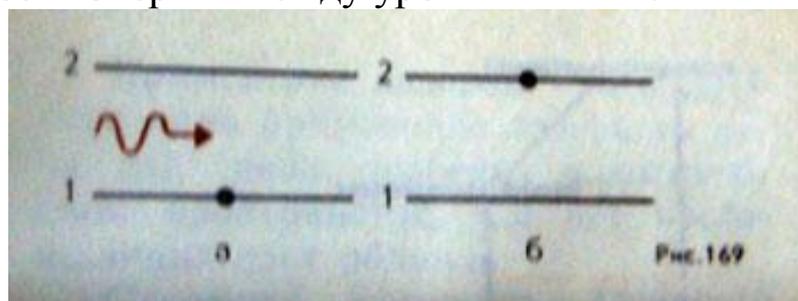


Рис.

На рисунке а) схематически представлены невозбуждённый атом и электромагнитная волна в виде отрезка синусоиды.

Электрон находится на нижнем уровне.

На рисунке б) изображён возбуждённый атом, поглотивший энергию. Возбуждённый атом может отдать свою энергию соседним атомам при столкновении или испустить фотон в любом направлении.

Теперь представим себе, что каким-либо способом мы возбуждали большую часть атомов среды. Тогда при прохождении через вещество электромагнитной волны с частотой:

$$\nu = E_2 - E_1 / h$$

эта волна будет не ослабляться, а, напротив, усиливаться за счёт индуцированного излучения. Под её воздействием атомы согласованно переходят в низшие энергетические состояния, излучая волны, совпадающие по частоте и фазе с падающей волной.

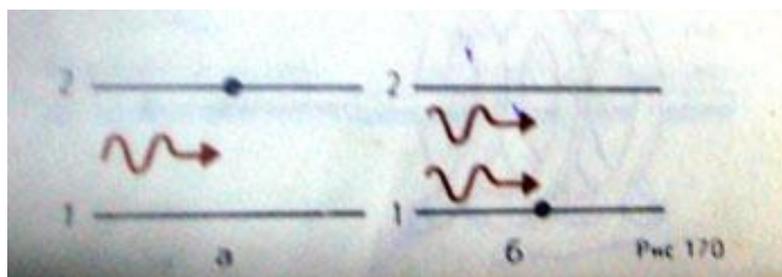


Рис.

На рисунке а) показаны возбуждённый атом и волна, а на рисунке б) схематически показано, что атом перешёл в основное состояние, а волна усилилась.

Применение лазеров.

Очень перспективно применение лазерного луча для связи, особенно в космическом пространстве, где нет поглощающих свет облаков.

Огромная мощность лазерного луча используется для испарения материалов в вакууме, для сварки и т. д. С помощью луча лазера можно производить хирургические операции, например, приваривать» отслоившуюся от глазного дна сетчатку, получать объёмные изображения предметов, используя когерентность лазерного луча.

Лазеры позволили осуществить светолокатор, с помощью которого расстояние до предметов измеряется с точностью до нескольких миллиметров.

Перспективно использование мощных лазерных лучей для осуществления управляемой термоядерной реакции.

Физика атомного ядра.

Методы наблюдения и регистрации элементарных частиц.

Регистрирующий прибор—это сложная макроскопическая система, которая может находиться в неустойчивом состоянии.

При небольшом возмущении, вызванном пролетевшей частицей, начинается процесс перехода системы в новое, более устойчивое состояние. Этот процесс и позволяет регистрировать частицу.

В зависимости от целей эксперимента и условий, в которых он проводится, применяются те или иные регистрирующие

устройства, отличающиеся друг от друга по основным характеристикам.

Газоразрядный счётчик Гейзера.

Счётчик Гейзера—один из важнейших приборов для автоматического счёта частиц.

Счётчик состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем (катод), и тонкой металлической нити, идущей вдоль оси трубки (анод).

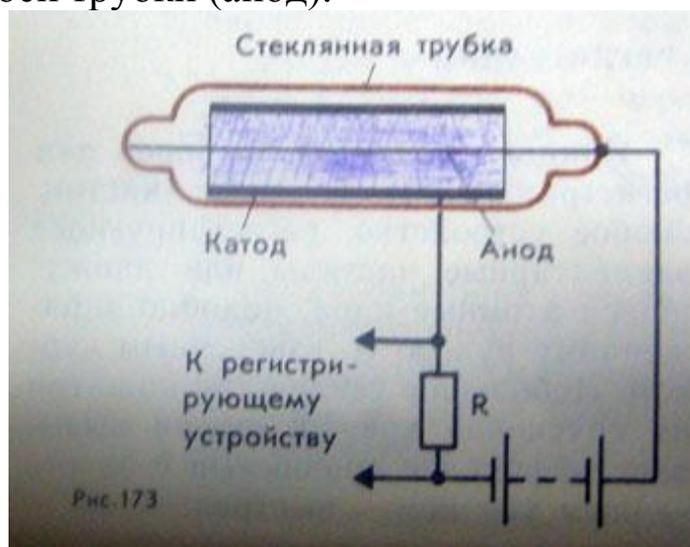


Рис.

Трубка заполняется газом, обычно аргоном.

Действие счётчика основано на ударной ионизации. Заряженная частица (электрон, α -частица и т.д.), пролетая в газе, отрывает от атомов электроны и создаёт положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между анодом и катодом (к ним подводится высокое напряжение) ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация. Возникает лавина ионов, и ток через счётчик резко возрастает. При этом на нагрузочном резисторе R образуется импульс напряжения, который подаётся в регистрирующее устройство.

Для того, чтобы счётчик мог регистрировать следующую попавшую в него частицу, лавинный разряд нужно погасить. Это происходит автоматически. Так как в момент появления импульса тока падение напряжения на нагрузочном резисторе R велико, то напряжение между анодом и катодом резко уменьшается— настолько, что разряд прекращается.

Счётчик Гейзера применяется в основном для регистрации электронов и γ -квантов (фотонов большой энергии). Однако непосредственно γ -кванты вследствие их малой ионизирующей способности не регистрируются. Для их обнаружения внутреннюю стенку трубки покрывают материалом, из которого γ -кванты выбивают электроны.

