

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ГОРЛОВСКИЙ АВТОТРАНСПОРТНЫЙ ТЕХНИКУМ»  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
ОДП.02 ФИЗИКА

специальности: 23.02.01 «Организация перевозок и управление на транспорте (автомобильном)» 23.02.03 «Техническое обслуживание и ремонт автомобильного транспорта», 23.02.05 «Эксплуатация транспортного электрооборудования и автоматики (на автомобильном транспорте)»

Рассмотрено и утверждено  
на заседании цикловой комиссии  
«Физико-математические,  
общетехнические дисциплины и  
компьютерная техника»  
Протокол №1 от «29» августа 2019 года  
Председатель цикловой комиссии  
\_\_\_\_\_ Е.А. Брагина

Разработала преподаватель  
ГПОУ «ГАТТ» ГОУВПО «ДонНТУ»  
И.С. Баркова

г. Горловка  
2019 г.

## Тема 1. Физика и методы научного познания

### Лекция №1

#### План

1. Зарождение и развитие физики как науки.
2. Методы научного познания.
3. Физические величины и их измерение.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Укажите основные этапы в развитии физики.
2. Приведите примеры использования знаний по физике в создании предметов быта.
3. Назовите имена известных вам ученых-физиков. В какой области физики они работали? Для создания каких технических устройств были использованы их открытия?
4. Назовите основные методы физических исследований. Приведите примеры.
5. Приведите примеры физических моделей. Почему физическая модель – это идеализированный объект?
6. Дайте определение физической величины. Как вы его понимаете?
7. Что значит измерить физическую величину?
8. Назовите основные единицы СИ.
9. Какие виды измерений вы знаете?

## Зарождение и развитие физики как науки.

Физика – одна из древнейших естественных наук. Еще издавна человек наблюдал за окружающим миром и пытался понять природные явления. Солнце давало тепло, дожди поливали землю, землетрясения и ураганы приносили бесчисленные беды. Не зная причин всех этих явлений, человек все приписывал сверхъестественным силам. Но потихоньку люди начали понимать истинные причины природных явлений и приводить их в определенную систему. Первыми попытались объяснить различные физические явления ученые Греции. В произведениях философа Аристотеля (IV в. до н.э.) и появилось слово «физика». В переводе с греческого слово «фюзис» означает природа.

Первоначально слова «физика» и «философия» были словами синонимами, так как в основе обеих дисциплин лежало стремление объяснить законы функционирования Вселенной. Однако в результате научной революции XVI века физика развилась в самостоятельную научную отрасль.

В русский язык это слово ввел в XVIII в. М.В. Ломоносов. С этого времени в России начали серьезно заниматься физикой. Она служит фундаментом естественных и технических наук. На основе достижений физической науки на протяжении истории человечества базируется развитие техники, мореплавания, воздухоплавания, автомобилестроения, изучение Вселенной, радио и телевидения, машиностроения, энергоснабжения, компьютеризация и т.д. Поиски ученых, так же как и изучение физики, – это большой напряженный труд. Десять лет напряженного труда понадобилось ученому Фарадею, чтобы получить электрический ток с помощью магнита, тысячи опытов были проведены Лодыгиным и Эдисоном, пока им не удалось сделать электрическую лампочку, пригодную для освещения.

Наибольшее влияние на установление физических понятий и закономерностей осуществили мыслители Древней Греции: Аристотель, Архимед, Демокрит, Левкипп, Пифагор, Птолемей, Эвклид. Они заложили элементы научных представлений о физических свойствах окружающего мира.

Аристотель (384-322 гг. до н.э.) вошел в историю науки как ученый, который обобщил и систематизировал знания в области общественных и естественных наук своего времени. Аристотель первым сформулировал понятие состояния тела в механике, которое, по его мнению, определяется положением тела в пространстве (координатами тела), вывел правила сложения параллельных и перпендикулярных друг к другу перемещений, а

также правило равновесия рычага. Аристотелю также принадлежит научная картина распространения звука в воздухе, которое он объяснял чередованием областей сжатия и разрежения воздуха. Это представление о звуковых волнах сохранилось и в современной физике.

Демокриту и Левкиппу (V в. до н.э.) принадлежит очень важная идея об атомном строении материи. Кстати, экспериментально эта идея была подтверждена только в начале XX в.

Эвклид (III в. до н.э.) заложил основы геометрической оптики, сформулировал закон прямолинейного распространения света и закон отражения света (угол отражения равен углу падения).

Огромный вклад в развитие физики сделал Архимед (287-212 гг. до н.э.) – выдающийся физик, механик, математик, инженер. В частности, он ввел понятие центра тяжести, построил теорию равновесия рычага, дал определение момента сил, экспериментально определил законы плавания тел.

Выдающимся физиком XVII в. бесспорно, является Галилео Галилей. Его справедливо считают основателем экспериментальной физики.

Еще один качественно новый этап в физике связан с именем Исаака Ньютона. В своей книге «Математические начала натуральной философии» Ньютон сформулировал основные законы механики, которые определили развитие физики на 300 лет вперед.

В создание современной науки об электрических и магнитных явлениях существенный вклад внесли французские физики Шарль Кулон (1736-1806) и Андре Мари Ампер (1775-1836), датский физик Ханс Эрстед (1777-1851), британские физики Майкл Фарадей (1791-1867) и Джеймс Максвелл (1831-1879).

С XVIII в. бурно развивалась отрасль физики, связанная с использованием тепловых двигателей. На ее развитие повлияли два события. Первое – изобретение английским инженером Джеймсом Уаттом (1736-1819) тепловой машины. В 1785 одна из таких машин была установлена на пивоваренном заводе в Лондоне и выполняла работу 24 лошадей. Второе событие – выход работы французского инженера и физика Сади Карно (1796-1832) «Рассуждение о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Ученый проанализировал имеющиеся на то время паровые машины и вывел условие, при которых КПД машин достигает максимального значения (тогда их КПД не превышал 2%, сейчас может составлять 60% в парогазовых устройствах).

XX в. стал временем триумфального проникновения электромагнетизма в инженерную практику и в конечном итоге – в жизнь



общества. Электродвигатели, лампы, телевидение, компьютеры, средства связи и многое другое вошли в повседневную жизнь людей.

Приведем несколько примеров. В 1889 русский физик и электротехник Александр Степанович Попов (1859-1905) высказал мнение о том, что электромагнитные волны могут быть использованы для передачи информации, а уже 7 мая 1895 ученый продемонстрировал работу созданного им радиоприемника (ныне 7 мая отмечают как день радио). Независимо от А.С. Попова над вопросами использования электромагнитных волн для беспроводной электросвязи работал итальянский радиотехник и предприниматель Гульельмо Маркони (1874-1937). Деятельность Маркони сыграла важную роль в развитии радиотехники и распространении радио как средства связи.

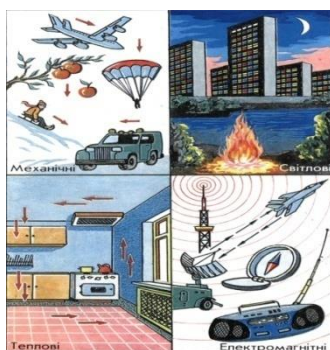
В настоящее время электромагнитные волны – основные носители информации. Именно с их помощью осуществляются радио и телепередачи, на их основе работают мобильная связь и Интернет.

Изучение электрических свойств *p-n*-перехода – места контакта двух полупроводников *p*- и *n*-типа – привело к созданию в 1947 транзисторов. И буквально через несколько лет транзисторы стали основными элементами всех радиоприборов. Сейчас они – основа интегральных схем.

В 50-х гг. XX в. было открыто лазерное излучение активными средами, а сегодня трудно назвать такую отрасль техники, медицины, где не применяются лазеры. Еще одно значительное событие, которое повлияло на развитие физики XX и XXI вв. – это открытие в 1896 г. явления радиоактивности. В 1938 г. было открыто деление ядер урана с выделением энергии, а уже в 1942 г. запущен в эксплуатацию первый ядерный реактор, в котором было реализовано цепную ядерную реакцию.

### Методы научного познания

Нас окружает большое разнообразие предметов (стол, стул, ручка, автомобиль, Луна, Солнце и т.д.). Все эти предметы в физике называются **физическими телами**. Со всеми физическими телами происходят изменения.



Например, автомобиль перемещается, вода испаряется или замерзает. Все такие изменения называют физическими явлениями. Дождь, ветер, смена времени суток, смена времени года – все это также примеры физических явлений. В физике изучаются механические, звуковые, тепловые, электромагнитные и световые явления.

**Физическое исследование** – это целенаправленное изучение того или иного явления средствами физики. Первый этап физического исследования – наблюдение.

**Наблюдение** – это восприятие природы с целью получения первичных данных для последующего анализа. Например, наблюдают такие явления природы, как радуга, молния, солнечное затмение и т.д. Однако наблюдения не всегда могут удовлетворить ученых: часто они бывают кратковременными (молния), их не всегда и не везде можно наблюдать (полярное сияние, затмение). Поэтому для изучения многих явлений в физике проводят специальные исследования, проводят экспериментальные исследования. Поэтому физика – это наука экспериментальная. Далеко не всегда наблюдения ведут к правильному выводу. Так, наблюдая падение различных тел, Аристотель решил, что чем тело тяжелее, тем быстрее оно падает. Этот вывод оказался ложным, но только через тысячи лет благодаря тщательно подготовленным экспериментам Галилео Галилей смог его опровергнуть.

**Эксперимент** – это исследование физического явления в условиях, находящихся под контролем ученого, с целью более глубокого изучения этого явления.

В своей основе физика является экспериментальной наукой: ее законы базируются на фактах, установленных опытным путем. Однако одних экспериментальных методов физических исследований недостаточно, чтобы получить полное представление об изучаемых физикой явлениях.

Современная физика широко использует теоретические методы физических исследований, которые предусматривают анализ данных, полученных в результате экспериментов, формулировку законов природы, объяснение конкретных явлений на основе этих законов, а главное – предсказание и теоретическое обоснование (с широким использованием математических методов) новых явлений. К числу этих методов относятся:

- анализ – процесс мысленного или реального расчленения предмета, явления на части (признаки, свойства, отношения);
- синтез – соединение выделенных в ходе анализа сторон предмета в единое целое;
- классификация – объединение различных объектов в группы на основе общих признаков;

- абстрагирование – отвлечение в процессе познания от некоторых свойств объекта с целью углубленного исследования одной определенной его стороны (результат абстрагирования – абстрактные понятия);
- формализация – отображение знания в знаковом, символическом виде (в математических и физических формулах, химических символах и т.д.);
- аналогия – умозаключение о сходстве объектов в определенном отношении на основе их сходства в ряде других отношений;
- моделирование – создание и изучение заместителя (модели) объекта (например, компьютерное моделирование);
- идеализация – создание понятий для объектов, не существующих в действительности, но имеющих прообраз в ней (геометрическая точка, шар, идеальный газ);
- дедукция – движение от общего к частному;
- индукция – движение от частного (фактов) к общему утверждению.

Теоретические исследования проводятся не с конкретным физическим телом, а с его идеализированным аналогом – физической моделью, которая должна учитывать небольшое количество основных свойств исследуемого тела. Например, в ходе изучения некоторых видов механического движения используют модель физического тела – материальную точку. Эта модель применяется, если размеры тела не являются существенными для теоретического описания его движения, то есть в модели «материальная точка» учитывают только массу тела, а форму тела и его размеры в расчет не берут. Изучая электростатику, вы ознакомились с еще одной физической моделью – ядерной моделью атома, а изучая ядерную физику – с капельной моделью ядра атома.

### Физические величины и их измерение

Физический эксперимент почти всегда связан с измерениями, от качества которых и зависит его успех.

Физические тела и явления отличаются друг от друга различными свойствами. Например, окружающие нас предметы различаются по форме, размеру, свойствам. Но, чтобы изучать физические тела и явления, простого описания их свойств недостаточно. Поэтому физика, изучая различные свойства тел и явлений, пытается характеризовать их с количественной стороны.

Численную характеристику физического тела или явления называют **физической величиной**. Длина, площадь, объем, время, сила, скорость – примеры различных физических величин. Основными величинами Международной системы величин являются длина, масса, время,

электрический ток, термодинамическая температура, количество вещества и сила света.

Физическую величину можно измерить. Каждая физическая величина имеет свою единицу измерения. Например, единица измерения длины – метр. Совокупность единиц физических величин называют **системой единиц**. В наше время используется международная система единиц, сокращенно СИ (система интернациональная).

СИ определяет семь основных единиц физических величин и производные единицы (сокращенно – единицы СИ или единицы), а также набор приставок. СИ также устанавливает стандартные сокращенные обозначения единиц и правила записи производных единиц.

Единицы измерения для основных величин – основные единицы СИ – метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела, соответственно.

Остальные единицы СИ являются производными и образуются из основных с помощью уравнений, связывающих друг с другом физические величины Международной системы величин.

Наименования и обозначения основных единиц, так же как и всех других единиц СИ, пишутся маленькими буквами (например, метр и его обозначение м). У этого правила есть исключение: обозначения единиц, названных фамилиями учёных, пишутся с заглавной буквы (например, *ампер* обозначается символом А).

Для того, чтобы измерить физическую величину, необходимо уметь пользоваться измерительными приборами.

Для измерения физической величины необходим эталон, стандарт, т.е. некоторое средство измерения, позволяющее хранить единицу, передавать и повторять ее размер. Эталоны, такие, например, как эталоны метра, килограмма и многих других величин, хранятся в Палате (Международном бюро) мер и весов в г. Севре (Франция).



Измерение может быть **прямым**, когда величину измеряют непосредственно с помощью прибора. Например, длину карандаша можно измерить с помощью линейки. Но иногда непосредственно физическую величину измерить нельзя. В этих случаях ее рассчитывают по известным соотношениям через другие величины, измеренные непосредственно. Такие

измерения называют **косвенными**. Например, косвенным способом измеряют ускорение бегунов на стартовом участке или объем тела.

Найди лишнее:

Километр	Секундомер	Миллиграм	Литр
Линейка	Динамометр	Верста	Кубический сантиметр
Сантиметр	Километр	Сажень	Рулетка
Метр	Мензурка	Фут	Кубический метр

Все то, что существует вокруг нас, называется **материей**. Материя существует в двух формах: в форме вещества и форме поля.

**Вещество** – вид материи, состоящей из элементарных частиц, атомов, молекул.

**Поле** – форма материи, благодаря которой происходит взаимодействие между частями вещества.

Физика – наука о природе, о различных формах материи, ее движении и превращении.

## Тема 2. Механика

### Лекция №2

#### Механическое движение и его характеристики.

##### План

1. Механическое движение и его виды. Система отсчета.
2. Траектория. Путь. Перемещение.

##### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

##### Вопросы для самоконтроля:

1. Дайте определение механического движения.
2. В чем заключается основная задача механики?
3. Что изучает кинематика?
4. Что такое тело отсчета?
5. Что называют системой отсчета?
6. Какими способами можно задать положение точки?
7. Как задают положение точки в пространстве с помощью координат?
8. Что называется радиус-вектором?
9. Что такое траектория движения?
10. Какие бывают механические движения по форме траектории?
11. Зависит ли траектория движения тела от системы отсчета?
12. В каких случаях применяют понятие материальной точки?
13. Что такое путь? В каких единицах его измеряют?
14. Дайте определение перемещения.
15. Когда модуль перемещения равен пройденному пути?

## Механическое движение и его виды. Система отсчета.

В настоящее время физика – это развитая система знаний о наиболее простых и фундаментальных явлениях материального мира. Прежде всего, эта система знаний представлена физическими теориями. Их много, но наиболее общих и принципиальных четыре: механика, молекулярная физика, электродинамика, квантовая физика.

Классическая механика состоит из трех частей: кинематики, динамики и статики. Для чего вообще нужно изучать механику? Знание механики в первую очередь необходимо для познания окружающего нас мира, потому что любое явление связано с движением.

Для понимания принципов устройства и работы многих технических объектов (то ли пылесос, автомобиль или космический корабль и т.д.), для их создания и эффективного использования необходимо знать механику. Основные понятия механики используются и в электро- и радиотехнике, автомобилестроении и т.д. Поэтому без преувеличения можно сказать, что механика – фундамент физики. Ее знание необходимо человеку любой профессии. Механика изучает самый вид движения: механическое движение.

**Механическое движение** – это изменение положения тела в пространстве с течением времени относительно других тел или в отношении одного тела, которое называют телом отсчета.

Основная задача механики – определение положения тела в любой момент времени по начальным условиям.

**Кинематика** – это раздел механики, в котором изучается движение тела без выяснения причин этого движения. Главная задача – описать это движение.

**Закон относительности движения.** Характер движения тела зависит от того, относительно каких тел мы рассматриваем данное движение.

Тело, движущееся, со временем меняет свое положение относительно других тел. Тело, относительно которого изучается движение тела, называют **телом отсчета**. Для того, чтобы описать движение, необходимо знать, как меняется со временем положение этого тела относительно выбранного тела отсчета. Для этого необходима система координат и часы. Начало координат совмещают с телом отсчета. Систему координат и часы, связанные с телом отсчета, называют **системой отсчета**.

### Способы описания движения

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



**Координатный способ.** Будем задавать положение точки с помощью координат (рис. 1.).

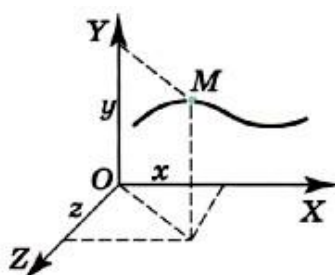


Рисунок 1. Координатный способ

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.

Математически это принято записывать в виде:

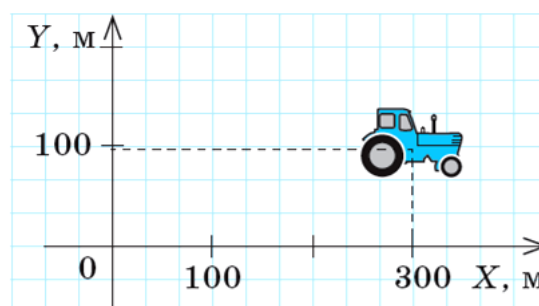
$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ z = z(t). \end{cases}$$

Эти уравнения называют кинематическими уравнениями движения точки, записанными в координатной форме.

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

Основной задачей кинематики является определение уравнения движения тел.

Количество выбираемых для описания движения координат зависит от условий задачи. Если движение точки происходит вдоль прямой, то достаточно одной координаты и, следовательно, одного уравнения, например,  $x(t)$ . Если движение происходит на плоскости, то его можно описать двумя уравнениями –  $x(t)$  и  $y(t)$ . Три уравнения  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$ ,  $z = z(t)$  описывают движение точки в пространстве.





Сколько координат необходимо для описания движения: машины по прямой дороге; бильярдного шара по столу; мухи по комнате?

**Векторный способ.** Положение точки можно задать, и с помощью радиус-вектора.

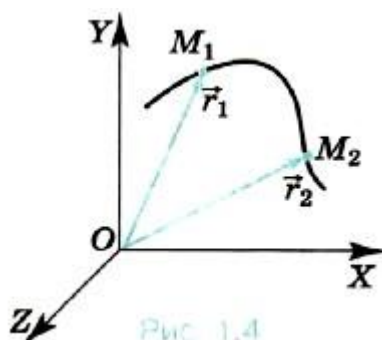


Рисунок 2. Векторный способ

**Радиус-вектор** – это направленный отрезок, проведённый из начала координат в данную точку.

При движении материальной точки радиус-вектор, определяющий её положение, с течением времени изменяется (поворачивается и меняет длину; рис. 2.), т. е. является функцией времени:  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ . Формула есть **уравнение движения** точки, записанное в векторной форме. Если оно известно, то мы можем для любого момента времени рассчитать радиус-вектор точки, а значит, определить её положение.

На рисунке 2 радиус-вектор  $\vec{r}_1$  определяет положение точки в момент времени  $t_1$ , а радиус-вектор  $\vec{r}_2$  – в момент времени  $t_2$ .

Таким образом, задание трёх скалярных уравнений равносильно заданию одного векторного уравнения.

Даже самый простой движение тела оказывается сложным для изучения. В самом деле, взгляните на клубящиеся облака, колышущиеся листья на ветке дерева. Представьте себе, какое сложное движение совершают поршни автомобиля, мчащегося по шоссе. Как же приступить к описанию движения? Самое простое (а в физике всегда идут от простого к сложному) – это научиться описывать движение точки. Под точкой можно понимать, например, маленькую отметку, нанесённую на движущийся предмет – футбольный мяч, колесо трактора и т.д. Если мы будем знать, как происходит движение каждой такой точки (каждого очень маленького участка) тела, то мы будем знать, как движется всё тело.

Однако когда вы говорите, что пробежали на лыжах 10 км, то никто не станет уточнять, какая именно часть вашего тела преодолела расстояние в

10 км, хотя вы отнюдь не точка. В данном случае это не имеет сколько-нибудь существенного значения.

Для того, чтобы упростить исследования движения, вводят ряд упрощений. Введём понятие материальной точки – первой физической модели реальных тел. Материальная точка – это абстрактное понятие, введение которого упрощает изучение многих физических явлений.

**Материальной точкой** называют тело, размерами и формой которого можно пренебречь в данных условиях.

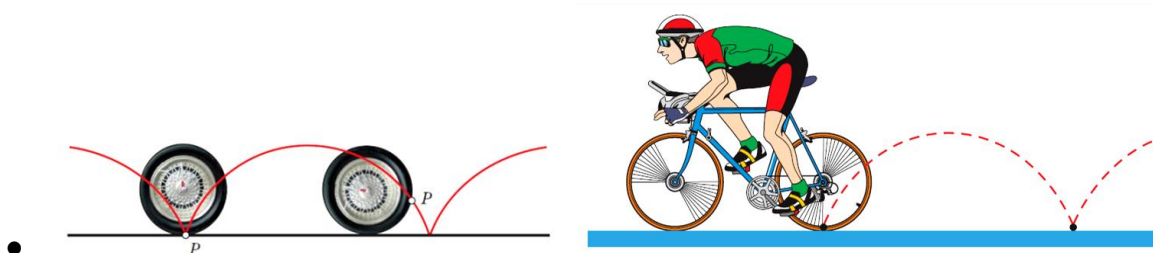
- Можно принять Землю за материальную точку при расчете:
  - расстояния от Земли до Солнца;
  - длины экватору.
- Можно считать поезд материальной точкой при расчете:
  - расстояния, которое он проходит по мосту длиной 50 м;
  - расстояния от станции отбытия до станции прибытия.
- Можно считать спортсмена, делающего сальто в воздухе, материальной точкой?
- Марс относительно Земли; или марсоход на Марсе.

Тело может двигаться так, что прямая, соединяющая любые его две точки, при перемещении в пространстве остается параллельной самой себе. Такое движение твердого тела называют **поступательным**.



Движение тела, при котором все точки тела описывают окружности, центры которых находятся на неподвижной прямой, называется осью вращения, называют **вращательным**.

Движение тела, при котором ось вращения, вокруг которой движутся по кругам все точки тела, сама движется поступательно (например, колесо движется по дороге), называют **поступательно-вращательным**.



## Траектория. Путь. Перемещение.

Тело, двигаясь в пространстве, непрерывно переходит от одной точки пространства в другую, описывая при этом в пространстве непрерывную линию.

**Траектория** – непрерывная линия, которую описывает тело, движущееся относительно выбранной системы отсчета.

По форме траектории движения классифицируют на прямолинейные и криволинейные.



Прямолинейное движение – это движение, траектория которого в выбранной системе отсчета является прямой линией.

Криволинейное – это движение, траектория которого в выбранной системе отсчета является некоторой кривой линией.

По траектории движения можно определить расстояние, которое пройдено телом.

Расстояние, пройденное телом вдоль траектории называют **путем**. Обозначается  $S$ . Единица пути в СИ – метр (м).

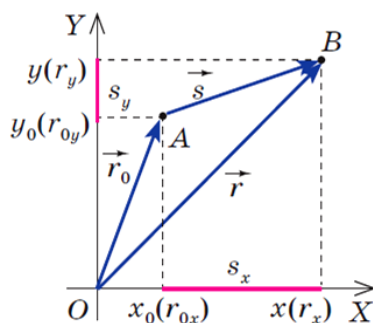
Направленный отрезок, соединяющий начальное и конечное положение тела, называют **перемещением**. Обозначают  $\Delta\vec{r}$ .

Как и любой вектор, перемещение считается заданным, если известны направление и модуль перемещения. Единица модуля перемещения в СИ – метр (м).

Путь – величина скалярная, а перемещение – векторная.

- Путь или перемещение мы платим при переезде в такси?
- Полете в самолете?
- Футболист пробегает за матч около 10 км. Что означает это число – путь или модуль перемещения? Каким может оказаться минимальный модуль перемещения футболиста за матч?

Зная, что проекции вектора перемещения равны изменениям координат, имеем:  $x = x_0 + \Delta x$ ;  $y = y_0 + \Delta y$ .



## Лекция №3

### Равномерное прямолинейное движение.

План.

1. Равномерное прямолинейное движение.
2. Неравномерное движение. Средняя и мгновенная скорости.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какое движение называют равномерным прямолинейным?
2. Дайте характеристику скорости равномерного прямолинейного движения.
3. Что представляет собой график зависимости  $v(t)$  в случае равномерного прямолинейного движения?
4. Как вычислить перемещения тела, если известны скорость и время движения тела?
5. Как записывается в векторной форме уравнение равномерного прямолинейного движения точки?
6. Как записывается в координатной форме уравнение равномерного прямолинейного движения точки, если она движется: по оси  $Ox$ ?
7. Равен ли модуль перемещения длине пути при равномерном движении точки?
8. Можно ли сказать, что тангенс угла наклона прямой  $x(t)$  к оси  $t$  численно равен скорости?
9. Что называется средней скоростью перемещения?
10. Что такое мгновенная скорость?
11. Как направлена мгновенная скорость в данной точке траектории?
12. Точка движется по криволинейной траектории так, что модуль её скорости не изменяется. Означает ли это, что скорость точки постоянна?
13. Что такое средняя путевая скорость?

## Равномерное прямолинейное движение.

Для описания движения нужно знать радиус-вектор точки в любой момент времени. Когда известен радиус-вектор в начальный момент времени  $t_0$ , то есть  $\vec{r}_0$ , и известно перемещение  $\Delta\vec{r}$ , то можно найти радиус-вектор  $\vec{r}$  в любой последующий момент времени:  $\vec{r} = \vec{r}_0 + \Delta\vec{r}$ .

Векторному уравнению для движения точки на плоскости соответствуют два уравнения в координатной форме.

Зная, что проекции вектора перемещения равны изменениям координат, имеем:  $x = x_0 + \Delta x$ ;  $y = y_0 + \Delta y$ .

**Равномерное прямолинейное движение** – это механическое движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

Из определения равномерного прямолинейного движения можно сделать такие выводы. Во-первых, траектория такого движения – прямая линия, поэтому для его описания достаточно воспользоваться одномерной системой координат, например ось  $Ox$ , следует направить вдоль траектории движения тела. При этом вектор перемещения будет направлен или так же, как ось координат, или противоположно ей. Во-вторых, за любые равные промежутки времени тело совершает одинаковые перемещения, поэтому отношение перемещения  $\Delta\vec{r}$  к промежутку времени  $\Delta t$ , в течение которого это перемещение произошло, для этого движения является постоянной величиной. Это отношение называют скоростью равномерного прямолинейного движения тела и обозначают символом  $\vec{v}$ .

**Скорость равномерного прямолинейного движения**  $\vec{v}$  – векторная физическая величина, равная отношению перемещения тела  $\Delta\vec{r}$  ко времени  $\Delta t$ , за которое это перемещение произошло:  $\vec{v} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ .

Из определения следует, что направление вектора скорости совпадает с направлением перемещения тела.

Единица скорости движения в СИ – метр в секунду (м/с). 1 м/с равна скорости такого равномерного прямолинейного движения, в ходе которого тело за 1 с перемещается на расстояние 1 м.

При решении задач векторные физические величины, характеризующие движение тела, как уже отмечалось ранее, записывают в проекциях на соответствующую ось, то есть:  $v_x = \frac{r_x}{t}$ .

В случае равномерного прямолинейного движения график зависимости  $v_x(t)$  представляет собой отрезок прямой, параллельной оси времени. Если тело движется в положительном направлении оси  $Ox$ , то есть

направления вектора скорости  $\vec{v}$  и оси  $Ox$  совпадают, то проекция скорости  $v_x$  движения будет положительной:  $v_x > 0$ . График скорости в этом случае изображается прямой, лежащей выше оси времени  $t$ .

Если же тело движется в отрицательном направлении оси  $Ox$ , то есть направления вектора скорости  $\vec{v}$  и оси  $Ox$  противоположные, то проекция скорости движения  $v_x$  будет отрицательной  $v_x < 0$ . График скорости в этом случае изображается прямой, лежит ниже оси  $t$  (рис. 1).

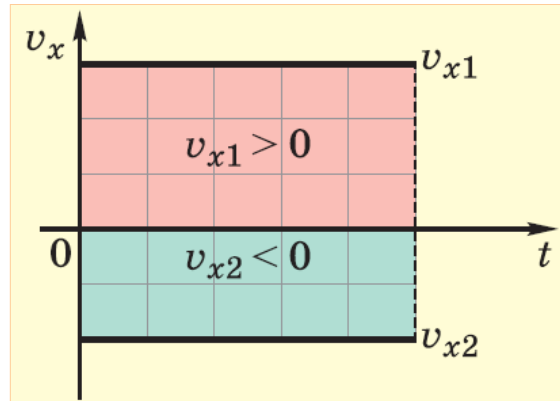


Рисунок 1. График скорости

Перемещение тела в случае равномерного прямолинейного движения можно вычислить по формуле  $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}t$ .

Последнее уравнение и есть уравнение равномерного прямолинейного движения точки, записанное 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.

Запишем уравнение в проекциях на оси декартовой системы координат  $r_x = r_{0x} + v_x t$ . Обсудим, в каком случае при рассмотрении движения точки можно ограничиться одной осью.

Выберем оси координат так, чтобы точка двигалась по какой-либо оси, например по оси  $Ox$ . Тогда векторы  $\vec{r}_0$  и  $\vec{v}$  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 на оси  $Oy$  и  $Oz$  (рис. 2).

Так как проекции радиус-вектора на координатные оси равны координатам его конца, то  $r_x = x$  и  $r_{0x} = x_0$ . Поэтому в проекциях на ось  $Ox$  уравнение  $\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}t$  можно записать в виде:

$$x = x_0 + v_x t$$

Это **уравнение равномерного прямолинейного движения точки**, записанное в координатной форме. Оно позволяет найти координату  $x$  точки

при этом движении в любой момент времени, если известны проекция её скорости на ось  $Ox$  и её начальная координата  $x_0$ .

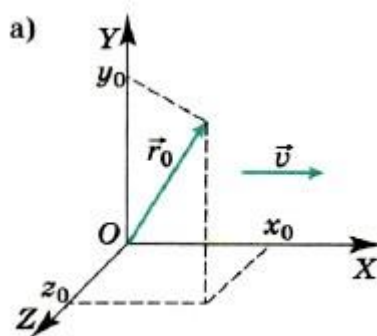


Рисунок 2 . Движение тела вдоль оси  $Ox$

Проекция перемещения тела численно равна площади прямоугольника под графиком зависимости проекции скорости движения от времени (рис. 3). В этом заключается геометрический смысл перемещения.

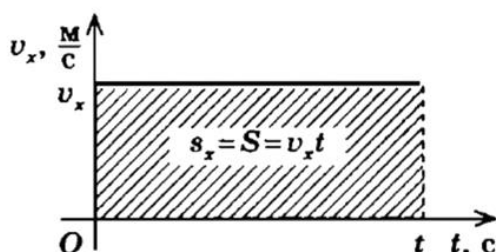


Рисунок 3. График зависимости проекции скорости от времени

На рисунке 4 приведены примеры графиков зависимости координаты от времени для трёх различных случаев равномерного прямолинейного движения. Прямая 1 соответствует случаю  $x_0 = 0, v_{x1} > 0$ ; прямая 2 – случаю  $x_0 < 0, v_{x2} > 0$ , а прямая 3 – случаю  $x_0 > 0, v_{x3} < 0$ . Угол наклона  $\alpha_2$  прямой 2 больше, чем угол наклона  $\alpha_1$  прямой 1. За один и тот же промежуток времени  $t_1$  точка, движущаяся со скоростью  $v_{x2}$ , проходит большее расстояние, чем при движении её со скоростью  $v_{x1}$ . Следовательно, скорость  $v_{x2}$  больше, чем скорость  $v_{x1}$ . Проекция скорости определяет угол наклона прямой к оси  $t$ . Очевидно, проекция скорости  $v_x$  численно равна тангенсу угла  $\alpha$ . В случае 3  $\alpha_3 < 0$ , движение происходит в сторону, противоположную оси  $Ox$ .

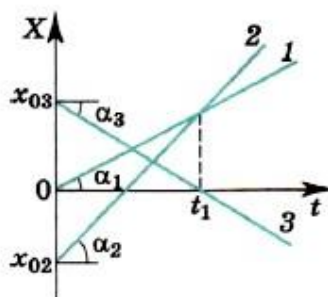
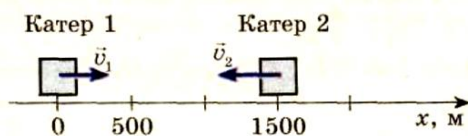


Рисунок 4. Графики зависимости координаты от времени для трёх различных случаев равномерного прямолинейного движения



**Задача.** Два катера, которые расположены на расстоянии 1500 м друг от друга, начали движение навстречу друг другу с постоянными скоростями 25 и 50 м/с. Определите время и место встречи катеров.



Запишем уравнение координаты для равномерного прямолинейного движения:  $x = x_0 + v_x t$ . Воспользовавшись рисунком, конкретизируем это уравнение для каждого катера:

$$x_{01} = 0, v_{1x} = v_1 = 25 \text{ м/с, откуда } x_1 = 25t \text{ (м);}$$

$$x_{02} = 1500 \text{ м, } v_{2x} = -v_2 = -50 \text{ м/с, откуда } x_2 = 1500 - 50t \text{ (м)}$$

На момент встречи координаты катеров будут одинаковыми ( $x_1 = x_2$ ), поэтому имеем уравнение:  $25t = 1500 - 50t$ . Решив его, вычислим время встречи катеров:  $50t + 25t = 1500$ ;  $75t = 1500$ ;  $t = 20$  с.

Вычислим координату катера 1 в момент встречи:  $x_1 = 25t = 25 \cdot 20 = 500$  (м).

Анализ результатов. Поскольку катер 1 движется медленнее катера 2, то в момент встречи положения катера 1 в точке с координатой  $x_1 = 500$  м является реальным.

Ответ: катера встретятся через 20 с в точке, расположенной на расстоянии 500 м от исходного положения катера 1.

### Неравномерное движение. Средняя и мгновенная скорости.

**Неравномерное прямолинейное движение** – это движение со скоростью, которая изменяется по модулю.

Для характеристики неравномерного движения введем понятие средней скорости и мгновенной скорости.

Пусть, например, поезд, двигаясь по прямой, проходит 300 км за 5 ч. Это означает, что в среднем за 1 ч он проходит 60 км. Но ясно, что какую-то часть времени поезд стоял на остановках, ускорял и замедлял свое движение. Все это при определении средней скорости мы не берем во внимание. Мы как бы заменяем настоящее неравномерное движение на данном участке пути равномерным движением с постоянной скоростью, хотя возможно, не было ни одного часа, когда поезд двигался со скоростью 60 км/ч. Следовательно, средняя скорость является характеристикой всего участка пути и не позволяет определять скорости на отдельных его частях.



Скорость, с которой должна равномерно и прямолинейно двигаться точка, чтобы попасть из начального положения в конечное за определённый промежуток времени, называется **средней скоростью** перемещения.

**Средняя скорость перемещения** – это векторная величина, характеризующаяся отношением суммарного перемещения к полному времени, за которое это перемещение было совершено:

$$\vec{v}_{cp_s} = \frac{\Delta\vec{r}}{t} = \frac{\Delta\vec{r}_1 + \Delta\vec{r}_2 + \dots + \Delta\vec{r}_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

На практике чаще используют понятие средней путевой скорости.

**Средняя путевая скорость** – это физическая величина, равная отношению всего пути  $s$  к промежутку времени  $t$ , за который этот путь пройден:

$$v_{cp} = \frac{s}{t}$$

**Мгновенная скорость** – это скорость тела в данный момент времени и в данной точке траектории.

Мгновенная скорость равна отношению очень малого перемещения к промежутку времени, за который это перемещение произошло:

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

Из определения средней векторной скорости следует, что ее направление совпадает с направлением перемещения. Мгновенная скорость направлена по касательной к траектории



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

скорость, равную скорости точек на окружности диска. Вот почему грязь из-под колёс буксующей автомашины летит по касательной к окружности колёс.

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.

**Задача.** Велосипедист ехал из одного города в другой. Половину пути он проехал со скоростью 12 км/ч, а вторую половину шел пешком со скоростью 4 км/ч. Определить среднюю скорость его движения.

## Лекция №4

### Равноускоренное прямолинейное движение.

План.

1. Ускорение.
2. Описание движения с постоянным ускорением.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какое прямолинейное движение называют равноускоренным?
2. Дайте определение ускорения тела. Какова единица ускорения?
3. Какой вид имеет график  $a_x(t)$  зависимости?
4. Назовите уравнение зависимости  $v_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения. Как выглядит график этой зависимости
5. Как движется тело, если направление его ускорения: а) совпадает с направлением скорости движения? б) противоположно направлению скорости движения?
6. С помощью каких формул можно вычислить проекцию перемещения при равноускоренном прямолинейном движении?
7. Что представляет собой график координаты в случае равноускоренного прямолинейного движения? график зависимости перемещения от времени
8. Как решается основная задача механики для равноускоренного прямолинейного движения?

## Ускорение.

**Равнопеременным движением** называют такое движение, скорость которого за любые равные промежутки времени изменяется на равные величины.

Характеристикой равнопеременного движения является **ускорение**.

**Ускорение** – это векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости и равная отношению изменения скорости к промежутку времени, за который это изменение произошло:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Данную формулу можно записать и в проекциях на ось координат Oх:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

Единица измерения ускорения – метр на секунду в квадрате ( $\text{м/с}^2$ ).

$1 \text{ м/с}^2$  – это ускорение такого движения, во время которого тело за 1 с изменяет свою скорость на 1 м/с. Равноускоренное движение может быть собственно ускоренным, когда скорость тела со временем растёт, и замедленным, когда оно уменьшается. Значение ускорения движения определяют, учитывая векторные свойства данной физической величины. Для измерения ускорения используют акселерометры.

Ускорение направлено так, как направлен вектор изменения скорости  $\Delta \vec{v}$  при стремлении промежутка времени  $\Delta t$  к нулю. В отличие от направления скорости, направление вектора ускорения нельзя определить, зная траекторию точки и направление движения точки по траектории. В общем случае ускорение направлено под углом к вектору скорости (рис. 1.). Полное ускорение характеризует изменение скорости и по модулю, и по направлению. Часто полное ускорение  $\vec{a}$  считается равным векторной сумме двух ускорений – касательного ( $\vec{a}_k$ ) и центростремительного ( $\vec{a}_{цс}$ ). Касательное ускорение  $\vec{a}_k$  характеризует изменение скорости по модулю и направлено по касательной к траектории движения. Центростремительное ускорение  $\vec{a}_{цс}$  характеризует изменение скорости по направлению и перпендикулярно касательной, т. е. направлено к центру кривизны траектории в данной точке. В дальнейшем мы рассмотрим два частных случая: точка движется по прямой и скорость изменяется только по модулю; точка движется равномерно по окружности и скорость изменяется только по направлению.

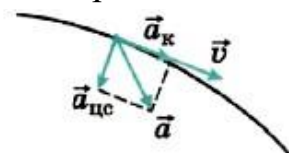


Рисунок 1

## Описание движения с постоянным ускорением.

Равнопеременное движение – это движение с постоянным ускорением:  $\vec{a} = const$ .

В случае, когда  $a_x > 0$  – движение равноускоренное, а когда  $a_x < 0$  – равнозамедленное движение.

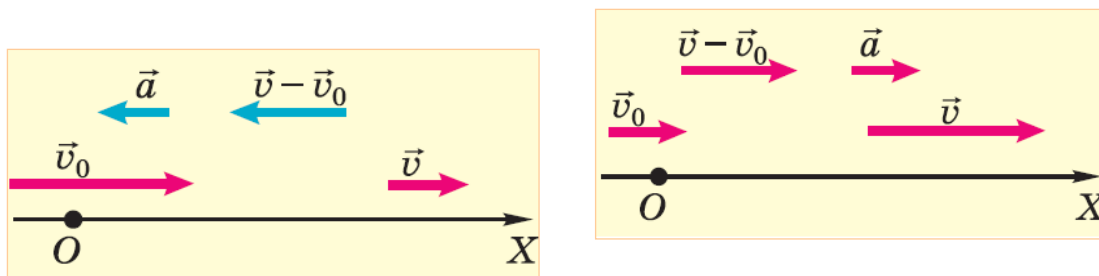


Рисунок 2. Определение ускорения тела

Однако следует помнить, что знак проекции ускорения не определяет характер движения – замедленное оно или ускоренное, а зависит от выбора системы отсчета. В этом легко убедиться, если рассмотреть случай, когда оба тела движутся равноускоренно в противоположных направлениях.

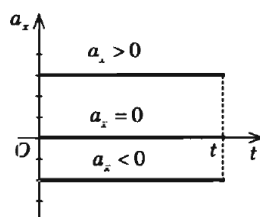


Рисунок 3. График зависимости  $a_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения

Во время равнопеременного движения ускорение тела является постоянным в течение всего времени движения, поэтому график зависимости проекции ускорения от времени  $a_x(t)$  представляет собой отрезок прямой, параллельной оси времени (рис. 3).

Обратите внимание: если ускорение тела равно нулю, то тело не меняет скорости своего движения ( $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = 0 \Rightarrow \vec{v} = \vec{v}_0$ ), то есть движется равномерно прямолинейно. Это означает, что равномерное прямолинейное движение является частным случаем равнопеременного прямолинейного движения, а именно равноускоренным движением с нулевым ускорением.