Счётчик регистрирует почти все попадающие в него электроны; что касается γ -квантов, то он регистрирует приблизительно только один γ -квант из ста. Регистрация тяжёлых частиц (например, α -частиц) затруднена, так как сложно сделать в счётчике достаточно тонкое «окно», прозрачное для этих частиц.

В настоящее время созданы счётчики, работающие на иных принципах, чем счётчик Гейзера.

Камера Вильсона.

Счётчики позволяют лишь регистрировать факт прохождения через них частицы и фиксировать некоторые её характеристики. В камере же Вильсона, созданной в 1912 году, быстрая заряженная частица оставляет след, который можно наблюдать непосредственно или сфотографировать.

Действие камеры Вильсона представляет собой герметически закрытый сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению. (см. рис.).



Рис.

При резком опускании поршня, вызванном уменьшением давления под поршнем, пар в камере адиабатически расширяется. Вследствие этого происходит охлаждение, и пар становится перенасыщенным. Это неустойчивое состояние пара: пар легко конденсируется. Центрами конденсации становятся ионы, которые образует в рабочем пространстве камеры пролетевшая частица. Если частица проникает в камеру непосредственно перед расширением или сразу после него, то на её пути возникают капельки воды. Эти капельки образуют видимый след пролетевшей частицы—трек.(рис.).

Затем камера возвращается в исходное состояние и ионы удаляются электрическим полем. Информация, которую дают треки в камере Вильсона, значительно богаче той, которую могут дать счётчики. По длине трека можно определить энергию частицы, а по числу капелек на единицу длины трека оценивается её скорость.

Чем длиннее трек частицы, тем больше её энергия. А чем больше капелек воды образуется на единицу длины трека, тем меньше её скорость. Частицы с большим зарядом оставляют трек большей толщины.

Советские физики П.Л.Капица и Д.В.Скобельцин предложили помещать камеру Вильсона в однородное магнитное поле. Магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу с определённой силой (силой Лоренца). Эта сила искривляет траекторию частицы, не изменяя модуля её скорости. Трек имеет тем большую кривизну, чем больше заряд частицы и чем меньше её масса. По кривизне трека можно определить отношение заряда частицы к её массе. Если известна одна из этих величин, то можно вычислить другую. Например, по заряду частицы и кривизне её трека можно определить массу.

Пузырьковая камера.

В 1952 году американским учёным Д.Глейзером было предложено использовать для обнаружения треков частиц перегретую жидкость. В такой жидкости на ионах, образующих при движении быстрой заряженной частицы, возникают пузырьки пара, дающие видимый трек. Камеры такого типа были названы пузырьковыми.

В исходном состоянии жидкость в камере находится под высоким давлением, предохраняющим её от закипания, несмотря на то, что температура жидкости выше температуры кипения при атмосферном давлении.

При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой и в течение небольшого времени она будет находиться в неустойчивом состоянии. Заряженные частицы, пролетающие именно в это время, вызывают появление треков, состоящих из пузырьков пара. (рис.)

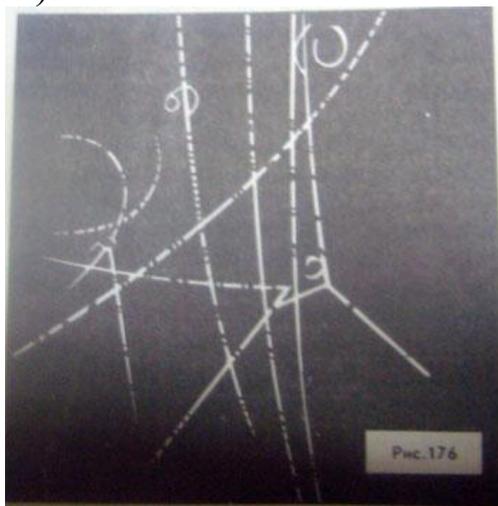


Рис.

В качестве жидкостей используются главным образом жидкий водород и пропан. Длительность рабочего цикла пузырьковой камеры невелика—около 0,1 с.

Преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона обусловлено большей плотностью рабочего вещества. Пробеги частиц вследствие этого оказываются достаточно короткими, и частицы даже больших энергий застревают в камере. Это позволяет наблюдать серию последовательных превращений частицы и вызываемые ею реакции.

Треки в камере Вильсона и пузырьковой камере—один из главных источников информации о поведении и свойствах частиц.

Наблюдение следов элементарных частиц производит сильное впечатление, создаёт ощущение непосредственного соприкосновения с микромиром.

Радиоактивность.

1. Открытие радиоактивности.

Открытие радиоактивности—явления, доказывающего сложный состав атомного ядра, произошло благодаря счастливой случайности.

Рентгеновские лучи впервые были получены при столкновениях быстрых электронов со стеклянной стенкой разрядной трубки. Одновременно наблюдалось свечение стенок трубки. Беккерель долгое время исследовал родственное явление—свечение веществ, предварительно облучённых солнечным светом. К таким веществам принадлежат, в частности, соли урана, с которыми экспериментировал Беккерель.

Соответственно возник вопрос:--не появляются ли после облучения солей урана наряду с видимым светом и рентгеновские лучи?

Беккерель завернул фотопластинку в плотную чёрную бумагу, положил сверху крупинки урановой соли и выставил на яркий солнечный свет. После проявления пластинка почернела на тех участках, где лежала соль. Следовательно, уран создавал какое-то излучение, которое подобно рентгеновскому пронизывает непрозрачные тела и действует на фотопластинку

Это означало, что соли урана самопроизвольно, без каких-либо внешних влияний создают какое-то излучение.

Вскоре Беккерель обнаружил, что излучение урановых солей ионизирует воздух подобно рентгеновским лучам и разряжает электроскоп.

Испробовав различные химические соединения урана, он установил очень важный факт: -- интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит.

Следовательно, это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу урану, его атомам.

В 1898 году Мария Склодовская-Кюри во Франции и другие учёные обнаружили излучение тория.

В дальнейшем главные усилия в поисках новых элементов были предприняты Марией Склодовской-Кюри и её мужем Пьером Кюри. Систематическое исследование руд, содержащих уран и торий, позволило им выделить новый, неизвестный ранее химический элемент—полоний, названный так в честь родины Марии Склодовской-Кюри—Польши.

Наконец, был открыт ещё один элемент, дающий очень интенсивное излучение. Он был назван радием(т.е. лучистым).