В случае равноускоренного движения скорость изменяется линейно:  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$ . Для решения задач будем использовать формулу, записанную в проекциях на ось OX:  $v_x = v_{0x} + a_x t$ .

График зависимости проекции скорости движения от времени ( $v_x(t)$ ) – отрезок прямой, начинающийся на оси скорости в точке  $v_{0x}$  (рис 4).

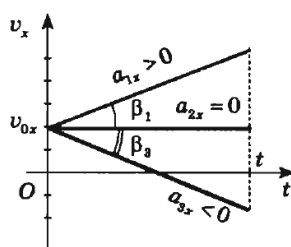


Рисунок 4. График зависимости  $v_x(t)$  для равноускоренного прямолинейного движения

Выведем теперь кинематическое уравнение перемещения для равнопеременного движения. Учтем, что скорость во время такого движения все время меняется, например, в начале движения она равна  $v_0$ , а в конце движения она уже будет  $v$ . Поэтому в формуле перемещения можно воспользоваться понятием средней скорости:  $\vec{v}_c = \frac{\Delta\vec{r}}{t}$ . Отсюда имеем:

$$\Delta\vec{r} = \vec{v}_c \cdot t. \quad \vec{v}_c = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} \text{ – средняя скорость при равнопеременном движении.}$$

$$\Delta\vec{r} = \vec{v}_c \cdot t = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}}{2} t = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}_0 + \vec{a}t}{2} = \frac{2\vec{v}_0 + \vec{a}t}{2} t = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$$

$\Delta\vec{r} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$  – перемещение при равнопеременном прямолинейном движении или в проекциях на выбранную ось ОХ:

$$\Delta r_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$

Учитывая, что для любого вида движения проекция перемещения и координата связаны соотношением  $x = x_0 + \Delta r_x$ , уравнение изменения координаты при равноускоренном движении имеет вид:

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$

Зная исходное положение тела  $x_0$  (положение в момент времени  $t = 0$ ), начальную скорость  $v_0$  тела, его ускорение  $a$  и воспользовавшись формулой  $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ , можно определить положение тела в любой момент времени, то есть решить основную задачу механики для равноускоренного прямолинейного движения.

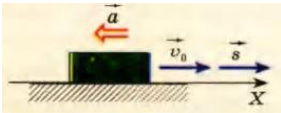
Проанализировав уравнение координаты, можно сделать вывод, что зависимость  $x(t)$  является квадратичной, поэтому график зависимости

координаты от времени, как и график зависимости проекции перемещения от времени – парабола.

**Основные формулы, характеризующие равномерное прямолинейное и равноускоренное прямолинейное движения**

Физическая величина	Прямолинейное движение (траектория – прямая линия)			
	Равномерное		Равноускоренное	
	Формулы	Графики	Формулы	Графики
<b>Ускорение</b>	$a = 0;$ $a_x = 0$		$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t};$ $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$	
<b>Скорость</b>	$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}; v_x = \frac{s_x}{t}$		$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t;$ $v_x = v_{0x} + a_x t$	
<b>Перемещение</b>	$\vec{s} = \vec{v}t; s_x = v_x t;$ $s = vt$		$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2};$ $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$ $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} t$	
<b>Координата тела</b> $x = x_0 + s_x$	$x = x_0 + v_x t$		$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	

Основные этапы решения задач на равноускоренное движение рассмотрим на конкретном примере.

Последовательность действий	Пример решения задачи
<p>1. Внимательно прочитайте условие задачи. Выясните, какие тела участвуют в движении, которым является характер их движения, параметры движения известны.</p>	<p><b>Задача.</b> После начала торможения поезд прошел до остановки 225 м. Какова была скорость движения поезда перед началом торможения? Считайте, что ускорение поезда является постоянным и равным <math>0,5 \text{ м/с}^2</math>.</p>
<p>2. Запишите короткое условие задачи. В случае необходимости переведите значения физических величин в единицы СИ.</p>	<p>Дано:  <math>s = 225 \text{ м}</math>  <math>a = 0,5 \text{ м/с}^2</math>  <math>v = 0</math></p> <hr/> $v_0 = ?$
<p>3. Выполните пояснительный рисунок, на котором обозначьте оси координат, для каждого тела обозначьте также направления скорости движения, начальной скорости, ускорения.</p>	<p>На пояснительном рисунке направлении ось OX в направлении движения поезда. Поскольку поезд уменьшает свою скорость, то <math>\vec{a} \uparrow \downarrow \vec{v}_0</math>.</p> 
<p>4. Из формул, описывающих равноускоренное движение, выберите те, которые наиболее соответствуют условию задачи.</p> $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t};$ $v_x = v_{0x} + a_x t;$ $s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x};$ $s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} t.$	<p>Из условия задачи известно, <math>a</math>, <math>v</math> и <math>s</math>, нужно найти <math>v_0</math>. Все эти четыре физические величины входят в формулу <math>s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}</math>. Запишем эту формулу для данного конкретного случая. Направление перемещения и направление начальной скорости совпадают с направлением оси OX, потому что <math>s_x = s</math>, <math>v_{0x} = v_0</math>. Направление ускорения противоположную направлению оси OX, следовательно <math>a_x = -a</math>. По условию конечная скорость <math>v = 0</math>. Подставим полученные данные в формулу перемещения:</p> $s = \frac{0 - v_0^2}{-2a} = \frac{v_0^2}{2a}.$
<p>5. Решите задачу в общем виде (получите математическое выражение для искомых величин).</p>	<p>Из формулы <math>s = \frac{v_0^2}{2a}</math> найдем начальную скорость: <math>v_0</math>, <math>v_0^2 = 2as</math> отсюда <math>v_0 = \sqrt{2as}</math>.</p>
<p>6. Проверьте единицу искомой величины.</p>	$[v] = \sqrt{\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}$
<p>7. Найдите числовое значение искомой величины.</p>	$\{v\} = \sqrt{2 \cdot 225 \cdot 0,5} = \sqrt{225} = 15$

Последовательность действий	Пример решения задачи
8. Запишите и проанализируйте результат.	$v_0 = 15 \text{ м/с} = 54 \text{ км/ч}$ – вполне реальная скорость движения для поезда
9. Запишите ответ.	Ответ: перед началом торможения скорость движения поезда $v_0 = 54 \text{ км/ч}$ .



## Самостоятельное изучение. Равномерное движение точки по окружности.

### План

1. Криволинейное движение тела.
2. Равномерное движение тела по окружности.

### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Какое движение называют криволинейным?
2. Может ли тело двигаться по криволинейной траектории без ускорения?
3. Как в случае криволинейного движения направлен вектор мгновенной скорости?
4. Дайте определение линейной скорости.
5. Какие виды криволинейных движений вы знаете? Дайте их определения.
6. Как определить линейную скорость в случае равномерного криволинейного движения?
7. Какое движение называют равномерным движением по окружности?
8. Какие физические величины характеризуют движение тела по окружности?
9. Каким соотношением связаны угловая и линейная скорости движения?
10. Охарактеризуйте физические величины, описывающие периодичность движения тела по окружности.
11. Как связаны период и частота вращения?
12. По какой формуле определяют центростремительное ускорение?

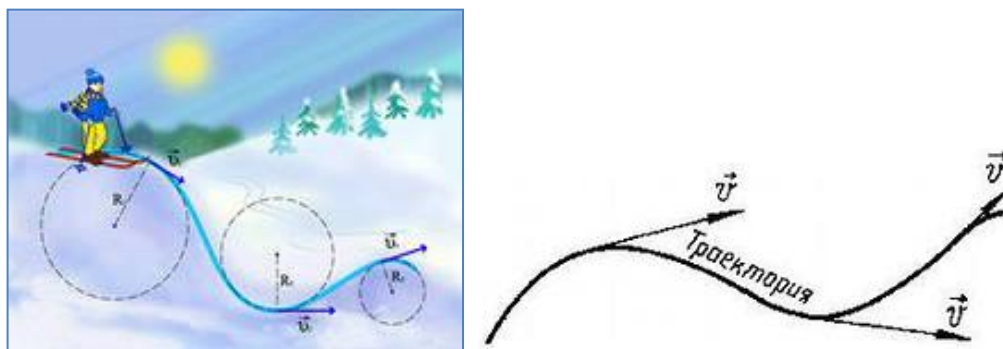
## Криволинейное движение тела.

Уже говорилось о том, что по форме траектории все движения делятся на два вида – прямолинейные и криволинейные. До сих пор мы изучали движения, при которых траектория была прямая. Однако на практике гораздо чаще встречается криволинейное движение. Автомобиль поворачивает на перекрестке, человек идет по извилистой тропинке, планета мчится вокруг своей звезды, заряженная частица отклоняется в магнитном поле и многое другое – все это примеры движений, участки траектории которых не являются прямыми.

**Криволинейное движение** – это такое движение тела, при котором траектория движения тела представляет собой кривую линию.

В чем заключаются особенности криволинейного движения? Криволинейное движение гораздо сложнее, чем прямолинейное. Во-первых, в случае криволинейного движения меняются как минимум две координаты движущегося тела.

Во-вторых, в случае криволинейного движения вектор мгновенной скорости, а, следовательно, и вектор перемещения тела не лежит на траектории движения этого тела. Вектор мгновенной скорости всегда совпадает с касательной к траектории движения тела в рассматриваемой точке и направлен в сторону движения тела.



В-третьих, в случае криволинейного движения направление вектора скорости непрерывно меняется, поэтому даже если модуль скорости остается неизменным, скорость движения нельзя считать постоянной, ведь для векторных величин одинаково важны и модуль, и направление.

Непрерывное изменение скорости движения означает, что криволинейное движение – это всегда движение с ускорением. Ускорение при криволинейном движении тоже непрерывно меняет свое направление.

## Равномерное движение тела по окружности.

Описывать криволинейное движение достаточно сложно хотя бы потому, что различных форм криволинейных траекторий множество. Однако часто оказывается, что не нужно рассматривать движение по каждой кривой отдельно: отдельные участки сложной криволинейной траектории можно представить как совокупность дуг различных радиусов. Поэтому практически любое криволинейное движение можно рассматривать как движение по дугам окружностей. При изучении криволинейного движения движение на каждом участке можно представить движением по дуге окружности. Поэтому обратимся к описанию движения материальной точки по окружности.

Как всегда, начнем с самого простого – с равномерного движения по окружности.

Рассмотрим важный, но частный случай криволинейного движения – равномерное вращение материальной точки по окружности. По модулю скорость постоянная, по направлению – меняется (рис. 1). Перемещение направлено по хорде и не совпадает с направлением скорости. Определим модуль и направление ускорения, которое характеризует равномерное движение тела по окружности.

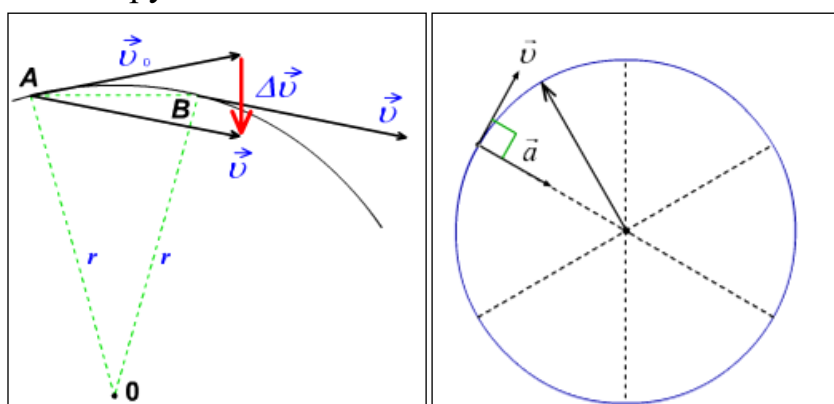


Рисунок 1. Равномерное движение точки по окружности

Найдём теперь направление ускорения  $\vec{a}$ . Вектор ускорения направлен так, как направлен вектор  $\Delta \vec{v}$  в пределе при стремлении промежутка времени  $\Delta t$  к нулю. Из рисунка 1 видно, что при стремлении интервала  $\Delta t$  к нулю точка A приближается к точке B и угол  $\varphi$  стремится к нулю. Таким образом, угол между вектором  $\Delta \vec{v}$  и радиусом окружности стремится к нулю. Следовательно, в пределе вектор мгновенного ускорения направлен к центру окружности. В случае равномерного движения тела по окружности вектор ускорения в данной точке окружности всегда перпендикулярен вектору мгновенной скорости и направлен к центру окружности. Поэтому

ускорение точки при её равномерном движении по окружности называют **центростремительным** и записывают с индексом  $a_{\ddot{}}$ .

**Важно.** В процессе движения точки по окружности ускорение всё время направлено по радиусу к центру, т. е. непрерывно изменяется по направлению. Следовательно, равномерное движение точки по окружности является движением с переменным ускорением и переменной скоростью. Отметим, что модули скорости и ускорения при этом остаются постоянными.

Ускорение при равномерном движении тела по окружности всегда направлено к центру окружности; его модуль не зависит от времени и вычисляется по формуле:  $a_{\ddot{}} = \frac{v^2}{R}$ .

Какие физические величины характеризуют равномерное движение точки по окружности?

**Линейная скорость**  $v$  – это физическая величина, характеризующая криволинейное движение и равна средней путевой скорости, измеренной за бесконечно малый промежуток времени.

Скорость тела, направленную по касательной к окружности, называют линейной.

Поскольку для очень малых промежутков времени модуль перемещения (длина  $\Delta s$  секущей) приближается к длине участка траектории ( $\Delta l$ ), то линейная скорость в данной точке равна модулю мгновенной скорости.

Именно линейную скорость мы имеем в виду, когда, например, характеризуем движение автомобиля на повороте, говорим о скорости полета искусственных спутников Земли, описываем движение частицы в ускорителе или скорость движения лыжника на трассе и тому подобное.

Со временем линейная скорость может меняться, а может оставаться величиной постоянной. В зависимости от этого, в физике рассматривают неравномерное криволинейное движение (движение с переменной линейной скоростью) и равномерное криволинейное движение (движение с постоянной линейной скоростью). Мы будем иметь дело только с равномерным криволинейным движением.

Если за любые равные промежутки времени радиус-вектор тела поворачивается на одинаковые углы, а линейная скорость тела по модулю не изменяется, движение тела по окружности называют **равномерным** (не следует забывать, что равномерное движение по окружности происходит с ускорением, так как скорость тела непрерывно меняется по направлению).

В случае такого движения линейную скорость вычисляют по формуле

$$v = \frac{l}{t}.$$

**Равномерное движение тела по окружности** – это такое криволинейное движение, во время которого траекторией движения тела является окружность, а линейная скорость и модуль мгновенной скорости не изменяются со временем.

Какие физические величины характеризуют периодичность равномерного движения по кругу

Любое периодическое движение характеризуется такими физическими величинами, как период и частота.

**Период вращения  $T$**  – это физическая величина, равная промежутку времени, за который тело делает один полный оборот:

$$T = \frac{t}{N},$$

где  $T$  – период вращения,  $N$  – количество полных оборотов, сделанных телом за промежутки времени  $t$ .

Единица периода вращения в СИ – секунда (с).

**Частота вращения** – это физическая величина, численно равно количеству полных оборотов в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t},$$

где  $\nu$  – частота вращения  $N$  – количество полных оборотов, совершенных телом за промежуток времени  $t$ .

Единица частоты в СИ – оборот на секунду (об/с, или  $\text{с}^{-1}$ ).

Период и частота вращения связаны соотношением:  $\nu = \frac{1}{T}$ .

Зная период вращения (частоту вращения) и радиус окружности, по которой движется тело, легко определить линейную скорость  $v$  движения тела. Действительно, за время одного полного оборота ( $t=T$ ) тело проходит расстояние, равное длине окружности  $l = 2\pi R$ . Поскольку,  $\nu = \frac{l}{t}$ , получим:

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R \nu.$$

Кроме линейной скорости для характеристики скорости движения тела по окружности часто используют угловую скорость.

**Угловая скорость  $\omega$**  – это физическая величина, численно равная отношению угла поворота  $\varphi$  радиус-вектора точки, движущейся по

окружности, к промежутку времени  $t$ , в течение которого произошел этот поворот:  $\omega = \frac{\varphi}{t}$ .

Единица угловой скорости в СИ – радиан в секунду (рад/с).

Например, угловая скорость вращения Земли вокруг оси 0,0000727 рад/с, а точильного диска – около 140 рад/с

Радиан равен центральному углу, опирающемуся на дугу, длина которой равна радиусу окружности, 1 рад = 57°17'48". В радианной мере угол равен отношению длины дуги окружности к её радиусу:  $\varphi = l/R$ .

Поскольку за время, равное одному периоду ( $t=T$ ) радиус-вектор выполняет один полный оборот ( $\varphi = 2\pi$ ), угловую скорость можно вычислить по формуле:  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ .

Угловая и линейная скорости связаны соотношением:  $v = \omega R$ .

Из этой формулы видно, что, чем дальше расположена точка тела от оси вращения, тем больше её линейная скорость. Для точек земного экватора  $v = 463$  м/с, а для точек на широте Санкт-Петербурга  $v = 233$  м/с. На полюсах Земли  $v = 0$ .

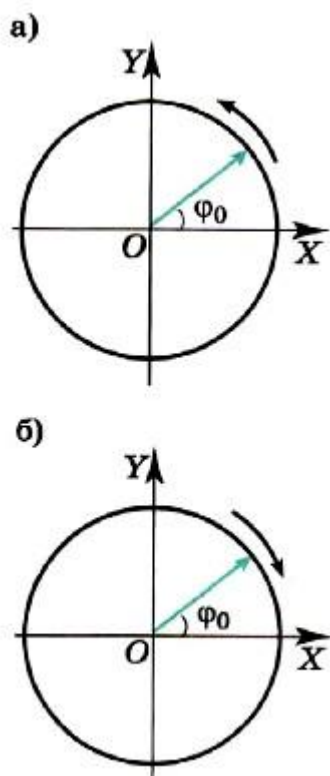


Рисунок 2

Угловая скорость принимает положительные значения, если угол между радиус-вектором, определяющим положение одной из точек твёрдого тела, и осью ОХ увеличивается (рис. 2, а), и отрицательные, когда он уменьшается (рис. 2, б).

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

$$a_{ц} = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r.$$

Запишем все возможные расчётные формулы для центростремительного ускорения:

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2} R = 4\pi^2 \nu^2 R.$$

Мы рассмотрели два простейших движения абсолютно твёрдого тела – поступательное и вращательное. Однако любое сложное движение

абсолютно твёрдого тела можно представить как сумму двух независимых движений: поступательного и вращательного.

На основании закона независимости движений можно описать сложное движение абсолютно твёрдого тела.

**Задача.** Период вращения платформы карусельного станка 4 с. Найдите скорость крайних точек платформы, удаленных от оси вращения на 2 м.

**Основные характеристики равномерного движения материальной точки по окружности:**

Физическая величина	Обозначение	Единица	Формула по определению	Формула связи
<b>Период</b>	$T$	$c$	$T = \frac{t}{N}$	$\nu = \frac{1}{T}$
<b>Частота</b>	$\nu$	$c^{-1}$	$\nu = \frac{N}{t}$	$T = \frac{1}{\nu}$
<b>Линейная скорость</b>	$v$	$\frac{м}{с}$	$v = \frac{l}{t}$	$v = \frac{2\pi R}{T};$ $v = 2\pi R \nu$
<b>Угловая скорость</b>	$\omega$	$\frac{рад}{с}$	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	$\omega = \frac{2\pi}{T};$ $\omega = 2\pi \nu$
<b>Центростремительное ускорение</b>	$a_{ц}$	$\frac{м}{с^2}$	$a = \frac{v^2}{r}$	$a = \frac{v^2}{R};$ $a = \omega^2 R$

## Лекция №5

### Взаимодействие тел в природе. Законы Ньютона.

План.

1. Взаимодействие тел.
2. Первый закон Ньютона.
3. Сила.
4. Второй закон Ньютона.
5. Третий закон Ньютона.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Что изучает динамика?
2. Какова основная задача динамики?
3. Что является причиной ускорения тела?
4. Какие виды взаимодействий вы знаете?
5. Дайте определение инертности.
6. Что такое масса тела? Какова единица массы в СИ?
7. Назовите основные свойства массы.
8. В чём состоит явление инерции?
9. Что такое свободное тело?
10. При каких условиях тело сохраняет состояние покоя?
11. Можно ли утверждать, что состояние покоя и состояние равномерного прямолинейного движения с точки зрения кинематики не различаются?
12. Как определить, что наблюдаемое тело начало взаимодействовать с другим телом?
13. Выполняется ли закон инерции в системе отсчёта, в которой тело движется с ускорением?
14. Какое утверждение содержится в первом законе Ньютона?
15. Какая система отсчёта называется инерциальной?
16. Каким образом можно установить, что данная система отсчёта является инерциальной?



17. Если за инерциальную систему отсчёта принять Землю, то какие надо выбрать на Земле тела отсчёта, чтобы системы, связанные с ними, были также инерциальными?
18. Дайте определение силы. В каких единицах ее измеряют?
19. Дайте определение равнодействующей силы.
20. От каких факторов зависит ускорение тела?
21. Сформулируйте второй закон Ньютона. Каково его математическое выражение?
22. Почему второй закон Ньютона называют основным законом динамики
23. Что можно сказать о направлении силы и ускорения, которое эта сила придает телу?
24. Как записать второй закон Ньютона, если на тело действуют несколько сил?
25. Какое условие равноускоренного движения тела?
26. Сформулируйте третий закон Ньютона.
27. Почему этот закон называют законом взаимодействия
28. Приведите примеры проявления третьего закона Ньютона.
29. Что сказать о природе сил, которые возникают при взаимодействии тел?
30. Почему силы, возникающие при взаимодействии тел, не уравновешивают друг друга?

## Взаимодействие тел.

Изучая кинематику, мы описывали движения тел, однако о причинах, которые вызывают эти движения, речи не было. При этом основная задача механики заключается не только в том, чтобы описать, как движется тело в данный момент времени, но и предсказать, как оно будет двигаться дальше. А для этого необходимо установить, почему тело меняет характер своего движения или, наоборот, почему и при каких условиях характер движения тела будет неизменным. Именно этими вопросами занимается динамика.

**Динамика** – раздел механики, изучающий движение тел с выяснением причин этого движения.

Основная задача динамики – выяснить причины возникновения ускорения, изучить возможные взаимодействия тел, выяснить законы, которым подчиняются движение и взаимодействие тел и на основе этих законов уметь определять положение тел в любой момент времени.

Основоположником динамики является гениальный физик Исаак Ньютон. Он жил в XVII в. в Англии. Англия того времени из аграрной страны превращалась в индустриальную. Быстрый рост промышленности требовал новых технических изобретений. Но работа технических устройств нуждалась в научном обосновании. Так практика стимулировала развитие физики. Ньютон стал первым среди учёных того времени.

С давних времён люди задумывались: каковы причины равномерного и ускоренного движений тел? Одинаковы ли причины этих движений?

- Что является причиной появления ускорения при движении тела?
- При каком условии тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения?

В этих вопросах представлена основная учебная проблема нашего занятия.

В природе все находится в движении. Движение – это неотъемлемое свойство материи. При своем движении тела встречаются друг с другом, и между ними происходит взаимодействие.

Свободных (изолированных) тел в природе практически не существует. Любое тело (или частица) окружено другими телами (частицами). Тела (или частицы) оказывают определенное действие друг на друга.

Действие тел или частиц друг на друга называют **взаимодействием**.

Взаимодействие – одно из основных (фундаментальных) понятий не только в физике, но и в науке в целом. Именно взаимодействия являются причиной каких-либо изменений, происходящих с телами. Взрыв сверхновой звезды, питание клетки, полет орла, радиоактивный распад вещества, порыв

ветра, химические реакции, – все процессы и явления в природе происходят в результате взаимодействия. Благодаря взаимодействиям существует и сама природа: существование атомов и их составляющих, существование планет, звезд, галактик, человека и окружающих тел, – все это возможно именно благодаря взаимодействиям.

Различают четыре фундаментальные виды взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое.

Гравитационное взаимодействие универсальное – в нем принимают участие все тела и частицы. Это взаимодействие является определяющим для существования и движения небесных тел.

Электромагнитное взаимодействие проявляется только между частицами, имеющими электрический заряд. Это взаимодействие определяет структуру вещества: оно связывает электроны и ядра в атомах, атомы в молекулах, определяет химические и биологические процессы и др. В механике с этим видом взаимодействия вы встречались, когда изучали силы упругости и силы трения.

Гравитационное и электромагнитное взаимодействия являются дальнедействующими – они проявляются на достаточно больших расстояниях между объектами и не имеют конечного радиуса действия.

Процессы, обусловленные сильным взаимодействием и слабым взаимодействием, подчиняются законам квантовой механики. Эти взаимодействия проявляются в микромире.

### **Первый закон Ньютона.**

**Выбор системы отсчёта.** Мы уже знаем, что любое движение следует рассматривать по отношению к определённой системе отсчёта. В кинематике, т. е. при описании движения без рассмотрения причин, его вызывающих, все системы отсчёта равноправны. Выбор определённой системы отсчёта для решения той или иной задачи диктуется соображениями целесообразности и удобства. Так, при стыковке космических кораблей удобно рассматривать движение одного из них относительно другого, а не относительно Земли.

Вопрос о выборе системы отсчёта в динамике не является простым.

**Инерция** – это явление, при котором тело сохраняет состояние покоя или равномерного движения, когда на него не действуют другие тела.

Тело стремится сохранить свое первоначальное состояние, после того, как на него подействует другое тело.

У всех тел есть свойство, которое характеризует их способность сохранять свое первоначальное состояние больше или меньше времени (сохранять свою скорость). Это свойство называется **инертностью**.

При одинаковом воздействии со стороны окружающих тел одно тело может быстро изменять свою скорость, а другое в тех же условиях – значительно медленнее. Принято говорить, что второе из этих двух тел обладает большей инертностью.

**Инертность** – это свойство тел, которое характеризует их способность сохранять свое первоначальное состояние больше или меньше времени.

Все тела инертные, но инертность различных тел разная. Для характеристики инертности вводят понятие массы.

**Масса** – это мера инертности и гравитации тела.

В Международной системе единиц (СИ) за единицу массы – один килограмм (1 кг) – принята масса эталонной гири из сплава платины и иридия, которая хранится в Международном бюро мер и весов в Севре, близ Парижа. Точные копии этой гири имеются во всех странах. Приблизённо массу 1 кг имеет вода объёмом 1 л при комнатной температуре.

Прибор для измерения – весы.  $[m] = \text{кг}$ .

### **Основные свойства массы**

1. Масса тела – величина инвариантная: она не зависит от выбора СО. Например, масса пассажира в движущемся поезде равна его массе на перроне.

2. Масса тела не зависит от скорости движения тела. Это свойство массы является следствием ее инвариантности.

3. Масса тела – величина аддитивная: масса тела равна сумме масс всех частиц, из которых состоит тело, а масса системы тел равна сумме масс тел, образующих систему. Например, масса авторучки равна сумме масс молекул, из которых она состоит, и сумме масс ее деталей.

4. В классической механике выполняется закон сохранения массы: в ходе любых процессов в системе тел общая масса системы остается неизменной; масса тела не меняется при его взаимодействии с другими телами.

Измерить массу тела, значит сравнить ее с массой эталона (с массой тела, массу которого взято за единицу). Один из самых распространенных способов прямого измерения массы тела – взвешивание. Поскольку масса – мера гравитации, то тела, которые имеют равную массу, одинаково притягиваются к Земле.

Взвешивание – один из самых удобных способов измерения массы, однако не универсальный. Как, например, измерить массу молекулы или массу Луны, ведь положить эти объекты на весы невозможно?

В таких случаях используют тот факт, что масса – мера инертности. Во время любого взаимодействия двух тел отношение их масс обратно пропорционально отношению модулей ускорений, приобретенных телами в результате этого взаимодействия:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{a_1}{a_2}.$$

**?** Объясните назначение ремней безопасности для пассажиров автомобилей и авиапассажиров.

Почему нельзя перебежать дорогу перед близко идущим транспортом?

Многочисленные наблюдения и опыты показывают, что тело изменяет скорость своего движения в результате взаимодействия с другими телами. Прежде чем найти причину изменения скорости, т.е. возникновения ускорения, мы выясним, при каких условиях тело движется без ускорения, т.е. его скорость с течением времени не меняется.

**Итак, выясним, при каких условиях тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя относительно Земли.**

Выберем вначале систему отсчёта, связанную с земным шаром.

**А как будет двигаться тело, если на него не действуют другие тела?**

За ответом на этот вопрос обратимся к истории физики.

Заключение о том, как будет вести себя тело в отсутствие действия других тел, впервые было предложено Рене Декартом и в своих опытах продолжено было Галилео Галилеем.

В IV веке до н.э. Аристотель писал: «**Всякое движение – бывает или насильственным, или происходящим по природе**». К последним он относил круговые движения небесных светил, а также считал их присущими самим телам и не нуждающимися в каких-либо внешних причинах. Если какое-либо движение отличается от естественного, то оно может быть осуществлено лишь насильственным путём. В отношении таких движений около 2500 лет назад древнегреческий философ Аристотель писал: «**Все, что движется, имеет движение благодаря чему-то. Тело, которое движется, останавливается, если тело, его толкающее, прекращает свое действие**». Иными словами, причина «неестественного движения» – действие со стороны других тел. Нет действия других тел – нет движения.

Начиная с великого древнегреческого философа Аристотеля, на протяжении почти двадцати веков все были убеждены, что движение тела с постоянной скоростью нуждается для своего поддержания в действиях,

производимых на тело извне, т. е. в некоторой активной причине. Считали, что без такой поддержки тело обязательно остановится.

Это, казалось, находит подтверждение в нашем повседневном опыте. Например, автомобиль с выключенным двигателем останавливается и на совершенно горизонтальной дороге. Для поддержания его постоянной скорости необходимо, чтобы двигатель был включён.

Представим идеализированную ситуацию: оси колес телеги смазаны так хорошо, что между ними и колесами нет трения, дорога является идеально ровной и гладкой, а оглобли закреплены, но не мешают движению. Другими словами – мысленно исключим все возможные силы трения. Можно предположить, что в этом случае телега, начав движение, будет двигаться равномерно прямолинейно сколь угодно долго.

Если бы не было сопротивления движению со стороны земли, то скорость автомобиля на горизонтальном шоссе и при выключенном двигателе оставалась бы постоянной.

Именно к такому выводу в конце XVI в. пришел итальянский ученый Галилео Галилей. Цитата из работы Галилея: «Когда тело движется по горизонтальной поверхности, не встречая никаких сопротивлений движению, то... движение его является равномерным и может продолжаться постоянно...».

Изучая движение тел по наклонной плоскости и используя мысленный эксперимент, он сформулировал закон, который позже получил название **закона инерции Галилея**:

**Если на тело не действуют другие тела, оно сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.**

Обратимся к опыту, к наблюдениям: груз, подвешенный на нити, находится в состоянии покоя.

Действуют ли на груз окружающие тела? Какие тела действуют? Почему груз не меняет свою скорость? Изменится ли его скорость, если одно из действий исключить? Как это практически сделать?

Вывод: два (или более) действия на тело могут уравновесить или компенсировать друг друга. При этом сами действия не исчезают.

Следовательно, можно сделать вывод:

**Тело находится в состоянии покоя, если действия на него других тел скомпенсированы.**

Представим себе, что мимо висящего неподвижно груза движется равномерно и прямолинейно какое-либо тело, например тележка. Тогда относительно системы отсчета, связанной с этой тележкой, груз будет двигаться равномерно и прямолинейно, оставаясь неподвижным

относительно системы отсчета, связанной с Землей. Следовательно, при компенсации действия на тело других тел оно может двигаться равномерно и прямолинейно. Состояние покоя и состояние равномерного прямолинейного движения ( $\vec{a} = 0$ ) с точки зрения динамики не различаются.

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

Изменение скорости тела (а значит, ускорение) всегда вызывается воздействием на него каких-либо других тел. Только действие со стороны другого тела способно изменить его скорость.

Тело, на которое не действуют другие тела и поля, называют **свободным** (изолированным), а движение свободного тела называют **движением по инерции**, поэтому закон, установленный Галилеем, называют **законом инерции**.

В реальности практически невозможно создать условия, когда на тело ничто не действует, поэтому движением по инерции обычно считают случаи, когда действия на тело других тел и полей вдоль линии движения тела достаточно слабые и для заметного изменения скорости это тело проходит значительный путь.

Так, движениями по инерции можно считать практически равномерные движения: шайбы по льду после удара клюшкой, шара на дорожке во время игры в боулинг и т.д.

Закон инерции Г. Галилея стал первым шагом в установлении основных законов механики. Формулируя основные законы движения тел, И. Ньютон назвал этот закон первым законом движения и подал его так:

**Любое тело, пока оно остается изолированным, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.**

Все мы знаем, что движение и покой относительны. В одних системах отсчёта, тело может покоиться, относительно других в это же время двигаться с ускорением. Но состояние покоя и состояние движения связано с системой отсчета.

Обратим внимание на следующее.

Во-первых, тело движется равномерно прямолинейно или находится в состоянии покоя, если оно изолировано (то есть на него не действуют другие тела) или если действия на него других тел скомпенсированы. Поэтому можно утверждать, что отсутствие воздействия на тело других тел



равносильно тому, что на тело действуют другие тела, однако их действия скомпенсированы.

Во-вторых, любое движение рассматривается в отношении какой-либо СО. Поэтому первый закон Ньютона не только формулирует условие движения тела по инерции, но и постулирует существование СО, в отношении которых наблюдается такое движение.

Исходя из этого, можно сформулировать закон инерции Галилея (или первый закон движения Ньютона) с учетом современных представлений.

Итак, первый закон механики Ньютона:

**Существуют такие системы отсчета, относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела и поля или если их действия скомпенсированы.**

Явление сохранения телом состояния покоя или равномерного прямолинейного движения при условии, что на него не действуют другие тела и поля или их действия скомпенсированы, называют **явлением инерции**.

Но не в каждой СО наблюдается явление инерции.

Представьте, что вы сидите в купе поезда, который стоит на перроне. На столике купе лежит мячик. На мячик действуют два тела: Земля и столик. Действия Земли и столика скомпенсированы, и мячик находится в покое относительно перрона.

Таким образом, в отношении СО, связанной с перроном, явление инерции наблюдается. Но как только поезд начинает набирать скорость, мячик начинает катиться по столу, то есть относительно поезда начинает двигаться с ускорением, хотя действия Земли и столика, как и раньше, скомпенсированы.

Следовательно, относительно СО, связанной с поездом, который набирает скорость, явление инерции не наблюдается (действие других тел на мячик скомпенсировано, но он не сохраняет свою скорость).

СО, в отношении которой наблюдается явление инерции, называют **инерциальной системой отсчета (ИСО)**, СО, в отношении которой явление инерции не наблюдается, – **неинерциальной системой отсчета**.

**Инерциальные системы отсчета** – это такие системы отсчета, относительно которых тело сохраняет скорость своего движения постоянной, если на него не действуют другие тела и поля или если их действия скомпенсированы.

Обычно в качестве инерциальной используют СО, жестко связанную с точкой на поверхности Земли. Однако это не единственная инерциальная СВ



– их бесконечно много. Любая СО, движущаяся относительно Земли равномерно прямолинейно, является инерциальной.

Мы уже неоднократно говорили о гениальном английском ученом Исааке Ньютоне. За свои научные заслуги он даже получил рыцарское звание и титул лорда. «Природа для него была открытой книгой, которую он читал без усилий», – писал об этом ученом Альберт Эйнштейн. В работе «Математические начала натуральной философии» (1687) Ньютон сформулировал «аксиомы движения» – их теперь называют законами Ньютона. О втором, основном законе динамики, и третьем законе Ньютона пойдет речь сегодня на занятии.

При каких условиях происходит ускоренное движение тел? Многочисленные наблюдения и опыты позволили сделать вывод: тело движется ускоренно, если на него действует другое тело или тела. Кроме того, опыты убеждают: если первое тело действует на второе, то и второе действует на первое. Односторонних действий нет.

Явление взаимодействия тел – самое распространённое в природе; в природе нет односторонних действий; во взаимодействии всегда участвуют два (или более) тела, взаимодействие тел выражается в изменении скоростей их движений.

Действие может приводить к изменению размеров или формы тела (деформации).

Взаимодействие тел может происходить по-разному. Например, одну и ту же пружину ребенок растянет менее, чем взрослый человек. Для характеристики взаимодействия тел в физике вводится величина под названием сила.

**Сила** – это векторная физическая величина, характеризующая действие одного тела на другое, в результате которого тело приобретает ускорение или (и) меняет форму и размеры и являющаяся мерой этого взаимодействия.

Понятие силы не применимо к одному телу. То есть, если мы говорим о силе, то обязательно должны указать как минимум два тела: тело, которое действует и тело, которое подвергается этому воздействию. Например, лошадь тянет телегу: очевидно, что лошадь – это тело, которое оказывает воздействие на поводыря.



Единица силы в СИ – ньютон (Н). 1 Н равен силе, которая, действуя на тело массой 1 кг, сообщает ему ускорение 1 м/с<sup>2</sup>.

$$[Н] = \left[ \frac{кг \times м}{с^2} \right].$$

Результат действия силы на тело зависит от ее модуля, направления и точки приложения.

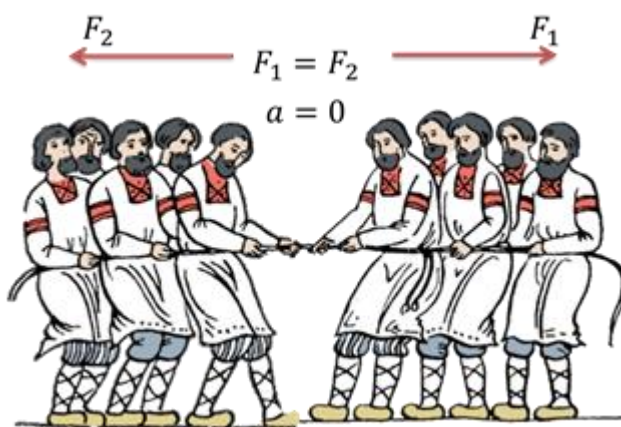


### Сравнение сил

Для количественного определения силы мы должны уметь её измерять. Только при этом условии можно говорить о силе как об определённой физической величине. Но ведь действия на данное тело могут быть самыми разнообразными. Что общего, казалось бы, между силой притяжения Земли к Солнцу и силой, преодолевающая тяготение, заставляет взмывать вверх ракету, или между этими двумя силами и силой, сжимающей мяч в руке, определяемой сокращением мускул? Ведь они совершенно различны по своей природе! Можно ли говорить о них как о чём-то физически родственном? Можно ли сравнивать их?

**Важно.** 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).

Рассмотрим пример перетягивания каната.



Это соревнование определяет, какая команда сильнее (то есть с большей силой) тянет канат. Если же силы оказываются равны, то ни люди, тянущие канат, ни сам канат не двигаются (то есть, им не сообщают

ускорение). Следует заметить, что, конечно же, обе команды тянут канат в разные стороны. Таким образом, мы можем заключить, что две силы считаются равными и противоположно направленными, если их одновременное действие на тело не меняет его скорости.

На практике для измерения сил применяют динамометр. Использование динамометра основано на том, что при упругой деформации удлинение пружины прямо пропорционально приложенной к ней силе. Поэтому по длине пружины можно судить о значении силы.

В механике не рассматривается природа тех или иных сил и не делаются попытки выяснить, вследствие каких физических процессов появляются те или иные силы. Это задача других разделов физики.

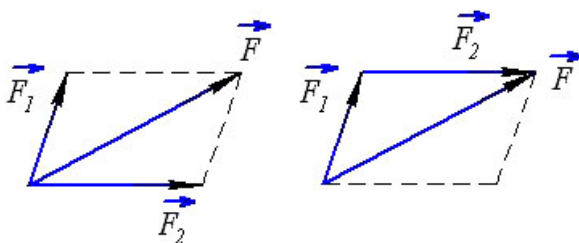
В механике важно лишь знать, при каких условиях возникают силы, каковы их направления и чему равны их модули, т. е. знать, как силы зависят от расстояний между телами и от скоростей их движения. А знать модули сил, определять, когда и как они действуют, можно, не вникая в природу сил, а лишь располагая способами их измерения.

В механике имеют дело с тремя типами сил: гравитационными силами, силами упругости и силами трения. Модули и направления этих сил определяются опытным путём. Важно, что все рассматриваемые в механике силы зависят либо только от расстояний между телами или от расположения частей тела (гравитация и упругость), либо только от относительных скоростей тел (трение).

### Принцип суперпозиции сил

**Сложение сил** – нахождение векторной величины, равной геометрической сумме векторов, изображающих силы данной системы.

При сложении сил применяют правило параллелограмма, по которому вектор, изображающий силу, равнодействующую двух сил, является диагональю параллелограмма, построенного на этих силах как на его сторонах.

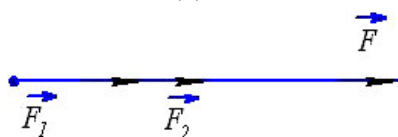


Силы, действующие на тела, графически изображаются стрелками. Обычно силы откладывают от центра массы.

**Равнодействующей сил** называется сила, которая вызывает на тело такое же действие, как и как несколько сил, одновременно приложенных к телу.

Рассмотрим отдельные случаи.

а) Две силы, приложенные в одной точке, действуют вдоль одной прямой и имеют одинаковое направление.

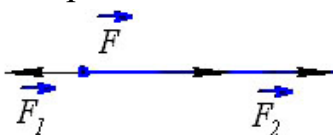


Равнодействующая сил равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

Её модуль равен  $F_p = F_1 + F_2$ .

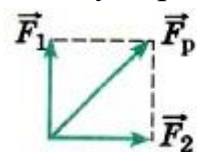
б) Две силы, приложенные в одной точке, действуют вдоль одной прямой и противоположно направлены.



Равнодействующая сил равна:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

Её модуль равен  $F_p = F_1 - F_2$ .