Само же явление самопроизвольного излучения было названо супругами Кюри радиоактивностью.

Радий имеет относительную атомную массу, равную 226, и занимает в таблице Д.И.Менделеева место под номером 88. До открытия Кюри эта клетка пустовала. По своим химическим свойствам радий принадлежит к щелочноземельным элементам. Впоследствии было выявлено, что все химические элементы с порядковым номером более 83 являются радиоактивными.

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.

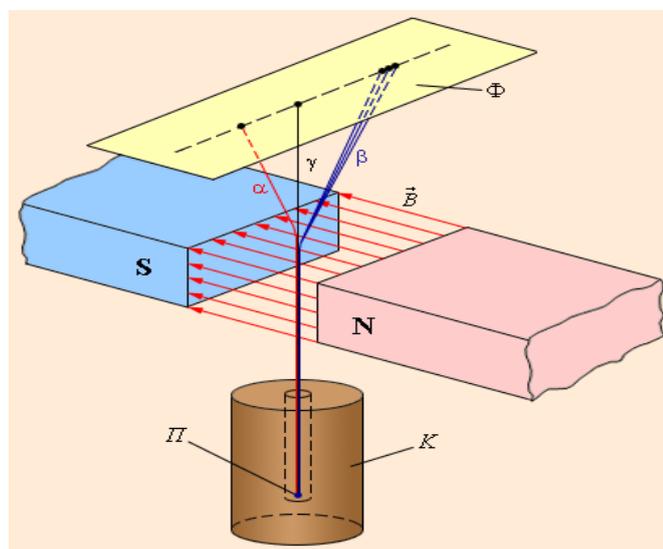


Рис.

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 (см. рис.). Вся установка размещалась в вакууме.

В отсутствие магнитного поля на фотопластинке после проявления обнаруживалось одно тёмное пятно, точно напротив канала. В

магнитном поле пучок распадался на три пучка. Две 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 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).

Эти три вида излучения очень сильно отличаются друг от друга по проникающей способности, т.е. по тому, насколько интенсивно они поглощаются различными веществами.

Наименьшей проникающей способностью обладают α -лучи. Слой бумаги толщиной около 0,1мм для них уже не прозрачен. 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 увеличивается с ростом атомного номера вещества-поглотителя. Но и слой свинца толщиной в 1см не является для них непреодолимой преградой. При прохождении γ -лучей через такой слой свинца их интенсивность убывает лишь вдвое.

Физическая природа α -, β -, 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 наводит 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 длина волны. Она оказалась очень малой—от 10 до 10 см.

На шкале электромагнитных волн γ -лучи непосредственно следуют за рентгеновскими. Скорость распространения у γ -лучей такая же, как у всех электромагнитных волн—около 300км/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 сильно отклоняются как в магнитном, так и в электрическом поле.

Основная задача 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 данным радиоактивным элементом, неодинаковы. Встречаются частицы с самыми различными скоростями. Это и приводит к расширению пучка β -частиц в магнитном поле.(рис.).

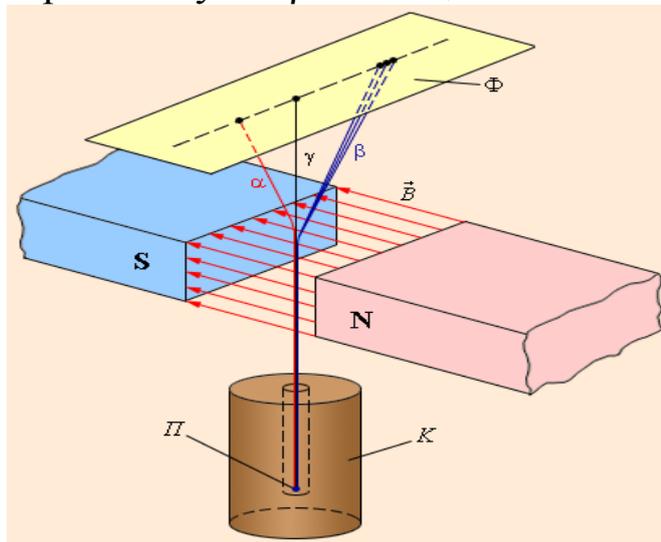


Рис.178

Альфа-частицы

Труднее было выяснить природу α —частиц, так как они слабо отклоняются магнитным и электрическим полями.

Окончательно эту задачу удалось решить Резерфорду. Он измерил отношение заряда q частицы к её массе m по отклонению в магнитном поле. Оно оказалось примерно в два раза меньше, чем у протона—ядра атома водорода. Заряд протона равен элементарному, а его масса очень близка к атомной единице массы ($1/12$ массы углерода; $1 \text{ а.е.м.} = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$).

Следовательно, у α —частицы на один элементарный заряд приходится масса, равная двум атомным единицам массы.

Но заряд α —частицы и её масса оставались неизвестными.

Следовало измерить либо заряд, либо массу α —частицы. С появлением счётчика Гейгера проще и надежнее было измерить заряд. Сквозь очень тонкое окошко α —частицы могут проникать внутрь счётчика и регистрироваться им.

Резерфорд поместил на пути α —частиц счётчик Гейзера, который измерил число частиц, испускавшихся радиоактивным препаратом за определённое время. Затем он поставил вместо счётчика металлический цилиндр, соединённый с чувствительным электрометром (рис. 179).

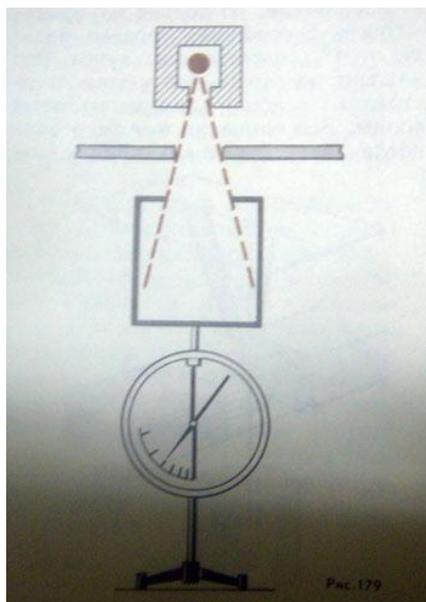


Рис. 179

Электрометром Резерфорд измерил 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, Резерфорд установил, что у α —частицы на каждый из двух элементарных зарядов приходится две атомные единицы массы. Следовательно, на два элементарных заряда приходится четыре атомных единицы массы. Такой же заряд и такую же относительную атомную массу имеет ядро гелия. Из этого следует, что α —частица—это ядро атома гелия

Вывод:--При радиоактивном распаде рождаются α —лучи (ядра атома гелия), β —лучи (электроны) и γ —лучи (коротковолновое электромагнитное излучение).