На рисунке показаны две силы, равные по модулю ( $F_1 = F_2 = F$ ) и направленные друг к другу под прямым углом. Очевидно, что модуль равнодействующей равен

$$F_p = \sqrt{2}F.$$

### Задачи

1) Модуль равнодействующей сил, действующих на тело во взаимно перпендикулярных направлениях, равен 13 Н. Модуль одной из этих сил равен 12 Н. Чему равен модуль второй силы?

2) Чему может равняться равнодействующая двух сил 2 и 5 Н, действующих на тело вдоль одной прямой?

### Второй закон Ньютона.

Перед постановкой учебной проблемы фронтально повторяются вопросы: какое механическое движение тела наиболее распространено в природе? (ускоренное). Какова причина ускоренного движения тела? (действие других тел). От чего зависит характер ускоренного движения тела?

Итак, между внешним действием и ускоренным движением тела существует причинно-следственная связь. Как выражается эта связь – основная учебная проблема нашего занятия.

II закон Ньютона дает ответ на вопрос: когда возникает ускорение и чему оно равно?

**Ускорение, которое получает тело в результате взаимодействия с другим телом, прямо пропорционально силе, на него действует обратно пропорционально его массе:**

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

Эта формула выражает один из самых фундаментальных законов природы, которому с удивительной точностью подчиняется движение как громадных небесных тел, так и мельчайших песчинок.

Каково значение второго закона динамики? Основной закон классической механики был открыт не сразу. До Ньютона большой вклад в его открытие сделал Галилей. Но в своей гениальной работе «Математические начала натуральной философии» (1687) Ньютон дал точную формулировку закона, раскрыл его смысл и значение при решении задач механики. Прежде всего, речь идёт о решении главной задачи динамики – определении характера движения тела (материальной точки) под действием заданных (известных) сил.

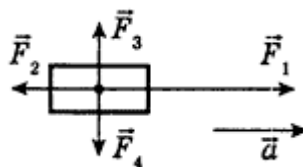
Как определить характер движения? По известной силе (результатирующей силе) можно найти ускорение, по известным начальным условиям (координатам и скорости) можно определить положение тела в любой последующий момент времени. Так закон устанавливает (раскрывает) динамическую причинность.

В любой ли системе отсчёта справедлив второй закон динамики? Как доказать, что он справедлив только в ИСО? Можно ли применить закон к вращающемуся телу? (Нет, так как разные точки тела движутся с разными ускорениями. Закон справедлив лишь для тел, которые можно моделировать материальной точкой.) Можно ли с помощью второго закона динамики предсказать (предвидеть) положение тела в любой момент времени?

С помощью этого закона можно рассчитать движение поршня в цилиндре автомобиля и сложнейшие траектории космических кораблей. Для решения задач мы чаще пользуемся другой формулировкой второго закона Ньютона.

**Важно.** Произведение массы тела на ускорение равно сумме действующих на тело сил:

$$m\vec{a} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$$



Если на тело действует несколько сил, II закон Ньютона принимает вид:

$$m\vec{a} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$$

### Алгоритм решения задач на II закон Ньютона:

1. Записать II закон Ньютона в векторной форме.
2. Сделать рисунок, на котором указать все силы, действуют на тело. *Все силы должны быть приложены к одной точке.*
3. Показать на рисунке направление ускорения.
4. Если тело движется прямолинейно равномерно, то ускорение равно нулю.
5. Выбрать координатные оси и их направление. *Как правило, одну ось направляют вдоль ускорения, а другую перпендикулярно ей.*
6. Записать II закон Ньютона в проекциях на координатные оси. *Если сила перпендикулярна координатной оси, то ее проекция на эту ось равна нулю. Если сила параллельна координатной оси и имеет тот же направление, то ее проекция равна модулю этой силы. Если она направлена против координатной оси, то ее проекция равна модулю этой силы со знаком «-».*
7. Выразить неизвестные величины и рассчитать их.

$$a = F/m = const$$

$$x = x_0 + S_x$$

$$v = v_0 + at \Rightarrow S = v_0 t + at^2 / 2 \Rightarrow y = y_0 + S_y$$

$$z = z_0 + S_z$$

### Следствия из второго закона Ньютона

1. Ускорение определяется силой, действующей на тело (сила – причина ускорения). Изменение силы приводит к изменению ускорения, а не наоборот.

2. Направление ускорения движения тела всегда совпадает с направлением равнодействующей сил, приложенных к телу.

3. Если силы, действующие на тело, скомпенсированы, то  $\vec{a}=0$ . Таким образом, тело находится в состоянии покоя или движется с постоянной скоростью ( $\vec{a}=0$ ), если равнодействующая сил, приложенных к телу, равна

нулю. Тело движется равноускоренно только в том случае, если равнодействующая сил, приложенных к телу, не меняется со временем.

4. На основании второго закона Ньютона устанавливается единица силы: если масса тела равна 1 кг, а ускорение, которое приобретает тело в результате действия силы, равно  $1 \text{ м/с}^2$ , то из равенства  $F=ma$  имеем, что сила равна силе в 1 Н ( $1\text{Н} = 1 \text{ кг}\cdot 1 \text{ м/с}^2$ ).

### Задачи

1) Тело массой 1 кг под действием силы приобретает ускорение  $2 \text{ м/с}^2$ . Чему равна сила?

2) Под действием силы 15 кН тело движется прямолинейно так, что его координата изменяется по закону  $x = -200 + 9t - 3t^2$ . Определите массу этого тела.

3) Десантник раскрыл парашют и опускается вниз с постоянной скоростью. Какова сила сопротивления воздуха? Масса десантника – 100 килограмм.

Решение:

Движение парашютиста – равномерное и прямолинейное, поэтому, по первому закону Ньютона, действие сил на него скомпенсировано.

На десантника действуют сила тяжести и сила сопротивления воздуха. Силы направлены в противоположные стороны.

По второму закону Ньютона, сила тяжести равна ускорению свободного падения, умноженному на массу десантника.

$$F_{\text{тяж.}} = mg$$

$$F_{\text{тяж.}} = 100 \text{ кг} \cdot 9.81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 981 \text{ Н}$$

$$F_{\text{тяж.}} = F_{\text{сопр.}}$$

Ответ: Сила сопротивления воздуха равна силе тяжести по модулю и противоположна направлена.

### Третий закон Ньютона.

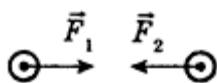
Ударьте ладонью о парту. Больно? Но почему? Ведь это вы били парту, а не парта вас. Потяните своего товарища за руку, стоя на гладком льду. Кто сдвинет с места? Оба? А почему? Ведь это вы тянули товарища, а не товарищ вас. Сможете ли вы, ухватившись за волосы, вытащить себя из воды? Нет? Но почему? Вы же легко можете вытащить таким образом из воды взрослого человека, который тяжелее вас.

На эти и другие вопросы вам поможет ответить третий закон Ньютона.

III закон Ньютона дает ответ на вопрос: как тела действуют друг на друга?



**Силы, с которыми взаимодействуют тела, действуют вдоль одной прямой, равны по модулю и противоположно направлены. Надо обратить внимание, что силы не уравновешены, так как они приложены к телам различной массы.  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$**



1. Третий закон Ньютона выполняется как в случаях непосредственного контакта тел, так и в случаях взаимодействия тел на расстоянии.

2. Силы всегда возникают парами. Обратите внимание: проявления этих сил (или одной из них) не всегда заметны. Например, во время ходьбы вы отталкиваетесь от поверхности Земли, следовательно, на вас действует сила со стороны Земли. Согласно третьему закону Ньютона, с такой же силой вы толкаете Землю назад, однако из-за большой массы Земли результат действия этой силы незаметен. А вот если вы будете идти по легкой лодке, то ваше действие на нее сразу станет заметным: лодка будет двигаться в направлении, противоположном вашему движению.

3. Пары сил, возникающих при взаимодействии двух тел, всегда имеют одну природу.

4. Казалось бы, если по каким-либо взаимодействиям тел возникает пара сил, равных по модулю и противоположных по направлению, такие силы должны уравновешивать друг друга, а это равносильно тому, что действия нет; следовательно, получается, что мы обречены или на неподвижность, или на непрерывное движение. Но в реальности это не так! Дело в том, что уравновешиваются только те силы, которые приложены к одному телу, а силы, возникающие при взаимодействии, приложены к разным телам, поэтому они не могут уравновесить (и компенсировать) друг друга.

Никакие внутренние силы не могут привести тело в движение. Они могут сместить отдельные части тела, а центр масс тела остается на месте. Силы взаимодействия между телами замкнутой системы не могут изменить положение центра масс системы.

### **Задачи**

1) В стекло движущегося автомобиля ударился комар. Сравнить силы, которые действуют на комара и автомобиль при ударе.

2) Почему лодка не сдвинется с места, когда человек, находящийся в ней, давит на борт, и придет в движение, если человек выйдет из лодки и будет толкать ее с такой же силой?



## Лекция №6

Сила всемирного тяготения. Сила упругости. Силы трения.

План

1. Сила всемирного тяготения. Закон всемирного тяготения.
2. Сила упругости. Закон Гука. Вес тела.
3. Силы трения.
4. Первая космическая скорость (самостоятельное изучение).

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какое взаимодействие называют гравитационным? Приведите примеры.
2. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
3. Каков физический смысл гравитационной постоянной? Чему она равна?
4. Каковы границы применения закона всемирного тяготения
5. Дайте определение силы тяжести. По каким формулам ее вычисляют и как она направлена?
6. Дайте определение силы упругости. Как направлена эта сила?
7. При каких условиях выполняется закон Гука?
8. Какую силу называют силой нормальной реакции опоры? Как она направлена?
9. Какую силу называют силой натяжения подвеса? Как она направлена?
10. Что называют весом тела? Чем вес тела отличается от силы тяжести?
11. Дайте определение силы трения.
12. Дайте определение силы трения скольжения. Как она направлена и по какой формуле ее вычисляют?
13. Для чего на автомобильных шинах делают рельефный рисунок (протектор)?
14. От чего зависят модуль и направление силы трения покоя?
15. В каких пределах может изменяться сила трения покоя?
16. Может ли сила трения скольжения увеличить скорость тела?
17. В чём состоит главное отличие силы сопротивления в жидкостях и газах от силы трения между двумя твёрдыми телами?
18. Приведите примеры полезного и вредного действия сил трения всех видов.

## Сила всемирного тяготения. Закон всемирного тяготения.

### Виды сил



Говорят, что И. Ньютон сам рассказывал, как он пришел к открытию закона всемирного тяготения. Однажды ученый гулял яблоневым садом и увидел в дневном небе Луну. В этот момент на его глазах с ветки упало яблоко. Ньютон знал, что яблоко упало под действием притяжения Земли. Знал он и о том, что Луна вращается вокруг Земли и, следовательно, есть какая-то сила, удерживающая ее на орбите. Именно тогда к ученому пришла мысль о том, что, возможно, это одна и та же сила заставляет яблоко падать на землю, а Луну оставаться на околоземной орбите.

Ньютон пришёл к выводу, что если бы не сопротивление воздуха, то траектория камня, брошенного с высокой горы с определённой скоростью, могла бы стать такой, что он вообще никогда не достиг бы поверхности Земли, а двигался бы вокруг неё подобно тому, как планеты описывают в небесном пространстве свои орбиты.

Итак, по мнению Ньютона, движение Луны вокруг Земли или движение планет вокруг Солнца – это тоже свободное падение, которое длится, не прекращаясь, миллиарды лет. Причиной такого падения (идёт ли речь действительно о падении обычного камня на Землю или о движении планет по их орбитам) служит сила тяготения.

Можно лишь догадываться о волнении, охватившем Ньютона, когда он пришёл к великому результату: одна и та же причина вызывает явления поразительно широкого диапазона – от падения брошенного камня на землю до движения огромных космических тел.

Ньютон нашёл эту причину и смог точно выразить её в виде одной формулы – закона всемирного тяготения.

Все без исключения физические материальные тела во вселенной притягиваются друг к другу – это явление называют **всемирным тяготением** или **гравитацией** (от лат, *gravitas* – вес).

**Гравитационное взаимодействие** – взаимодействие, присущее всем телам во вселенной и проявляется в их взаимном притяжении друг к другу.

Например, сейчас вы и этот учебник взаимодействуете силами гравитационного притяжения. Однако в этом случае силы настолько малы, что их не фиксируют даже самые точные современные приборы. Силы гравитационного притяжения тел достигают заметного значения только тогда, когда хотя бы одно из тел имеет массу, сравнимую с массой небесных тел.

Гравитационное взаимодействие осуществляется с помощью особого вида материи – гравитационного поля, которое существует вокруг любого тела: звезды, планеты, человека, книги, молекулы, атома и т.д.

Силы взаимного притяжения тел между собой подчиняются закону всемирного тяготения:

**Два любых материальных тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.**

То есть:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2},$$

где  $F$  – сила всемирного тяготения, Н,

$G$  – гравитационная постоянная, равная  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н м}^2/\text{кг}^2$ ;

$m_1$  – масса первого тела, кг;

$m_2$  – масса второго тела, кг,

$R$  – расстояние между телами, м.

Этот закон открыл в 1667 году Исаак Ньютон в Англии.

Гравитационная постоянная  $G$  – одна из фундаментальных констант в физике. Из формулы  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$  следует:  $G = \frac{FR^2}{m_1 m_2}$ .

Если  $m_1 = m_2 = 1 \text{ кг}$ , а  $r = 1 \text{ м}$ , то  $\{G\} = \{F\}$ , то есть гравитационная постоянная численно равна силе гравитационного притяжения двух материальных точек массой 1 кг каждая, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга. В этом и заключается физический смысл гравитационной постоянной.

Впервые гравитационная постоянная была измерена английским физиком Генри Кавендишем в 1798 г. с помощью прибора, называемого

крутильными весами. Схема крутильных весов показана на рисунке 1. На тонкой упругой нити подвешено лёгкое коромысло с двумя одинаковыми грузиками на концах. Рядом неподвижно закреплены два тяжёлых шара. Между грузиками и неподвижными шарами действуют силы тяготения. Под влиянием этих сил коромысло поворачивается и закручивает нить до тех пор, пока возникающая сила упругости не станет равна гравитационной силе. По углу закручивания можно определить силу притяжения. Для этого нужно только знать упругие свойства нити. Массы тел известны, а расстояние между центрами взаимодействующих тел можно непосредственно измерить.

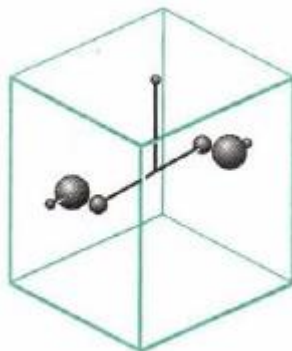


Рисунок 1. Крутильные весы

Из этих опытов было получено следующее значение для гравитационной постоянной:  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ ;

Закон всемирного тяготения – выдающееся достижение естествознания. Он позволяет описать большой круг явлений, в том числе движение естественных и искусственных тел в Солнечной системе, движение двойных звезд, звездных скоплений и тому подобное. В современной астрономии, основываясь на этом законе, вычисляют массы небесных тел, определяют характер их движения, строение, эволюцию.

Каковы границы применения закона всемирного тяготения?

Формула закона всемирного тяготения дает точный результат в таких случаях:

- 1) если размеры тел пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними, то есть когда тела можно считать материальными точками,
- 2) если оба тела имеют шарообразную форму и сферическое распределение вещества; в этом случае за расстояние между телами берут расстояние между центрами сфер;
- 3) если одно из взаимодействующих тел – шар, размеры и масса которого значительно больше, чем размеры и масса второго тела, находящегося на поверхности этого шара или вблизи нее.

**Задача.** Определить значение силы взаимного притяжения двух кораблей, удаленных друг от друга на 100 м, если масса каждого из них 10000 т.

### Сила тяжести.

Если взять в руки, а затем отпустить мяч, то он обязательно упадет. Мяч упадет и если подбросить его вертикально вверх или если, разбежавшись, попробовать закинуть его как можно дальше. Падение тел на землю – результат гравитационного взаимодействия этих тел и Земли.

**Сила тяжести** – сила, характеризующая гравитационное взаимодействие тел с Землей. Сила тяжести – это сила, с которой тело притягивается к Земле. Она численно равна:  $\vec{F} = m\vec{g}$ ,

где  $F$  – сила тяжести, Н;

$m$  – масса тела, кг;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

Согласно закону всемирного тяготения модуль силы тяжести  $F_{\text{тяж}}$ , действующей на любое тело вблизи поверхности Земли, можно вычислить по

формуле:  $F = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2}$ .

С другой стороны,  $F = mg$ .

Сравнив правые части этих выражений, получим формулу для вычисления ускорения свободного падения:  $g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}$ .

Анализируя последнюю формулу, можно сделать ряд выводов.

1. Ускорение свободного падения не зависит от массы тела (этот факт был доказан Галилеем).

2. Ускорение свободного падения уменьшается в случае поднятия тела над поверхностью Земли, причем заметное изменение происходит при поднятии на десятки и сотни километров (если поднять тело на 100 км, ускорение свободного падения уменьшается на  $0,3 \text{ м/с}^2$ ).

3. Если тело находится на поверхности Земли ( $h=0$ ) или вблизи нее ( $h \ll R_3$ ), то ускорение свободного падения вычисляют по формуле:

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2}.$$

Сила тяжести направлена по вертикали к центру Земли, приложена к центру тяжести тела.

В общем случае положение центра тяжести тела можно определить, подвешивая тело поочередно за любые две крайние точки. Для однородного симметричного тела центр тяжести расположен в центре симметрии. Центр тяжести может находиться и вне тела, то есть не совпадать ни с одной из его точек.

### Сила упругости. Закон Гука. Вес тела.

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

При деформации растяжения, смещения, кручения, сжатия тела в нем возникают силы упругости. Деформация называется упругой, если после прекращения действия внешней силы деформация полностью исчезает. Тела, деформация которых сохраняется после прекращения действия силы, называют пластичными. Упругие тела – стальная пружина; пластические – глина, воск.

При малых изменениях формы и объёма тела связь силы упругости тела с этими изменениями проста. Она была установлена экспериментально английским естествоиспытателем, учёным-энциклопедистом Робертом Гуком, современником Исаака Ньютона.

Зависимость силы упругости  $F_{упр}$  от деформации выражается законом

Гука:  $F_{упр} = -kx$ ,

где  $F_{упр}$  – сила упругости, Н;

$x$  – смещение (удлинение), м;

$k$  – жесткость тела (пружины), Н/м.

Коэффициент пропорциональности  $k$  называют **коэффициентом упругости** или **жесткостью**.

Знак «минус» означает, что направление силы упругости противоположно направлению деформации. Величина  $k$  определяется свойствами материала, из которого изготовлено тело.

Если тело расположить на опоре, то опора деформируется (прогнется). Деформация опоры вызывает появление силы упругости, действующая на тело перпендикулярно к поверхности опоры.

Силу упругости, действующую на тело со стороны опоры, называют **силой нормальной реакции опоры** и обозначают символом  $\vec{N}$ .

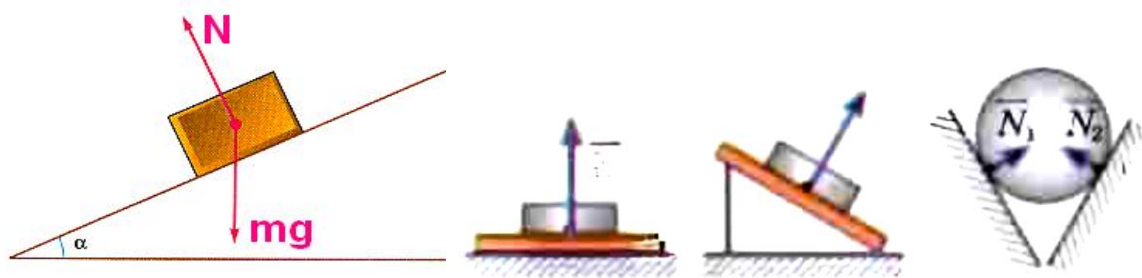


Рисунок 1. Сила реакции опоры

Если тело закрепить на подвесе (нити, жгуте, шнуре), то под действием тела подвес деформируется (растянется) и начнет действовать на тело с определенной силой упругости, направленной вдоль подвеса.

Силу упругости, действующая на тело со стороны подвеса, называют **силой натяжения подвеса** и обозначают символом  $\vec{T}$ .

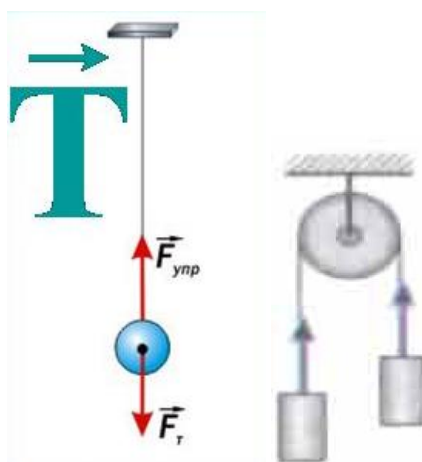


Рисунок 2. Сила натяжения подвеса

### Вес тела.

В результате притяжения к Земле все тела сжимают или прогибают опоры, растягивают подвесы. Сила, которая характеризует такое действие тел, называется **весом**.

**Вес тела**  $\vec{P}$  – это сила упругости, с которой вследствие притяжения к Земле тело действует на горизонтальную опору или вертикальный подвес.

В отличие от силы притяжения, которая приложена к телу, вес приложен к опоре или подвесу. Вес тела и сила тяжести отличаются и своей природой: сила тяжести имеет гравитационную природу; вес тела – это сила упругости, поэтому вес имеет электромагнитную природу.

Если тело находится в покое или движется с постоянной скоростью, то действие силы тяжести и действие силы реакции опоры (силы натяжения

подвеса) компенсируют друг друга – они равны по модулю и противоположно направлены.

Итак, если тело находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, то его вес по значению равен силе тяжести и совпадает с ней по направлению.

**Важно.** Важнейшей особенностью веса является то, что его значение зависит от ускорения, с которым движется опора.

Вес тел, движущихся с ускорением вверх (вниз):

$$P = m(g \pm a);$$

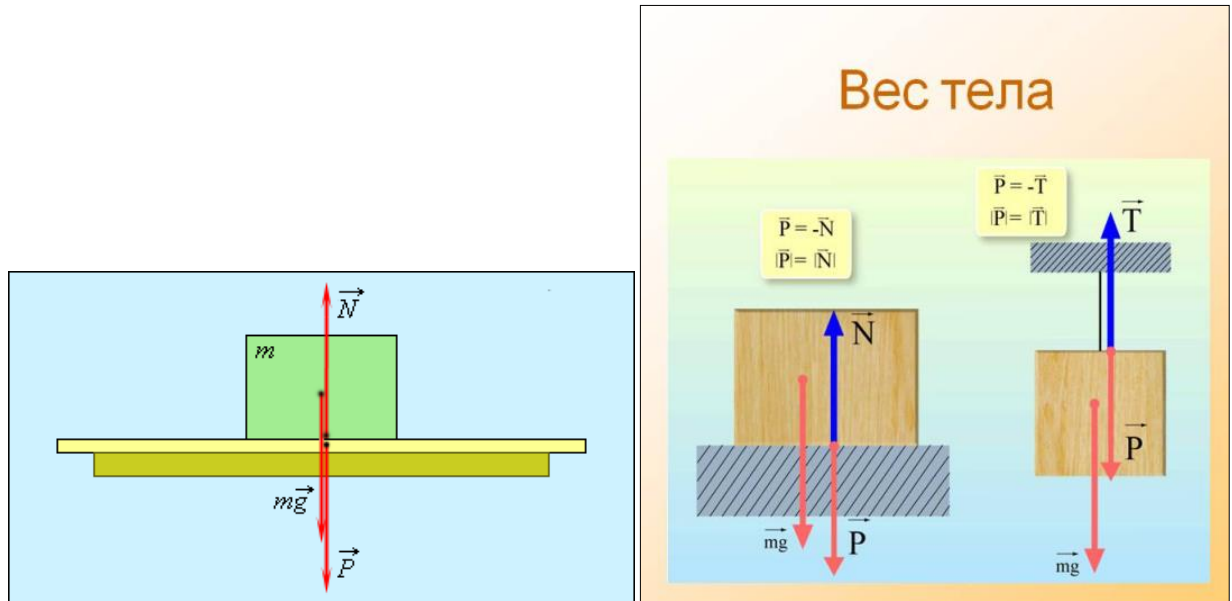


Рисунок 3. Вес тела

Вес тела зависит от ускорения, с которым движется опора, и появление этого ускорения эквивалентно изменению ускорения свободного падения. Если, например, заставить лифт падать свободно, т. е.  $a = g$ , то  $F_l = m(g-g) = 0$ , тело находится в состоянии невесомости.

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

### Силы трения.

Всякое движущееся тело встречает сопротивление своему движению со стороны окружающей среды и других тел, с которыми оно сталкивается во время движения. Иначе говоря, на любое тело действуют силы трения. Природа этих сил может быть разная, но в результате их действия всегда происходит преобразование механической энергии во внутреннюю энергию трущихся тел, то есть в энергию теплового движения их частиц.



Различают два вида внешнего трения: трение кинематическое, которое происходит между движущимися телами, и трения статическое между взаимно неподвижными телами. В зависимости от характера относительного движения статических тел, кинематическое трение подразделяют на трение скольжения, кручения, качения.

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

**Сила трения покоя** – сила, препятствующая телам начинать двигаться. Сила трения покоя направлена всегда против того движения, которое должно было бы возникнуть. Благодаря силе трения покоя человек ходит.

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

Если действующая на покоящееся тело сила хотя бы немного превысит максимальную силу трения покоя, то тело начнёт скользить.

**Важно.** Максимальное значение модуля силы трения покоя пропорционально модулю силы нормальной реакции опоры.

Если обозначить модуль максимальной силы трения покоя через  $F_{тр. max}$ , то можно записать:

$$F_{тр. max} = \mu N$$

где  $\mu$  – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом трения. Коэффициент трения характеризует обе трущиеся поверхности и зависит не только от материала этих поверхностей, но и от качества их обработки. Коэффициент трения определяется экспериментально.

Эту зависимость впервые установил французский физик Ш. Кулон.

**Важно.** Максимальная сила трения покоя не зависит от площади соприкосновения тел.

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

**Сила трения скольжения** – сила трения, возникающая при скольжении одного тела по другому. Одной из основных причин возникновения трения скольжения является шероховатость тел, которые сталкиваются. На обоих соприкасающихся поверхностях есть углубления и выступы.

При движении одной поверхности по второй их выступы ударяются друг о друга и ломаются, поверхность раздробляется. Это создает некоторую силу, которая задерживает движение, всегда направленную против движения.

Сила трения скольжения описывается формулой:

$$F_{тр} = \mu N ,$$

где  $F_{тр}$  – сила трения скольжения, Н;

$\mu$  – коэффициент трения скольжения, зависящий от материала тел и состояния их поверхностей, сталкиваются;

$N$  – сила реакции сопротивления, Н.

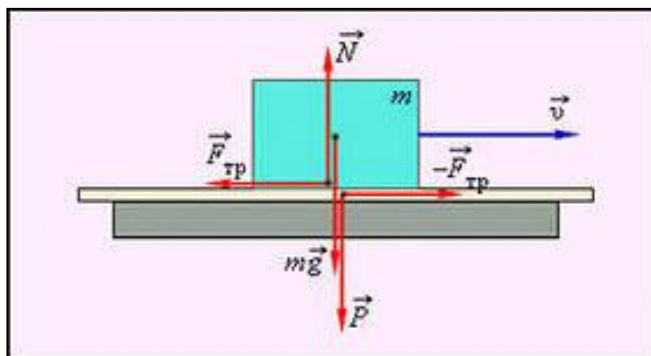


Рисунок 4. Сила трения

**Сила трения качения.** Сила трения качения существенно меньше силы трения скольжения, поэтому гораздо легче перекатывать тяжёлый предмет, чем двигать его.

Сила трения 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.

**Важно.** 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. Это приводит к тому, что усилием рук можно сдвинуть тяжёлое тело, например плавающую лодку, в то время как сдвинуть с места, скажем, поезд усилием рук просто невозможно.

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.

При относительной скорости, равной нулю, сила сопротивления не действует на тело ( $F_c = 0$ ). С увеличением относительной скорости сила сопротивления сначала растёт медленно, а затем всё быстрее и быстрее. При малых скоростях движения силу сопротивления можно считать прямо пропорциональной скорости движения тела относительно среды:

$$F_c = k_1 v,$$

где  $k_1$  – коэффициент сопротивления, зависящий от формы, размеров, состояния поверхности тела и свойств среды – её вязкости. Вычислить коэффициент  $k_1$  теоретически для тел сколько-нибудь сложной формы не представляется возможным, его определяют опытным путём.

При больших скоростях относительного движения сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости:

$$F_c = k_2 v^2,$$

где  $k_2$  – коэффициент сопротивления, отличный от  $k_1$ .

Какую из формул можно использовать в конкретном случае, определяется опытным путём. Например, для легкового автомобиля первую формулу желательно применять приблизительно при 60-80 км/ч, при больших скоростях следует использовать вторую формулу.

### Первая космическая скорость.

Проведем мысленный эксперимент. Представим, что мы стреляем из пушки ядрами в горизонтальном направлении, с каждым выстрелом увеличивая скорость движения ядра. Соответственно каждый раз ядро будет падать все дальше. Если представить, что Земля является плоской, то на этом наш эксперимент можно и закончить: больше ничего интересного не произойдет. Но Земля имеет форму шара, поэтому с каждым выстрелом она все больше и больше «уходит» из-под ядра (рис.2).



Рисунок 2. Движение тела под действием силы тяжести (по рисунку И. Ньютона): снаряды А и В падают на Землю, снаряд С выходит на круговую орбиту, D – на эллиптическую, снаряд Е летит в открытый космос.

Теперь представим, что мы сообщили ядру такую большую скорость, что оно облетело вокруг Земли и вернулось к месту выстрела. Сопротивлением воздуха пренебрегаем, поэтому, облетев вокруг Земли, ядро вернется в исходную точку точно с той же скоростью, с которой было выпущено. При этом ядро не остановится, а будет и дальше двигаться с постоянной скоростью, «наматывая круги» вокруг планеты. Иначе говоря, мы получим искусственный спутник Земли. Спутником может стать любое тело, лишь бы ему предоставить достаточную скорость.

Скорость, которую надо предоставить телу в момент запуска с данной планеты, чтобы тело стало ее искусственным спутником и при этом двигалось бы по окружности, центр которой совпадает с центром этой планеты, называют **первой космической скоростью**.

Различают три космические скорости:

1.  $v_1 = 7,9$  км/с;
2.  $v_2 = 11,2$  км/с;
3.  $v_3 = 16,4$  км/с.

Если скорость тела  $v < v_1$ , то оно падает на Землю. Когда скорость тела  $v_1 \leq v < v_2$ , то тело является спутником Земли. Если скорость тела  $v_2 \leq v < v_3$ , то оно движется в пределах Солнечной системы. В противном случае, когда скорость тела  $v \geq v_3$ , то оно вылетает за пределы Солнечной системы (рис. 3).

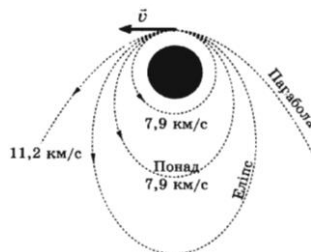


Рисунок 3. Если спутник Земли имеет скорость  $v = 7,9$  км/с (первую космическую скорость), то он движется по круговой орбите; при скорости  $7,9$  км/с  $< v < 11,2$  км/с он движется по эллиптической орбите. Развив скорость  $11,2$  км/с (вторая космическая скорость) спутник Земли преодолет ее притяжения и станет спутником Солнца.

Первую космическую скорость можно рассчитать по формуле:

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3 + h}},$$

где  $M_3$  – масса Земли, равна  $5,96 \cdot 10^{24}$  кг;

$R_3$  – радиус Земли, равный  $6,37 \cdot 10^6$  м;

$h$  – высота над поверхностью Земли, м.

4 октября 1957 был запущен первый спутник Земли.

**Задача.** Найти числовое значение первой космической скорости тела, запущенного с Земли.

Дано:

$$M_3 \text{ (масса Земли)} = 5,96 \cdot 10^{24} \text{ кг}$$

$$R_3 \text{ (радиус Земли)} = 6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$$

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

$$v_1 - ?$$

Решение

Пусть тело находится на некоторой очень малой высоте над поверхностью Земли; при предоставлении ему определенной скорости в горизонтальном направлении тело будет двигаться вокруг Земли по круговой орбите, превратившись в искусственный спутник Земли (это утверждение справедливо, если пренебречь сопротивлением воздуха). Соответствующее значение скорости называется первой космической скорости.

На тело, движущееся по круговой орбите, действует центростремительная сила, величина которой выражается формулой:

$$F_{\text{цс}} = \frac{m v_1^2}{R},$$

где  $m$  – масса тела,

$v_1$  – скорость движения,

$R$  – радиус кривизны траектории.

В данном случае центростремительной силой является сила притяжения тела Землей (сила всемирного тяготения):  $F = G \frac{mM}{R^2}$ ,

где  $M$  – масса Земли,  $G$  – гравитационная постоянная,  $R$  – расстояние тела от центра Земли (равное радиусу кривизны траектории).

Приравнявая выражения для центростремительной силы, получим уравнение:  $\frac{m v_1^2}{R} = G \frac{mM}{R^2}$ , из которого находим выражение для скорости:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M}{R}}$$

Подставим в это выражение числовые значения величин, входящих в него, и, вычисляя, находим:

$$v_1 = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,96 \cdot 10^{24}}{6,37 \cdot 10^6}} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ (м/с)} = 7,9 \text{ (км/с)}.$$

Ответ:  $v_1 = 7,9 \text{ км/с}$ .

## Лекция №7

Импульс тела. Закон сохранения импульса. Механическая работа. Мощность.

План.

1. Импульс тела.
2. Закон сохранения импульса.
3. Механическая работа. Мощность.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Дайте определение импульса тела. В каких единицах его измеряют?
2. Дайте определение импульса силы. В каких единицах его измеряют?
3. Сформулируйте второй закон Ньютона, используя понятие импульса силы и импульса тела.
4. Может ли импульс тела быть равен нулю?
5. Как направлен вектор импульса тела?
6. Как направлен вектор импульса силы?
7. Что можно сказать об импульсе тела, когда сумма сил, приложенных к нему, равна нулю?
8. Какую систему можно считать замкнутой? Приведите примеры.
9. Какие силы называют внутренними силами системы?
10. Сформулируйте закон сохранения импульса.
11. Что такое удар?
12. Какой удар называют абсолютно неупругим? Приведите примеры.
13. Какой удар считают упругим? Приведите примеры.
14. Дайте определение работы в механике.
15. Как рассчитать работу?
16. Может ли совершать работу сила трения покоя?
17. Всегда ли сила трения скольжения совершает отрицательную работу?
18. В каких единицах выражается работа?
19. Какие единицы измерения работы?
20. Какую физическую величину называют мощностью?
21. Как рассчитать мощность? Какова основная единица мощности?

## Импульс тела.

На предыдущих занятиях вы видели, что законы движения (законы Ньютона) позволяют решать задачи механики, когда известные силы, приложенные к телам. Может показаться, что на этом можно было бы закончить изучение механики. Однако во многих случаях законы движения нельзя использовать для решения задач именно потому, что неизвестные силы. Например, когда приходится рассматривать столкновения двух тел – столкновение автомобилей, вагонов или бильярдных шаров, трудно определить значение сил, которые возникают при этом.

В таких случаях для решения задачи применяют последствия из законов движения. При этом появляются новые величины вместо сил и ускорений.

Оказывается, решение многих задач значительно упрощается, если воспользоваться законами сохранения, – законом сохранения импульса и законом сохранения энергии. Эти законы непосредственно вытекают из законов Ньютона, однако открыты они были самостоятельно. Это наиболее общие и универсальные законы не только в механике, но и во всей физике. Сегодня на занятии вы узнаете о законе сохранения импульса.

Вспомним формулу для определения ускорения:  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$  и запишем второй закон Ньютона в виде:  $m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \vec{F}$ .

Умножив обе части равенства на  $t$ , имеем:  $\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0$ .

Произведение  $\vec{F}t$  называют **импульсом силы**. Эта величина одновременно определяет и силу, и продолжительность действия, необходимого для того, чтобы изменить скорость движения тела массой  $m$  от  $\vec{v}_0$  до  $\vec{v}$ .

**Импульс силы** – это векторная физическая величина, равная произведению силы на время ее действия  $\vec{F}t$ .

Единица импульса силы в СИ – ньютон·секунда (Н с).

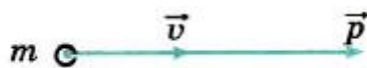
В правой части равенства имеем изменение некоторой величины  $m\vec{v}$ . Эту величину называют импульсом тела или количеством движения.

**Импульс тела** или **количество движения** – это векторная величина, равная произведению массы тела на его скорость:  $\vec{p} = m\vec{v}$ ,  $[\vec{p}] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ .

Единица импульса тела в СИ – килограмм·метр в секунду (кг·м/с).

В отличие от импульса силы импульс тела зависит от выбора СО, так как от выбора СО зависит скорость движения тела.

Импульс – векторная величина. Так как  $m > 0$ , то импульс имеет такое же направление, как и скорость.



Обозначим через  $\vec{p}_1 = mv_1$  импульс материальной точки в начальный момент времени, а через  $\vec{p}_2 = mv_2$  – её импульс в конечный момент времени. Тогда разность  $\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \Delta\vec{p}$  есть изменение импульса материальной точки за время  $\Delta t$ . Уравнение можно записать так:  $m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \vec{F}\Delta t$  или  $\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \vec{F}\Delta t$  или  $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$ .

Так как  $\Delta t > 0$ , то направления векторов  $\Delta\vec{p}$  и  $\vec{F}$  совпадают. Одинаковые изменения импульса могут быть получены в результате действия большой силы в течение малого интервала времени или малой силы за большой промежуток времени.

**Второй закон Ньютона в импульсной форме:** Изменение импульса материальной точки равно импульсу действующей на нее силы.

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$$

Развитие механики показало, что второй закон Ньютона, записанный в импульсном виде, более общий, чем записанный в виде  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , поскольку в импульсном виде он позволяет описывать движение тел переменной массы, например движение ракет.

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

**Импульс тела равен сумме импульсов его отдельных элементов.** Импульс системы тел равен векторной сумме импульсов каждого из тел системы:  $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots$ . Систему тел составляют взаимодействующие тела, движение которых мы рассматриваем.

### Закон сохранения импульса.

При каких условиях систему тел можно считать замкнутой?

Несколько тел, взаимодействующих друг с другом, образуют систему тел. Силы, которые характеризуют взаимодействие тел системы между собой, называют **внутренними силами системы**. Если тела взаимодействуют только внутренними силами, то такую систему тел называют замкнутой.



**Замкнутая система тел** – это такая система тел, на которую не действуют внешние силы, а любые изменения состояния этой системы является результатом действия внутренних сил системы.

Строго говоря, на Земле нельзя найти замкнутую систему тел: на любое тело вблизи поверхности Земли действует сила притяжения, любое движение тела сопровождается трением. Поэтому на практике систему тел считают замкнутой, если внешние силы, действующие на систему, уравновешенные или гораздо меньше внутренних сил системы.

Например, при взрыве снаряда внешние силы, действующие на осколки (сила притяжения и сила сопротивления), во много раз меньше силы взаимодействия  $F$  этих осколков, поэтому во время взрыва систему тел «осколки» можно считать замкнутой.

Если человек толкает ядро с силой  $F$ , стоя на легкоподвижной тележке, то систему тел «человек на тележке – ядро» можно считать замкнутой, поскольку силу притяжения уравновешивает сила нормальной реакции опоры, а сила трения качения незначительна.

Если же человек толкает ядро, стоя на земле, то система тел «человек – ядро» не является замкнутой, так величину силы трения можно сравнить с силой взаимодействия человека и ядра.

Рассмотрим взаимодействие двух тел массами  $m_1$  и  $m_2$  которые образуют замкнутую систему и движутся соответственно со скоростями  $v_1$  и  $v_2$  (рис. 1).

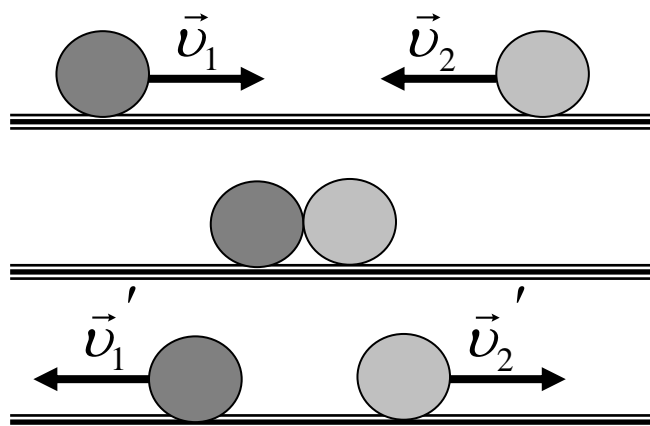


Рисунок 1. Взаимодействие двух тел

В результате взаимодействия, которое длится определенный промежуток времени  $t$ , оба тела изменяют скорости своего движения. Поскольку система замкнута, то причиной изменения скорости являются только силы взаимодействия  $F_{12}$  и  $F_{21}$  – внутренние силы системы.

Пусть в результате взаимодействия тела приобрели скорости  $\vec{v}_1'$  и  $\vec{v}_2'$ .

Запишем для каждого тела второй закон Ньютона:

$$\vec{F}_1 t = m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1$$

$$\vec{F}_2 t = m_2 \vec{v}'_2 - m_2 \vec{v}_2$$

Время взаимодействия  $t$  одинаково для обоих тел, а силы взаимодействия согласно третьему закону Ньютона равны по модулю и противоположными по направлению:  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ .

$$\vec{F}_1 t = m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1$$

$$-\vec{F}_2 t = m_2 \vec{v}'_2 - m_2 \vec{v}_2$$

После преобразований получим:

$$0 = m_1 \vec{v}'_1 - m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}'_2 - m_2 \vec{v}_2$$

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2$$

После взаимодействия импульс каждого тела изменился, однако суммарный импульс системы остался неизменным – он сохранился.