Радиоактивные превращения

Радиоактивность сопровождается выделением энергии. Пьер Кюри поместил ампулу с хлоридом радия в калориметр. В нём поглощались α -, β -, γ -лучи, и за счёт их энергии нагревался калориметр. Кюри определил, что 1г радия выделяет за 1 час около

582 Дж энергии. И такая энергия выделяется непрерывно на протяжении ряда лет.

При радиоактивности вещество испытывает какие-то глубокие изменения, совершенно отличные от обычных химических превращений. Было сделано предположение, что превращения претерпевают сами атомы.

В результате опытов учёные пришли к выводу, который был точно сформулирован Резерфордом:

--атомы радиоактивного вещества подвержены спонтанным (самопроизвольным) видоизменениям.

В каждый момент времени небольшая часть общего числа атомов становится неустойчивой и взрывообразно распадается. В подавляющем большинстве случаев выбрасывается с огромной скоростью осколок атома-- α —частица.

В некоторых других случаях взрыв сопровождается выбрасыванием быстрого электрона и появлением лучей, обладающих подобно рентгеновским лучам большой проникающей способностью и называются γ —излучением.

Было обнаружено, что в результате атомного превращения образуется вещество совершенно нового вида, полностью отличное по своим физическим и химическим свойствам от первоначального вещества. Это новое вещество, однако, само также неустойчиво и испытывает превращение с испусканием характерного радиоактивного излучения. (могут образовываться и стабильные ядра).

Таким образом, точно установлено, что атомы некоторых элементов подвержены спонтанному распаду, сопровождающемуся излучением энергии в количествах, огромных по сравнению с энергией, освобождающейся при обычных молекулярных изменениях.

После того как было открыто атомное ядро, сразу стало ясно, что именно оно претерпевает изменения при радиоактивных превращениях.

Ведь α —частиц вообще нет в электронной оболочке, а уменьшение числа электронов оболочки на единицу превращает атом в ион, а не в новый химический элемент. Выброс же электрона из ядра меняет заряд ядра (увеличивает его) на единицу.

Таким образом, радиоактивность представляет собой самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных частиц.

Правило смещения.

Превращения ядер подчиняются так называемому правилу смещения, сформулированному впервые Содди:

--при α —распаде ядро теряет положительный заряд $2e$ и масса его убывает приблизительно на четыре атомных единицы массы. В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы.

Символически это можно записать так:

m

Здесь элемент обозначается, как и в химии, общепринятыми символами: --заряд ядра записывается в виде индекса слева внизу символа, а атомная масса—в виде индекса слева вверху символа.

Например, водород обозначается символом ${}^1_1\text{H}$.

Для α —частицы, являющейся ядром атома гелия, применяется обозначение ${}^4_2\text{He}$ и т.д.

При β —распаде из ядра вылетает электрон. В результате заряд ядра увеличивается на единицу, а масса остаётся почти неизменной:

Здесь ${}^0_{-1}\text{e}$ обозначает электрон:--индекс «0» вверху означает, что масса его очень мала по сравнению с атомной единицей массы.

После β —распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу периодической системы.

Гамма—излучение не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется незначительно мало

Правила смещения показывают, что при радиоактивном распаде сохраняется электрический заряд и приближённо сохраняется атомная масса ядер.

Возникшие при радиоактивном распаде новые ядра в свою очередь обычно также радиоактивны.

Изотопы.

В результате наблюдения огромного числа радиоактивных превращений постепенно выяснилось, что существуют вещества, совершенно тождественные по своим химическим свойствам, но имеющие совершенно различные радиоактивные свойства (т.е. распадающиеся по разному).

Их никак не удавалось разделить всеми химическими способами. На этом основании Содди в 1911 году высказал предположение о возможности существования элементов с одинаковыми химическими свойствами, но различающихся в других отношениях, в частности своей радиоактивностью. Эти элементы нужно помещать в одну и ту же клетку периодической системы Менделеева. Содди назвал их изотопами (т.е. занимающими одинаковые места).

Предположение Содди получило подтверждение и глубокое толкование год спустя, когда Дж. Томсон предпринял точные измерения массы ионов неона методом отклонения их в электрических и магнитных полях. Томсон обнаружил, что неон представляет собой смесь двух сортов атомов. Большую часть их имеет относительную массу, равную 20. Но имеется незначительная добавка атомов с относительной атомной массой 22. В результате относительная атомная масса смеси равна 20,2. Атомы, обладающими одними и теми же химическими свойствами, различались массой. Оба сорта неона, естественно, занимают одно и то же место в таблице Менделеева и, следовательно, являются изотопами. Таким образом, изотопы могут отличаться не только своими радиоактивными свойствами, но и массой. Именно последнее обстоятельство и оказалось главным. У изотопов заряды атомных ядер одинаковы. Поэтому число электронов в оболочках атомов и, следовательно, химические свойства изотопов одинаковы. Но массы ядер различны. Причём ядра могут быть как радиоактивными, так и стабильными. Различие свойств радиоактивных изотопов связано с тем, что их ядра имеют различную массу.

В настоящее время установлено существование изотопов у всех химических элементов. Некоторые элементы имеют только нестабильные (т.е. радиоактивные) изотопы. Изотопы есть у самого тяжёлого из существующих в природе элементов—урана

(относительные атомные массы 238, 235 и др.) и у самого лёгкого—водорода (относительные массы 1, 2, 3).

Особенно замечательны изотопы водорода, так как они отличаются друг от друга по массе в два или три раза. Изотоп с относительной массой 2 называется дейтерием. Он стабилен (т.е. не радиоактивен) и входит в качестве небольшой примеси (1:4500) в обычный водород. При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая тяжёлая вода. Её физические свойства заметно отличаются от свойств обычной воды. При нормальном атмосферном давлении она кипит при $101,2^{\circ}\text{C}$ и замерзает при $3,8^{\circ}\text{C}$.