Таким образом, **закон сохранения импульса**:

В замкнутой системе тел геометрическая сумма импульсов тел до взаимодействия равна геометрической сумме импульсов тел после взаимодействия.

Закон сохранения импульса: в замкнутой системе взаимодействующих тел импульс системы не изменяется при любых взаимодействиях тел между собой.

$$\text{Для } n \text{ тел: } m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + \dots + m_n \vec{v}_n = \text{const}$$

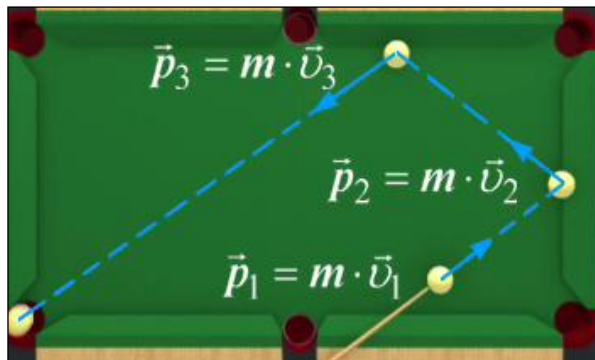
Если внешние силы на систему не действуют или их сумма равна нулю, то импульс системы сохраняется:

$$\Delta \vec{p}_{\text{сист}} = 0, \text{ или } \vec{p}_{\text{сист}} = \text{const.}$$

Полученный результат справедлив для системы, содержащей произвольное число тел:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 + \dots = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 + m_3 \vec{u}_3 + \dots$$

где  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \dots$  – скорости тел до взаимодействия;  $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3, \dots$  – скорости тел после взаимодействия.



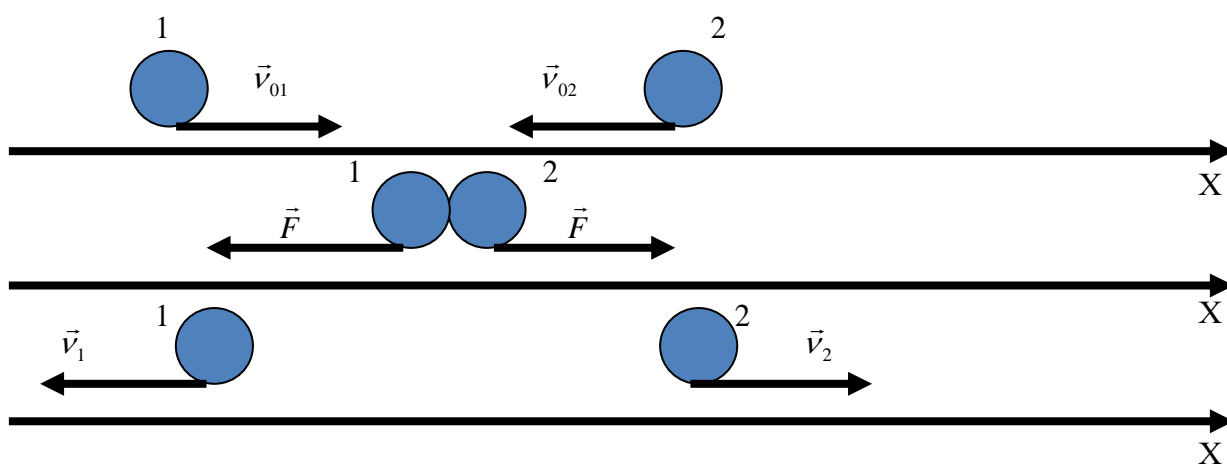
### Абсолютно упругий удар и абсолютно неупругий удар.

Под ударом понимают такое взаимодействие, которое осуществляется мгновенно (за очень малый промежуток времени).

**Абсолютно упругим** называют удар, после которого размеры и форма взаимодействующих тел восстанавливаются, и не происходит преобразование механической энергии во внутреннюю.

До и после удара остается неизменным суммарный импульс системы тел. Для двух тел имеем:

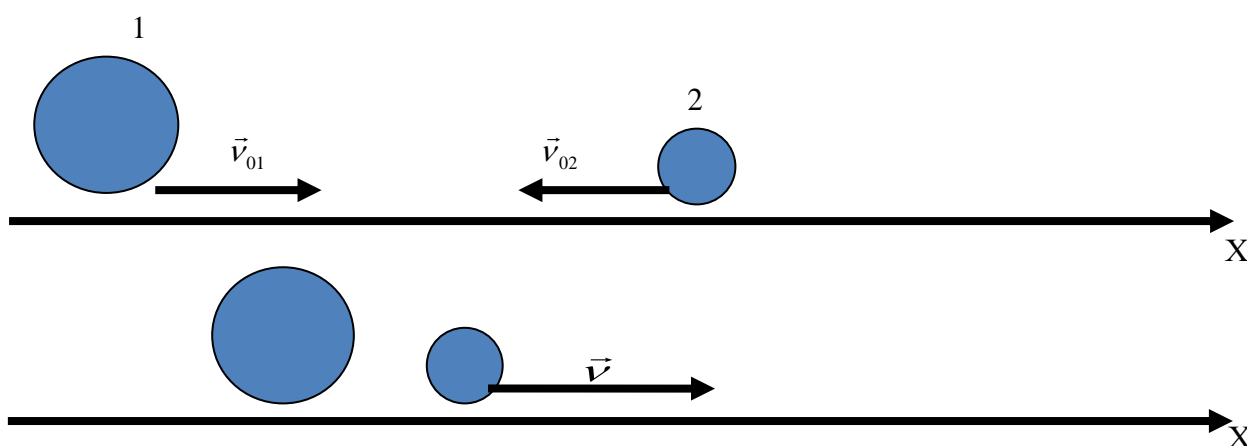
$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$$



**Абсолютно неупругий удар.** Для двух тел имеем

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}$$

При абсолютно неупругом ударе взаимодействующие тела образуют новое тело, масса которого равна сумме масс взаимодействующих тел, взаимодействовали.



С проявлениями закона сохранения импульса мы постоянно встречаемся в природе, технике, быту.

Именно законом сохранения импульса объясняется эффект отдачи огнестрельного оружия, движение беговой дорожки на некоторых

спортивных тренажерах, движение лодки во время передвижения по ней человека и тому подобное.

Импульс, очевидно, сохраняется в изолированной системе тел, так как в этой системе на тела вообще не действуют внешние силы. Но область применения закона сохранения импульса шире.

Обратите внимание:

1) закон сохранения импульса выполняется только для замкнутой системы тел, поэтому, прежде чем применить его для решения задачи, нужно определить, является замкнутой данная система

2) если на систему действуют внешние силы, которые не уравновешены или действием которых нельзя пренебречь, то суммарный импульс системы меняется – это изменение равно суммарному импульсу внешних сил:  $\Delta \vec{P} = \vec{F} \Delta t$ .

3) если даже на тела системы действуют внешние силы, но их сумма равна нулю, то импульс системы всё равно сохраняется.

4) если сумма внешних сил не равна нулю, но сумма проекций сил на какое-то направление равна нулю, то проекция суммарного импульса системы на это направление не меняется.

5) если внешние силы много меньше внутренних сил, то можно считать, что импульс системы сохраняется. Например, при разрыве снарядов силы, разрывающие снаряд, много больше внешней силы тяжести.

### Задачи

1) Импульс грузового автомобиля массой 10 т, движущийся со скоростью 36 км/ч, и легкового автомобиля массой 1 т, движущегося со скоростью 25 м/с.

2) С какой скоростью лететь хоккейная шайба массой 160 г, чтобы ее импульс был равен импульсу пули массой 8 г, летящая со скоростью 600 м/с?

## **Механическая работа. Мощность.**

В повседневной жизни мы очень часто слышим слово «работа», которое означает любую деятельность, которая требует усилий: работой называют и подъем груза, и решение задачи, и любую полезную работу рабочего, ученого, студента. Как видим, слово работа имеет разнообразное значение: для обозначения профессии, для характеристики состояния (холодильник работает).

Народная мудрость гласит: «Куда бы тебя не влекла фантазия и забота, основой бытия твоего есть все-таки работа».

Понятие работы в физике имеет определенный смысл.

Для многих инженерных и технических задач очень важна не только выполненная работа, но также и скорость выполнения этой работы. Потому одну и ту же работу можно выполнить с разной скоростью: например, груз можно поднимать медленно и быстро.

Очень часто в повседневной жизни можно услышать и слово «энергия». Им можно пользоваться для характеристики людей (энергичный), природных явлений, машин, механизмов, бытовых приборов.

Какой же смысл понятий «работа», «энергия» в физике? И как энергия связана с работой? Именно об этом мы с вами поговорим на сегодняшнем занятии.

О механической работе (или работе силы) говорят в том случае, когда происходит движение тела под действием силы. Примеров можно привести много: каждый раз, когда мы сами что-нибудь поднимаем, передвигаем, переносим, выполняется механическая работа. Под действием силы тяжести шарик падает на землю. Говорят, что сила тяжести выполняет работу по перемещению шарика. Пуля в стволе ружья перемещается в результате действия пороховых газов, в результате чего летит на значительное расстояние. Под действием силы упругости, которая возникает при растяжении тетивы лука, стрела приобретает значительную скорость и улетает от лука. Но никто не скажет, что сила тяжести, действующая на неподвижный камень, выполняет работу. Ведь камень не изменяет своего состояния.

Поэтому считают, что работа выполняется только тогда, когда на тело действует сила и оно при этом осуществляет перемещение. Механическая работа является физической величиной, и ее можно рассчитать.

Работа совершается в природе всегда, когда на какое-либо тело в направлении его движения или против него действует сила (или несколько сил) со стороны другого тела (других тел).

Сила тяготения совершает работу при падении капель дождя или камня с обрыва. Одновременно совершает работу и сила сопротивления, действующая на падающие капли или на камень со стороны воздуха. Совершает работу и сила упругости, когда распрямляется согнутое ветром дерево.

Как рассчитывают механическую работу?

Представим себе, что на высоту 2 м надо поднять сначала груз массой 5 кг, а затем – массой 10 кг. Очевидно, что во втором случае должна быть выполнена работа больше, чем в первом, поскольку к телу нужно приложить большую силу. Большая работа будет выполнена и в случае подъема груза на большую высоту, например не в 2 м, а на 4 м.

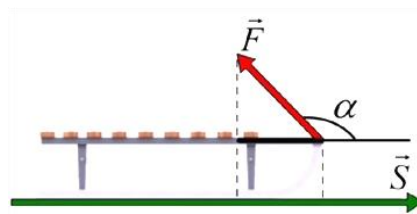
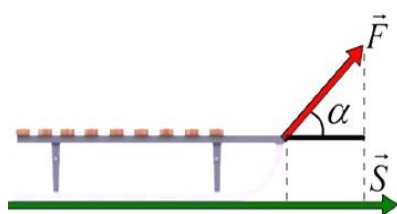
**Механическая работа** – это физическая величина, определяемая скалярным произведением вектора силы на вектор перемещения:  
 $A = \vec{F}\Delta\vec{r} = |\vec{F}||\Delta\vec{r}| \cdot \cos\angle(\vec{F}\Delta\vec{r})$ ,  $[A] = \text{Джс} = 1\text{Н} \times 1\text{м}$ .

Если перемещение тела равна нулю, работа этой силы равна нулю.

Единицей измерения работы в СИ является джоуль (Дж). 1 Дж равен механической работе, которую выполняет сила 1 Н, перемещая тело на 1 м в направлении действия этой силы ( $1\text{Дж} = 1\text{Н} \times \text{м}$ ).

Работа силы, действующей на тело, является величиной скалярной, но она может быть положительной, отрицательной или равной нулю – в зависимости от того, куда направлена сила относительно направления движения самого тела.

Работа постоянной силы равна:  $A = F|\Delta\vec{r}|\cos\alpha$ . Если угол между направлениями векторов силы и перемещения острый – работа положительная, если тупой – сила выполняет отрицательную работу.



Проанализируем общую формулу работы

1. Если угол  $\alpha=0^\circ$ ,  $\cos\alpha=1$ , то работа  $A = F|\Delta\vec{r}|$  и  $A>0$ .
2. Если угол  $\alpha=90^\circ$ ,  $\cos\alpha=0$ , то работа  $A=0$ .
3. Если угол  $\alpha=180^\circ$ ,  $\cos\alpha= -1$ , то работа  $A = -F|\Delta\vec{r}|$  и  $A<0$ .
4. Если сила  $F=0$ , то работа  $A = 0$ .
5. Если перемещение  $=0$ , то работа  $A=0$ .

Работа, $A$	$A = A_{max}$	$A > 0$	$A = 0$	$A < 0$
Угол, $\alpha$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha < 90^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha > 90^\circ$
Рисунок к ситуации				

Важный факт: если на тело действует несколько сил, то проекция равнодействующей силы на перемещение равна сумме проекций отдельных сил:

$$F_r = F_{1r} + F_{2r} + \dots$$

Поэтому для работы равнодействующей силы получаем

$$A = F_{1r}|\Delta \vec{r}| + F_{2r}|\Delta \vec{r}| + \dots = A_1 + A_2 + \dots$$

Если на тело действует несколько сил, то полная работа (алгебраическая сумма работ всех сил) равна работе равнодействующей силы.

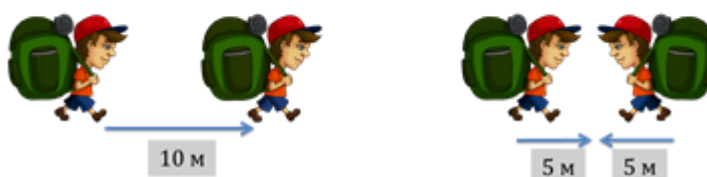
Необходимо отметить, что разделяется два вида работы: **полезная работа и работа совершенная**. Рассмотрим простой пример: один мальчик прошел 10 м, а другой – 5 м и вернулся обратно. Допустим, что оба мальчика затрачивают одинаковую силу на перемещения. При этом оба они прошли 10 м, а, значит, фактически совершили одинаковую работу. Но, вот полезная работа мальчика, который вернулся в исходную, точку равна нулю, поскольку его перемещение равно нулю. Мальчик затратил силы, но добился «нулевого результата»: его положение никак не изменилось.

$$A_c = 10F$$

$$A_n = 10F$$

$$A_c = 10F$$

$$A_n = 0$$

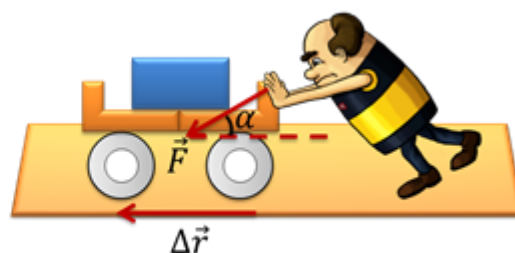


Так вот, в механике, говоря о работе силы, имеют ввиду полезную работу.

**Задача.** Человек толкнул телегу, приложив силу под углом  $45^\circ$  к горизонту. Модуль этой силы равен 120 Н. Пренебрегая

Дано:
$F = 120 \text{ Н}$
$\alpha = 45^\circ$
$\Delta r = 3 \text{ м}$
$A = ?$

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



$$A = 120 \times 3 \times \cos 45^\circ = 255 \text{ Дж}$$

Работа выполняется в течение определенного времени. Простейшие наблюдения показывают, что время выполнения работы может быть разным. Так, студент может подняться на пятый этаж за 1-2 мин, а пожилой человек – не менее чем за 5 мин. Грузовой автомобиль КраЗ перевезет определенный груз на расстояние 50 км за 1 час. Но если этот груз частями начнет

перевозить легковой автомобиль с прицепом, то затратит на это не менее 12 ч.

Для описания процесса выполнения работы, учитывая его скорость, используют физическую величину, которая называется мощностью.

**Мощность** – это скалярная физическая величина, характеризующая скорость выполнения механической работы механизмами и измеряемая отношением работы к тому промежутку времени, за который эта работа выполняется:  $N = \frac{A}{t}$ .

Т. е. мощность – это работа в единицу времени. Единица мощности в СИ – ватт.  $[N] = Вт = 1 \frac{Дж}{с}$

1 Вт – это работа в 1 Дж, совершенная за 1 с.

Существуют и другие единицы измерения мощности, например, такие, как лошадиная сила: **1 л.с. = 735,5 Вт.**

Именно в лошадиных силах чаще всего измеряется мощность двигателя автомобилей.

Если некоторое тело движется с постоянной скоростью  $v$ , то мощность можно вычислить по формуле:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{F|\Delta\vec{r}|\cos\alpha}{t} = Fv\cos\alpha$$

Анализ данной формулы показывает: в случае постоянной мощности двигателя чем больше скорость его вращения, тем меньшую силу тяги он может развить. Например, если автомобиль движется в гору и нужна большая сила тяги, водитель переходит на меньшую скорость и, наоборот: на горизонтальном участке дороги водитель переходит на большую скорость.

Каждый конструктор знает, что для увеличения скорости движения автомобиля, самолета или морского судна нужно, или увеличивать мощность двигателя, или уменьшать силы сопротивления. Поскольку увеличение мощности связано с увеличением расхода топлива, то средствам современного транспорта, как правило, придают специфическую обтекаемую форму, при которой сопротивление воздуха будет наименьшим, а все подвижные части изготавливают так, чтобы сила трения была минимальной.

### **Задачи**

1) Рабочий перевез нагруженную тележку на расстояние 25 м. Прикрепленный к ручке динамометр показал прилагаемую силу 200 Н. Какую работу выполнил рабочий?

2) Автомобиль массой 2 т трогается с места с ускорением  $2\text{ м/с}^2$  и разгоняется на горизонтальном участке дороги со скоростью 20 м/с.



Определите работу силы тяги двигателя автомобиля, если коэффициент сопротивления движению равен 0,01.

3) Кран поднимает равномерно груз массой 5 кг на высоту 10 м за 20 с. Какую мощность развивает кран?

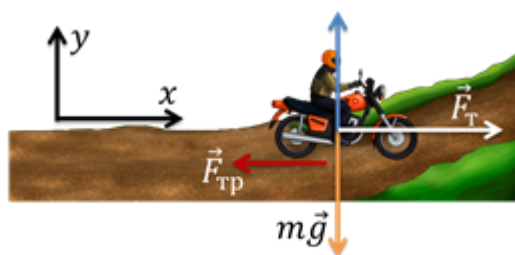
4) Автомобиль едет со скоростью 20 м/с. При этом мотор развивает мощность 20 кВт. Какова сила сопротивления движению? Груз какой массы можно поднять, прикладывая такую силу?

5) Мощность мотоцикла равна 80 л.с. Двигаясь по горизонтальному участку, мотоциклист развивает скорость равную 150 км\ч. При этом, двигатель работает на 75% от своей максимальной мощности. Определите силу трения, действующую на мотоцикл.

Дано:  
 $N = 58840 \text{ Вт}$   
 $v = 41,6 \text{ м/с}$   
 $\eta = 75\%$

$$\left. \begin{array}{l} N = 58840 \text{ Вт} \\ v = 41,6 \text{ м/с} \\ \eta = 75\% \end{array} \right\} \begin{array}{l} N = F_T v \cos \alpha \\ F_T = \frac{N}{v \cos \alpha} \\ F_T = \frac{0,75N}{v \cos \alpha} \end{array}$$

$$F_T = \frac{0,75N}{v} \quad F_{\text{тр}} = F_T = \frac{0,75 \times 58840}{41,6} \approx 1 \text{ кН}$$



$$a = 0 \Rightarrow F_p = 0$$

$$X: F_T = F_{\text{тр}}$$

## Лекция №8

### Механическая энергия. Закон сохранения энергии в механике.

#### План

1. Кинетическая энергия. Потенциальная энергия.
2. Закон сохранения механической энергии.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что означает выражение «Тело (система тел) имеет (имеют) энергию»?
2. Какая единица энергии в СИ?
3. Дайте определение кинетической энергии тела.
4. Сформулируйте теорему об изменении кинетической энергии.
5. Дайте определение потенциальной энергии.
6. По какой формуле определяют потенциальную энергию тела, поднятого над поверхностью Земли?
7. Какую силу называют консервативной?
8. По какой формуле определяют потенциальную энергию упруго деформированного тела?
9. Сформулируйте теорему о потенциальную энергию.
10. В чём состоит сходство и различие между кинетической энергией и потенциальной?
11. Может ли потенциальная энергия быть отрицательной?

## Кинетическая энергия. Потенциальная энергия.

Когда тело (сила) выполняет работу, меняется механическое состояние тела. Например, мяч, который падает, меняет свое состояние – его высота относительно поверхности Земли уменьшается; шар, ударившись о препятствие, останавливается – меняется состояние его движения.

Если тело или система тел могут выполнить работу, то говорят, что они обладают энергией (от греч. *energeia* – деятельность).

**Энергия** – это универсальная мера движения различных форм материи. Понятие энергии распространилось, кроме механического, на другие виды движения. Можно провести аналогию между преобразованием энергии и обменом валют: другие банкноты, другое название, но главное – покупательная способность – остается. Так же и энергия, испытывая преобразования, остается энергией и характеризует способность тела или системы тел выполнять работу.

Выполняя механическую работу, тело или система тел переходят из одного состояния в другое.

**Механическая энергия  $E$**  – это физическая величина, характеризующая способность тела (системы тел) выполнить работу.

Единица энергии в СИ (как и работы) – джоуль (Дж).

Во время выполнения механической работы энергия тела меняется – **механическая работа является мерой изменения энергии тела.**

В физике различают два вида механической энергии: потенциальную и кинетическую.

Энергию подвижного тела называют кинетической энергией.

**Кинетическая энергия  $E_k$**  – это физическая величина, характеризующая движущееся тело, и равная половине произведения массы тела на квадрат скорости его движения.

Кинетическая энергия – это энергия тела, движущегося со скоростью  $v$  относительно неподвижной системы отсчета:  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ .

**Теорема об изменении кинетической энергии:** работа равнодействующей сил, приложенных к телу, равна изменению кинетической энергии тела:  $A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}$ .

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k.$$

Если на точку действует несколько сил, то изменение её кинетической энергии равно алгебраической сумме работ всех сил, действующих на неё:

$$\Delta E_k = A_1 + A_2 + \dots$$

Кинетическая энергия тел зависит только от их масс и скоростей.

Изменение кинетической энергии материальной точки зависит от начальной и конечной скоростей точки и не зависит от того, каким образом изменялась её скорость, под действием каких сил происходило это изменение.

Если тело неподвижно, но на него действует определенная сила, то говорят, что оно имеет потенциальную энергию. Потенциальную энергию имеет тело, поднятое над поверхностью Земли, сжатая пружина, сжатый газ, речная вода в водоеме и т.д.

**Потенциальная энергия  $E_{\text{п}}$**  – это энергия, которой обладает тело вследствие взаимодействия с другими телами или вследствие взаимодействия частей тела между собой.

Все силы, которые встречаются в механике макроскопических тел, принято разделять на консервативные и неконсервативные.

К консервативным силам относятся такие силы, работа которых не зависит от формы пути между двумя точками 1 и 2 (рис.1).

$$A_{1,2}(a) = A_{1,2}(b) = A_{1,2}(c)$$

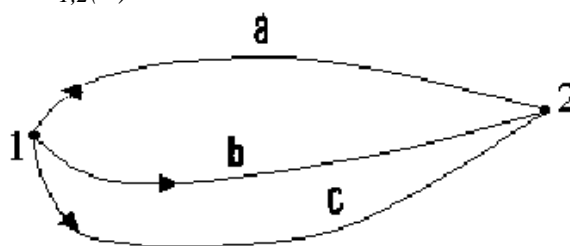


Рисунок 1. Работа консервативных сил

Примером консервативных сил является сила тяжести.

Для консервативных сил справедлива **теорема о потенциальной энергии**: работа всех консервативных сил, действующих на тело, равна изменению потенциальной энергии тела, взятой с противоположным знаком:

$$A = -\Delta E_{\text{п}}$$

Работа силы тяжести при движении вертикально:  $A = -mg(h_1 - h_2)$ .

$E_{\text{п}} = mgh$  – потенциальная энергия тела в поле силы тяжести.

Работа силы тяжести при движении по любой траектории:

$$A = mg(h_1 - h_2)$$

Работа силы упругости:

$$A = -\left(\frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2}\right)$$

$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$  – потенциальная энергия упруго деформированного тела.

Работа силы упругости аналогична работе силы тяжести и зависит от деформации пружины.

При перемещении тела по замкнутой траектории работа силы упругости равна нулю.

Работа силы трения:

$$A = -F_{\text{тр}}s, \text{ так как } \cos 180^\circ = -1$$

**Нулевой уровень потенциальной энергии.** Работа консервативных сил определяет не саму потенциальную энергию, а её изменение.

Поскольку работа определяет лишь изменение потенциальной энергии, то только изменение энергии в механике имеет физический смысл. Поэтому можно произвольно выбрать состояние системы, в котором её потенциальная энергия считается равной нулю. Этому состоянию соответствует нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии.

Ни одно явление в природе или технике не определяется значением самой потенциальной энергии. Важна лишь разность значений потенциальной энергии в конечном и начальном состояниях системы тел.

Выбор нулевого уровня производится по-разному и диктуется условиями данной задачи. Обычно в качестве состояния с нулевой потенциальной энергией выбирают состояние системы с минимальным значением энергии. Тогда потенциальная энергия всегда положительна или равна нулю.

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

У пружины потенциальная энергия минимальна в отсутствие деформации, а у системы «камень – Земля» – когда камень лежит на поверхности Земли. Поэтому в первом случае  $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$ , а во втором случае  $E_{\text{п}} = mgh$ .

Но к данным выражениям можно добавить любую постоянную величину  $C$ . При этом изменение потенциальной энергии, определяемое работой консервативной силы, останется прежним.

**Важно.** Изолированная система тел стремится к состоянию, в котором её потенциальная энергия минимальна.

Если не удерживать тело, то оно падает на землю ( $h = 0$ ); если отпустить растянутую или сжатую пружину, то она вернётся в недеформированное состояние ( $x = 0$ ).

### Задачи

1) Автомобиль массой 1 т увеличил свою скорость от 10 до 20 м/с. Определите работу равнодействующей сил, действующих на автомобиль.

2) Тело массой 1 кг имеет потенциальную энергию 20 Дж. На какую высоту над Землей поднято тело, если ноль отсчета потенциальной энергии находится на поверхности Земли?

3) В процессе растяжения пружины на 2 см выполнена работа 1 Дж. Какую работу необходимо выполнить, чтобы растянуть пружину еще на 2 см?

### **Закон сохранения механической энергии.**

Полная механическая энергия  $E$  равна сумме кинетической и потенциальной энергий тел, входящих в систему:

$$E = E_{\kappa} + E_{\text{п}}.$$

$$A = -(E_n - E_{n0}), \quad A = E_{\kappa} - E_{\kappa0}$$

$$-(E_n - E_{n0}) = E_{\kappa} - E_{\kappa0}$$

$$E_{\kappa0} + E_{n0} = E_{\kappa} + E_n$$

$$E = E_{\kappa} + E_n = \text{const}$$

Последнее равенство представляет собой математическую запись закона сохранения полной механической энергии: в замкнутой системе тел, которые взаимодействуют только консервативными силами, полная механическая энергия остается неизменной (сохраняется):

$$E_{\kappa0} + E_{n0} = E_{\kappa} + E_n$$

Тот факт, что сумма потенциальной и кинетической энергий остается неизменной, гласит: если в замкнутой системе тел работу выполняют только консервативные силы, то на сколько уменьшается потенциальная энергия системы, на столько же увеличивается ее кинетическая энергия, и наоборот. То есть в процессе выполнения работы происходит превращение одного вида механической энергии в другой.

Закон сохранения полной механической энергии предусматривает преобразование кинетической энергии в потенциальную и наоборот. При этом полная механическая энергия остается неизменной.

Закон сохранения полной механической энергии выполняется только в том случае, если в системе отсутствует трение. Однако в природе не существует движений, которые не сопровождалось бы трением. А поскольку сила трения всегда направлена против движения тела, то в процессе движения она выполняет отрицательную работу, при этом полная

механическая энергия системы будет уменьшаться, а работа силы трения будет равна:  $A_{тр} = E_0 - E$

Так как изменение полной энергии системы в рассматриваемом случае согласно уравнению равно нулю, то энергия остаётся постоянной:

$$E = E_k + E_{п} = \text{const.}$$

**Закон сохранения механической энергии.** В изолированной системе, в которой действуют консервативные силы, механическая энергия сохраняется.

Закон сохранения механической энергии является частным случаем общего закона сохранения энергии.

**Общий закон сохранения энергии.** Энергия не создаётся и не уничтожается, а только превращается из одной формы в другую.

Энергия никуда не исчезает и ниоткуда не появляется: она только превращается из одного вида в другой, передается от одного тела к другому.

## Тема 3. Молекулярная физика. Тепловые явления

### Лекция №9

#### Основные положения МКТ.

План.

1. Основные положения МКТ.
2. Размеры молекул.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Сформулируйте основные положения МКТ.
2. Какие наблюдения и эксперименты подтверждают основные положения МКТ?
3. Что такое молекула? атом?
4. Что называют относительной молекулярной массой? Какая формула выражает это понятие?
5. Что такое количество вещества? Какая формула выражает смысл этого понятия? Какова единица количества вещества? Дайте определение этой единицы.
6. Что называют постоянной Авогадро? Чему она равна?
7. Что такое молярная масса вещества? Какая формула выражает смысл этого понятия? Какова единица молярной массы?
8. Установите связь между молярной массой и относительной молекулярной массой вещества.
9. По какой формуле определяют количество молекул в произвольной массе вещества?
10. Что представляет собой броуновское движение? О чем свидетельствует броуновское движение?
11. Что называют диффузией?
12. Какая природа межмолекулярных сил?
13. Что представляет собой сфера молекулярной действия?
14. Как силы взаимодействия между молекулами зависят от расстояния между ними?



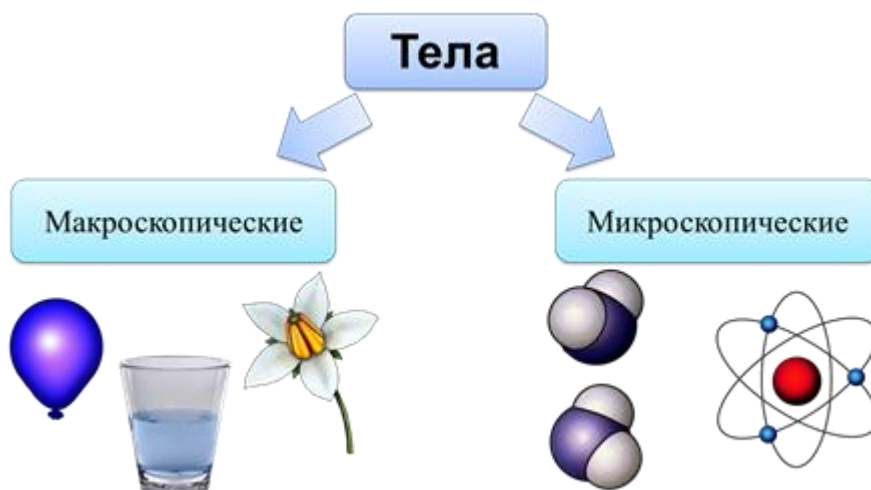
## Основные положения МКТ.

Дадим ряд определений и понятий, которые в дальнейшем будем использовать и уточнять. Сформулируем основные задачи молекулярной физики.

Прежде чем перейти к изучению тепловых явлений, давайте вспомним, что мы изучали ранее. Мы изучали механику и механическое движение. Классическая механика Ньютона изучает перемещение одних тел относительно других в пространстве с течением времени.



Механика изучает движение макроскопических тел, то есть тел, состоящих из огромного числа молекул. Например, воздух в шарике, вода в стакане или цветок – все это макроскопические тела. Мы живём в мире макроскопических тел. Наше тело – это тоже макроскопическое тело.



В физике **макроскопическими телами** называются тела, состоящие из огромного числа молекул.

Газ в баллоне, вода в стакане, песчинка, камень, стальной стержень, земной шар – всё это примеры макроскопических тел.

Механика изучает движение тел, но она не в состоянии объяснить, почему существуют твёрдые, жидкие и газообразные тела и почему эти тела

могут переходить из одного состояния в другое. Исследование внутренних свойств тел не входит в задачу механики.

В механике говорят о силах как причинах изменения скоростей тел, но природа этих сил, их происхождение не выясняются. Остаётся непонятным, почему при сжатии тел появляются силы упругости, почему возникает трение. На многие, очень многие вопросы механика Ньютона ответов не даёт. Это хорошо понимал и сам Ньютон.

Явления, связанные с нагреванием или охлаждением тел, с изменением их температуры, называются **тепловыми**. Тепловые явления, пожалуй – самые заметные после механических. Действительно, ведь мы с детства сталкиваемся с нагреванием или охлаждением тех или иных тел. Например, достаточно нагрев воду, её можно превратить в пар. Или же, наоборот, можно остудить воду настолько, что она превратится в лед. Эти изменения обусловлены изменением ряда параметров тела.

Механическое движение не вызывает в теле каких-либо существенных изменений, если не происходит катастрофических столкновений. Но нагревание или охлаждение тела способно изменить его до неузнаваемости. Сильно нагрев прозрачную, но всё же видимую воду, мы превратим её в невидимый пар. Сильное охлаждение превратит воду в кусок льда. Если вдуматься, то эти явления загадочны и удивительны, они не вызывают нашего изумления лишь потому, что мы привыкли к ним с детства.

Надо найти законы, которые могли бы объяснить изменения в телах, когда сами тела неподвижны и когда с точки зрения механики с ними не происходит ничего. Эти законы описывают особый вид движения материи – тепловое движение, присущее всем макроскопическим телам независимо от того, перемещаются они в пространстве или нет.

Все тела состоят из атомов и молекул. Тепловые явления происходят внутри тел и всецело определяются движением этих частиц. Движение атомов и молекул мало напоминает движение собаки или автомобиля. Атомы и молекулы вещества совершают беспорядочное движение, в котором трудно усмотреть следы какого-либо порядка и регулярности.

Беспорядочное движение молекул называют **тепловым движением**.

К началу нашего века была окончательно построена и подтверждена множеством опытов молекулярно-кинетическая теория состояния вещества. Что же это за теория?

Молекулярно-кинетическая теория даёт объяснение свойств макроскопических тел и тепловых процессов, происходящих в них, на основе представлений о том, что все тела состоят из отдельных беспорядочно движущихся частиц.

Большой вклад в развитие молекулярно-кинетической теории был сделан М. В. Ломоносовым. Он рассматривал теплоту как вращательное движение частиц тела. Важность этой теории для объяснения многих явлений природы трудно переоценить.

Тела, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни, на производстве (особенно твердые и жидкие) почти всегда кажутся нам плотными и однородными. Но многие явления свидетельствуют об ошибочности этих представлений. Так, хорошо известно, что тела при нагревании плавятся и испаряются. Если считать, что вещество имеет сплошное строение, то эти явления невозможно понять и объяснить. Но все эти явления легко объясняются, если предположить, что тела только кажутся сплошными, а на самом деле состоят из большого количества маленьких частиц вещества – молекул, расположенных на некоторых расстояниях друг от друга.

Молекулярно-кинетическая теория даёт объяснение свойств макроскопических тел и тепловых процессов, происходящих в них, на основе представлений о том, что все тела состоят из отдельных беспорядочно движущихся частиц.

**Молекулой** называют наименьшую частицу вещества, которая способна к самостоятельному существованию и сохраняет химические свойства этого вещества.

Молекулы состоят из атомов (от греческого «*atomos*» – неделимый) например, молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода, это записывают следующим образом:  $H_2O$ . Если при любом явлении природы молекулы остаются неизменными, то они сохраняют свои химические свойства. Если эти молекулы меняют свое состояние или распадаются на отдельные атомы, то получаются новые виды вещества с другими химическими и физическими свойствами. Например, молекулы воды можно разложить на атомы водорода и кислорода. Вместо воды мы получим газы: водород и кислород. Пробы химически разложить эти газы на более простые вещества не удалось. Такие вещества, которые нельзя разложить на более простые составляющие части, называют химическими элементами, например, кислород, азот, свинец и др. Каждому химическому элементу сопоставлены атомы, которые занимают свое место в таблице Менделеева.

Опытным подтверждением того факта, что вещества состоят из молекул, между которыми есть промежутки, являются: явление диффузии, изменение объема тела под влиянием внешних воздействий, нагревании, охлаждении.

**Диффузия** – проникновение молекул одного вещества в межмолекулярное пространство другого вещества. Это явление определяется беспорядочным движением молекул. Этим можно объяснить, например, тот факт, что объём смеси воды и спирта меньше объёма составляющих её компонентов.

Как показывает опыты, все газы легко сжимаемы. Это доказывает, что между молекулами газа есть большие свободные промежутки. Жидкости и твердые тела также сжимаемы, но значительно меньше, чем газы. Благодаря взаимному проникновению молекул одного вещества между молекулами другого происходит смешивание различных газов или жидкостей, растворение твердых тел в жидкостях, испарение твердых тел и жидкостей.

Если вещества состоят из молекул, то почему они не распадаются и не разлетаются? Между молекулами существуют силы притяжения, и именно эти силы мы преодолеваем, разбивая, разрезая тот или иной предмет. Однако вернуть разрушенный предмет в первоначальное состояние простым сложением отдельных частей нельзя. Почему? Неужели силы притяжения в этом случае прекращают действовать? На самом деле, дело в том, что они проявляются только на очень маленьких расстояниях. Так, например, обломки стекла не слипаются между собой, но если их края нагреть до размягчения, то их можно соединить между собой.

Тогда возникает вопрос. Если между молекулами действуют силы притяжения, которые способствуют сжатию тела, то почему, чтобы сжать тело, к нему нужно приложить силу. Значит, между молекулами кроме притяжения действуют и силы отталкивания.

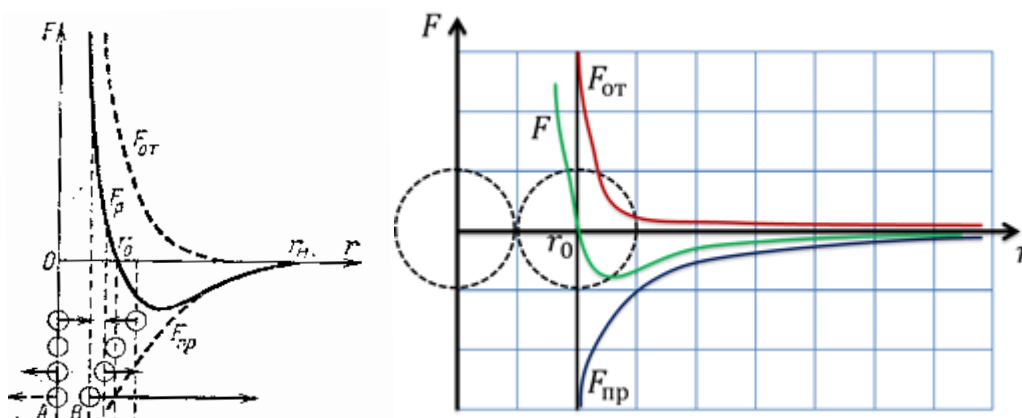


Рисунок 1. График зависимости равнодействующей сил притяжения и отталкивания двух молекул  $A$  и  $B$  от расстояния  $r$  между их центрами.

На рис. изображен график зависимости равнодействующей сил притяжения и отталкивания двух молекул  $A$  и  $B$  от расстояния  $r$  между их центрами. При построении графика силы отталкивания считают

положительными, а силы притяжения – отрицательными. Расстояние  $r_0$  соответствует положению устойчивого равновесия молекул, так как равнодействующая молекулярных сил в этом случае равна нулю. При изменении расстояния между молекулами возникают силы, которые возвращают молекулу в первоначальное состояние. Наименьшее расстояние между молекулами, на котором силы взаимодействия молекул так малы, что ими можно пренебречь, называют **радиусом молекулярного действия**. Он составляет около одного нанометра (1 нм). Если вокруг молекулы описать сферическую поверхность, радиус которой равен радиусу молекулярного действия, то ограниченное этой поверхностью пространство называют **сферой молекулярной действия**. С любой молекулой взаимодействуют только те молекулы, центры которых находятся внутри этой сферы. Расчеты показывают, что при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами газа составляет около 3 нм, в то время как радиус молекулярного действия равен примерно 1 нм.

Если молекулы находятся на расстояниях, превышающих их размеры в несколько раз, то силы взаимодействия практически не сказываются.

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 определённом расстоянии  $r_0$  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.

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

Итак, между молекулами действуют силы притяжения и они участвуют в тепловом движении. Агрегатное состояние вещества определяется тем, какое из этих двух свойств молекул является главным.

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

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

Газы могут неограниченно расширяться. Они не сохраняют ни формы, ни объёма. Многочисленные удары молекул о стенки сосуда создают давление газа.

Молекулы газа 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.

В газах средняя кинетическая энергия теплового движения молекул больше средней потенциальной энергии их взаимодействия, поэтому часто потенциальной энергией взаимодействия молекул мы можем пренебречь.

**Жидкости.** Молекулы жидкости расположены почти вплотную друг к другу поэтому молекула жидкости ведёт 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 положении равновесия сила отталкивания равна силе притяжения, т. е. суммарная сила взаимодействия молекулы равна нулю.

Характер молекулярного движения в жидкостях, впервые установленный советским физиком Я.И. Френкелем, позволяет понять основные свойства жидкостей. По образному выражению учёного: «...молекулы жидкости ведут кочевой образ жизни...» При этом время оседлой жизни молекулы воды, т. е. время её колебаний около одного определённого 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.

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

Жидкости: 1) малосжимаемы; 2) текучи, т. е. не сохраняют своей формы.

Объяснить текучесть жидкостей можно так. Внешняя сила заметно не меняет числа перескоков молекул в секунду. Но перескоки молекул из одного оседлого положения в другое происходят преимущественно в направлении действия внешней силы. Вот почему жидкость течёт и принимает форму сосуда.



В жидкостях средняя кинетическая энергия теплового движения молекул сравнима со средней потенциальной энергией их взаимодействия. Наличие поверхностного натяжения доказывает, что силы взаимодействия молекул жидкостей существенны, и ими пренебрегать нельзя.

**Твёрдые тела.** Атомы или молекулы твёрдых тел, в отличие от атомов и молекул жидкостей, колеблются около определённых положений равновесия. По этой причине твёрдые тела сохраняют не только объём, но и форму

В твёрдых телах средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул много больше средней кинетической энергии их теплового движения.

Если соединить центры положений равновесия атомов или ионов твёрдого тела, то получится правильная пространственная решётка, называемая **кристаллической**.

Внутренний порядок в расположении атомов кристаллов приводит к правильным внешним геометрическим формам.



Если в комнату попадает солнечный луч, то в нем под действием воздуха можно увидеть большое количество пылинок, движущихся непрерывно и хаотично. Чем это можно объяснить?

К числу исследовательских подтверждений молекулярной теории относится явление, которое впервые наблюдал английский ботаник Роберт Броун, рассматривая в микроскоп пыльцу растений.

Английский ботаник Р. Броун (1773-1858) в 1827 г. рассматривал в микроскоп взвешенные в воде споры плауна.

Позже он рассматривал и другие мелкие частицы, в том числе частички камня из египетских пирамид в воде. Эти частички совершают беспорядочное движение. Самым поразительным и непривычным для нас является то, что это движение никогда не прекращается. Мы ведь привыкли к тому, что любое движущееся тело рано или поздно останавливается. Броун вначале думал, что споры плауна проявляют признаки жизни.

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

Сейчас для наблюдения броуновского движения используют частички краски гуммигут, которая нерастворима

Броуновское движение – тепловое движение, и оно не может прекратиться. С увеличением температуры интенсивность его растёт.

На рисунке 2 приведены траектории 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.

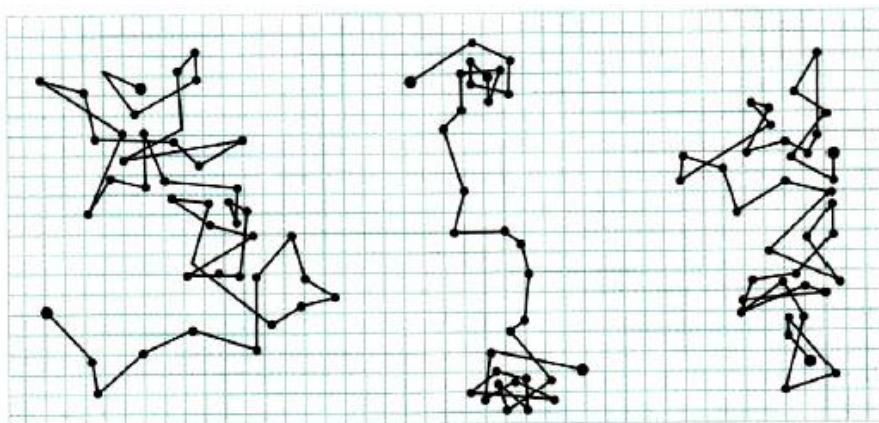


Рисунок 2. Траектории движения броуновских частиц.

Объяснить броуновское движение можно только на основе молекулярно-кинетической теории.

«Немногие явления способны так увлечь наблюдателя, как броуновское движение. Здесь наблюдателю позволяется заглянуть за кулисы того, что совершается в природе. Перед ним открывается новый мир – безостановочная сутолока огромного числа частиц. Быстро пролетают в поле зрения микроскопа мельчайшие частицы, почти мгновенно меняя направление движения. Медленнее продвигаются более крупные частицы, но и они постоянно меняют направление движения. Большие частицы практически толкуются на месте. Их выступы явно показывают вращение частиц вокруг своей оси, которая постоянно меняет направление в пространстве. Нигде нет и следа системы или порядка. Господство слепого случая – вот какое сильное, подавляющее впечатление производит эта картина на наблюдателя». Р. Поль (1884-1976).

Причина броуновского движения частицы заключается в том, что удары молекул жидкости о частицу не компенсируют друг друга.



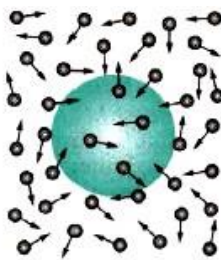


Рисунок 3.

На рисунке 3 схематически показано положение одной броуновской частицы и ближайших к ней молекул.

При беспорядочном движении молекул передаваемые ими броуновской частице 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.

Молекулярно-кинетическая теория броуновского движения была создана в 1905 г. А. Эйнштейном (1879-1955). Построение теории броуновского движения и её экспериментальное подтверждение французским физиком Ж. Перреном окончательно завершили победу молекулярно-кинетической теории. В 1926 г. Ж. Перрен получил Нобелевскую премию за исследование структуры вещества.

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 счёт теплового движения молекулы покидали бы Землю, так как газ способен к неограниченному расширению. В результате действия этих противоположных факторов устанавливается определённое распределение молекул по высоте, т. е. концентрация молекул довольно быстро уменьшается с высотой. Причём 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 тяжёлых 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 нашёл, что эта концентрация убывает с высотой по тому же

закону, что и концентрация молекул газа. Отличие в том, что за счёт большой массы броуновских частиц убывание происходит очень быстро.

Все эти факты свидетельствуют о правильности теории броуновского движения и о том, что броуновские частицы участвуют в тепловом движении молекул.

Вывод: молекулы вещества движутся непрерывно и хаотично.

### **Основные положения молекулярно-кинетической теории состояния вещества:**

- любое вещество состоит из молекул, между которыми есть межмолекулярные промежутки.
- молекулы в веществе непрерывно и хаотично двигаются.
- на небольших расстояниях между молекулами действуют как силы притяжения так и силы отталкивания. Природа этих сил электромагнитная.

### **Размеры молекул.**

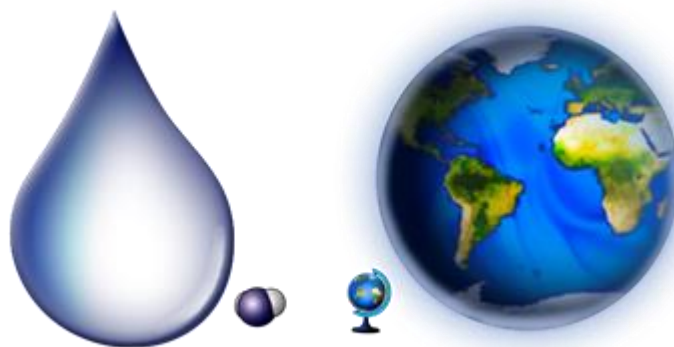
Для полной уверенности в существовании молекул надо определить их размеры. Проще всего это сделать, наблюдая расплывание капельки масла, например оливкового, по поверхности воды. Масло никогда не займёт всю поверхность, если мы возьмём достаточно широкий сосуд. Нельзя заставить капельку объёмом  $1 \text{ мм}^2$  расплыться так, чтобы она заняла площадь поверхности более  $0,6 \text{ м}^2$ . Предположим, что при растекании масла по максимальной площади оно образует слой толщиной всего лишь в одну молекулу – «мономолекулярный слой». Толщину этого слоя нетрудно определить и тем самым оценить размеры молекулы оливкового масла.

Объём  $V$  слоя масла равен произведению его площади поверхности  $S$  на толщину  $d$  слоя, т. е.  $V = Sd$ . Следовательно, линейный размер молекулы оливкового масла равен:

$$d = \frac{0,001 \text{ см}^2}{6000 \text{ см}^2} \approx 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ см.}$$

Размеры молекул, в том числе и оливкового масла, больше размеров атомов. Диаметр любого атома примерно равен  $10^{-8}$  см. Эти размеры так малы, что их трудно себе представить. В таких случаях прибегают к помощи сравнений.

Вот одно из них. Если пальцы сжать в кулак и увеличить его до размеров земного шара, то атом при том же увеличении станет размером с кулак.



При очень малых размерах молекул число их в любом макроскопическом теле огромно. Подсчитаем примерное число молекул в капле воды массой 1 г и, следовательно, объемом  $1 \text{ см}^3$ .

Диаметр молекулы воды равен примерно  $3 \cdot 10^{-8}$  см. Считая, что каждая молекула воды при плотной упаковке молекул занимает объем  $(3 \cdot 10^{-8} \text{ см})^3$ , можно найти число молекул в капле, разделив объем капли ( $1 \text{ см}^3$ ) на объем, приходящийся на одну молекулу:

$$N = \frac{1 \text{ см}^3}{(3 \cdot 10^{-8})^3} \approx 3,7 \cdot 10^{22}.$$

Молекулы такие малые, что представить себе их размеры можно только благодаря сравнению. Приведем один из них: молекула воды во столько раз меньше большого яблока, во сколько раз это яблоко меньше земного шара. Массы молекул также очень малые. Например, масса молекулы кислорода равна  $53,5 \cdot 10^{-27}$  кг, а масса молекулы водорода –  $3,34 \cdot 10^{-27}$  кг. Масса самого легкого в природе атома водорода равна  $1,672 \cdot 10^{-27}$  кг. На практике измерять массы молекул и атомов в килограммах или граммах оказалось неудобным. Для этого была введена еще одна единица измерения – атомная единица массы.

По международному соглашению массы всех атомов и молекул сравнивают с  $1/12$  массы атома углерода (так называемая углеродная шкала атомных масс).

**Атомной единицей массы** называют  $1/12$  массы атома углерода  $\text{C}_{12}$  сокращенно – а.е.м.

Сравнение атомов и молекул с  $1/12$  массы атома углерода было принято в 1961 г. Главная причина такого выбора состоит в том, что углерод входит в огромное число различных химических соединений. Множитель  $1/12$  введен для того, чтобы относительные массы атомов были близки к целым числам.

Масса молекулы, которая выражается в а.е.м., называется **относительная молекулярная масса**  $M_r$ .



## Количество вещества



**Количество вещества** — это величина, характеризующая количество молекул (или атомов), содержащихся в веществе.

$$[ \nu ] = [ \text{моль} ]$$

**Моль** — это количество вещества, в котором содержится столько же молекул (атомов), сколько содержится атомов в 12 г углерода.

В связи с этим, вводится еще одна величина, которая называется молярной массой. Молярная масса — это масса данного вещества, взятого в количестве один моль. Эта величина измеряется в килограммах на моль.

## Молярная масса



**Молярная масса** — это масса данного вещества, взятого в количестве 1 моль:

$$M = m_0 N_A \quad [ M ] = \left[ \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} \right]$$

$$m = m_0 N \quad \frac{m}{M} = \frac{m_0 N}{m_0 N_A} \Rightarrow$$

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

Молярную массу также можно взять из таблицы Менделеева. Только обязательно нужно помнить о том, что в таблице Менделеева молярная масса указана в граммах на моль. Ну и конечно, ни в коем случае нельзя путать относительную молекулярную массу с молярной массой, несмотря на то, что в таблице Менделеева эти величины численно равны.

## Молярная масса и молекулярная масса

$$M_r(O) = 16 \text{ а. е. м}$$

$$M(O) = 16 \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}} = 0,016 \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$$



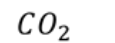
Величина	Обозначение величины	Единицы измерения	Формулы для расчета	Величины, входящие в формулу	Определение
Масса молекулы (атома)	$m_0$	кг	$m_0 = \frac{m}{N}$	$m$ – масса вещества тела; $N$ – число молекул (атомов)	Масса молекулы (атома) – величина, определяемая отношением массы вещества к числу молекул (атомов) в нем.
Относительная молекулярная (атомная) масса	$M_r$		$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_c}$	$m_0$ – масса молекулы; $m_c$ – масса атома углерода	Относительной молекулярной (атомной) массой называют отношение массы молекулы (атома) данного вещества к 1/12 массы атома углерода.
Количество вещества	$\nu$	моль	$\nu = \frac{N}{N_A}$	$N$ – число молекул в теле; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – число атомов в 0,012 кг углерода (постоянная Авогадро)	Количеством вещества называют отношение числа молекул (атомов) в данном теле к числу атомов в 0,012 кг углерода. Моль – количество вещества, содержащее столько же молекул (атомов), сколько содержится атомов в 0,012 кг углерода.
Молярная масса	$M$	кг/моль	$M = m_0 N_A$ $M = \frac{m}{\nu}$	$m$ – масса тела; $\nu$ – количество вещества	Молярной массой вещества называют массу вещества, взятого в количестве 1 моль. Чтобы рассчитать молярную массу, необходимо по химической формуле найти относительную молекулярную массу и полученное число умножить на $10^{-3}$ кг/моль.

При изучении свойств газов с помощью опытов было выяснено, что один моль любого газа при нормальных условиях имеет объем 22,4 л, или  $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ . Количество молекул газа в единице объема при нормальных условиях называют постоянной Лошмидта и обозначают:  $n_{\text{л}} \approx 2,7 \cdot 10^{25} \text{ молекул/ м}^3$ .

Определите массу трех молей углекислого газа.

Дано:

$$\nu = 3 \text{ МОЛЬ}$$



$$m = ?$$

<b>C</b> Carboneum Углерод	6 12.011	<b>O</b> Oxygenium Кислород	8 15.999
----------------------------------	-------------	-----------------------------------	-------------

$$M(O) = 0,016 \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$$

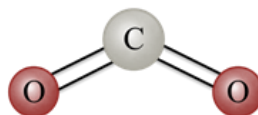
$$M(C) = 0,012 \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$$

$$M(CO_2) = 2 \times 16 + 12 = 44 \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}}$$

$$M(CO_2) = 0,044 \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$$

$$m = M\nu$$

$$m = 0,044 \times 3 = 0,132 \text{ КГ}$$



## Лекция №10

### Идеальный газ. Основное уравнение МКТ газов.

#### План

1. Понятие идеального газа.
2. Основное уравнение МКТ газов.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что представляет собой идеальный газ в МКТ?
2. Назовите условия, при которых газ можно считать идеальным.
3. Какой механизм возникновения давления газа с точки зрения МКТ
4. Какую скорость движения молекул называют средней квадратичной?
5. Что называют концентрацией молекул?
6. Запишите и объясните физический смысл основного уравнения МКТ.
7. Получите формулу, связывающую давление идеального газа и среднюю кинетическую энергию движения молекулы.
8. Как записывается основное уравнение МКТ через средний квадрат скорости молекул газа и его плотность?
9. Какими приборами измеряют давление газа?
10. Каковы особенности основного уравнения идеального газа и почему его называют основным?



## Понятие идеального газа.

Возьмем сосуд с разреженным газом. Будем считать, что в сосуде создан высокий вакуум, то есть молекулы газа беспрепятственно летают между стенками сосуда и только после многих ударов о стенки сосуда иногда сталкиваются друг с другом. У такого разреженного газа расстояния между молекулами в несколько раз превышают их размеры. В этом случае можно пренебречь взаимодействием между молекулами. Собственный объем молекул газа составляет очень маленькую часть от объема, занимающейся газом, поэтому мы можем принять молекулы газа за материальные точки. Такая физическая модель газа получила название идеального газа.

**Идеальный газ** – это теоретическая модель газа, в которой не учитываются размеры молекул (они считаются материальными точками) и их взаимодействие между собой (за исключением случаев непосредственного столкновения).

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 объём, который они занимают, гораздо меньше объёма сосуда.

Напомним, что в физической модели принимают во внимание лишь те свойства реальной системы, учёт которых совершенно необходим для объяснения исследуемых закономерностей поведения этой системы.

Ни одна модель не может передать все свойства системы. Сейчас нам предстоит решить 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.

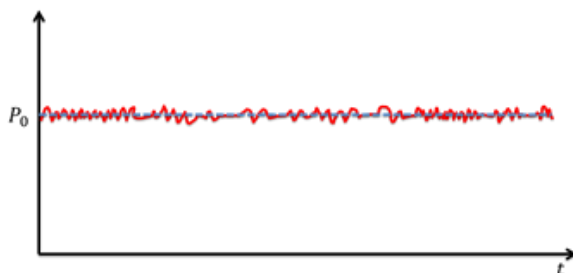
Рассмотрим давление газа на стенки закрытого сосуда. Как вы знаете, давление газа возникает в результате соударений молекул газа со стенками сосуда. Прибор, измеряющий давление, называется манометр.



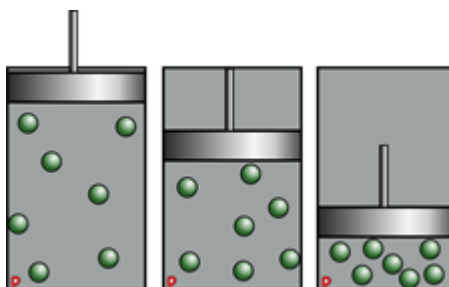
Манометр

Конечно, манометр не может улавливать силу удара отдельных молекул. Манометр регистрирует среднюю по времени силу, которая

действует на единицу площади поверхности. Если мы построим график зависимости давления от времени, то убедимся, что давление постоянно меняется.



Однако наблюдаются не хаотичные скачки давления, а сравнительно небольшие колебания вокруг какого-то среднего значения. Поэтому, давление оказывается вполне определенной величиной. В одном из предыдущих уроков мы убедились, что газы легко сжимаются, но при этом повышается давление. Теперь мы можем в этом ещё раз убедиться: очевидно, что если газ поместить в меньший объём, то количество соударений в единицу времени увеличится. Это увеличит среднюю силу, а, значит, давление тоже увеличится.



Но, чтобы вычислить среднее давление, необходимо знать среднюю скорость молекул. Точнее, как мы убедимся чуть позже, нам нужно знать значение не самой средней скорости, а квадрата средней скорости. Конечно же, проследить за всеми молекулами газа просто невозможно. Их очень много, все они движутся по хаотичной траектории, преодолевая несколько сотен метров в секунду. Но нас не интересует скорость отдельной молекулы. Нас интересует, к какому результату приводит движение всех молекул газа.

Приведем простой пример. Когда повар готовит ужин для большого количества людей, он не знает, кто сколько съест.



Но повар знает какое-то среднее количество еды, которое может съесть за ужином среднестатистический человек, и, исходя из этого, рассчитывает количество еды, которое необходимо приготовить.

Точно также, нам не надо знать скорости отдельных молекул. Нам необходимо знать какое-то среднее значение скорости, и, исходя из него, производить те или иные расчеты.

При невысоких давлениях и не очень низких температурах реальные газы можно считать идеальными. Реальные разреженные газы ведут себя подобно идеальному газу.

Молекула идеального газа, движущегося со скоростью  $v$ , имеет кинетическую энергию  $E_k = \frac{m_0 v_i^2}{2}$ .

Кинетическая энергия идеального газа равна сумме кинетических энергий всех молекул газа:

$$E_k = \frac{m_0}{2} (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2).$$

Разделим общую кинетическую энергию молекул на число молекул:

$$\frac{E_k}{N} = \frac{m_0}{2} \cdot \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}.$$

Величину  $\frac{E_k}{N}$  называют средней кинетической энергией поступательного движения молекулы и обозначают  $\langle E_k \rangle$ .

Величину  $\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N} = \langle v^2 \rangle$  называют средним значением квадрата скорости.

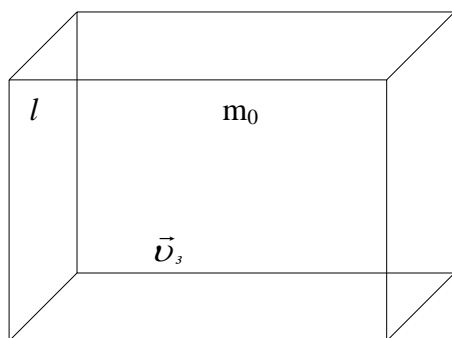
Общее количество молекул в сосуде  $N$ , а через  $\langle v \rangle$  обозначим среднюю квадратичную скорость их движения;

$$\langle v \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N}}.$$

Значит:  $\langle E_k \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$ .

### Основное уравнение МКТ.

Возьмем сосуд в форме куба с ребром  $l$ .



Так как молекулы движутся, то каждая из них имеет импульс:  $m_0\vec{v}$ . Будем считать удары молекул в стенку абсолютно упругими. Тогда, если молекула движется перпендикулярно к стенке сосуда, то при ударе о стенку изменение ее импульса равно:  $\Delta(m_0v) = m_0v - (-m_0v) = 2m_0v$

Такой же по модулю импульс получает и стенка.

Предположим, что молекула беспрепятственно движется между левой и правой стенками сосуда. По второму закону Ньютона имеем:

$$a = \frac{F}{m_0}, \quad a = \frac{\Delta v}{t}, \quad \frac{\Delta v}{t} = \frac{F}{m_0} \quad \Longrightarrow \quad Ft = \Delta(m_0v) = 2m_0v, \quad F = \frac{2m_0v}{t},$$

где  $t$  – время движения молекулы от одной стенки к другой и обратно, то есть  $t = \frac{2l}{v}$ .

$$\text{Значит: } F = \frac{2m_0v^2}{2l} = \frac{m_0v^2}{l}.$$

Вследствие полной хаотичности движения молекул все направления равноправны. Это значит, если у нас в сосуде находится  $N$  молекул, то между двумя противоположными стенками куба по перпендикуляру к ним движется  $1/3$  общего числа молекул.

Сила давления газа на стенку сосуда равна сумме сил ударов отдельных молекул в эту стенку:

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_N = \frac{m_0}{l}(v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2) = \frac{1}{3} \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{l} N.$$

$$\text{Поскольку } p = \frac{F}{S} = \frac{F}{l^2}, \text{ получаем } p = \frac{1}{3} \cdot \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{l^3} N.$$

Заметим, что  $l^3 = V$ ,  $\frac{N}{V} = n$ , где  $n$  – концентрация молекул (количество молекул в единице объема).

$$\text{Таким образом, имеем: } p = \frac{1}{3} m_0 n \langle v^2 \rangle$$

Это уравнение называют **основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов**.

С учетом  $\langle E_k \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$ , уравнение можно переписать в виде:  $p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$

### Задача

Азот, плотность которого равна  $1,3 \text{ кг/м}^3$  при данном давлении, поместили в колбу. Определите давление азота на стенки колбы, если средняя кинетическая энергия его молекул составляет  $35 \times 10^{-22} \text{ Дж}$ .

Дано:

$$\begin{array}{l} \rho = 1,3 \text{ кг/м}^3 \\ \overline{E_k} = 35 \times 10^{-22} \text{ Дж} \\ N_2 \\ \hline p - ? \end{array}$$

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E_k} \quad n = \frac{N}{V}$$

$$V = \frac{m}{\rho} \Rightarrow n = \frac{N}{m/\rho} = \frac{N\rho}{m}$$

$$m = Mv \quad N = \nu N_A$$

$$n = \frac{\nu N_A \rho}{Mv} = \frac{N_A \rho}{M}$$

$$p = \frac{2}{3} \frac{N_A \rho}{M} \overline{E_k}$$



$$M(N) = 14 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

$$M(N_2) = 2M(N) = 28 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

$$p = \frac{2}{3} \times \frac{6,02 \times 10^{23} \times 1,3}{0,028} \times 35 \times 10^{-22} \approx 65,2 \text{ кПа}$$



## Лекция №11

### Температура. Уравнение состояния идеального газа. Газовые законы.

#### План.

1. Макроскопические параметры системы.
2. Температура и тепловое равновесие. Понятие абсолютной температуры.
3. Уравнение состояния идеального газа.
4. Газовые законы.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Какие тела называют макроскопическими?
2. Какие величины характеризуют состояния макроскопических тел?
3. Как зависит интенсивность теплообмена между двумя телами от разности их температур?
4. Каковы отличительные признаки состояний теплового равновесия?
5. В чём преимущество использования разреженных газов для измерения температуры?
6. Что такое температура? Как называется прибор для измерения температуры?
7. Кто сконструировал первый термометр? Какие виды термометров вы знаете?
8. Перечислите известные вам шкалы для измерения температур.
9. Чему равен абсолютный нуль температуры по шкале Цельсия?
10. Какие преимущества имеет абсолютная шкала температур по сравнению со шкалой Цельсия?
11. Каков физический смысл постоянной Больцмана?
12. Как зависит от температуры средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа?
13. Как зависит средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул от их массы?

14. Каким уравнением связана абсолютная температура и давление идеального газа?
15. Какая температура тела здорового человека, если ее выразить в градусах Кельвина?
16. Какие термодинамические параметры используют для того, чтобы описать состояние идеального газа?
17. Какое уравнение связывает между собой все три термодинамические параметры?
18. Что называют уравнением состояния?
19. Какая форма уравнения состояния содержит больше информации: уравнение Клапейрона или уравнение Менделеева-Клапейрона?
20. Почему газовая постоянная  $R$  называется универсальной?
21. Какие процессы называют изопроцессами?
22. Что называют газовым законом?
23. Охарактеризуйте изотермический процесс.
24. Охарактеризуйте изобарный процесс.
25. Охарактеризуйте изохорный процесс.
26. Изобразите график изотермического процесса в координатах  $(V, T)$  и  $(p, T)$ .
27. Изобразите график изобарного процесса в координатах  $(p, T)$  и  $(p, V)$ .
28. Изобразите график изохорного процесса в координатах  $(V, T)$  и  $(p, V)$ .

## Макроскопические параметры системы.

Все тела состоят из большого количества молекул. Такие тела называют макроскопическими телами или макроскопическими системами (мел, воздух в аудитории). Для описания свойств газа можно пользоваться величинами, характеризующими молекулярный мир (микромир), например энергией молекулы, скоростью ее движения, массой и т.д. Числовые значения таких величин мы можем определить только с помощью расчетов. Все такие величины принято называть **микроскопическими** величинами. Однако для описания процессов в газах и других макроскопических телах нет необходимости все время обращаться к молекулярно-кинетической теории. Поведение макроскопических тел можно охарактеризовать небольшим числом физических величин, относящихся не к отдельным молекулам, из которых состоит тело, а ко всем молекулам в целом. Числовые значения таких величин находят измерением с помощью приборов. К числу таких величин относят объем  $V$ , давление  $p$ , температуру  $t$ .

Величины, которые имеют смысл только для систем, состоящих из большого числа частиц, называют **макроскопическими** величинами (макропараметрами).

Основное уравнение МКТ  $p = \frac{1}{3} m_0 n \langle v^2 \rangle$  связывает макроскопическую величину – давление – с микроскопическими параметрами:  $m_0$ ,  $\langle v \rangle$ .

Макроскопические параметры, однозначно характеризующие состояние газа, называют **термодинамическими параметрами**.

### Температура и тепловое равновесие. Понятие абсолютной температуры.

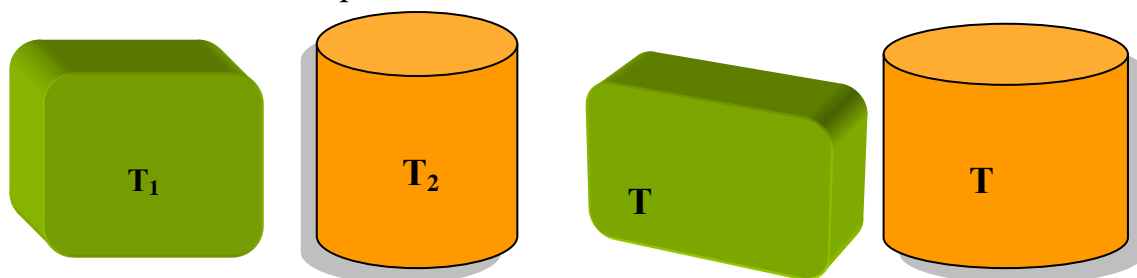
Термометрами пользуются все. А что они измеряют? Конечно температуру. Однако это еще не ответ. Что означают слова: «Я измерил температуру тела». Что именно характеризует температура?

Всем известно, что в повседневной жизни мы, касаясь того или иного тела, можем определить, какое тело нагрето сильнее, то есть, какое из тел имеет большую температуру. Температура характеризует степень нагретости тела (холодное, тёплое, горячее).

При соприкосновении двух тел, нагретых по-разному (тепловом контакте), они обмениваются энергией. Если при этом одно из них передает энергию другому, то считают, что первое тело имеет большую температуру, чем второе. Если тела при соприкосновении не обмениваются энергией, то



им приписывается одинаковая температура. В этом случае говорят, что тела находятся в тепловом равновесии.



### Тепловое равновесие

Любое макроскопическое тело или группа макроскопических тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние теплового равновесия.

У обоих тел могут быть разные давления, объемы и температуры. После установления теплового равновесия все параметры могут оставаться разными, но температура у обоих тел одинакова. Но микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии: меняются положения молекул, их скорости при столкновениях.

**Температура** – это параметр, который однозначно характеризует состояние теплового равновесия.

Температуру измеряют с помощью термометра. Термометр – это тело, которое находится в тепловом контакте с другим телом, температуру которого измеряют.

Первым, кто пытался измерить температуру, был Галилео Галилей. К изучению тепловых явлений он подошел с позиции механической природы тепла. Термометр, который сконструировал Галилей (около 1597 г.), состоял из стеклянного шара, наполненного воздухом; от нижней части шара отходила трубка, частично заполненная водой, которая заканчивалась в сосуде, также наполненном водой. Высота столбика зависела как от температуры, так и от атмосферного давления, и измерять таким термометром температуру более или менее точно было невозможно. В эти времена сама идея, что воздух может давить на землю, казалась довольно дикой. Поэтому термометр Галилея измерял достаточно неопределенную величину, но даже такой термометр позволял сравнивать температуру различных тел в одно и то же время в одном и том же месте.

Уже тогда с помощью еще несовершенного термометра врач и анатом Санкториус с Падуанского университета начал измерять температуру человеческого тела. Для этого он сам, не зная о Галилее, сконструировал похожий термометр.

История термометра многим обязана деятелю 18 века Отто фон Герике. Он сконструировал сравнительно хороший термометр, который состоял из латунной пули, заполненной воздухом, и изогнутой в форме буквы U трубки со спиртом. В его термометре в середине шкалы стояла точка, у которой указатель останавливался при первых заморозках, – эта точка, которую Герике выбрал за начало шкалы. Понятно, что такой выбор был условный, но все-таки Герике сделал первый шаг.

Упомянем еще и работу Ньютона «О шкале степеней тепла и холода», опубликованную в 1701 г., в которой описана 12-ти градусная шкала. Ноль он поместил там же, где помещаем его сейчас и мы, – в точке замерзания воды, а 12 градусов соответствовали температуре здорового человека.

Первый современный термометр был описан в 1724 г. Даниэлем Фаренгейтом, стеклодувом из Голландии. Различные термометры Фаренгейта можно было сверять друг с другом, сравнивая их показания в разных «опорных» точках шкалы. Поэтому они прославились своей точностью. Такая шкала используется в Англии и США.

В 1742 г. А. Цельсий опубликовал работу с описанием стоградусной шкалы термометра, в которой температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении была принята за  $0^{\circ}$ , а температура таяния льда — за  $100^{\circ}$ . Позже шведский биолог К. Линней «перевернул» эту шкалу, приняв за  $0^{\circ}$  температуру таяния льда. Этой шкалой мы пользуемся до сих пор, называя её шкалой Цельсия.

Если принять за основу интервал температур между реперными точками плавления льда и кипения воды, обозначив их соответственно 0 и 100 градусов, в пределах этих температур измерить объемное расширение какого-либо рабочего вещества, например ртути, находящейся в узкой цилиндрической стеклянной посуде, и разделить на 100 равных частей изменение высоты ее столба, то в результате будет построена так называемая температурная шкала.

При измерении температуры на практике чаще всего используют зависимость объема жидкости от температуры. За нуль принимают температуру плавления льда; второй постоянной точкой считают температуру кипения воды (100) при нормальном атмосферном давлении.

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

Было замечено, что в отличие от жидкостей все разреженные газы 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 изменении объема газа при постоянном давлении.

Пользуясь вторым законом термодинамики, английский физик Кельвин в 1848 г. предложил очень точную и равномерную, не зависящую от свойств рабочего вещества, шкалу. Такую шкалу называют **идеальной газовой шкалой температур (абсолютной (термодинамической) температурной шкалой, шкалой Кельвина)**.

При установлении идеальной газовой шкалы температур удаётся избавиться ещё от одного существенного недостатка шкалы Цельсия – произвольности выбора начала отсчёта, т. е. нулевой температуры.

**Газы в состоянии теплового равновесия.** Рассмотрим следующий опыт. Возьмём несколько сосудов, заполненных различными газами, например водородом, гелием и кислородом. Сосуды имеют определённые объёмы и снабжены манометрами. Это позволяет измерить давление в каждом сосуде. Массы газов известны, тем самым известно число молекул в каждом сосуде.

Приведём газы в состояние теплового равновесия. Для этого поместим их в тающий лёд и подождём, пока не установится тепловое равновесие и давление газов перестанет меняться (рис. 1). После этого можно утверждать, что все газы имеют одинаковую температуру  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Давления газов  $p$ , их объёмы  $V$  и число молекул  $N$  различны.

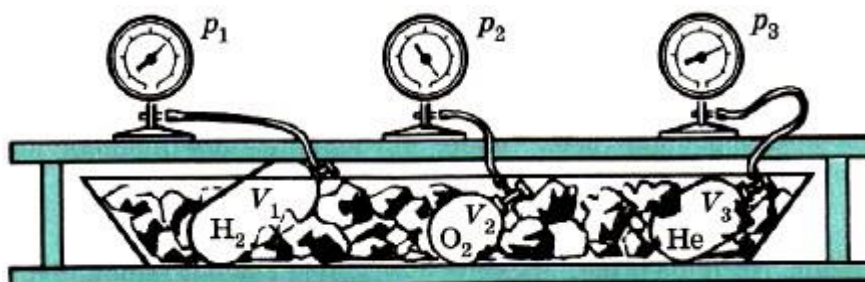


Рисунок 1

Найдём отношение  $\frac{pV}{N}$  для водорода. Если, к примеру, водород, количество вещества которого равно 1 моль, занимает объём  $V_{\text{H}_2} = 0,1\text{ м}^3$ , то при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  давление оказывается равным  $p_{\text{H}_2} = 2,265 \cdot 10^4\text{ Па}$ . Отсюда

$$\frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{A}}} = \frac{2,265 \cdot 10^4 \cdot 0,1\text{ Н} \cdot \text{м}^3}{6,02 \cdot 10^{23}\text{ м}^2} = 3,76 \cdot 10^{-21}\text{ Дж.}$$

Если взять водород в объёме, равном  $kV_{\text{H}_2}$ , то и число молекул будет равно  $kN_A$  и отношение  $\frac{p_{\text{H}_2} kV_{\text{H}_2}}{kN_A}$  останется равным  $3,76 \cdot 10^{-21}$  Дж.

Такое же значение отношения произведения давления газа на его объём к числу молекул получается и для всех других газов при температуре тающего льда. Обозначим это отношение через  $\Theta_0$ . Тогда

$$\frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_A} = \frac{p_{\text{He}} V_{\text{He}}}{N_{\text{He}}} = \frac{p_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2}}{N_{\text{O}_2}} = \Theta_0.$$

Средняя кинетическая энергия  $\bar{E}$ , а также давление  $p$  в состоянии теплового равновесия одинаковы для всех газов, если их объёмы и количества вещества одинаковы или если отношение  $\frac{pV}{N} = \text{const}$ .

Если же сосуды с газами поместить в кипящую воду при нормальном атмосферном давлении, то согласно эксперименту отношение  $\frac{pV}{N}$  по-прежнему будет одним и тем же для всех газов, но больше, чем предыдущее:

$$\frac{pV}{N} = \Theta_{100} = 5,14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж.}$$

Можно, следовательно, утверждать, что величина  $\Theta$  растёт с повышением температуры. Более того,  $\Theta$  ни от чего, кроме температуры, не зависит. Ведь для идеальных газов  $\Theta$  не зависит ни от рода газа, ни от его объёма или давления, а также от числа частиц в сосуде. Этот опытный факт позволяет рассматривать величину  $\Theta$  как естественную меру температуры, как параметр газа, определяемый через другие макроскопические параметры газа. В принципе можно было бы считать температурой и саму величину  $\Theta$  и измерять температуру в энергетических единицах – джоулях. Однако, во-первых, это неудобно для практического использования (температуре  $100^\circ\text{C}$  соответствовало бы очень малое значение – порядка  $10^{-21}$  Дж), а во-вторых, и это главное, уже давно температуру принято выражать в градусах.

Вместо температуры  $\Theta$ , выражаемой в энергетических единицах, введём температуру, выражаемую в привычных для нас градусах.

Будем считать величину  $\Theta$  прямо пропорциональной температуре  $T$ , измеряемой в градусах:

$$\Theta = kT,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Определяемая равенством температура называется **абсолютной**.

Такое название, как мы сейчас увидим, имеет достаточные основания. Учитывая выше приведенное определение, получим

$$\frac{pV}{N} = kT$$

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

Температура, определяемая этой формулой, 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 объём  $V$  равны нулю.

Предельную температуру, при которой давление идеального газа обращается в нуль при фиксированном объёме или при которой объём идеального газа стремится к нулю при неизменном давлении, называют **абсолютным нулём температуры**.

Это самая низкая температура в природе, та «наибольшая или последняя степень холода», существование которой предсказывал Ломоносов. Отметим важнейший факт: абсолютный нуль температуры недостижим!

Английский учёный У. Томсон (лорд Кельвин) (1824–1907) ввёл абсолютную шкалу температур. Нулевая температура по абсолютной шкале (её 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).

Определим коэффициент  $k$  так, чтобы изменение температуры на один кельвин (1 К) было равно изменению температуры на один градус по шкале Цельсия (1 °С).

Коэффициент  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К называется **постоянной Больцмана** в честь Л. Больцмана, одного из основателей молекулярно-кинетической теории газов.

Постоянная Больцмана связывает температуру  $\Theta$  в энергетических единицах с температурой  $T$  в кельвинах. Это одна из наиболее важных постоянных в молекулярно-кинетической теории.



**Л. Больцман**  
(1844—1906)

Зная постоянную Больцмана, можно найти значение абсолютного нуля по шкале Цельсия.

$$T = \frac{PV}{Nk}$$

Рассчитаем по полученной формуле абсолютную температуру:

$$T = \frac{101300 \text{ Па} \cdot 22,4 \cdot 10^3 \text{ м}^3}{6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \approx 273 \text{ К}$$

Один кельвин и один градус шкалы Цельсия совпадают. Поэтому любое значение абсолютной температуры  $T$  будет на 273 градуса выше соответствующей температуры  $t$  по Цельсию:  $T \text{ (К)} = (t + 273) \text{ (}^\circ\text{C)}$ .

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

На рисунке 2 для сравнения изображены абсолютная шкала и шкала Цельсия. Абсолютному нулю соответствует температура  $t = -273 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Рисунок 2

Термодинамическая температурная шкала начинается с абсолютного нуля и в настоящее время является основной.

На Генеральной конференции по мерам и весам Международный комитет принял новую практическую температурную шкалу (1968 г.), градусы которой отмечаются знаком  $^\circ\text{C}$  (градус Цельсия), а условное значение температуры – буквой  $t$ . Для этой шкалы градус Цельсия равен градусу Кельвина.

Кроме Международной практической температурной шкалы существует еще шкала Фаренгейта, предложенная в 1715 г. Шкала построена путем деления интервала между реперными точками плавления льда и кипения воды на 180 равных частей (градусов), обозначенных знаком  $^\circ\text{F}$ . По этой шкале точка плавления льда равна  $32^\circ\text{F}$ , а кипения воды  $212^\circ\text{F}$ .

Для перечисления температуры, выраженной в градусах Кельвина или градусах Фаренгейта, в градусы Цельсия пользуются уравнением

$$t \text{ } ^\circ\text{C} = T \text{ } \text{K} - 273,15 = 0,556 (t \text{ } ^\circ\text{F} - 32).$$

**Абсолютная температура** – физическая скалярная величина, которая является мерой средней кинетической энергии хаотического поступательного движения молекул.

$$\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \langle E_k \rangle; \quad \frac{pV}{N} = kT; \quad kT = \frac{2}{3} \langle E_k \rangle \rightarrow \langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} kT \quad T = \frac{2\overline{E_k}}{3k}$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.

Чем выше температура, тем быстрее движутся молекулы. Соотношение 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 твёрдых тел, где атомы могут лишь колебаться возле положений равновесия в узлах кристаллической решётки. При приближении температуры к абсолютному нулю энергия теплового движения молекул приближается к нулю, т. е. прекращается поступательное тепловое движение молекул.

$$p = nkT$$

где  $p$  – давление газа;  $n$  – концентрация молекул идеального газа;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура газа.

Соотношение  $p = nkT$  показывает, что газы с одинаковыми значениями температуры и давления имеют одинаковые концентрации (закон Авогадро).

**Закон Авогадро:** в равных объемах газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул.

Давление смеси газов равно сумме давлений каждого из газов:

$$p = n_1kT + n_2kT + \dots + n_nkT = p_1 + p_2 + \dots + p_n,$$

где  $p_1, p_2, \dots, p_n$  – давление, которое оказывает каждый газ отдельно от других и называется **парциальным**. Полученное соотношение для давления смеси газов называется **закона Дальтона**. Теперь мы убедились, что основное уравнение МКТ газов называют основным, поскольку из него выводятся газовые законы.



### Задача

При температуре 200 К средняя скорость молекул одного моля неизвестного газа равна 500 м/с. Считая этот газ идеальным, определите его молярную массу.

Дано:

$$T = 200 \text{ К}$$

$$\bar{v} = 500 \text{ м/с}$$

$$\nu = 1 \text{ моль}$$

$$M - ?$$

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} kT$$

$$\overline{E_k} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$$

$$m_0 \bar{v}^2 = 3kT \quad M = m_0 N_A$$

$$\frac{M}{N_A} \bar{v}^2 = 3kT \quad m_0 = \frac{M}{N_A}$$

$$M = \frac{3kTN_A}{\bar{v}^2} = 0,02 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 20 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$



### Уравнение состояния идеального газа.

Основное уравнение МКТ газов  $p = \frac{1}{3} nm \langle v^2 \rangle$  устанавливает связь между микроскопическими величинами и макроскопической величиной – давлением.

Уравнение, связывающее три макроскопических параметра  $p$ ,  $V$  и  $T$ , называют **уравнением состояния идеального газа**.

$$p = nkT; \quad pV = NkT; \quad N = \frac{m}{M} N_A \quad pV = \frac{m}{M} N_A kT$$

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

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Произведение  $kN_A = R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – универсальная газовая

постоянная.