Изотоп водорода с атомной массой 3 называется тритием.

Он β —радиоактивен с периодом полураспада около 12 лет.

Существование изотопов доказывает, что заряд атомного ядра определяет не все свойства атома, а лишь его химические свойства, которые зависят от периферии электронной оболочки, например размеры. Масса же атома и его радиоактивные свойства не определяются порядковым номером в таблице Менделеева.

Существенно, что при точном измерении относительных атомных масс изотопов выяснилось, что они близки к целым числам.

Атомные массы химических элементов иногда сильно отличаются от целых чисел.

Так, относительная масса хлора равна 35,5. Это значит, что в естественном состоянии химически чистое вещество представляет собой смесь изотопов в различных пропорциях.

Целочисленность (приближённая) относительных атомных масс изотопов очень важна для выяснения строения атомного ядра.

Открытие нейтрона.

Важнейшим этапом в развитии атомного ядра было открытие нейтрона.

В 1932 году произошло важнейшее для всей ядерной физики событие:--учеником Резерфорда, английским физиком Д. Чедвиком был открыт нейтрон.

При бомбардировке бериллия α —частицами протоны не появлялись. Но обнаружилось какое-то сильно проникающее излучение, способное преодолеть такую преграду, как свинцовая

пластина в 10—20 см толщиной. Было сделано предположение, что это γ —лучи большой энергии.

Ирен Жолио-Кюри (дочь Марии и Пьера Кюри) и её муж Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что если на пути излучения, образующегося при бомбардировке бериллия α —частицами, поставить парафиновую пластину, то ионизирующая способность этого излучения резко увеличивается. Они справедливо предположили, что это излучение выбивает из парафиновой пластины протоны, имеющиеся в большом количестве в этом водород—содержащем веществе.

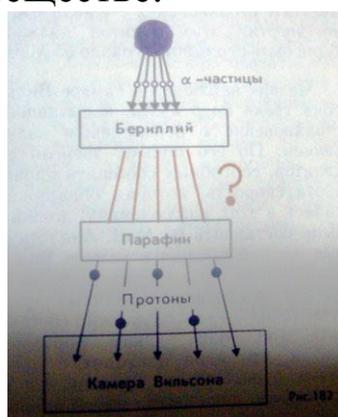


Рис.

С помощью камеры Вильсона (схема опыта приведена на рис.) супруги Жолио-Кюри обнаружили эти протоны и по длине пробега оценили их энергию. Если согласно сделанному предположению протоны ускорялись в результате столкновения с γ —квантами, то энергия этих квантов должна быть огромной—около 55 МэВ. Энергия γ —квантов, способных сообщать ядрам азота скорость, которая обнаруживалась в опытах, должна была составлять 90 МэВ.

Аналогичные же наблюдения в камере Вильсона треков ядер аргона привели к выводу, что энергия указанных гипотетических γ —квантов должна составлять 150 МэВ. Таким образом, считая, что ядра приходят в движение в результате столкновения с частицами, лишёнными массы покоя, исследователи пришли к явному противоречию:--одним и тем же γ —квантам приходилось приписывать различную энергию.

Стало очевидным, что предположение об излучении бериллием γ —квантов, т.е. частиц, лишённых массы покоя, несостоятельны. Из бериллия под действием α —частиц вылетают какие-то достаточно тяжёлые частицы. Только при столкновении с тяжёлыми частицами протоны или ядра азота и аргона могли получить ту большую

энергию, которая наблюдалась. Поскольку эти частицы обладали большой проникающей способностью и непосредственно не ионизировали газ, то, следовательно, они были электрически нейтральными. Ведь заряженная частица сильно взаимодействует с веществом и поэтому быстро теряет свою энергию.

Новая частица была названа нейтроном. Существование её предсказывал Резерфорд более чем за 10 лет до опытов Чедвика. По энергии и импульсу ядер, сталкивающихся с нейтронами, была определена их масса

Она оказалась чуть больше массы протона—1836,6 электронных масс вместо 1836,1 для протона.

При попадании α -частиц в ядра бериллия происходит следующая реакция:

Где n —символ нейтрона; заряд его равен нулю, а относительная масса—приблизительно единице.

Нейтрон—нестабильная частица: свободный нейтрон за время около 15 мин распадается на протон, электрон и нейтрино—частицу, лишённую массы покоя.

Таким образом, элементарная частица—нейтрон—не имеет электрического заряда, а его масса больше массы протона приблизительно на 2,5 электронных массы.

Строение атомного ядра. Ядерные силы.

Сразу после того, как в опытах Чедвика был открыт нейтрон, советский учёный Д.Д. Иваненко и немецкий учёный В. Гейзенберг в 1932 году предложили протонно—нейтронную модель ядра. Она была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений

Протонно—нейтронную модель ядра.

Согласно протонно—нейтронной модели ядра состоят из элементарных частиц двух типов:--протонов и нейтронов. Так как в целом атом электрически нейтрален, а заряд протона равен по модулю заряду 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 :

$$A=Z+N$$

Массы протона и нейтрона близки друг к другу, и каждая из них приблизительно равна атомной единице массы. Масса электронов в атоме много меньше массы ядра. Поэтому массовое число ядра равно округлённой до целого числа относительной массе элемента. Изотопы представляют собой ядра с одним и тем же значением Z , но различными массовыми числами A , т.е. с различным числом нейтронов N .

Ядерные силы.

Так как ядра весьма устойчивы, то протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра какими-то силами, причём очень большими.

Это не гравитационные силы, которые слишком слабы. Устойчивость ядра не может быть объяснена также электромагнитными силами по той причине, что между одноименно заряженными протонами действует электрическое отталкивание. А нейтроны лишены электрического заряда. Значит, между ядерными частицами—протонами и нейтронами (часто их называют нуклонами) действуют особые силы. Название для них нашлось само собой—ядерные силы.

Основные свойства ядерных сил:

--ядерные силы примерно в 100 раз превосходят электрические (кулоновские) силы. Это самые мощные силы из всех, которыми располагает природа. Поэтому взаимодействия ядерных частиц часто называют сильными взаимодействиями. Сильные

взаимодействия не сводятся только к взаимодействию нуклонов в ядре. Это особый тип взаимодействия, присущий большинству элементарных частиц наряду с электромагнитными взаимодействиями.

--другая важная особенность ядерных сил—их короткодействующий характер. Электромагнитные силы сравнительно медленно убывают с расстоянием. Ядерные силы заметно проявляются лишь на расстояниях, равных по порядку величины размерам ядра (10^{-12} -- 10^{-13} см), что показали уже опыты Резерфорда по рассеянию α —частиц атомными ядрами.

Энергия связи атомных ядер

Важнейшую роль во всей ядерной физике играет понятие энергии связи ядра. Энергия связи позволяет объяснить устойчивость ядер, выяснить, какие процессы ведут к выделению ядерной энергии.

Нуклоны в ядре прочно удерживаются ядерными силами. Для того чтобы удалить нуклон из ядра, надо совершить 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 основании закона сохранения энергии можно также утверждать что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц. Энергия связи атомных ядер очень велика. Рассмотрим возможность ее определения.

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:

$$E=mc^2$$

Точнейшие измерения масс ядер показывают, что масса покоя ядра $M_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс покоя слагающих его протонов и нейтронов:

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n$$

Существует, как говорят дефект масс: разность масс

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$$

Положительна. В частности, для гелия масса ядра на 0,75% меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Соответственно для одного моля гелия:

$$\Delta M = 0,03 \text{ г.}$$

Уменьшение массы при образовании ядра из нуклонов означает, что при этом уменьшается энергия той системы нуклонов на величину энергии связи $E_{\text{св}}$:

$$E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) \cdot c^2$$

Но куда при этом деваются энергия связи $E_{\text{св}}$ 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 массой.

$$\Delta M = E_{\text{св}} / c^2$$

О том, как велика энергия связи, можно судить по такому примеру:--образование 4г гелия сопровождается выделением такой же энергии, что и сгорание 1,5—2 вагонов каменного угля. Важную информацию о свойствах ядер содержит зависимость удельной энергии связи от массового числа A .

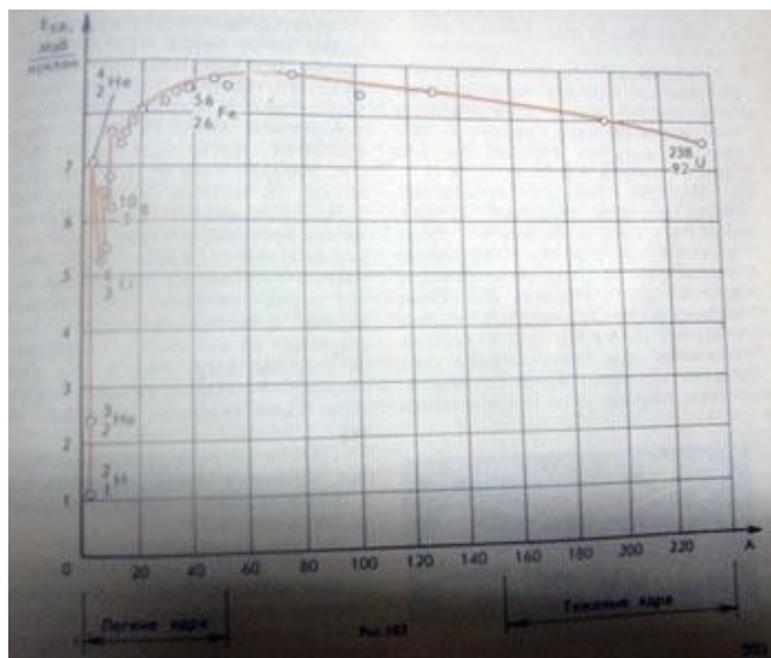


Рис.

Удельной энергией связи называют энергию связи, приходящуюся на один нуклон ядра. Ее определяют экспериментально.

Из графика хорошо видно, что, не считая самых легких ядер, удельная энергия связи примерно постоянна и равна 8 МэВ/нуклон. Отметим, что энергия связи электрона с ядром в атоме водорода, равная энергии ионизации, почти в миллион раз меньше этой величины.

Кривая на графике имеет слабо выраженный максимум.

Максимальную удельную энергию связи (8,6 МэВ/нуклон) имеют элементы с массовыми числами от 50 до 60, т.е. железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет растущей с увеличением Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

Ядерные реакции

Атомные ядра при взаимодействиях испытывают превращения. Эти превращения сопровождаются уменьшением или увеличением кинетической энергии участвующих в превращениях частиц.

Ядерными реакциями называют изменения атомных ядер при взаимодействии их с элементарными частицами или друг с другом.

Ядерные реакции происходят, когда частицы вплотную приближаются к ядру и попадают в сферу действия ядерных сил. Одноименно заряженные частицы отталкиваются друг от друга. Поэтому сближение положительно заряженных частиц с ядрами (или ядер друг с другом) возможно, если этим частицам (или ядрам) сообщена большая кинетическая энергия. Эта энергия сообщается протонам, ядрам дейтерия—дейтронам, α —частицам и другим более тяжелым ядрам с помощью ускорителей элементарных частиц и ионов.

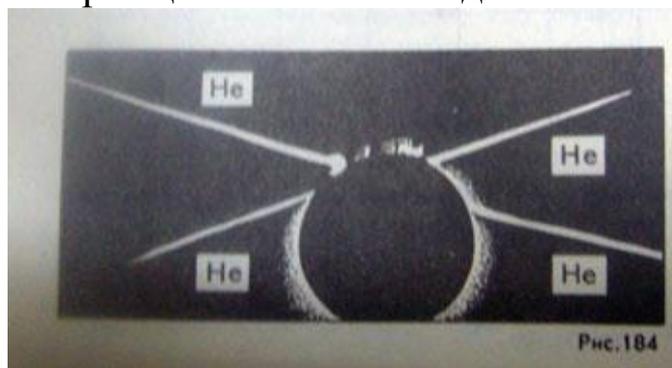
Для осуществления ядерных реакций такой метод гораздо эффективнее, чем использование ядер гелия, испускаемых радиоактивными элементами.

Во-первых, с помощью ускорителей частицам может быть сообщена энергия порядка 10^n МэВ, т.е. гораздо больше той, которую имеют α —частицы (максимально 9 МэВ).