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R = \text{const} \quad pV = \frac{m}{M} RT \quad \text{или} \quad pV = \nu RT$$

$$\frac{pV}{T} = \text{const} - \text{уравнение Менделеева-Клапейрона.}$$

Для данной массы газа, как бы ни менялись его давление, объем и температура, произведение давления на объем, разделенный на абсолютную температуру, есть величина постоянная.

Часто уравнение состояния идеального газа записывают в виде



$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}; \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = const$$

Уравнение состояния в форме  $pV = \frac{m}{M}RT$  было впервые получено великим русским учёным Д. И. Менделеевым. Его называют **уравнением Менделеева-Клапейрона**.

Уравнение состояния в форме  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$  называется **уравнением Клапейрона** и представляет собой одну из форм записи уравнения состояния.

Б. Клапейрон в течение 10 лет работал в России профессором в институте путей сообщения. Вернувшись во Францию, участвовал в постройке многих железных дорог и составил множество проектов по постройке мостов и дорог.

Его имя внесено в список величайших учёных Франции, помещённый на первом этаже Эйфелевой башни.



### **Задача 1**

Как изменится температура идеального газа, если его давление увеличилось в 3 раза, а объем уменьшился в 2 раза?

Дано:	$P_0 V_0 = \nu_0 R T_0$
$\frac{P}{P_0} = 3$	$PV = \nu RT$
$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{2}$	$\frac{PV}{P_0 V_0} = \frac{\nu RT}{\nu_0 R T_0}$
$\frac{T}{T_0} = ?$	$\frac{PV}{P_0 V_0} = \frac{T}{T_0}$
	$\frac{3}{2} = \frac{T}{T_0}$

### **Задача 2**

Кислород находится в баллоне при температуре 25 °С. Давление в баллоне составляет 2 атм. Найдите плотность кислорода при таких условиях.

Дано: $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ $P = 2\text{ атм}$ $O_2$ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $\rho - ?$	СИ $298\text{ К}$ $2 \times 10^5\text{ Па}$	$PV = \frac{m}{M}RT$ $P = \frac{mRT}{VM}$ $\rho = \frac{PM}{RT}$	$\rho = \frac{m}{V}$		
--	---	--	----------------------	--	---

$$M(O_2) = 32 \frac{\text{г}}{\text{моль}} = 0,032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$\rho = \frac{2 \times 10^5 \times 0,032}{8,31 \times 298} = 1,3 \text{ кг/м}^3$$

Если в газе происходят какие-то процессы, то обычно изменяются все три его параметра:  $p$ ,  $V$  и  $T$ . Естественно, что самыми простыми являются процессы, которые происходят с изменением лишь двух параметров, а третий остается постоянным. Эти процессы получили название **изопроцессов** (от греческого «изос» – равный, одинаковый).

Количественные зависимости между двумя параметрами газа при фиксированном значении третьего называют **газовыми законами**.

Процессы, протекающие при неизменном значении одного из параметров, называют **изопроцессами**.

### Изотермический процесс.

Процесс изменения состояния системы макроскопических тел (термодинамической системы) при постоянной температуре называют **изотермическим**.

Если в уравнении состояния считать  $T = \text{const}$ , правая часть уравнения будет величиной постоянной:  $pV = \text{const}$ .

$$m = \text{const}, \quad T = \text{const}$$

$$pV = \text{const}$$

Эта формула выражает закон, установленный опытным путем в середине XIX в. английским ученым Р. Бойлем и французским физиком Э. Мариоттом. Закон Бойля-Мариотта, или уравнение состояния идеального газа при изотермическом процессе, означает: **произведение давления данной массы газа на объем, который занимает газ при постоянной температуре, является величиной постоянной**.

Графически зависимость между давлением и объемом газа при постоянной температуре изображают хорошо известной из курса математики гиперболой.

Кривую, изображающую зависимость давления газа от объёма при постоянной температуре, называют **изотермой**.

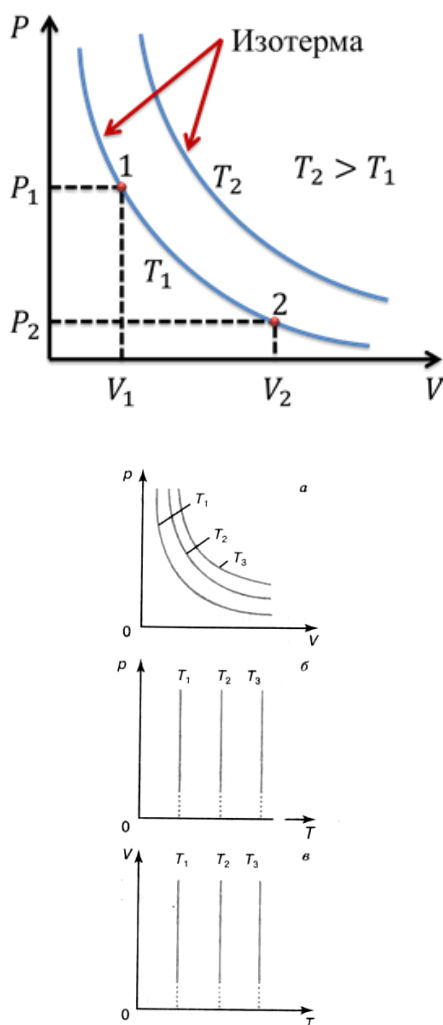


Рисунок 1. Изотермический процесс

Каждому значению температуры соответствует своя кривая (рис. 1, а). Эти кривые называют изотермами (кривыми одинаковых температур). Чем выше температура, при которой происходит процесс, тем выше расположена изотерма ( $T_1 < T_2 < T_3$ ).

В системах координат  $p, T$  (рис. 1, б) и  $V, T$  (рис. 1, в) изотермический процесс изображается прямой, параллельной соответственно оси  $p$  или  $V$ . Эти прямые также изотермами. Третий параметр ( $V$  или  $p$ ) сохраняет вдоль них установившегося значения.

Для того чтобы процесс происходил при постоянной температуре, сжатие или расширение газа должно происходить очень медленно. Дело в том, что, например, при сжатии газ нагревается, так как при движении поршня в сосуде скорость и соответственно кинетическая энергия молекул после ударов о поршень увеличиваются, а следовательно, увеличивается и температура газа. Именно поэтому для реализации изотермического процесса

надо после небольшого смещения поршня подождать, когда температура газа в сосуде опять станет равной температуре окружающего воздуха.

Кроме этого, отметим, что при быстром сжатии давление под поршнем сразу становится больше, чем во всём сосуде. Если значения давления и температуры в различных точках объёма разные, то в этом случае газ находится в неравновесном состоянии и мы не можем назвать значения температуры и давления, определяющие в данный момент состояние системы. Если систему предоставить самой себе, то температура и давление постепенно выравниваются, система приходит в равновесное состояние.

### **Изобарный процесс.**

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называют **изобарным**.

Слово «изобарный» происходит от греческих слов *isos* – равный, одинаковый и *baros* – вес, тяжесть.

Пусть теперь газ находится в условиях, когда постоянным является его давление  $p$ . Из уравнения Клапейрона следует, что в этом случае постоянным будет отношение объёма газа к его температуре –  $\frac{V}{T} = \text{const}$ , то есть **при неизменной массе газа и постоянном давлении объём газа прямо пропорционален абсолютной температуре.**

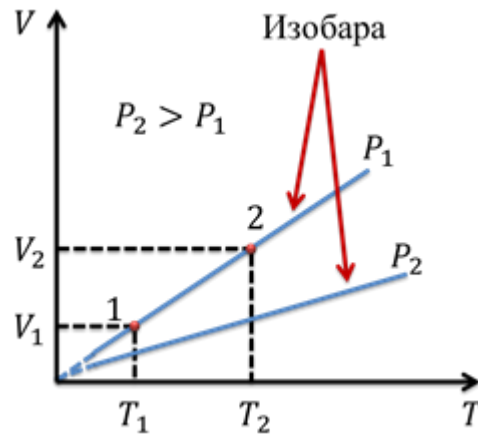
$$m = \text{const}, \quad p = \text{const}$$

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

Этот закон был установлен опытным путем в 1802 году французским физиком Ж. Гей-Люссаком. Таким образом, при неизменной массе газа и постоянном давлении его объём с повышением температуры на 1 градус увеличивается на  $1/273$  части того объёма, который газ занимал при температуре 273 К (0 °С).

Графически такой процесс в координатных осях  $V, T$  изображается прямой, продолжение которой проходит через начало координат.

Прямую, изображающую зависимость объёма газа от температуры при постоянном давлении, называют **изобарой**.



Угол ее наклона  $\alpha$  к оси температур зависит от давления газа: чем больше давление, тем меньше угол наклона (на рисунке 2, а имеем  $p_3 > p_2 > p_1$ ). Итак, по одной и той же температуры газ будет занимать тем больший объем, чем меньше его давление. На диаграммах с координатными осями  $p, T$  или  $p, V$  изобары имеют вид прямых, параллельных оси  $T$  или соответственно оси  $V$  (рис. 2, б и в).

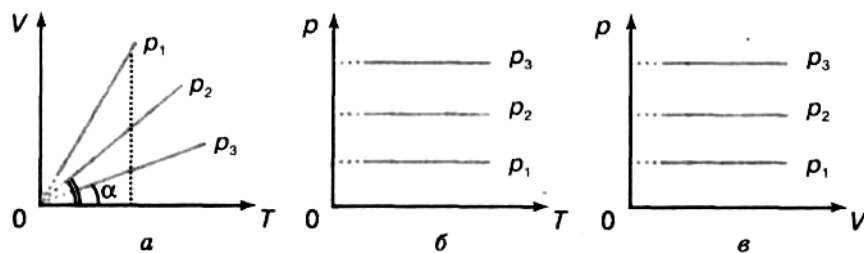


Рисунок 2. Изобарный процесс

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

Изобарным можно считать расширение газа при нагревании его в цилиндре с подвижным поршнем, если внешнее давление постоянно. Давление в цилиндре постоянно и равно сумме атмосферного давления и давления  $m_p g/S$  поршня.

### Изохорный процесс.

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объёме называют **изохорным**.

Слово «изохорный» происходит от греческих слов *isos* – равный, одинаковый и *chora* – место, пространство, занимаемое чем-нибудь.

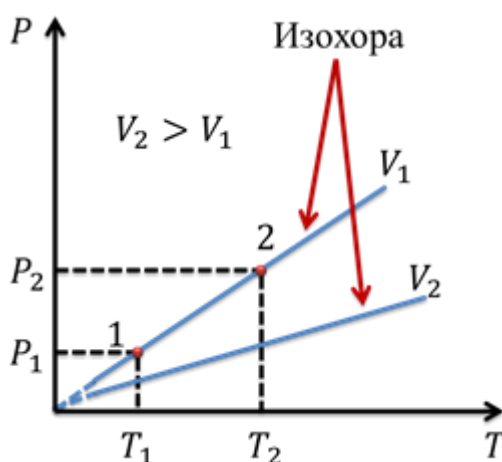
Рассмотрим случай, когда объем  $V$  газа остается постоянным. Из уравнения Клапейрона следует, что при этих условиях постоянным будет отношение давления газа к его температуре:  $\frac{P}{T} = const$ , то есть при постоянном объеме давление газа прямо пропорционален его абсолютной температуре.

$$m = const, \quad p = const$$

$$\frac{V}{T} = const$$

Этот закон экспериментально установил французский ученый Ж. Шарль.

График этого процесса в координатах  $p, T$  – прямая линия, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 3, а). Прямую, изображающую зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме, называют **изохорой**.



Угол наклона изохоры оси температур тем больше, чем меньше объем газа (на рис. 3, а имеем  $V_3 > V_2 > V_1$ ). В системах координат  $p, V$  и  $V, T$  изохора имеет вид прямой, параллельной оси  $p$  или соответственно  $T$  (рис. 3, б и в).

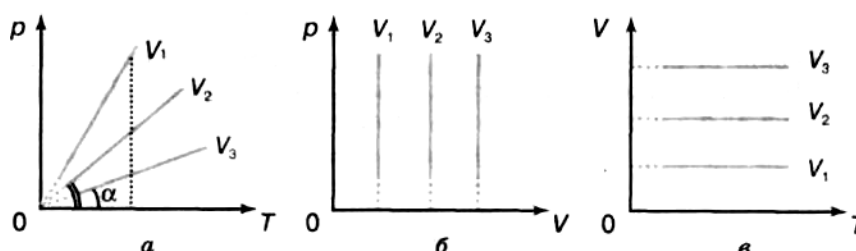


Рисунок 3. Изохорный процесс

Таким образом, основные газовые законы (Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля) – это отдельные случаи уравнения Клапейрона.

### Задача 1

Газ изотермически расширяется от объёма, равного 1 л до объёма, равного 3 л. Если начальное давление газа было равно 360 кПа, то каким станет его давление, когда газ закончит расширяться?

Дано:

$$T = const$$

$$V_0 = 1 \text{ л}$$

$$V = 3 \text{ л}$$

$$P_0 = 360 \text{ кПа}$$

$$P - ?$$

$$PV = const$$

$$P_0V_0 = PV$$

$$P = P_0 \frac{V_0}{V}$$

$$P = 360 \times \frac{1}{3} = 120 \text{ кПа}$$

### Задача 2

На графике показан некий процесс, происходящий с кислородом, масса которого 20 г. Определите объём газа, соответствующий указанной на графике точке.

Дано:

$$m = 0,02 \text{ кг}$$

$$O_2$$

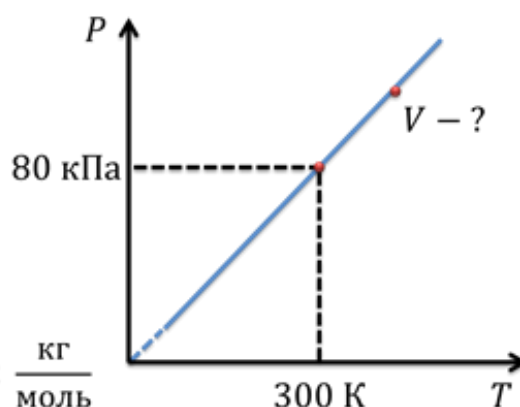
$$V - ?$$

$$\frac{P}{T} = const$$

$$V = \frac{mRT}{PM}$$

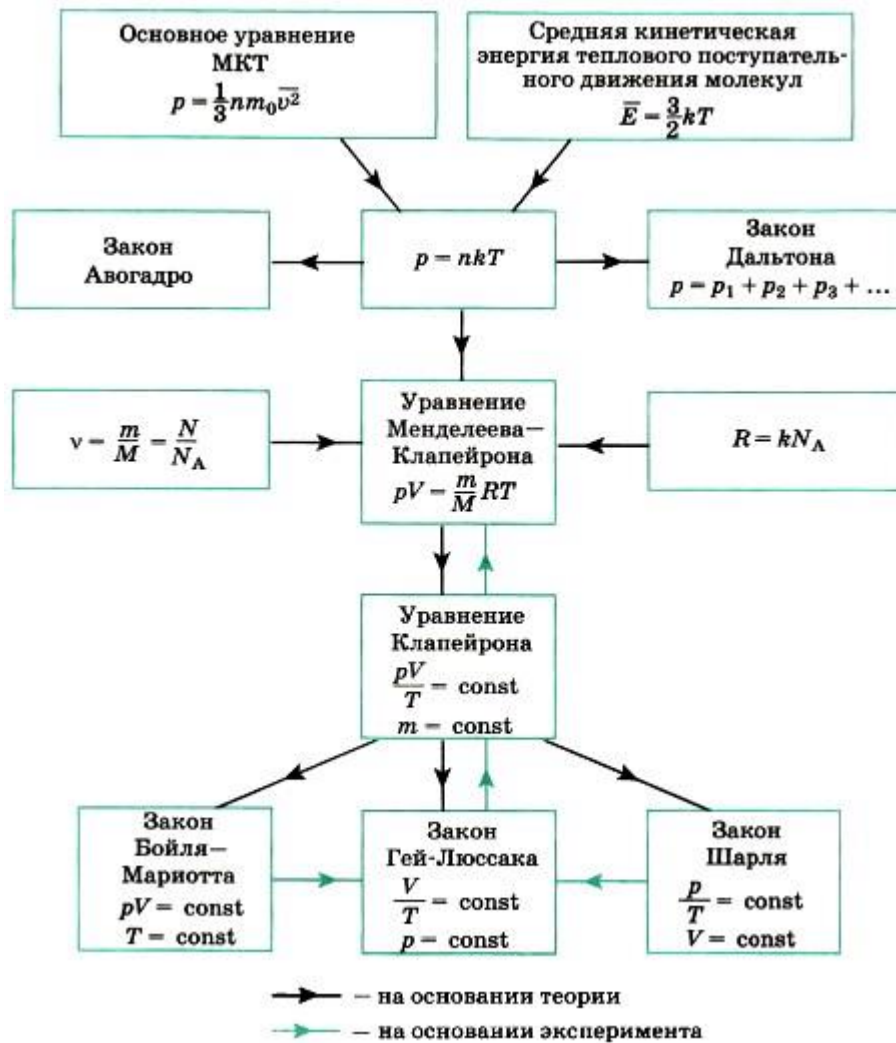


$$M(O_2) = 0,032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$



$$V = \frac{0,02 \times 8,31 \times 300}{80000 \times 0,032} = 0,019 \text{ м}^3$$

## Структурная схема МКТ





## Самостоятельное изучение. Кристаллические и аморфные тела.

План.

1. Кристаллические тела.
2. Аморфные тела.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Чем отличаются кристаллические тела от аморфных?
2. Назовите основные свойства кристаллических тел.
3. Древесина анизотропна. Является ли она кристаллическим телом?
4. Что называют монокристаллом?
5. Какие тела называют поликристаллическими?
6. Что такое анизотропия? Изотропность?
7. Все ли кристаллические тела анизотропны?
8. Почему в течение всего времени плавления температура кристаллического тела не меняется?
9. Какие основные свойства аморфных тел.
10. Почему аморфные тела не имеют определенной температуры плавления?
11. Приведите примеры монокристаллических, поликристаллических и аморфных тел.
12. Возникла бы профессия стеклодува, если бы стекло было кристаллическим телом, а не аморфным?

## Кристаллические тела.

Мы живём на поверхности твёрдого тела – земного шара, в домах, построенных из твёрдых тел. Различные приборы, орудия труда сделаны из твёрдых тел. Знать свойства твёрдых тел необходимо.

Вспомните, что такое твёрдое тело. Чем мы пренебрегали, когда в механике считали, что тело абсолютно твёрдое?

Каковы физические свойства твёрдых тел?

Какие физические величины характеризуют свойства твёрдых тел?

Твёрдые тела сохраняют не только свой объём, как жидкости, но и форму. Причиной такой устойчивости является характер движения и взаимодействия частиц: они не могут менять положение своего равновесия, совершая малые колебания и вращаясь вокруг него. Энергия и амплитуда колебаний тем больше, чем выше температура тела.

Твёрдые тела находятся преимущественно в кристаллическом состоянии.

**Кристаллы** – это твёрдые тела, атомы или молекулы которых занимают определённые, упорядоченные положения в пространстве.

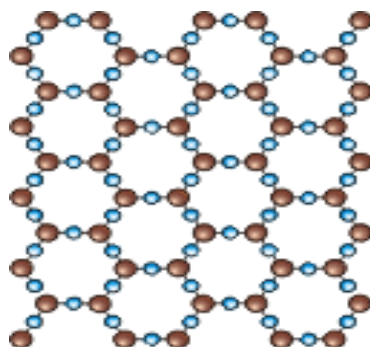


Рисунок 1. Внутреннее строение кристаллического тела

Поэтому кристаллы имеют плоские грани. Например, крупинка обычной поваренной соли имеет плоские грани, составляющие друг с другом прямые углы (рис. 2). Это можно заметить, рассматривая соль с помощью лупы. А как геометрически правильна форма снежинки! В ней также отражена геометрическая правильность внутреннего строения кристаллического твёрдого тела – льда (рис. 2).

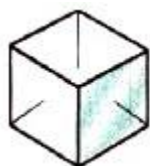


Рисунок 2.

Твердые тела могут существовать в двух существенно различных состояниях, отличающихся своим внутренним строением, и, соответственно, свойствами. Это кристаллическое и аморфное состояние твердых тел.

Для кристаллических тел характерны:

- Правильное расположение атомов, молекул, ионов, которые колеблются около положения равновесия, то есть образование кристаллической решетки;
- Постоянство углов между гранями любого кристалла данного вещества и существования дальнего порядка в размещении частиц.

Примерами веществ в кристаллическом состоянии могут служить соль, сахарный песок, сода и др. Если весь кусок вещества представляет собой один кристалл, то такое тело называется монокристаллом или просто кристаллом.

**Монокристалл** – отдельный однородный кристалл, имеющий непрерывную кристаллическую решетку и характеризующийся анизотропией свойств.

**Анизотропия** – это зависимость физических свойств (механических, оптических, электрических, тепловых) от направления внутри монокристаллов. Наличие природных граней в монокристаллах ведет к четко выраженному различию в физических свойствах тела по различным направлениям.

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

Это происходит потому, что кристаллическая решётка графита имеет слоистую структуру. Слои образованы рядом параллельных сеток, состоящих из атомов углерода (рис. 3). Атомы располагаются в вершинах правильных шестиугольников. Расстояние между слоями сравнительно велико – примерно в 2 раза больше, чем длина стороны шестиугольника, поэтому связи между слоями менее прочны, чем связи внутри их.

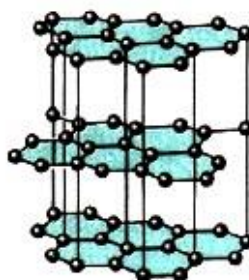


Рисунок 3. Кристаллическая решетка графита

В других случаях тело представляет собой множество мелких кристалликов, сросшихся между собой, например, кусок рафинада. Такие тела называют поликристаллическими.

**Поликристаллы** – это твердые тела, состоящие из большого числа кристаллов, беспорядочно ориентированных друг относительно друга (сталь, чугун, графит).

Поликристаллы являются изотропными.

**Изотропность** – независимость физических свойств тела от выбранного в нем направления. Это объясняется тем, что кристаллы внутри располагаются беспорядочно, и каждый в отдельности обладает анизотропией, а в целом поликристалл изотропный.

Кристаллические вещества характеризуются правильным расположением тех частиц, из которого они состоят: атомов, молекул и ионов в строго определенных точках пространства. При соединении этих точек прямыми линиями образуется пространственный каркас, который называют **кристаллической решеткой**. Точки, в которых размещены частицы кристалла, называют **узлами решетки**.

В узлах воображаемой решетки могут находиться ионы, атомы и молекулы. В зависимости от типа частиц, расположенных в узлах кристаллической решетки и характера связи между ними различают ионные, атомные, молекулярные и металлические кристаллические решетки.

### Виды кристаллических структур.

**Ионная** – в узлах решетки находятся положительные и отрицательные ионы, которые содержатся электрическими силами притяжения и отталкивания.

**Атомная** – в узлах находятся нейтральные атомы, между которыми устанавливается ковалентная связь.

**Молекулярная** – в узлах находятся нейтральные молекулы, которые удерживаются молекулярными силами.

**Металлическая** – в узлах находятся положительно заряженные ионы металла, между которыми хаотично двигаются свободные электроны.

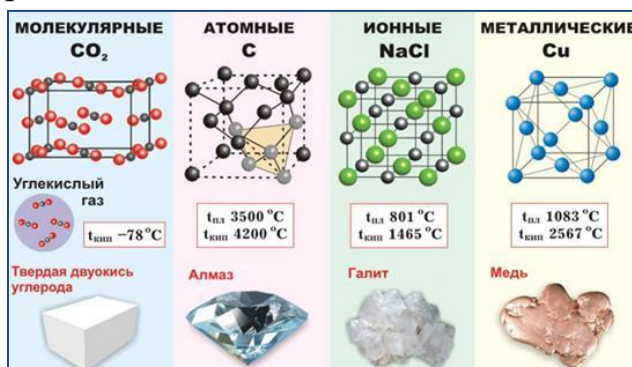


Рисунок 4. Виды кристаллических решеток

### **Механическое напряжение. Закон Гука.**

В недеформированном кристаллическом теле каждая частица (молекула, ион, атом) находится в определенном положении равновесия, в котором сумма сил, действующих на нее со стороны остальных частиц, равна нулю, а потенциальная энергия частицы минимальна. Но если какая-то внешняя сила сместит частичку из его положения равновесия, то сумма сил взаимодействия этой частицы с остальными частицами уже не будет равна нулю. Если деформация ведет к увеличению средних расстояний между частицами, то будут преобладать силы притяжения, которые будут стремиться вернуть частицы в исходное положение равновесия. Наоборот, если кристаллическое тело сжимать и тем самым приближать частицы кристалла друг к другу, то будут преобладать силы отталкивания, которые опять-таки стремиться вернуть частицы в исходное положение равновесия. Это силы упругости – результат межмолекулярного (межатомного) взаимодействия в деформированных телах.

**Деформацией** называется изменение формы или объема тела, вызванное каким-либо действием на него. Виды деформации твердого тела разнообразны. По характеру поведения после прекращения – это деформация твердого тела под действием сил, растягивающих (сжимающих) тело в одном направлении. Достаточно часто в природе и технике встречаются всесторонние деформации растяжения (сжатия). Эти деформации наблюдаются в том случае, когда деформированное тело испытывает давление со всех сторон, или растяжения во всех направлениях.

**Деформация чистого сдвига** – это деформация твердого тела, при которой все его плоские слои, параллельные некоторой плоскости (плоскости сдвига), не изменяются по форме, а лишь смещаются параллельно друг другу. При деформации сдвига меняется форма тела без изменения его объема.

**Деформация кручения** – это деформация тела, которая осуществляется под действием двух противоположно направленных моментов, приложенных к противоположным концам тела. Угол, на который вернется радиус крайнего сечения, называется углом кручения.

**Деформацией изгиба** называется деформация, которая приводит к растяжению (сжатию), неодинакового в различных частях тела. Внутри изогнутого тела есть слой, который не испытывает ни растяжения, ни сжатия и называется нейтральным.

**Деформация растяжения.** Абсолютной деформацией (удлинением), называется величина  $\Delta L = L - L_0$ ,

где  $L$  – длина деформированного тела,

$L_0$  – начальная длина тела.

Относительной деформацией (удлинением) называется отношение абсолютной деформации к начальной длине тела:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}.$$

В деформированном твердом теле, вследствие смещения частиц в кристаллической решетке относительно друг друга, возникают внутренние силы, которые создают в материале напряжение.

**Механическим напряжением** называется величина, характеризующая действие внутренних сил в деформированном твердом теле. Механическое напряжение измеряется внутренней силой, действующей на единицу площади сечения деформированного тела:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$
$$\sigma = \frac{F}{S}; \quad \sigma = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Величина  $k$ , характеризующая зависимость механического напряжения в материале от рода последнего и от внешних условий, называется **коэффициентом упругости**. Коэффициент упругости измеряется механическим напряжением, которое возникает в материале при относительной упругой деформации, равной единице. Единицей измерения коэффициента упругости в системе СИ является  $1 \text{ Н/м}^2$ .

Связь между упругими деформациями и внутренними силами в материале впервые была установлена английским ученым Р. Гуком.

Р. Гук в XVII в. установил, что в пределах упругих деформаций нормальное напряжение и относительное удлинение связаны соотношением:

$$\varepsilon = k\sigma.$$

Величину, обратную коэффициенту упругости, называют **модулем продольной упругости** или **модулем Юнга**

$$E = \frac{1}{k}.$$

Учитывая, что  $E = \frac{1}{k}$ , запишем закон Гука в виде:  $\sigma = E\varepsilon$ .

Закон Гука формулируется следующим образом: **механическое напряжение в упруго деформированном теле прямо пропорционально относительной деформации этого тела:  $\sigma = E\varepsilon$ .**

Из закона Гука следует, что при  $E = \sigma$ ,  $\varepsilon = 1$  то есть  $\Delta L = L_0$ .

Модуль Юнга численно равен такому нормальному напряжению, при котором абсолютная деформация была бы равна начальной длине тела, то есть длина тела увеличилась бы в два раза.

В качестве примера рассмотрим применение закона Гука к деформации одностороннего растяжения или сжатия. Формула для этого случая принимает вид:

$$\sigma_n = E \frac{\Delta l}{l},$$

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}.$$

Практически любое тело при упругой деформации не может удвоить своей длины и гораздо раньше разорвется.

Рассмотрим результаты испытания некоторого однородного образца на растяжение, представленные в виде **диаграммы растяжения** – зависимости нормального напряжения от относительной деформации (рис. 5).

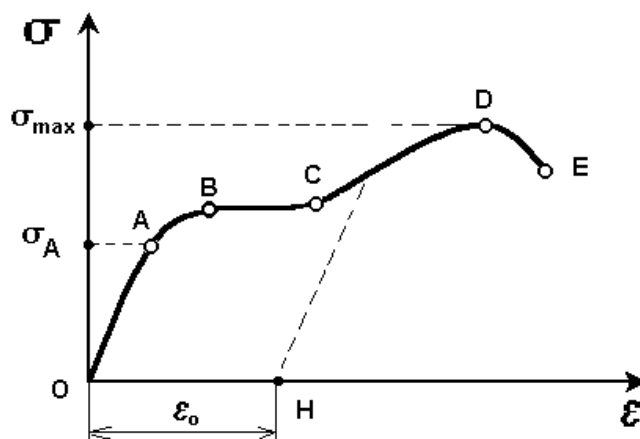


Рисунок 5. Диаграмма растяжения

- участок OA: выполняется закон Гука, деформация упругая (исчезает при снятии напряжения, из точки A образец по линии OA возвращается в исходное состояние).  $\sigma_A$  предел пропорциональности;
- участок AB: возрастают нарушения закона Гука; точка B начало текучести;
- участок BC: участок текучести: образец удлиняется при неизменном напряжении. Внутри тела размножаются дефекты, а в окрестности точки C их становится так много, что взаимовлияние дефектов существенно укрепляет материал образца;
- участок CD: растяжение образца продолжается. Снятие напряжения в любой точке на участке BD приводит к сокращению образца по линии CH, параллельной OA так, что образец приобретает остаточную деформацию  $\epsilon_0$ .



- значение  $\sigma_{\max}$  в верхней точке кривой называется пределом прочности – это максимальное напряжение, которое некоторое время может выдержать образец без разрыва, хотя и с определенными остаточными деформациями.
- - на участке DE тело разрывается.

### **Упругость, пластичность, хрупкость и твердость.**

Свойство деформированных твердых тел принимать свою первоначальную форму и свой объем после прекращения действия внешних сил называется **упругостью**.

Деформация тела, которая исчезает после снятия внешних нагрузок на это тело, называется **упругой деформацией**. Поскольку упруго деформированное тело стремится вернуть свою форму и свой объем, оно действует на тела, вызвавшие его деформацию, с некоторой силой, которую называют силой упругости. Внутренние силы, возникающие в материале при деформации, тоже называют силами упругости.

Опыт показывает, что тело можно деформировать настолько, что оно не восстановит свою прежнюю форму, когда внешние воздействия на него исчезнут. Свойство тел сохранять деформацию после снятия внешних нагрузок называют **пластичностью**. Остаточная деформация тела, которая сохраняется после снятия внешних нагрузок на тело, называется **пластической деформацией**. Упругость (пластичность) тел в основном определяется материалом, из которого они сделаны. Например, сталь и резина упруги, а медь и воск пластичны. Деление материалов на упругие и пластичные условно, так как каждый материал в большинстве случаев обладает одновременно и пластичностью, и упругостью. Например, стальную пружину можно растянуть так, что она уже не сожмется. С другой стороны, медная спираль при небольших растяжениях пружинит (т. е. сжимается, если ее отпустить). Важными механическими свойствами материалов, которые приходится учитывать в машиностроении, являются хрупкость и твердость.

На практике встречаются материалы, которые при относительно небольших нагрузках упруго деформируются, а при увеличении внешней нагрузки разрушаются прежде, чем у них появится остаточная деформация. Такие материалы называются **хрупкими** (например, стекло, кирпич). Хрупкие материалы очень чувствительны к ударной нагрузке. При резком ударе хрупкие тела сравнительно легко разрушаются.

**Твердость** материала можно определить различными способами. Обычно более твердым считают тот материал, который оставляет царапины на поверхности другого материала. Опыт показал, что наиболее твердым материалом является алмаз.



## Аморфные тела.

**Аморфное тело** – твердое тело, у которого нет строгого порядка в расположении атомов и молекул. Для аморфных тел характерна изотропность свойств и отсутствие точки плавления. При повышении температуры аморфные тела размягчаются и постепенно переходят в жидкое состояние, поэтому их называют переохлажденными жидкостями.

У аморфных тел нет строгого порядка в расположении атомов. Только ближайшие атомы-соседи располагаются в некотором порядке. Но строгой повторяемости по всем направлениям одного и того же элемента структуры, которая характерна для кристаллов, в аморфных телах нет. По расположению атомов и по их поведению аморфные тела аналогичны жидкостям. Часто одно и то же вещество может находиться как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии. Например, кварц  $\text{SiO}_2$  может быть как в кристаллической, так и в аморфной форме (кремнезём). Кристаллическую форму кварца схематически можно представить в виде решётки из правильных шестиугольников. Аморфная структура кварца также имеет вид решётки, но неправильной формы. Наряду с шестиугольниками в ней встречаются пяти- и семиугольники (рис. 6).

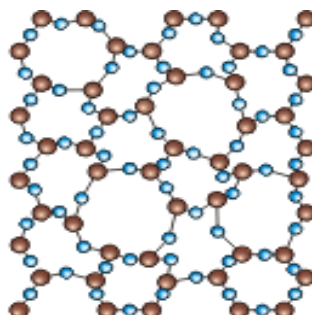


Рисунок 6. Внутреннее строение аморфного тела

При внешних воздействиях аморфные тела обнаруживают одновременно упругие свойства, подобно твёрдым телам, и текучесть, подобно жидкости. Так, при кратковременных воздействиях (ударах) они ведут себя как твёрдые тела и при сильном ударе раскалываются на куски. Но при очень продолжительном воздействии аморфные тела текут. Атомы или молекулы аморфных тел, подобно молекулам жидкости, имеют определённое время «оседлой жизни» – время колебаний около положения равновесия. Но в отличие от жидкостей это время у них весьма велико.

В этом отношении аморфные тела близки к кристаллическим, так как перескоки атомов из одного положения равновесия в другое происходят сравнительно редко. Аморфные тела при низких температурах по своим свойствам напоминают твёрдые тела. Текучестью они почти не обладают, но

по мере повышения температуры постепенно размягчаются и их свойства всё более и более приближаются к свойствам жидкостей. Это происходит потому, что с ростом температуры постепенно учащаются перескоки атомов из одного положения равновесия в другое.

К аморфным телам относятся стекло, смола, канифоль, сахарный леденец и др.

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

Сравнительная характеристика аморфных и кристаллических веществ

Вещество	
Кристаллическое	Аморфное
Характеристика	
1. Дальний порядок расположения частиц	1. Ближний порядок расположения частиц
2. Анизотропия физических свойств	2. Изотропность физических свойств
3. Конкретная температура плавления	3. Отсутствие конкретной точки плавления
4. Термодинамическая устойчивость (малый запас внутренней энергии)	4. Термодинамическая нестабильность (большой запас внутренней энергии)
5. Есть элементы симметрии	5. Текучесть
Примеры: металлы, сплавы, твердые соли, углерод (алмаз, графит) и др.	Примеры: янтарь, стекло, органические полимеры и др.

## Самостоятельное изучение. Насыщенный пар. Влажность воздуха.

### План

1. Парообразование и конденсация.
2. Насыщенный и ненасыщенный пар.
3. Кипение.
4. Абсолютная и относительная влажность воздуха.

### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называют парообразованием? Конденсацией?
2. Что называют испарением?
3. Назовите причины, от которых зависит скорость испарения жидкости.
4. Как объяснить снижение температуры жидкости в результате ее испарения?
5. Могут ли испаряться твердые тела? Как называется этот процесс?
6. Что такое динамическое равновесие?
7. Какой пар называют насыщенным?
8. Почему давление насыщенного пара не зависит от объема, в котором он находится?
9. Назовите формулу зависимости давления насыщенного пара от температуры.
10. Что называют кипением? При каком условии жидкость кипит?
11. Какую температуру называют температурой кипения? От чего она зависит?
12. Почему при кипячении температура жидкости не меняется?
13. Какие этапы закипания жидкости?
14. Что общего и в чем различие между испарением и кипением?
15. Что понимают под влажностью воздуха?
16. Что называют абсолютной влажностью воздуха? Какая формула выражает смысл этого понятия? В каких единицах ее выражают?
17. Что называют относительной влажностью воздуха? В каких единицах ее выражают?
18. Относительная влажность воздуха 70%. Что это значит?
19. Что называют точкой росы?
20. С помощью каких приборов определяют влажность воздуха?

## Парообразование и конденсация.

Вещество может находиться в четырех фазах или агрегатных состояниях: в твердом, в жидком, в газообразном и в плазменном.

Молекулярно-кинетическая теория позволяет не только понять, почему вещество может находиться в различных агрегатных состояниях, но и выяснить процесс ее перехода из одного состояния в другое.

Идеальный газ нельзя превратить в жидкость. Его молекулы не имеют объема и не взаимодействуют между собой, а значит, как бы мы ни сжимали газ или не понижали его температуру, идеальный газ все равно останется газом. Реальные газы превращаются в жидкости, и наоборот.

**Парообразование** – это переход вещества из жидкого состояния в газообразное.

**Конденсация** – это переход вещества из газообразного состояния в жидкое.

Парообразование разделяют на испарение и кипение.

**Испарение** – это парообразование, которое происходит только со свободной поверхности жидкости, граничащей с газообразным состоянием. Испарение твердых тел называется сублимацией.

Испарение происходит при любой температуре.

Во время испарения вылетают молекулы с наибольшей кинетической энергией, вследствие чего внутренняя энергия жидкости уменьшается, то есть жидкость охлаждается.

Молекулы жидкости имеют разные значения кинетической энергии, ведь температура жидкости определяет только среднюю кинетическую энергию молекул. Поэтому среди молекул всегда есть и весьма «быстрые» – кинетическая энергия таких молекул достаточно велика, чтобы они смогли вылететь из жидкости, преодолев притяжение остальных молекул.

Откуда же берутся эти «быстрые молекулы»? Скорости молекул жидкости все время меняются из-за столкновения. Хотя средняя скорость молекул и остается неизменной, некоторые молекулы в результате столкновений могут за счет других молекул приобретать скорости, в несколько раз превышающие среднее значение. Именно эти молекулы и вылетают из жидкости при испарении.

Поскольку жидкость оставляют самые быстрые молекулы, средняя кинетическая энергия молекул, оставшихся уменьшается, то есть жидкость при испарении охлаждается. Чем быстрее испаряется жидкость, тем сильнее она охлаждается.

Скорость испарения зависит от:

- 1) рода жидкости,
- 2) площади свободной поверхности,
- 3) температуры жидкости,
- 4) плотности пара над жидкостью (влажности воздуха)
- 5) движения воздуха вблизи поверхности жидкости.

При нагревании жидкости скорость ее испарения увеличивается, поскольку чем выше температура жидкости, тем больше средняя кинетическая энергия ее молекул, а следовательно, тем больше число «быстрых молекул», способных вылететь из жидкости. Этим свойством часто пользуются, чтобы ускорить высыхание различных поверхностей.

Означает ли, что вылет из жидкости «энергичных молекул» приводит к тому, что средняя кинетическая энергия молекул пара будет больше, чем средняя кинетическая энергия молекул жидкости при той же температуре? Нет, не значит!

Во время вылета из жидкости молекула тормозится силами молекулярного притяжения со стороны других молекул жидкости. Молекулы в результате вылета теряют избыток кинетической энергии, и средняя кинетическая энергия молекул пара оказывается точно такой же, как и средняя кинетическая энергия молекул жидкости.

На что же расходуется энергия, подводимая к жидкости, если кинетическая энергия молекул не меняется? Она расходуется в основном на разрыв связей между молекулами при преобразовании жидкости в пар. Для того чтобы «вырвать» молекулу из жидкости, необходимо осуществить работу. Но, осуществляя работу, мы увеличиваем потенциальную энергию, то есть полная энергия молекул пара при той же температуре больше полной энергии молекул воды. На «вырывания» молекул с жидкости и расходуется почти вся теплота, подводимая к жидкости.

Важная характеристика процессов испарения и конденсации – **удельная теплота парообразования**. Это физическая скалярная величина  $r$ , численно равная количеству теплоты, необходимого для превращения 1 кг жидкости в пар при температуре ее кипения. В СИ ее измеряют в джоулях на килограмм;  $[R] = \text{Дж/кг}$ .

Удельную теплоту парообразования можно определить не только при температуре кипения, но и во время парообразования при любой температуре. В этом случае удельная теплота парообразования будет зависимо от температуры.

Для испарения жидкости массой  $m$  ей нужно предоставить количество теплоты:  $Q = rm$ .

При конденсации 1 кг пара будет выделяться теплота, численно равная количеству теплоты парообразования из 1 кг жидкости.

### Насыщенный и ненасыщенный пар.

Если сосуд с жидкостью плотно закрыт, то уменьшение количества жидкости вскоре прекратится. При неизменной температуре система «жидкость-пар» приходит в состояние теплового равновесия и будет находиться в нем сколь угодно долго. Одновременно с испарением происходит конденсация, и оба процесса в среднем компенсируют друг друга. В первый момент после того, как жидкость нальют в сосуд и закроют ее, жидкость будет испаряться, и плотность пара над ней будет увеличиваться. Однако одновременно будет расти количество молекул, возвращающихся в жидкость. В результате в закрытом сосуде при постоянной температуре установится динамическое (подвижное) равновесие между жидкостью и паром. Количество молекул, которые оставляют поверхность жидкости, равно в среднем количеству молекул, возвращающихся в то же время в жидкость.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют **насыщенным паром**.

Если число молекул, вылетающих из жидкости при испарении, превышает число молекул, возвращающихся в жидкость, то такой пар называется **ненасыщенным**.