Во-вторых, можно использовать протоны, которые в процессе радиоактивного распада не появляются (это целесообразно потому, что заряд протонов вдвое меньше заряда α —частиц, и поэтому действующая на них сила отталкивания со стороны ядер тоже в два раза меньше).

В-третьих, можно ускорить ядра более тяжелые, чем ядра гелия.

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 году. Удалось расщепить литий на две α —частицы:



Как видно из рисунка треков в камере Вильсона, ядра гелия разлетаются в разные стороны вдоль одной прямой в соответствии с требованиями закона сохранения импульса (импульс протона много меньше импульса возникающих α —частиц).

Энергетический выход ядерных реакций.

В описанной выше ядерной реакции кинетическая энергия двух образующихся ядер гелия оказалась больше кинетической энергии вступавшего в реакцию протона на 7,3 МэВ. Превращение ядер сопровождается изменением их внутренней энергии (энергия связи). В рассмотренной реакции удельная энергия связи в ядрах гелия больше удельной энергии связи в ядре лития. Поэтому часть внутренней энергии ядра лития превращается в кинетическую энергию разлетающихся α -частиц.

Изменение энергии связи ядер означает, что суммарная энергия покоя участвующих в реакциях частиц и ядер не остаётся неизменной. Ведь энергия покоя ядра $M_0 \cdot c^2$ согласно формуле () непосредственно выражается через энергию связи. В соответствии с законом сохранения энергии изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.

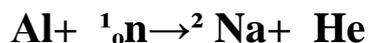
Энергетическим выходом ядерной реакции называется разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции.

Если кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о выделении энергии. В противном случае реакция идёт с поглощением энергии. Именно такого рода реакция происходит при бомбардировке азота α -частицами. Часть кинетической энергии (примерно $1,2 \cdot 10^7$ эВ) переходит в процессе этой реакции во внутреннюю энергию вновь образовавшегося ядра. Выделяющаяся при ядерных реакциях энергия может быть огромной. Но использовать её путём осуществления столкновений ускоренных частиц или ядер с неподвижными ядрами мишени практически нельзя. Ведь большая часть ускоренных частиц пролетает мимо ядер мишени, не вызывая реакции.

Ядерные реакции на нейтронах.

Открытие нейтрона стало поворотным пунктом в исследовании ядерных реакций. Так как нейтроны лишены заряда, то они

беспрепятственно проникают в атомные ядра и вызывают их изменения. Например, наблюдается следующая реакция:



Великий итальянский физик Энрико Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми, но и медленными нейтронами. Причём эти медленные нейтроны оказываются в большинстве случаев даже гораздо более эффективными, чем быстрые. Поэтому быстрые нейтроны целесообразно предварительно замедлять. Замедление нейтронов до тепловых скоростей происходит в обыкновенной воде. Этот эффект объясняется тем, что в воде содержится большое число ядер водорода—протонов, масса которых почти равна массе нейтронов. При столкновениях же шаров одинаковой массы происходит наиболее интенсивная передача кинетической энергии. При центральном соударении нейтрона с покоящимся протоном он целиком передаёт протону свою кинетическую энергию. Реакции, в которые вступают атомные ядра, очень разнообразны. Нейтроны не отталкиваются ядрами и поэтому особенно эффективно вызывают превращения ядер.

Деление ядер урана.

Делиться на части могут только ядра некоторых тяжёлых элементов. При делении ядер испускаются два—три нейтрона и γ —лучи. Одновременно выделяется большая энергия.

Деление ядер урана было открыто в 1938 году немецкими учёными О. Ганном и Ф. Штрассманом. Они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы средней части периодической системы: барий, криптон и др. Однако правильное истолкование этого факта, именно как деления ядер урана, захватившего нейтрон, было дано в начале 1939 года английским физиком О. Фришем совместно с австрийским физиком Л. Мейтнер.

Деление ядра возможно благодаря тому, что масса покоя тяжёлого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении. Из-за этого происходит выделение энергии,

эквивалентной уменьшению массы покоя, сопровождающему деление. Но полная масса сохраняется, так как масса движущихся с большой скоростью осколков превышает их массу покоя. Возможность деления тяжёлых ядер можно также объяснить с помощью графика зависимости удельной энергии связи от массового числа A .

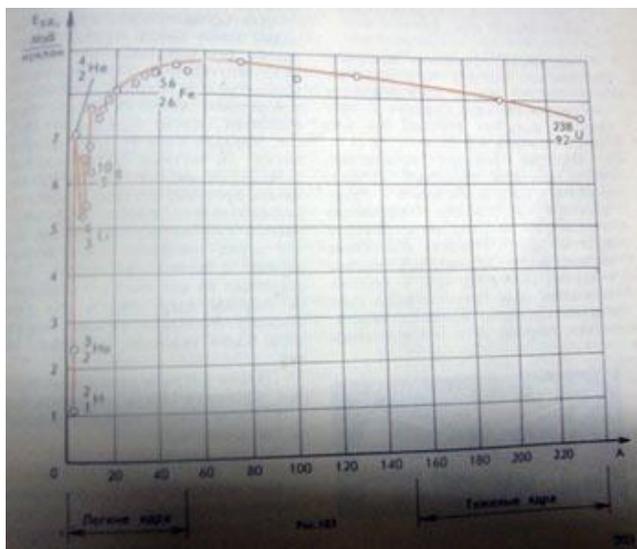


Рис.

Удельная энергия связи ядер атомов, занимающих в периодической системе последние места ($A=200$), примерно на 1 МэВ меньше удельной энергии связи в ядрах элементов, находящихся в середине периодической системы ($A=100$). Поэтому процесс деления тяжёлых ядер на ядра элементов средней части периодической системы является «энергетически выгодным». Система после деления переходит в состояние с минимальной внутренней энергией. Так как чем больше энергия связи ядра, тем большая энергия должна выделяться при образовании ядра и, следовательно, тем меньше внутренняя энергия образовавшейся вновь системы. При делении ядра энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличивается на 1 МэВ и общая выделяющаяся энергия должна быть огромной—порядка 200 МэВ. Ни при какой другой ядерной реакции (не связанной с делением) столь больших энергий не выделяется.

Непосредственные измерения энергии, выделяющейся при делении ядра урана U , подтвердили приведённые соображения и дали величину $=200\text{МэВ}$. Причём большая часть этой энергии (168 МэВ) приходится на кинетическую энергию осколков. На рисунке мы видим треки осколков делящегося урана в камере Вильсона.