Давление насыщенного пара приближенно можно рассчитать по выражению основного уравнения МКТ:  $p = nkT$ .

Поскольку концентрация молекул насыщенного пара не зависит от объема при постоянной температуре, то и давление насыщенного пара не зависит от объема, а зависит от температуры. Эти закономерности установлены экспериментально.

Описать состояние ненасыщенного пара можно, используя законы идеального газа, а состояние насыщенного пара – по уравнению Менделеева-Клапейрона при низких температурах и малых концентрациях:

$$p_0 = \frac{\rho_0 \cdot RT}{\mu}$$

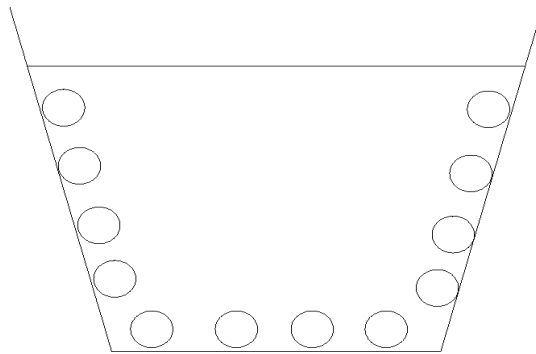
где  $p_0$  и  $\rho_0$  – соответственно давление и плотность насыщенного пара.

К насыщенному пару газовые законы Бойля-Мариотта ( $T = \text{const}$ ), Шарля ( $V = \text{const}$ ), Гей-Люссака ( $p = \text{const}$ ) применять нельзя.

## Кипение.

**Кипение** – это парообразование не только со свободной поверхности жидкости, но и изнутри жидкости, которое происходит при определенной для данной жидкости температуре.

В жидкости всегда растворен газ, молекулы которого прилипают к стенкам сосуда, образуя маленькие пузырьки газа. В этих пузырьках находится растворенный газ и насыщенный пар, которые создают внутреннее давление, которое зависит от температуры.



1 этап – жидкость полностью не прогрета, верхние слои холодные по сравнению с нижними. При нагревании жидкости этот воздух расширяется, собираясь в пузырьки, которые сначала возникают на стенках или дне сосуда. В пузырьках содержится насыщенный пар, давление которого при данной температуре является максимальным и растет с ее повышением.

По обычной температуре давление насыщенного пара пузырьков гораздо меньше внешнего давления, поэтому эти пузырьки сплюснутые и имеют микроскопические размеры:

$$p_{\text{атм}} + \rho gh + p_{\text{кр}} > p_{\text{нас}},$$

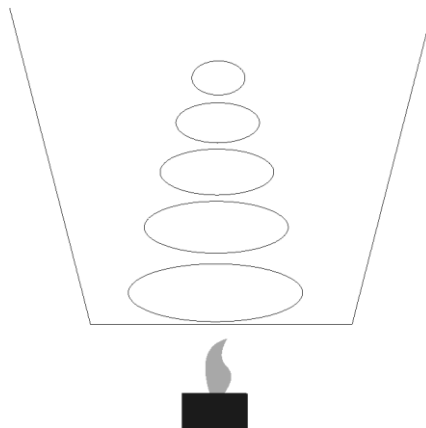
где  $p_{\text{атм}}$  – атмосферное давление;  $\rho gh$  – гидростатическое давление жидкости;  $p_{\text{кр}}$  – давление, обусловленное кривизной поверхности пузырька (давление Лапласа).

С повышением температуры давление насыщенного пара в пузырьке растет ( $p = nkT$ ). Кипение начинается уже при температуре, соответствующей равенству  $p_{\text{нас}} = p_{\text{внеш}}$ .

Стенки пузырьков растягиваются, пока под действием выталкивающей силы, которая увеличивается вместе с ростом объема, пузырьки не отрываются от дна или стенок и не поднимаются вверх.

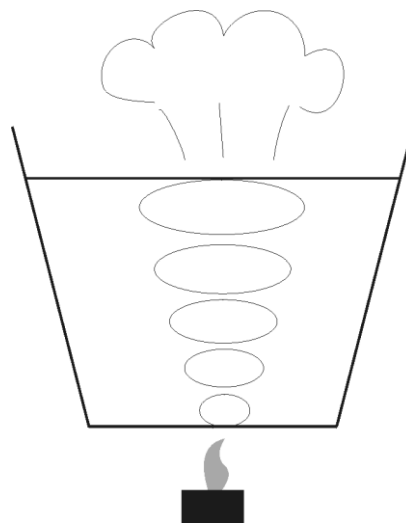
Если верхние слои жидкости имеют более низкую температуру, то в этих слоях происходит конденсация пара в пузырьках. Это происходит так быстро, что во время соприкосновения стенок пузыря слышен будто маленький взрыв. Большое количество таких микровзрывов создает

характерный шум. Когда жидкость достаточно прогреется, пузырьки перестают захлопываться и всплывают на поверхность, и жидкость закипает.



В процессе подъема пузырька внутреннее давление не меняется, а внешнее давление уменьшается, так как уменьшается гидростатическое и лапласовское и поэтому в момент кипения жидкости

$$P_{н.п.} = P_{атмосф.} + \overset{0}{\uparrow} P_{гидрост.} + \overset{0}{\uparrow} P_{лаплас.}$$



$$P_{н.п.} \approx P_{атм.}$$

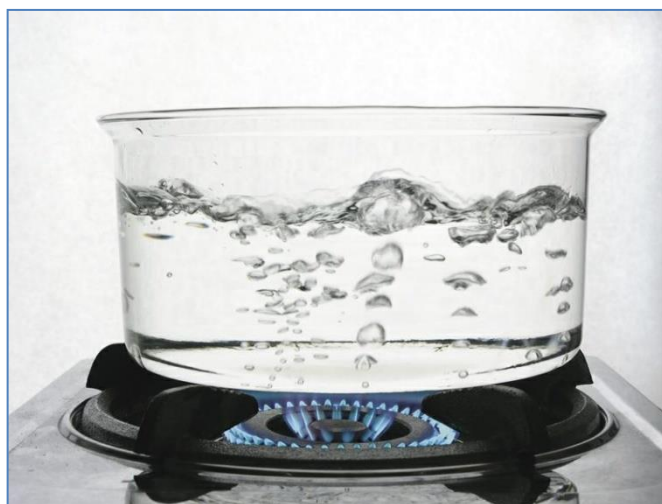
В момент кипения давление насыщенного пара равно атмосферному давлению, а давление насыщенного пара зависит от температуры. Таким образом, температура кипения жидкости прямо пропорционально зависит от атмосферного давления, чем оно больше, тем больше температура при которой происходит кипение воды.

Достигнув температуры кипения жидкости, давление насыщенного пара в пузырьках настолько увеличивается, что когда они лопаются из-за большого давления горячего пара, холод не успевает проникать внутрь них и пар уходит в атмосферу. Это и есть процесс кипения.



Основные стадии кипения жидкости в открытом сосуде:

- образование первичных пузырьков воздуха на дне и стенках сосуда;
- заполнения первичных пузырьков паром во время внутреннего испарения;
- рост давления пара в пузырьках за счет нагревания жидкости;
- увеличение размеров пузырьков под действием внутреннего давления;
- начало всплытия пузырьков под действием архимедовой силы;
- шумовое кипение: при недостаточном начальном прогреве верхних слоев жидкости первые пузырьки, всплывая, попадая в холодные слои жидкости, сжимаются с характерным шумом;
- полное кипение: при равномерном прогреве всех слоев жидкости размер пузырьков по мере всплытия из-за уменьшения гидростатического давления увеличивается, достигая поверхности, пузырьки с бульканьем разрушаются, выпуская накопленный в них пар наружу.



Каждая жидкость кипит при определенной температуре, которая называется **температурой кипения**. Величина температуры кипения данной жидкости приводится в физических справочниках.

Температура кипения зависит от внешнего давления над жидкостью.

В случае повышения давления температура кипения увеличивается, при уменьшении – уменьшается.

**Критическая температура** – это температура, при которой исчезает различие в физических свойствах жидкости и ее насыщенного пара. Это состояние называют критическим состоянием вещества.

В случае критической температуры плотность и давление насыщенного пара становятся максимальными, а плотность жидкости, находящейся в равновесии с паром, – минимальной. Удельная теплота парообразования

уменьшается с ростом температуры и при критической температуре равна нулю.

Каждое вещество имеет свою критическую температуру. Например, критическая температура воды примерно равна 375 °С. Особое значение критической температуры состоит в том, что если температура выше критической, газ нельзя превратить в жидкость ни при каких значениях давления.

### **Абсолютная и относительная влажность воздуха.**

В воздухе всегда есть водяной пар, но она не является насыщенным. Перемещение воздушных масс приводит к тому, что в одних местах нашей планеты испарение преобладает над конденсацией, в других – наоборот.

Содержание водяного пара в воздухе, то есть его влажность можно охарактеризовать парциальным давлением, абсолютной и относительной влажностью.

Атмосферное давление представляет собой давление смеси различных газов и водяного пара. Каждый из газов вносит свой вклад в суммарное давление, которое оказывает воздух на тела.

Давление, которое оказывал бы только водяной пар при отсутствии других газов, называется парциальным давлением водяного пара.

**Парциальное давление** – один из показателей влажности воздуха; измеряется в паскалях (Па) или миллиметрах ртутного столба (мм. рт. ст.).

$$760 \text{ мм. рт. ст.} = 101300 \text{ Па}; 1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па.}$$

Для количественной характеристики влажности используют абсолютную и относительную влажность.

**Абсолютная влажность** – это масса водяного пара, который содержится в одном кубическом метре воздуха при данной температуре. Иначе говоря, абсолютная влажность – это плотность водяного пара при данной температуре.

**Абсолютной влажностью** называется величина, которая определяется плотностью (или давлением) водяного пара, содержащегося в воздухе.

$$\rho_a = m/V$$

$\rho_a$  – абсолютная влажность.

Единица абсолютной влажности в СИ – килограмм на метр в кубе (кг/м<sup>3</sup>).

Итак, если при температуре 16 °С водяной пар составляет 4 г/м<sup>3</sup>, то это означает, что при данной температуре каждый кубический метр воздух содержит 4 г водяного пара.

На основании величины абсолютной влажности воздуха нельзя составить объективную картину о степени влажности воздуха, так как при одинаковой массе водяного пара, но большей температуре, воздух будет более сухим, а при меньшей температуре – более влажным.

Чтобы определить степень влажности воздуха, необходимо понимать, насколько водяной пар близок к насыщению. Для этого вводят понятие относительной влажности.

**Относительная влажность** – это отношение абсолютной влажности воздуха при некоторой температуре к плотности насыщенного водяного пара при той же температуре:

$$\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_n} \cdot 100\%$$

Относительную влажность обычно определяют в процентах; она не может быть больше, чем 100%. Составлены таблицы, в которых приведены плотность насыщенных водяных паров при различных температурах.

Определение относительной влажности можно сформулировать и иначе.

**Относительная влажность воздуха** – это отношение давления водяного пара в ней при некоторой температуре (парциального давления) к давлению насыщенного водяного пара при этом самой температуре:

$$\varphi = \frac{P_a}{P_n} \cdot 100\% .$$

Величину давления насыщенного пара при данной температуре можно найти в таблице.

Для человека благоприятным является значение относительной влажности 40 - 60%.

**Точка росы** – температура, при которой воздух достигает состояния насыщенности при данном содержании водяного пара.

### **Приборы для определения влажности воздуха.**

Для определения влажности используют:

- 1) Конденсационный гигрометр.
- 2) Волосяной гигрометр.
- 3) Психрометр.

Для измерения относительной влажности воздуха необходимо:

- 1) измерить температуру воздуха и по таблице найти давление насыщенного пара, которое соответствует данной температуре
- 2) определить точку росы и по таблице найти давление водяных паров, соответствующее этой же температуре
- 3) вычислить относительную влажность воздуха по формуле.

Наиболее простыми являются металлический гигрометр Ламберта и волосяной гигрометр.

Основной частью металлического гигрометра Ламберта (рис. 1) является металлический сосуд в форме цилиндра 3, ось которого занимает горизонтальное положение. Одно основание цилиндра снаружи блестящее.

В середину цилиндра входит трубка 2, которая присоединяется к резиновой груше – воздуходувка 1. В цилиндр наливают эфир. Продувая через этот цилиндр воздух, ускоряют его испарение. Испаряясь, эфир охлаждается и охлаждает цилиндр. Когда температура цилиндра становится равной температуре точки росы, его поверхность «потеет». Для измерения температуры внутри цилиндра вставляют термометр 4, а чтобы момент выпадения росы был заметным, на цилиндр надевают блестяще кольцо 5, изолированное от него теплоизоляционной прокладкой.

Действие волосяного гигрометра с обезжиренным волосом человека основано на том, если уровень влажности снижается, то длина волоса уменьшается, а в случае его увеличения – удлиняется. Растянутый с помощью подвеса волос размещают вертикально и прикрепляют шкале, проградуированный в единицах влажности.

К самому волосу прикрепляется стрелка-указатель, которая во время измерения влажности смещается по шкале вверх или вниз.

Относительную влажность можно найти не только посредством определения точки росы, но и с помощью специального прибора – психрометра (от греч. «психрос» – холодный).

Психрометр Августа состоит из двух термометров (рис. 2), один из которых сухой, а второй – влажный, так как снизу он обернут марлевой тканью, нижним концом погруженной в открытую емкость с жидкостью (водой или спиртом).

Когда жидкость испаряется из марли, ее температура снижается, и влажный термометр показывает более низкую температуру, чем сухой. Разница температур между показаниями сухого и влажного термометра называется психрометрической разницей температур. Пользуясь ею, можно составить суждение о влажности воздуха. Составлены специальные психрометрические таблицы, в которых каждой психрометрической разнице температур соответствует определенная относительная влажность.

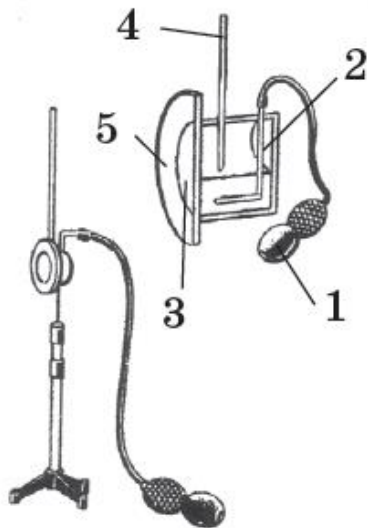


Рис. 1

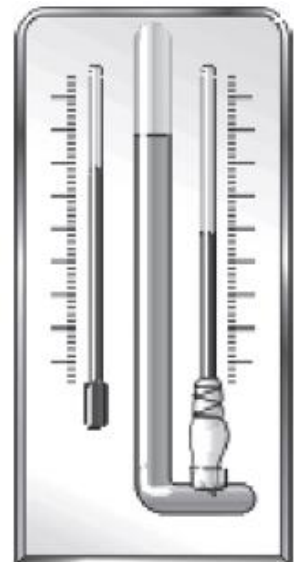


Рис. 2

**Задачи**

1. В  $6 \text{ м}^3$  воздуха с температурой  $19 \text{ }^\circ\text{С}$  содержится  $51,3 \text{ г}$  водяного пара. Определите абсолютную и относительную влажность воздуха.
2. Температура воздуха  $20\%$ , точка росы  $12 \text{ }^\circ\text{С}$ . Найти абсолютную и относительную влажность воздуха.
3. Температура воздуха  $23 \text{ }^\circ\text{С}$ , относительная влажность  $45\%$ . Найти абсолютную влажность воздуха и точку росы.

## Лекция №12

### Внутренняя энергия. Первый закон термодинамики.

#### План

1. Внутренняя энергия и способы ее изменения.
2. Первый закон термодинамики.
3. Применение первого закона термодинамики к различным процессам.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Приведите примеры превращения механической энергии во внутреннюю и обратно в технике и быту.
2. От каких физических величин зависит внутренняя энергия тела?
3. Чему равна внутренняя энергия идеального одноатомного газа?
4. Что называют количеством теплоты?
5. От чего зависит удельная теплоёмкость вещества?
6. Что называют удельной теплотой парообразования?
7. Что называют удельной теплотой плавления?
8. В каких случаях количество теплоты – положительная величина, а в каких случаях отрицательная?
9. Как следует записать уравнение теплового баланса для изолированной системы из трёх тел, переходящей в равновесное состояние?
10. Почему газы при сжатии нагреваются?
11. Как формулируется первый закон термодинамики?
12. В каком случае изменение внутренней энергии отрицательно?
13. Почему можно говорить, что система обладает внутренней энергией, но нельзя сказать, что она обладает запасом определённого количества теплоты или работы?
14. Можно ли считать систему изолированной, если её температура остаётся постоянной?
15. Известно, что при изотермическом процессе идеальный газ совершил работу 2000 Дж. Чему равно количество теплоты, сообщённой системе?
16. В каком случае работа газа больше: при изотермическом расширении от объёма  $V_1$  до объёма  $V_2$  или при изобарном расширении от объёма  $V_1$  до объёма  $V_2$ ?
17. Как можно изменить температуру газа?
18. Какой из процессов является самым выгодным для получения максимальной механической работы при данном затраченном количестве теплоты?

## Внутренняя энергия и способы ее изменения.

Тепловые явления можно описывать с помощью величин (макроскопических параметров), измеряемых такими приборами, как манометр и термометр. Эти приборы не реагируют на воздействие отдельных молекул. Теория тепловых процессов, в которой не учитывается молекулярное строение тел, называется **термодинамикой**. В термодинамике рассматриваются процессы с точки зрения превращения теплоты в другие виды энергии.

Термодинамика была создана в середине XIX в. после открытия закона сохранения энергии. В её основе лежит понятие **внутренняя энергия**. Само название «внутренняя» предполагает рассмотрение системы как ансамбля движущихся и взаимодействующих молекул. Остановимся на вопросе о том, какая связь существует между термодинамикой и молекулярно-кинетической теорией.

**Термодинамика и статистическая механика.** Первой научной теорией тепловых процессов была не молекулярно-кинетическая теория, а термодинамика.

Термодинамика возникла при изучении оптимальных условий использования теплоты для совершения работы. Это произошло в середине XIX в., задолго до того, как молекулярно-кинетическая теория получила всеобщее признание. Тогда же было доказано, что наряду с механической энергией макроскопические тела обладают ещё и энергией, заключённой внутри самих тел.

Сейчас в науке и технике при изучении тепловых явлений используется как термодинамика, так и молекулярно-кинетическая теория. В теоретической физике молекулярно-кинетическую теорию называют **статистической механикой**.

Термодинамика и статистическая механика изучают различными методами одни и те же явления и взаимно дополняют друг друга.

**Термодинамической системой** называют совокупность взаимодействующих тел, обменивающихся энергией и веществом.

Главное содержание термодинамики состоит в двух основных её законах, касающихся преобразования энергии. Эти законы установлены опытным путём. Они справедливы для всех веществ независимо от их внутреннего строения.

Основным понятием в термодинамике является понятие внутренней энергии.

Все тела состоят из молекул, которые непрерывно и хаотично движутся. Значит, каждая молекула тела имеет кинетическую энергию. Кроме того, между частицами тела действуют силы притяжения и силы отталкивания. Значит, молекулы имеют и потенциальную энергию.

Сумму кинетической и потенциальной энергии всех молекул тела называют его внутренней энергией. Под внутренней энергией мы будем понимать энергию хаотического движения молекул и энергию их взаимодействия.

**Внутренняя энергия тела** (системы) – это сумма кинетической энергии хаотического теплового движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия.  $[U] = \text{Дж}$ .

Механическая энергия тела (системы) как целого не входит во внутреннюю энергию. Например, внутренняя энергия газов в двух одинаковых сосудах при равных условиях одинакова независимо от движения сосудов и их расположения относительно друг друга.

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

Вычислим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа.

Согласно модели молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, следовательно, потенциальная энергия их взаимодействия равна нулю. Вся внутренняя энергия идеального газа определяется кинетической энергией беспорядочного движения его молекул.

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

$$U = \sum \bar{E}_k = \frac{3}{2} kTN_a = \frac{3}{2} RT \quad U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре.

Она не зависит от объёма и других макроскопических параметров системы.

Изменение внутренней энергии идеального газа

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



т. е. определяется температурами начального и конечного состояний газа и не зависит от процесса.

Если идеальный газ состоит из более сложных молекул, чем одноатомный, то его внутренняя энергия также пропорциональна абсолютной температуре, но коэффициент пропорциональности между  $U$  и  $T$  другой. Объясняется это тем, что сложные молекулы не только движутся поступательно, но ещё и вращаются и колеблются относительно своих положений равновесия. Внутренняя энергия таких газов равна сумме энергий поступательного, вращательного и колебательного движений молекул. Следовательно, внутренняя энергия многоатомного газа больше энергии одноатомного газа при той же температуре.

Мы установили, что внутренняя энергия идеального газа зависит от одного параметра – температуры.

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

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

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

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

#### Способы изменения внутренней энергии

Теплообмен

Выполнение работы

Количество энергии, передаваемой от одного тела к другому, называют по-разному в зависимости от способа передачи. Если способом передачи служит осуществления механической работы, то количество переданной энергии так и называют – работой. Если же энергия передается в результате теплообмена, то передаваемую энергию называют количеством теплоты.

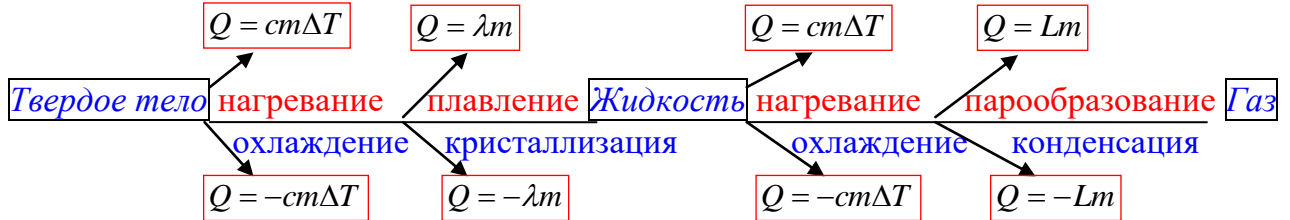
$A, Q$  – мера изменения внутренней энергии тела.

## Изменение внутренней энергии при теплообмене.

Обмен внутренней энергией между телами и окружающей средой или между частями тела без совершения механической работы называют **теплообменом**.

Мерой изменения внутренней энергии тела при теплообмене является количество теплоты.  $\Delta U = Q$ ,  $[Q] = \text{Дж}$

Виды теплообмена: теплопроводность, конвекция, излучение.



$$[c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}} \quad - \quad \text{удельная теплоемкость вещества} \quad - \quad \text{величина,}$$

характеризующая зависимость изменения внутренней энергии тела при нагревании или охлаждении от рода вещества и от внешних условий. Удельная теплоемкость вещества измеряется количеством теплоты, необходимым для нагрева единицы массы вещества на единицу температуры.

$$[\lambda] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad - \quad \text{удельная теплота плавления (кристаллизации)} \quad -$$

количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кристаллического вещества при температуре плавления в жидкость при той же температуре.

$$[L] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad - \quad \text{удельная теплота парообразования (конденсации)} \quad -$$

количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг жидкости при температуре парообразования в газ при той же температуре.

Внутренняя энергия тела частично может освобождаться, когда с веществом происходит химическая реакция. Особенно много теплоты выделяется при реакции горения.

$$Q = qm \quad - \quad \text{количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива.}$$

$$[q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad - \quad \text{удельная теплота сгорания топлива} \quad - \quad \text{характеризует}$$

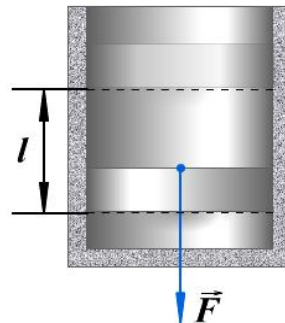
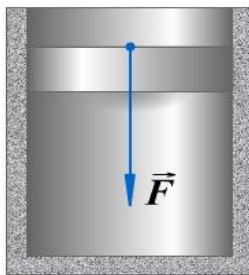
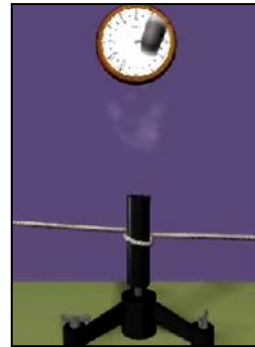
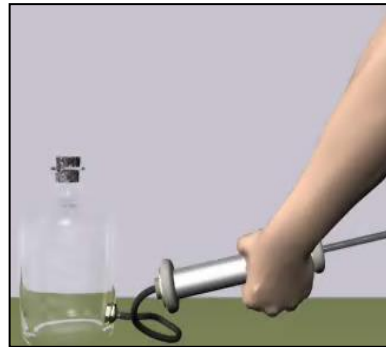
зависимость количества теплоты, выделяемого при сгорании топлива, от его вида. Измеряется количеством теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы топлива.

## Изменение внутренней энергии при выполнении работы.

Выполнение механической работы влечет за собой изменение температуры тела, которая непосредственно связана с изменением его внутренней энергии.

Работа – это мера изменения внутренней энергии.  $\Delta U = A$ ,  $[A] = \text{Дж}$ .

С другой стороны, за счет изменения внутренней энергии может выполняться работа. Сжатый газ в процессе своего расширения может выполнять работу.



$$A = Fl \cos \alpha$$

$$A = Fl$$

$$F = pS = p \frac{\Delta V}{l}$$

$$A = p\Delta V = p(V_2 - V_1)$$

### Первый закон термодинамики.

Первый закон термодинамики – это закон сохранения энергии для тепловых процессов.

Внутренняя энергия тела может быть изменена в процессе теплообмена или осуществления работы, причем оба эти процесса могут происходить одновременно. Все процессы в природе подчиняются закону сохранения и превращения энергии: энергия не возникает и не исчезает, она лишь превращается из одного вида в другой.

В соответствии с законом сохранения и превращения энергии изменение внутренней энергии системы должна быть равно сумме переданного ей количества теплоты и работы, совершенной над системой внешними силами.

**Первый закон термодинамики.** Изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:  $\Delta U = Q + A$ .

Так как  $A = -A'$ , имеем  $Q = \Delta U + A'$

Подведенное к системе количество теплоты частично идет на увеличение ее внутренней энергии и частично на выполнение системой работы над внешними силами.

**Невозможность создания вечного двигателя.** Из первого закона термодинамики следует невозможность создания вечного двигателя первого рода, т. е. устройства, способного совершать неограниченную работу без затрат топлива или каких-либо других материалов. Если к системе не поступает тепло ( $Q = 0$ ), то работа  $A'$  согласно уравнению  $Q = \Delta U + A'$  может быть совершена только за счёт убыли внутренней энергии:  $A' = -\Delta U$ .

После того как запас энергии окажется исчерпанным, двигатель перестанет работать.

В данном состоянии система всегда обладает определённой внутренней энергией. Но нельзя говорить, что в системе содержится определённое количество теплоты или работы. Как работа, так и количество теплоты являются величинами, характеризующими изменение внутренней энергии системы в результате того или иного процесса. Внутренняя энергия системы может измениться на одно и то же значение как за счёт совершения системой работы, так и за счёт передачи окружающим телам какого-либо количества теплоты. Например, нагретый газ в цилиндре может уменьшить свою энергию, остывая, без совершения работы. Но он может потерять точно такое же количество энергии, поднимая поршень, без отдачи теплоты окружающим телам. Для этого стенки цилиндра и поршень должны быть теплонепроницаемыми.

Газ может совершать работу и без сообщения ему теплоты.

Процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, называется **адиабатным процессом**.

Так, если сосуд с газом теплоизолировать от окружающей среды и предоставить возможность газу расширяться, то сила давления газа будет совершать положительную работу.

Согласно первому закону термодинамики количество теплоты, сообщенной системе (газу), идёт на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой механической работы. В данном случае системе теплота не сообщается и работа равна изменению внутренней энергии, взятому с обратным знаком:

$$A' = -\Delta U \quad (Q = 0).$$

Если газ расширяется, то положительная работа совершается газом за счёт уменьшения внутренней энергии:  $A' > 0$ ,  $\Delta U < 0$ . Внутренняя энергия газа является функцией температуры, следовательно, изменение температуры

газа также отрицательно:  $\Delta T < 0$ . При адиабатном расширении газ охлаждается.

При сжатии газа, когда внешние силы совершают положительную работу, а соответственно газ – отрицательную, внутренняя энергия газа увеличивается:  $A' < 0$ ,  $\Delta U > 0$ . При адиабатном сжатии газ нагревается.

Удельная теплоёмкость газа при адиабатном процессе равна нулю, так как  $Q = 0$ .

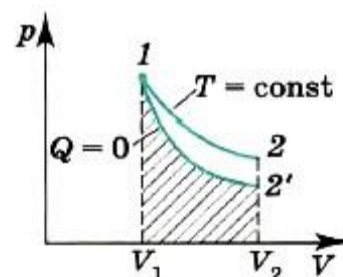
Адиабатный процесс вы можете наблюдать, накачивая насосом велосипедную камеру, насос быстро нагревается.

На горлышке бутылки с охлаждённой газированной водой при открывании образуется облачко тумана. При адиабатном расширении уменьшается температура, что приводит к конденсации пара.

Распространение звуковых волн, при котором происходит сжатие и разрежение воздуха, также является адиабатным процессом.

Повышение температуры при адиабатном сжатии наблюдается в дизельных двигателях. В них отсутствует система зажигания горючей смеси, необходимая для обычных карбюраторных двигателей внутреннего сгорания. В цилиндр засасывается не горючая смесь, а атмосферный воздух. К концу такта сжатия в цилиндр с помощью специальной форсунки впрыскивается жидкое топливо. К этому моменту температура воздуха так велика, что горючее воспламеняется.

Адиабатный процесс может быть реализован и при отсутствии теплоизоляции. Если процесс расширения или сжатия газа происходит настолько быстро, что за время процесса не успевает произойти теплообмен с внешней средой, то такой процесс также можно считать адиабатным.



На рисунке показаны процессы расширения газа от объёма  $V_1$  до объёма  $V_2$  при изотермическом и адиабатном процессах. Мы видим, что начальное состояние газа одно и то же. Так как при адиабатном процессе происходит понижение температуры, то кривая зависимости давления от температуры идёт ниже изотермы.

Мы знаем, что работа газа может быть вычислена по площади фигуры, ограниченной графиком зависимости  $p(V)$ , осью  $V$  и отрезками, численно равными давлениям при начальном и конечном состояниях газа. Из рисунка видно, что работа при адиабатном расширении меньше, чем при таком же изотермическом расширении.

## Применение первого закона термодинамики к различным процессам.

Название процесса	Полученное количество теплоты, $Q$	Выполненная работа, $A'$	Изменение внутренней энергии, $\Delta U$	Формула первого закона термодинамики	Формулировка первого закона термодинамики
Изотермическое расширение, $T=const$	$Q>0$	$A'=0$	$\Delta U >0$	$Q= \Delta U$	Все подведенное к системе количество теплоты идет на выполнение системой работы.
Изохорное нагревание, $V=const$	$Q>0$	$A'=0$	$\Delta U >0$	$Q= \Delta U$	Все подведенное к системе количество теплоты идет на изменение ее внутренней энергии.
Изобарное расширение, $p=const$	$Q>0$	$A'>0$	$\Delta U >0$	$Q= \Delta U + A'$	Подведенное к системе количество теплоты идет на изменение ее внутренней энергии и выполнение ею работы.
Адиабатное расширение, $Q=0$	$Q=0$	$A'>0$	$\Delta U <0$	$A'=- \Delta U$	При расширении газа выполняется работа за счет внутренней энергии газа.

## Лекция №13

### Необратимость процессов в природе. Второй закон термодинамики.

#### План

1. Необратимость процессов в природе.
2. Второй закон термодинамики.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что понимают под обратимыми и необратимыми процессами? Почему все процессы, сопровождающиеся механическим трением, являются необратимыми?
2. Приведите словесные формулировки второго начала термодинамики.
3. Как формулируется второй закон термодинамики?
4. Какое состояние газа является наиболее вероятным и соответствует равновесному состоянию?
5. Что такое «вечный двигатель» второго рода? В чем различие между «вечным двигателем» первого и второго рода?

## Необратимость процессов в природе.

Мы уже отмечали, что первый закон термодинамики – это частный случай закона сохранения энергии.

Закон сохранения энергии утверждает, что количество энергии при любых её превращениях остаётся неизменным. Между тем многие процессы, вполне допустимые с точки зрения закона сохранения энергии, никогда не протекают в действительности. Например, с точки зрения первого закона термодинамики в изолированной системе возможен переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому, если количество теплоты, полученной горячим телом, точно равно количеству теплоты, отданной холодным телом. В то же время наш опыт подсказывает, что это невозможно.

Первый закон термодинамики не указывает направление процессов.

Второй закон термодинамики указывает направление возможных энергетических превращений, т. е. направление процессов, и тем самым выражает необратимость процессов в природе. Этот закон был установлен путём непосредственного обобщения опытных фактов.

Есть несколько формулировок второго закона, которые, несмотря на внешнее различие, выражают, в сущности, одно и то же и поэтому равноценны.

Немецкий учёный Р. Клаузиус (1822-1888) сформулировал этот закон так: Невозможно перевести тепло от более холодной системы к более горячей при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или в окружающих телах.

Здесь констатируется опытный факт определённой направленности теплопередачи: тепло само собой переходит всегда от горячих тел к холодным. Правда, в холодильных установках осуществляется теплопередача от холодного тела к более тёплому, но эта передача связана с другими изменениями в окружающих телах: охлаждение достигается за счёт работы.

Важность этого закона в том, что из него можно вывести заключение о необратимости не только процесса теплопередачи, но и других процессов в природе.

Рассмотрим пример. Колебания маятника, выведенного из положения равновесия, затухают (рис. 1) 1, 2, 3, 4 – последовательные положения маятника при максимальных отклонениях от положения равновесия). За счёт работы сил трения механическая энергия маятника убывает, а температура маятника и окружающего воздуха (а значит, и их внутренняя энергия) слегка повышается.



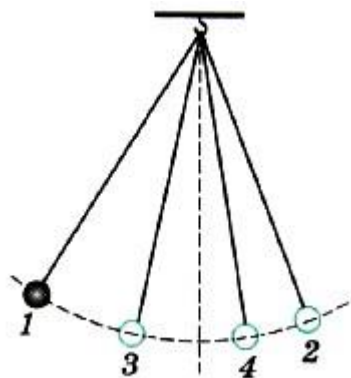


Рисунок 1.

Можно вновь увеличить размах колебаний маятника, подтолкнув его рукой. Но это увеличение возникает не само собой, а становится возможным в результате более сложного процесса, включающего движение руки.

Механическая энергия самопроизвольно переходит во внутреннюю, но не наоборот. При этом энергия упорядоченного движения тела как целого превращается в энергию неупорядоченного теплового движения составляющих его молекул.

Ещё один пример – процесс диффузии. Открыв пузырёк с духами, мы быстро почувствуем запах духов. Молекулы ароматического вещества благодаря тепловому движению проникают в пространство между молекулами воздуха. Трудно представить, чтобы все они вновь собрались в пузырьке.

Число подобных примеров можно увеличивать практически неограниченно. Все они говорят о том, что процессы в природе имеют определённую направленность, никак не отражённую в первом законе термодинамики.

Все макроскопические процессы в природе протекают только в одном определенном направлении.

В обратном направлении они самопроизвольно протекать не могут. Все процессы в природе необратимы.

Раньше при рассмотрении процессов мы предполагали, что они являются обратимыми.

**Обратимый процесс** – это процесс, который можно провести в прямом и обратном направлениях через одни и те же промежуточные состояния без изменений в окружающих телах.

Обратимый процесс должен протекать очень медленно, чтобы каждое промежуточное состояние было равновесным.

**Равновесное состояние** – это состояние, при котором температура и давление во всех точках системы одинаковы.

Следовательно, чтобы система пришла в равновесное состояние, необходимо время.

При изучении изопроцессов мы предполагали, что переход из начального состояния в конечное проходит через равновесные состояния, и считали изотермический, изобарный и изохорный процессы обратимыми.

Идеальных обратимых процессов в природе не существует, однако реальные процессы можно с определённой степенью точности рассматривать как обратимые, что является очень важным для теории.

### **Второй закон термодинамики.**

Яркой иллюстрацией необратимости явлений в природе служит просмотр кинофильма в обратном направлении. Например, прыжок в воду будет при этом выглядеть следующим образом. Спокойная вода в бассейне начинает бурлить, появляются ноги, стремительно движущиеся вверх, а затем и весь ныряльщик. Поверхность воды быстро успокаивается. Постепенно скорость ныряльщика уменьшается, и вот уже он спокойно стоит на вышке. Такой процесс, как вознесение ныряльщика на вышку из воды, не противоречит ни закону сохранения энергии, ни законам механики, ни вообще каким-либо законам, кроме второго закона термодинамики.

Второй закон термодинамики определяет направление процессов в изолированной системе, однако этот закон носит статистический (вероятностный) характер.

Любое макросостояние системы, характеризующееся некоторыми макропараметрами, определяется его микросостояниями. Например, для газа давление и температура определяются числом молекул, их скоростью, распределением молекул по объёму сосуда. Если система предоставлена самой себе и она изолирована, то, как мы знаем, постепенно достигается равновесное состояние, при котором давление и температура во всех точках одинаковы. Процесс перехода системы из неравновесного состояния в равновесное – необратимый процесс.

Равновесное состояние соответствует хаотичному движению молекул, т. е. система с точки зрения микросостояний приходит к полному хаосу. Хаотичное движение предполагает непрерывное перемещение молекул газа по объёму, обмен скоростями. Естественно, если мы сможем проследить за отдельными молекулами, то они в разные моменты времени оказываются в разных частях сосуда. Число молекул, находящихся в выделенном объёме, также может быть различным и т. д. В то же время макропараметры газа не меняются.

Движение молекул – это механическое движение, которое является обратимым. В то же время все необратимые процессы, такие, как теплообмен, происходят вследствие механического движения атомов и молекул, так как столкновения молекул обеспечивают передачу энергии. Итак, необратимые процессы являются следствием обратимого механического движения.

Чтобы соединить эти два неоспоримых факта, Л. Больцман использовал понятие вероятности. Так, состояние газа, при котором молекулы движутся хаотично, является наиболее вероятным, наиболее вероятным является и равномерное распределение молекул по объёму сосуда.

Однако возможно, что благодаря случайным перемещениям молекул все они окажутся в какой-то части сосуда, но вероятность такого состояния чрезвычайно мала.

Соответственно не противоречит законам природы даже такой процесс, в результате которого при случайном движении молекул воздуха все они соберутся в одной половине класса, а учащиеся в другой половине класса задохнутся. Но реально это событие никогда не происходило в прошлом и не произойдёт в будущем. Слишком мала вероятность подобного события, чтобы оно когда-либо случилось за всё время существования Вселенной в современном её состоянии – около нескольких миллиардов лет.

По приблизительным оценкам, эта вероятность примерно такого же порядка, как и вероятность того, что 20 000 обезьян, хаотично ударяя по клавишам пишущих машинок, напечатают без единой ошибки «Войну и мир» Л. Н. Толстого. В принципе это возможно, но реально никогда не произойдёт.

Вероятность обратных процессов перехода от равновесных состояний к неравновесным для макроскопических систем в целом очень мала. Но для малых объёмов, содержащих небольшое число молекул, вероятность отклонения от равновесия становится заметной. Такие случайные отклонения системы от равновесия называются **флуктуациями**.

Именно флуктуациями плотности газа в областях порядка длины световой волны объясняются рассеяние света в атмосфере Земли и голубой цвет неба. Флуктуации давления в малых объёмах объясняют броуновское движение. Наблюдение флуктуации служит важнейшим доказательством правильности созданной Больцманом статистической теории необратимости макропроцессов. Второй закон термодинамики выполняется только для систем с огромным числом частиц. В малых объёмах уже становятся существенными отклонения от этого закона.

## Лекция №14

### Принцип действия тепловых двигателей.

#### План

1. Принцип действия тепловых двигателей.
2. Цикл Карно.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называют циклом? В чем различие прямого и обратного циклов?
2. Какое устройство называют тепловым двигателем?
3. Как устроен тепловой двигатель?
4. Какова роль нагревателя, холодильника и рабочего тела в тепловом двигателе?
5. Как определяют работу, совершенную двигателем?
6. Почему циклы всех реальных тепловых машин необратимы?
7. Что называют коэффициентом полезного действия тепловой машины?
8. Какой цикл называют обратимым циклом Карно? Из каких процессов он состоит?
9. Как определить КПД идеальной тепловой машины?
10. Назовите типы тепловых двигателей.
11. Приведите примеры использования тепловых двигателей.

## Принцип действия тепловых двигателей.

Отметим, что именно создание теории тепловых двигателей привело к формулированию второго закона термодинамики.

Запасы внутренней энергии в земной коре и океанах можно считать практически неограниченными. Но для решения практических задач располагать запасами энергии ещё недостаточно. Необходимо так же уметь за счёт энергии приводить в движение станки на фабриках и заводах, средства транспорта, тракторы и другие машины, вращать роторы генераторов электрического тока и т. д. Человечеству нужны двигатели – устройства, способные совершать работу. Большая часть двигателей на Земле – это тепловые двигатели.

**Тепловые двигатели** – это устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую работу.

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 или тысячи градусов по сравнению с температурой окружающей среды. Такое повышение температуры происходит при сгорании топлива.

Одна из основных частей двигателя – сосуд, наполненный газом, с подвижным поршнем. Рабочим телом у всех тепловых двигателей является газ, который совершает работу при расширении. Обозначим начальную температуру рабочего тела (газа) через  $T_1$ . Эту температуру в паровых турбинах или машинах приобретает пар в паровом котле. В двигателях внутреннего сгорания и газовых турбинах повышение температуры происходит при сгорании топлива внутри самого двигателя. Температуру  $T_1$  называют **температурой нагревателя**.

По мере совершения работы газ теряет энергию и неизбежно охлаждается до некоторой температуры  $T_2$ , которая обычно несколько выше температуры окружающей среды. Её 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 окружающего воздуха.