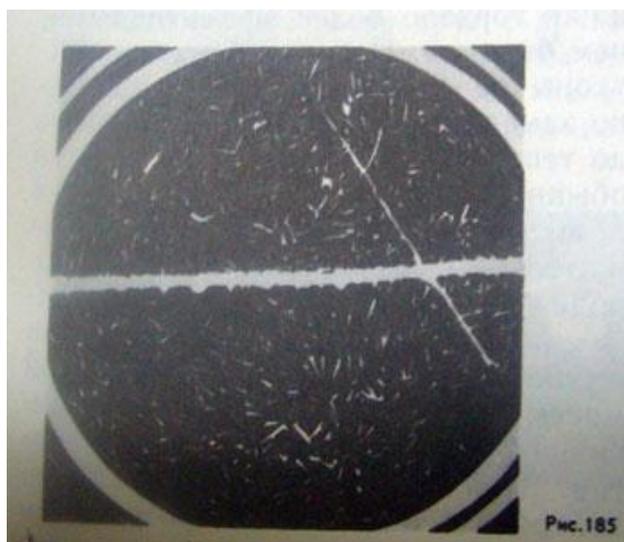


Рис.

Выделяющаяся при делении ядра энергия имеет электростатическое, а не ядерное происхождение. Большая кинетическая энергия, которую имеют осколки, возникает вследствие их кулоновского отталкивания.

Механизм деления ядер.

Процесс деления атомного ядра можно объяснить на основе капельной модели ядра. Согласно этой модели сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 186, 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 ещё большие ядерные силы притяжения. Эти силы удерживают ядро от распада.

Ядро урана—235 имеет форму шара. Поглотив лишний нейтрон, ядро возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму (рис. 186, б). Ядро растягивается до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не начинают преобладать над силами притяжения, действующими в перешейке (рис. 186, в)

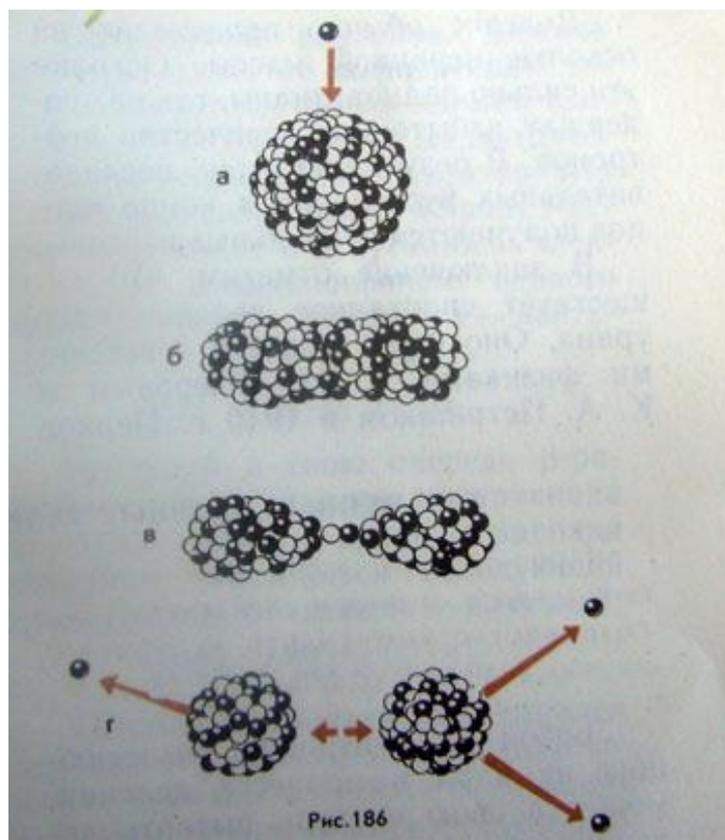


Рис. 186

После этого ядро разрывается на две части (рис 186, 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-трёх 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 допускается для ядер атомов, находящихся в середине таблицы Менделеева. В результате несколько нейтронов освобождается в процессе деления. Их энергия имеет различные значения—от нескольких миллионов электронвольт до совсем малых, близких к нулю.

Деление обычно происходит на осколки неравной массы. Осколки эти сильно радиоактивны, так как содержат избыточное количество нейтронов. В результате серии последовательных β —распадов в конце концов получаются стабильные изотопы.

Существует спонтанное деление ядер урана. Оно было открыто советскими физиками Г.Н.Флёрвым и К.А.Петржаком в 1940 году. Период полураспада для спонтанного деления равен 10 лет. Это в два миллиона раз больше полураспада при α —распаде урана.

Таким образом, деление атомных ядер тяжёлых элементов возможно потому, что удельная энергия связи ядер меньше удельной энергии связи ядер элементов середины периодической системы Менделеева.

Иркутский сельскохозяйственный колледж АТ и АПС

Цикловая комиссия общеобразовательных дисциплин

Курс лекций

по дисциплине **"Физика"**

Специальность: 190631

Составил преподаватель: Набока В. М.

Рассмотрено и одобрено
на заседании ЦК
общеобразовательных дисциплин
От "___" _____ 2015__ г. протокол №__

Квалификационные требования:

В результате освоения дисциплины обучающийся должен уметь:

- управлять своей познавательной деятельностью;
- проводить наблюдения;
- использовать и применять различные виды познавательной деятельности для изучения различных сторон окружающей действительности;
- использовать различные источники для получения физической информации;
- давать определения изученным понятиям;
- называть основные положения изученных теорий и гипотез;
- описывать демонстрационные и самостоятельно проведенные эксперименты;
- делать выводы и умозаключения из наблюдений, изученных физических закономерностей;
- применять приобретенные знания по физике для решения практических задач, встречающихся в повседневной жизни, для безопасного использования бытовых технических устройств, рационального природопользования и охраны окружающей среды.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать:

- роль физики в современном мире;
- фундаментальные физические законы и принципы, лежащие в основе современной физической картины мира;
- основные физические процессы и явления;
- важные открытия в области физики, оказавших определяющее влияние на развитие техники и технологии;
- методы научного познания природы;
- как оказать первую помощь при травмах полученных от бытовых технических устройств.