Таким образом, в двигателе рабочее тело при расширении не может отдать всю свою внутреннюю энергию на совершение работы. Часть тепла неизбежно передаётся холодильнику (атмосфере) вместе с отработанным

паром или выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин.

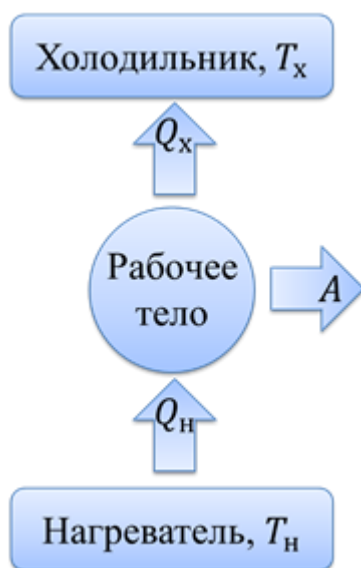


Рисунок 2.

Эта часть внутренней энергии топлива 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 (холодильнику). Принципиальная схема теплового двигателя изображена на рисунке 2.

Рабочее тело двигателя получает от нагревателя при сгорании топлива количество теплоты  $Q_1$ , совершает работу  $A'$  и передаёт холодильнику количество теплоты  $Q_2 < Q_1$ .

Для того чтобы двигатель работал непрерывно, необходимо рабочее тело вернуть в начальное состояние, при котором температура рабочего тела равна  $T_1$ . Отсюда следует, что работа двигателя происходит по периодически повторяющимся замкнутым процессам, или, как говорят, по циклу.

**Цикл** – это ряд процессов, в результате которых система возвращается в начальное состояние.

Невозможность полного превращения внутренней энергии газа в работу тепловых двигателей обусловлена необратимостью процессов в природе. Если бы тепло могло самопроизвольно возвращаться от холодильника к нагревателю, то внутренняя энергия могла бы быть полностью превращена в полезную работу с помощью любого теплового двигателя. Второй закон термодинамики может быть сформулирован следующим образом: **невозможно создать вечный двигатель второго рода, Двигатель, который полностью превращал бы теплоту в механическую работу.**

Согласно закону сохранения энергии работа, совершаемая двигателем, равна:  $A' = Q_1 - |Q_2|$ , где  $Q_1$  – количество теплоты, полученное от нагревателя, а  $Q_2$  – количество теплоты, отданное холодильнику.

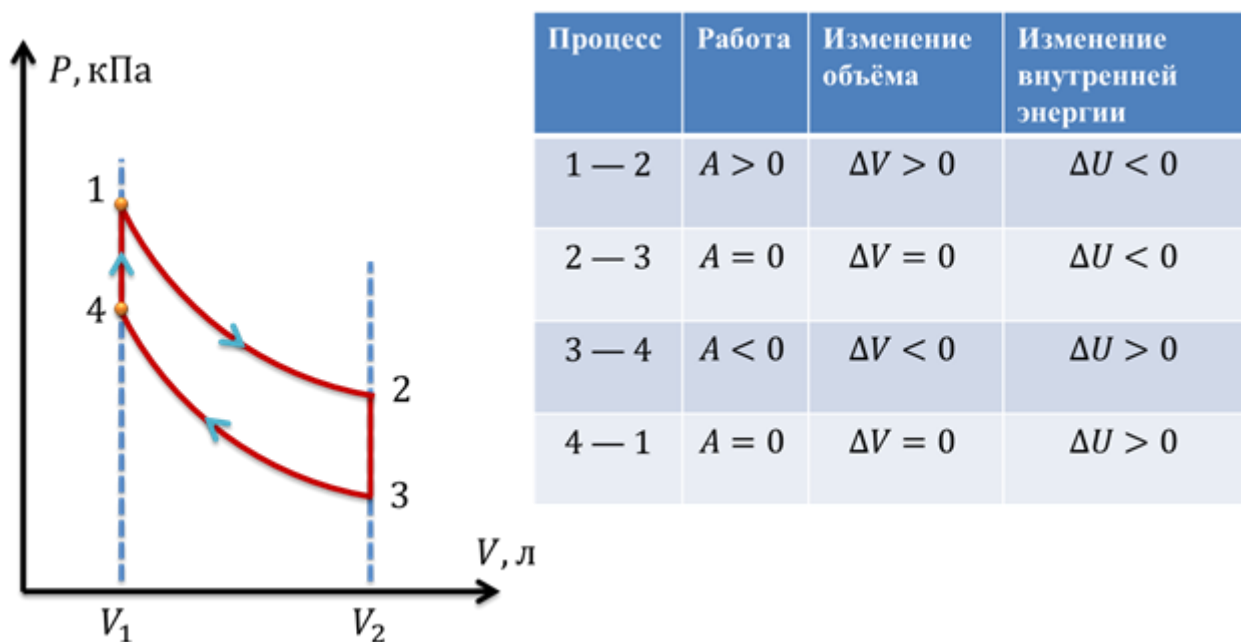
**Коэффициентом полезного действия** (КПД) теплового двигателя называют отношение работы  $A'$ , совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}.$$

Так как у всех двигателей некоторое количество теплоты передаётся холодильнику, то  $\eta < 1$ .

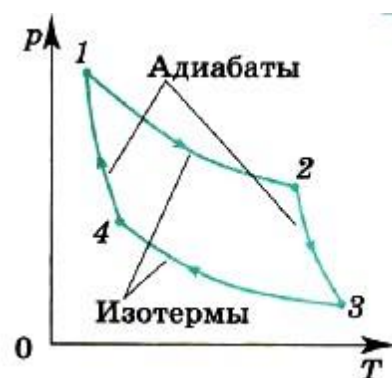
Законы термодинамики позволяют вычислить максимально возможный КПД теплового двигателя, работающего с нагревателем, имеющим температуру  $T_1$ , и холодильником с температурой  $T_2$ , а также определить пути его повышения.

Для наглядности мы можем изобразить графически работу теплового двигателя.



Впервые максимально возможный КПД теплового двигателя вычислил французский инженер и учёный Сади Карно (1796—1832) в труде «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824).

Карно придумал идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве





рабочего тела. Идеальная тепловая машина Карно работает по циклу, состоящему из двух изотерм и двух адиабат, причем эти процессы считаются обратимыми (рис. 3). Сначала сосуд с газом приводят в контакт с нагревателем, газ изотермически расширяется, совершая положительную работу, при температуре  $T_1$ , при этом он получает количество теплоты  $Q_1$ .

Затем сосуд теплоизолируют, газ продолжает расширяться уже адиабатно, при этом его температура понижается до температуры холодильника  $T_2$ . После этого газ приводят в контакт с холодильником, при изотермическом сжатии он отдаёт холодильнику количество теплоты  $Q_2$ , сжимаясь до объёма  $V_4 < V_1$ . Затем сосуд снова теплоизолируют, газ сжимается адиабатно до объёма  $V_1$  и возвращается в первоначальное состояние. Для КПД этой машины было получено следующее выражение:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Как следует из формулы, КПД машины Карно прямо пропорционален разности абсолютных температур нагревателя и холодильника.

Главное значение этой формулы состоит в том, что в ней указан путь увеличения КПД, для этого надо повышать температуру нагревателя или понижать температуру холодильника.

Любая реальная тепловая машина, работающая с нагревателем, имеющим температуру  $T_1$ , и холодильником с температурой  $T_2$ , не может иметь КПД, превышающий КПД идеальной тепловой машины:

$$\frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Процессы, из которых состоит цикл реальной тепловой машины, не являются обратимыми.

Формула даёт теоретический предел для максимального значения КПД тепловых двигателей. Она показывает, что тепловой двигатель тем эффективнее, чем больше разность температур нагревателя и холодильника.

Лишь при температуре холодильника, равной абсолютному нулю,  $\eta=1$ . Кроме этого доказано, что КПД, рассчитанный по формуле, не зависит от рабочего вещества.

Но температура холодильника, роль которого обычно играет атмосфера, практически не может быть ниже температуры окружающего воздуха. Повышать температуру нагревателя можно. Однако любой материал (твёрдое тело) обладает ограниченной теплостойкостью, или жаропрочностью. При нагревании он постепенно утрачивает свои упругие свойства, а при достаточно высокой температуре плавится.



Сейчас основные усилия инженеров направлены на повышение КПД двигателей за счёт уменьшения трения их частей, потерь топлива вследствие его неполного сгорания и т. д.

Для паровой турбины начальные и конечные температуры пара примерно таковы:  $T_1 - 800$  К и  $T_2 - 300$  К. При этих температурах максимальное значение коэффициента полезного действия равно 62% (отметим, что обычно КПД измеряют в процентах). Действительное же значение КПД из-за различного рода энергетических потерь приблизительно равно 40 %. Максимальный КПД – около 44% – имеют двигатели Дизеля.

Трудно представить современный мир без тепловых двигателей. Именно они обеспечивают нам комфортную жизнь. Тепловые двигатели приводят в движение транспорт. Около 80% электроэнергии, несмотря на наличие атомных станций, вырабатывается с помощью тепловых двигателей.

Однако при работе тепловых двигателей происходит неизбежное загрязнение окружающей среды. В этом заключается противоречие: с одной стороны, человечеству с каждым годом необходимо всё больше энергии, основная часть которой получается за счёт сгорания топлива, с другой стороны, процессы сгорания неизбежно сопровождаются загрязнением окружающей среды.

При сгорании топлива происходит уменьшение содержания кислорода в атмосфере. Кроме этого, сами продукты сгорания образуют химические соединения, вредные для живых организмов. Загрязнение происходит не только на земле, но и в воздухе, так как любой полёт самолёта сопровождается выбросами вредных примесей в атмосферу.

Одним из следствий работы двигателей является образование углекислого газа, который поглощает инфракрасное излучение поверхности Земли, что приводит к повышению температуры атмосферы. Это так называемый парниковый эффект. Измерения показывают, что температура атмосферы за год повышается на 0,05 °С. Такое непрерывное повышение температуры может вызвать таяние льдов, что, в свою очередь, приведёт к изменению уровня воды в океанах, т. е. к затоплению материков.

Отметим ещё один отрицательный момент при использовании тепловых двигателей. Так, иногда для охлаждения двигателей используется вода из рек и озёр. Нагретая вода затем возвращается обратно. Рост температуры в водоёмах нарушает природное равновесие, это явление называют тепловым загрязнением.

Для охраны окружающей среды широко используются различные очистительные фильтры, препятствующие выбросу в атмосферу вредных веществ, совершенствуются конструкции двигателей. Идёт непрерывное

усовершенствование топлива, дающего при сгорании меньше вредных веществ, а также технологии его сжигания. Активно разрабатываются альтернативные источники энергии, использующие ветер, солнечное излучение, энергию ядра. Уже выпускаются электромобили и автомобили, работающие на солнечной энергии.

### Задача 1

Температура холодильника равна 20 °С. Какова должна быть температура нагревателя, чтобы стало возможным достичь значения КПД теплового двигателя, равное 85%?

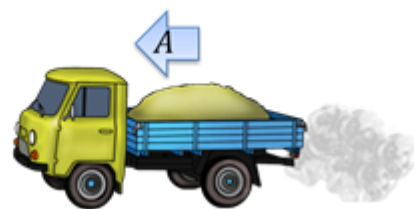
Дано: $T_x = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\eta = 85\%$ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $T_H = ?$	СИ 293 К	$\eta = \frac{T_H - T_x}{T_H} = 1 - \frac{T_x}{T_H}$  $\frac{T_x}{T_H} = 1 - \eta$  $T_H = \frac{T_x}{1 - \eta}$  $T_H = \frac{293}{1 - 0,85} \approx 1953 \text{ К}$
--	-------------	---



### Задача 2

Двигатель внутреннего сгорания совершил полезную работу, равную 45 МДж. Если КПД этого двигателя составляет 55%, то, сколько литров бензина было израсходовано на совершение данной работы? Плотность бензина равна 710 кг/м³.

Дано: $A = 4,5 \times 10^7 \text{ Дж}$ $\eta = 0,55$ $\rho = 710 \text{ кг/м}^3$ <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $V = ?$	$\eta = \frac{A}{Q_H} \quad Q_H = qm$  $\eta = \frac{A}{qm} = \frac{A}{q\rho V}$  $V = \frac{A}{q\rho\eta} = \frac{4,5 \times 10^7}{4,6 \times 10^7 \times 710 \times 0,55} = 0,0025 \text{ м}^3$
--	---



## Тема 4. Основы электродинамики

### Лекция №15

#### Электрический заряд. Закон Кулона.

##### План

1. Электрический заряд. Закон сохранения заряда.
2. Закон Кулона.

##### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

##### Вопросы для самоконтроля:

1. Что изучает электродинамика
2. Что такое электрический заряд? В каких единицах его измеряют?
3. В чем сходство и различие электрического заряда и гравитационной массы?
4. Как взаимодействуют одноименные и разноименные электрические заряды?
5. Какой заряд называют элементарным? Каково его значение?
6. В чем заключается явление электризации? Объясните это явление с точки зрения электронной теории.
7. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
8. Что определяет закон Кулона
9. Как формулируют и записывают закон Кулона для взаимодействия зарядов в вакууме?
10. Запишите закон Кулона для взаимодействия зарядов с учетом среды в СИ.
11. Чему равен коэффициент пропорциональности  $k$  в законе Кулона в СИ?
12. Чему равна электрическая постоянная?
13. Какое значение заряда и массы электрона?
14. Можно ли электрический заряд делить бесконечно?

## 1. Электрический заряд. Закон сохранения заряда.

Сегодня мы начинаем изучение нового раздела, который называется электродинамикой. **Электродинамика** – это наука о свойствах и закономерностях поведения электромагнитного поля, посредством которого происходит взаимодействие электрически заряженных частиц и тел.

Напомним, что электромагнитное взаимодействие является одним из четырех типов фундаментальных взаимодействий.



Именно электромагнитные взаимодействия имеют наиболее разнообразные проявления. Электромагнитные явления позволяют видеть все, что вы видите вокруг себя, поскольку свет является одной из форм электромагнитного поля, а без света нельзя было бы что-либо увидеть.

В глубокой древности (еще более 600 гг. до н.э.) в Древней Греции люди заметили, что при обработке янтаря, натирке его кусков шерстью, они начинают притягивать к себе мелкие легкие предметы. В дальнейшем было установлено, что этим свойством обладают и другие вещества – стеклянная палочка, потертая о шелк, эбонит, потертый сукном или мехом.

Если потереть сухим сукном эбонитовую палочку, то и сукно начнет притягивать кусочки бумаги. Это указывает на то, что при натирке электризуются оба тела. Тонкие струи воды также притягиваются к стеклянной палочке.

Эти явления в начале 17 в. были названы электрическими (от греческого электрон – янтарь). Стали говорить, что тело, которое получило после натирания способность притягивать другие тела, наэлектризовано, или, что ему сообщен электрический заряд.

**Электрический заряд** – это скалярная физическая величина, характеризующая свойство тел и элементарных частиц вступать в электрическую взаимодействие.

По современным представлениям, электрический заряд является физической величиной, которая определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий.

Электрический заряд тела обозначают буквой  $q$  и измеряют в кулонах (Кл). Электрический заряд является мерой электрического взаимодействия. Он не может существовать без материального носителя.

**Электризация** – это процесс получения электрически заряженных макроскопических тел с электрически нейтральных. Электрический заряд может передаваться от одного тела к другому. Для этого необходимо лишь прикоснуться наэлектризованным телом другого тела. При этом часть электрического заряда переходит на другое тело. И это тело начнет притягивать мелкие бумажки, пушинки и другие легкие тела.

Различные опыты по электризации тел показали, что существуют только два типа электрического взаимодействия – притяжение и отталкивание.

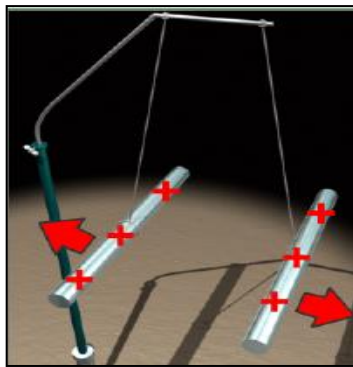


Рисунок 1 – Взаимодействие заряженных тел

Договорились называть заряд, возникающий при натирании стекла шелком, положительным и обозначать его знаком «+», заряд, возникающий при натирании эбонита шерстью, договорились считать отрицательным и обозначать знаком «-». Выбор названия этих зарядов был исторической случайностью. Так заряд, который был назван положительным, с тем же успехом можно было бы назвать отрицательным.

Из опытов мы убедились, что два разнородных тела (то есть тела из различных веществ) приобретают при электризации новое качество – способность вступать в электрическое взаимодействие.

Явление электризации подчиняется **закону сохранения электрического заряда**: во всех явлениях электризации тел в замкнутой системе суммарный электрический заряд сохраняется неизменным.

$$\sum_{i=1}^N q_i = const$$

Суммарный заряд электрически изолированной системы не меняется.

Электрические заряды не создаются и не исчезают, а только передаются от одного тела к другому или перераспределяются внутри данного тела:

Это означает, что когда одно тело приобретает положительный электрический заряд, то второе тело тоже приобретает такой же, но отрицательный электрический заряд.

Простейшими приборами для изучения и сравнения электрических зарядов являются так называемые электроскопы (слово «электроскоп» образовано из двух греческих слов: электрон и скопео – наблюдать, проявлять). Он состоит из металлического стержня с листочками бумаги на нижнем конце. Стержень пропущен через пластмассовую пробку, вставленную в металлический корпус. Корпус с обеих сторон закрыт стеклом. На верхний конец стержня посажены металлический шарик (рис. 2, а).

Если к положительно заряженному электроскопу приблизить положительно заряженную палочку, то его листочки разойдутся на больший угол. Приближая к электроскопу палочку, заряженную отрицательно, угол расхождения между листочками уменьшится. Таким образом, заряженный электроскоп позволяет определить, каким зарядом заряжено то или иное тело. По углу расхождения листочков можно определить также уменьшился или увеличился заряд электроскопа.

В лабораторной практике используют более современный прибор – так называемый электрометр Брауна. Здесь, как и в Электроскоп в металлический корпус, закрытый с обеих сторон стеклом вставлена через пластмассовую пробку металлический стержень, на котором посередине на оси закреплена легкая металлическая стрелка. На верхнем конце стержня для удобства зарядания закреплена металлическая шарик (рис. 2, б).

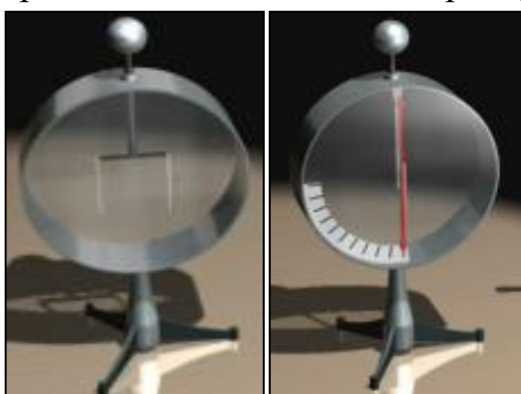


Рисунок 2 – Приборы для изучения и сравнения электрических зарядов, а – электроскоп, б – электрометр

Если передать стержню электрический заряд (в данном случае – положительный), то стрелка, зарядившись от наэлектризованного тела, отклонится от одноименно заряженного стержня на определенный угол, который может быть зафиксированным на шкале и свидетельствовать о величине заряда на электрометре.

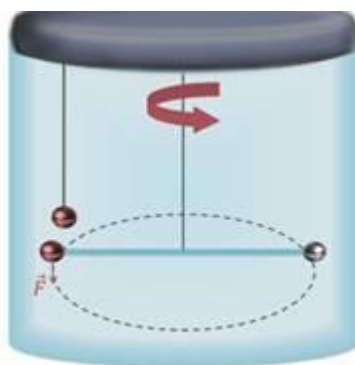
## 2. Закон Кулона.

**Электростатика** – это ветвь электродинамики, которая изучает взаимодействие покоящихся зарядов.

Основной закон электростатики – закон взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов (электрически заряженных тел, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними) установил французский физик Кулон в 1785, и поэтому его назвали законом Кулона.

Проводя свои опыты, Шарль Кулон пришел к выводу, что сила взаимодействия между двумя покоящимися зарядами прямо пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Обратите внимание, насколько похожа эта формулировка на формулировку закона всемирного тяготения. Да и сам эксперимент, проведенный Шарлем Кулоном, очень напоминает эксперимент Генри Кавендиша. Кулон тоже использовал крутильные весы, находящиеся в цилиндре, в котором был откачан весь воздух. Стеклянная палочка, на которой укреплены два одинаковых металлических шарика, подвешена на тонкой упругой проволочке.



Один из металлических шариков является заряженным, а другой служит противовесом. К заряженному шарiku подводится третий шарик, с одноименным зарядом той же величины. В результате шарики начинают отталкиваться, что приводит к закручиванию проволочки. По этому закручиванию можно определить силу взаимодействия, а расстояние между шариками можно узнать с помощью несложных измерений. Основная

сложность заключалась в изменении величины заряда, поскольку в то время даже не было единиц измерения электрического заряда. Однако Кулон предположил (и это предположение верно), что одинаковые шарики одинаково заряжаются при соприкосновении. Иными словами, если прикоснуться незаряженным шариком к заряженному шариком тех же размеров и массы, то заряд разделится пополам. Таким образом, Шарль Кулон нашел способ уменьшать заряд в 2, 4, 8 и более раз. Итак, **закон Кулона гласит следующее: сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:**

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

Данную силу взаимодействия часто называют **силой Кулона** или **кулоновской силой**. Напомним, что **точечными зарядами** обладают тела, **размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием между ними**.

Закон Кулона также применим, если оба тела имеют правильную форму, то есть форму шара. В этом случае, за расстояние между телами принимается расстояние между центрами этих тел. В формуле, описывающей закон Кулона,  $k$  – это коэффициент пропорциональности, о котором мы поговорим чуть позже. Для вычисления силы Кулона мы используем модули зарядов, а, следовательно, можем определить только модуль силы. Как вы понимаете, если мы подвесим заряженные шарики на нитях, то они будут либо притягиваться, либо отталкиваться. Таким образом, **силы взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами направлены вдоль прямой, проходящей через эти заряды**. Исходя из третьего закона Ньютона, шарики действуют друг на друга с силами равными по модулю и противоположными по направлению.

Как вы знаете из курса физики восьмого класса, величина электрического заряда измеряется в кулонах, именно в честь Шарля Кулона, который открыл только что изученный нами закон. **1 Кл** – это заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за 1 с при силе тока 1 А.

Теперь мы можем вернуться к коэффициенту пропорциональности в законе Кулона и определиться с его единицами измерения:

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1||q_2|}$$

$$[k] = \left[ \frac{\text{Н} \times \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \right]$$



Надо сказать, что 1 Кл – это очень большой заряд. Даже находясь на расстоянии 200 м друг от друга, два точечных разноименных заряда будут притягиваться примерно с той же силой, с которой Земля притягивает укомплектованный истребитель.

Напомним теперь, что заряд электрона является наименьшим зарядом в природе:

$$q_e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$$

Необходимо отметить, что заряд любого тела всегда кратен минимальному заряду, поскольку к телу может присоединиться только целое число электронов:

$$Q = Nq_e, N \in \mathbb{N}$$

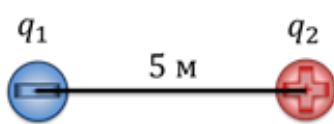
Однако, если речь идет о заряде многократно превышающим минимальный заряд, то проверять кратность не имеет смысла. Тем не менее, в ядерной физике данное правило очень важно.

Хотелось бы еще раз отметить, насколько закон Кулона похож на закон всемирного тяготения. В обоих случаях силы взаимодействия обратно пропорциональны квадрату расстояния. Также, кулоновская сила прямо пропорциональна произведению модулей зарядов, а сила тяготения прямо пропорциональна массам. Это тоже является очевидным сходством (если считать заряды за количество электричества, а массу за количество вещества). Даже области применения и того, и другого закона совпадают. Оба закона применимы к материальным точкам или к телам сферической формы.

### Пример решения задачи

#### Задача 1.

Два равных по модулю разноименных точечных заряда взаимодействуют с силой, равной 10 Н. Определите величину этих зарядов, если они находятся на расстоянии 5 м друг от друга.

Дано: $ q_1  =  q_2 $ $F = 10 \text{ Н}$ $r = 5 \text{ м}$ <hr style="width: 50%; margin: 5px 0;"/> $ q  = ?$	$F = k \frac{ q_1  q_2 }{r^2}$ $ q_1  =  q_2  = q$ $F = k \frac{q^2}{r^2}$ $q =  q_1  =  q_2  = \sqrt{\frac{Fr^2}{k}} = \sqrt{\frac{10 \times 5^2}{9 \times 10^9}} \approx 167 \text{ мкКл}$	
---	--	--

## Лекция №16

### Электрическое поле. Напряженность. Потенциал.

#### План

1. Электрическое поле. Напряженность электрического поля.
2. Потенциал электростатического поля.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что такое электрическое поле?
2. Назовите основные свойства электрического поля.
3. Какое поле называют электростатическим?
4. Что называют напряженностью электрического поля? Какая формула выражает смысл этого понятия?
5. Чему равна напряженность точечного заряда?
6. Объясните суть принципа суперпозиции электрических полей.
7. Что называют линиями напряженности электрического поля?
8. Назовите свойства линий напряженности электрического поля.
9. Какое электрическое поле называют однородным?
10. Приведите примеры графического изображения электрических полей.
11. Какое направление имеет вектор напряженности электрического поля?
12. Что называют потенциалом?
13. Чему равна работа электростатического поля по замкнутому контуру?
14. Какая связь между напряженностью и напряжением электрического поля?

## 1. Электрическое поле. Напряженность электрического поля.

На прошлом занятии мы познакомились с основным законом электростатики, то есть, с законом Кулона. Однако, не было никакой уверенности в том, как именно осуществляется взаимодействие между зарядами. На этот счет было два основных мнения: *теория близкодействия* и *теория дальнего действия* (или теория действия на расстоянии). **Теория близкодействия заключается в том, что всякое взаимодействие осуществляется посредством какого-то промежуточного звена (то есть переносчика взаимодействия).**

**Теория дальнего действия, напротив, говорит о том, что всякое взаимодействия осуществляется мгновенно и через пустоту, то есть действие со стороны любых тел может передаваться мгновенно на сколь угодно большие расстояния.**

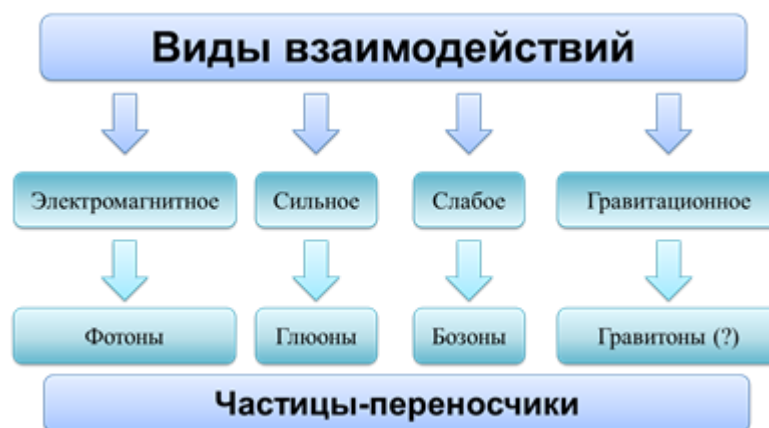
Рассмотрим некоторые примеры из жизни, подтверждающие теорию близкодействия. Например, когда вы разговариваете с собеседником, ваши голосовые связки оказывают воздействие на слуховые нервы собеседника. Но передается это воздействие через воздух. Из курса физики девятого класса вы знаете, как передаются звуковые волны. Ваши голосовые связки возбуждают колебания среды (в данном случае воздуха), и эти колебания передаются через воздух, после чего раздражают слуховой нерв собеседника. Точно таким же способом вы слышите музыку. Заметим, что это действие происходит с определенной скоростью – скоростью звука. То есть, на то, чтобы оказать воздействие требуется определенный промежуток времени. Также, если вы что-то рисуете, то оказываете некое воздействие на бумагу, посредством карандаша или кисти. Разрезая арбуз или яблоко, вы оказываете воздействие посредством ножа.

Многие ученые объясняли гравитационные и электромагнитные взаимодействия некими невидимыми и неосязаемыми субстанциями, которые, по их мнению, заполняли все пространство. Например, в 17 в. известным математиком, физиком и философом Рене Декартом была выдвинута теория о существовании так называемого мирового (или физического) эфира. Согласно этой теории, все пространство заполнено неким эфиром, посредством которого передаются электромагнитные волны (в том числе свет). Однако, в обосновании этой теории возникли серьезные трудности после того, как выяснили, что электромагнитные волны являются поперечными, а это свойство присуще только твердым телам, как вы знаете из курса физики девятого класса.

Позднее, когда Ньютон открыл закон всемирного тяготения, от теории близкодействия и вовсе отказались. Возникла теория дальнего действия. Действительно, изучая Солнечную систему, люди видели, что Луна вращается вокруг Земли, а Земля – вокруг Солнца. Казалось бы, несмотря на огромные расстояния, тяготение передается мгновенно без каких-либо посредников. Кстати, сторонником теории дальнего действия был и Шарль Кулон, который также наблюдал взаимодействие электрических зарядов без всяких видимых посредников.

То же самое можно сказать и о магнитах, которые способны притягивать металлические тела на расстоянии. Более того, если между магнитом и металлом поместить лист бумаги или даже деревянный брусок, магнит все равно продолжает оказывать воздействие на металл.

Несмотря на эти аргументы, в 19 в Майкл Фарадей провел очень серьезные исследования, в которых доказал, что взаимодействие между электрическими зарядами, все-таки, происходит с помощью неких частиц. Позднее, Джеймс Максвелл установил, что всякое взаимодействие между заряженными телами происходит в течение определенного промежутка времени (а не мгновенно). Это подтверждало опыты Фарадея. То есть, работы Фарадея и Максвелла указывали на то, что, все-таки существуют некие переносчики электромагнитного взаимодействия. Следовательно, должны быть и какие-то частицы-переносчики других фундаментальных видов взаимодействий.



На сегодняшний день считается, что переносчиками электромагнитного взаимодействия являются фотоны. За сильное взаимодействие отвечают частицы, которые называются глюонами, а переносчиками слабого взаимодействия являются некоторые виды бозонов. Подробнее об этих частицах мы будем говорить в одиннадцатом классе. Переносчиком гравитационного взаимодействия является гипотетическая частица, которая называется гравитоном. Дело в том, что эта частица еще не открыта, но ее открытие предсказано, также как и открытие бозона Хиггса.

Узнав о частицах, которые являются переносчиками взаимодействия, мы можем дать определение электрическому полю.

**Электрическое поле – это особая форма материи, которая создается электрическими зарядами и оказывает воздействие на другие заряды.**

Именно в этом и состояла идея Майкла Фарадея: заряды не действуют друг на друга непосредственно. Они окружены электрическим полем, посредством которого и осуществляется взаимодействие. Прямых доказательств существования полей получить не удалось до тех пор, пока не были проведены исследования взаимодействий движущихся зарядов. В результате таких исследований было доказано существование электромагнитных полей, которые могли изменяться с течением времени. Как вы знаете, вокруг любого движущегося заряда возникает магнитное поле, поэтому рассматривая движущиеся заряды, мы говорим об электромагнитных полях.

Итак, основываясь на работах Фарадея, Максвелл сумел доказать, что скорость распространения электромагнитных волн в пространстве вполне определена – она равна скорости света в вакууме. Разумеется, сторонники теории дальнего действия легко принимали такую скорость за мгновенное распространение даже в пределах Земли, не говоря уже о пределах помещения, в котором проводился тот или иной эксперимент. Тем не менее, именно определенность скорости распространения взаимодействий является решающим аргументом в пользу теории ближнего действия. Таким образом, на сегодняшний день считается, что теория ближнего действия верна и находит подтверждение в многочисленных экспериментах.

Приведем пример наглядный пример. Все вы знаете, что сегодня мы можем передавать информацию с помощью радиоволн. Космическая станция, находящаяся в миллионах километрах от Земли может послать на Землю некие радиоволны и сразу после этого быть уничтожена. Тем не менее, радиоволны дойдут до Земли. Если бы теория дальнего действия была верна, то сразу после уничтожения станции прекратилось бы и всякое взаимодействие между станцией и Землей. Однако, это не так, а, следовательно, электромагнитное поле – это некий особый вид материи, который реально существует и обнаруживает себя теми или иными воздействиями. Еще одним примером может являться звездное небо, на которое каждый из вас неоднократно смотрел. Любая звезда, которую вы видите сегодня, возможно умерла несколько тысяч лет назад, превратившись в белый карлик. Дело в том, что если звезда находится за несколько тысяч световых лет от Земли, то пройдет несколько тысяч лет, прежде чем свет долетит до Земли, и вы сможете его увидеть.

Несмотря на то, что существуют частицы-переносчики взаимодействия, мы, все же не можем сказать, что поле состоит из этих частиц. Поле — это некая особая материя, обладающая определенными свойствами, которые одинаково проявляются в одинаковых ситуациях, поэтому мы не можем спутать поле с чем-то другим. Говоря об электрическом поле, мы можем сказать, что главным его свойством является действие на электрические заряды с определенной силой. **Электрическое поле неподвижных зарядов называется электростатическим полем.**

То есть, мы можем сказать, что **вокруг любого неподвижного заряда возникает электростатическое поле, которое не изменяет своих свойств с течением времени.** Это поле будет действовать на любой другой электрический заряд. В свою очередь, поле другого заряда также будет действовать на первый заряд. Сила действия электрического поля зависит от величины заряда. Об этом и о других характеристиках электрического поля мы поговорим в ближайшее время.

**Электрическое поле – это особая форма материи, которая создается покоящимися электрическими зарядами и оказывает воздействие на другие заряды.**

Электрическое поле не возникает при взаимодействии зарядов. Любой заряд независимо от наличия других зарядов всегда создает электрическое поле. Если заряд неподвижен, то электрическое поле называют **электростатическим**. Оно не меняется во времени и создается только электрическими зарядами.

Электрическое поле можно обнаружить, если в пространство, окружающее заряд, внести другой заряд. Обычно для исследования свойств поля пользуются положительным зарядом, который называют пробным и обозначают  $q_0$ . При этом считают, что пробный заряд не меняет исследуемого поля, изучают, то есть его собственным полем пренебрегают.

Рассмотрим электрическое поле, созданное точечным электрическим зарядом  $q$  (рис. 3). Внесем в электрическое поле этого заряда пробный заряд  $q_0$ . На него будет действовать сила  $\vec{F}$ , разная в разных точках поля, которая, согласно закону Кулона будет пропорциональна пробному заряду. Если мы возьмем отношение этой силы к пробному заряду  $q_0$ , то эта величина не будет зависеть от выбора пробного заряда и будет однозначно характеризовать электрическое поле в той точке, где находится пробный заряд. Эта величина получила название напряженности электрического поля в данной точке.

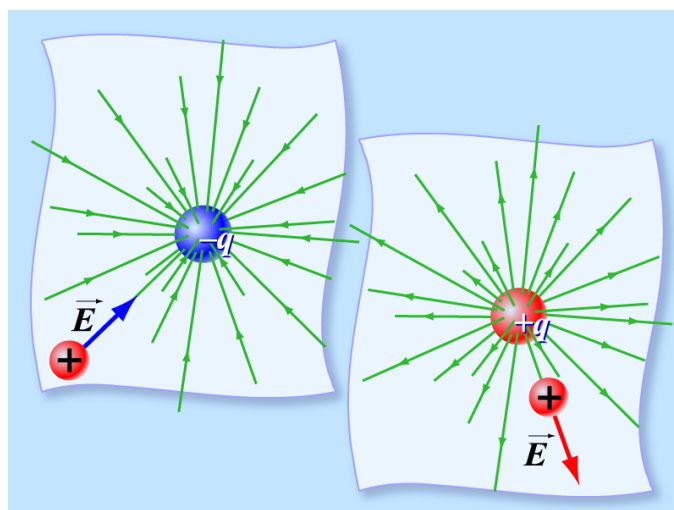
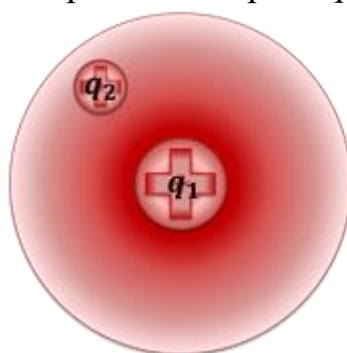


Рисунок 1 – Исследование электрического поля

Для того, чтобы каким-то образом описать электрическое поле, необходимо ввести количественную характеристику, которая называется **напряженностью электрического поля**. Рассмотрим электрическое поле, создаваемое зарядом  $q_1$ . Мы можем помещать в разные точки этого поля заряд  $q_2$  и измерять силу, с которой поле заряда  $q_1$  действует на заряд  $q_2$ .



Исходя из закона Кулона:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

Таким образом, **отношение силы, действующей на заряд со стороны поля, к величине этого заряда не зависит от самого заряда:**

$$\frac{F}{|q_2|} = k \frac{|q_1|}{r^2}$$

Поэтому, можно считать это отношение характеристикой поля. Итак, **напряженность электрического поля** – это векторная величина, являющаяся силовой характеристикой электрического поля и численно равная отношению силы, с которой поле действует на точечный заряд, расположенный в этой точке, к значению этого заряда.

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

Как видно из формулы, единицей измерения напряженности поля является ньютон на кулон:

$$[E] = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right]$$

Напряженность электрического поля, как и сила, является **векторной величиной**.

**Направление вектора напряженности совпадает с направлением вектора силы, действующей на положительный заряд, помещенный в данное поле.**

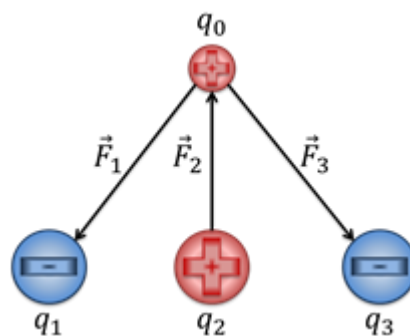
Исходя из всего выше сказанного, мы можем найти напряженность электрического поля, созданного точечным зарядом:

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{q_0}{r^2}$$

Как видно из формулы, **напряженность поля в данной точке прямо пропорциональна величине заряда и обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядом и данной точкой поля.**

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Возникает резонный вопрос: как охарактеризовать поле, если оно создается не одним, а несколькими зарядами? В этом случае, нам снова нужно воспользоваться пробным зарядом и рассмотреть, силы, действующие на него:



Итак, на рисунке пробный заряд обозначен за  $q_0$ . На него будут действовать кулоновские силы притяжения со стороны зарядов  $q_1$  и  $q_3$  (поскольку они отрицательные) и кулоновская сила отталкивания со стороны заряда  $q_2$  (поскольку он положительный). Как вы знаете, результирующая сила равна векторной сумме всех сил, действующих на данное тело:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$



Если теперь мы разделим это уравнение на величину пробного заряда, то получим, что напряженность поля в данной точке равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых зарядами:

$$\frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{\vec{F}_1}{q_0} + \frac{\vec{F}_2}{q_0} + \frac{\vec{F}_3}{q_0}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$$

Этот метод называется **принципом суперпозиции полей**, который гласит следующее: **если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля, с определенными напряженностями, то результирующая напряженность поля в этой точке будет равна векторной сумме напряженностей этих полей.**

Если на тело действуют несколько электрических сил, то напряженность суммарного электрического поля будет равна векторной сумме напряженностей полей, которые создаются отдельными зарядами.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_k^n \vec{E}_k$$

Этот вывод называют **принципом суперпозиции полей**. При наложении электрических полей они не влияют друг на друга и действуют на внесенный в них заряд независимо друг от друга (рис. 2).

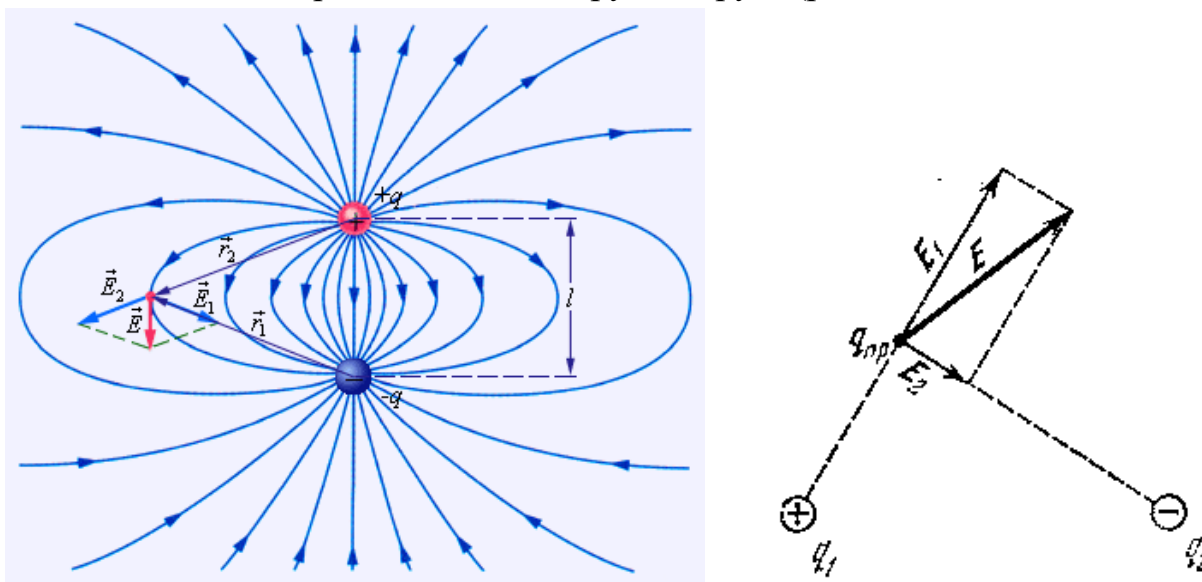


Рисунок 2 – Принцип суперпозиции электрических полей

Электрическое поле не ограничивается в пространстве, но действие его на другие заряды зависит от их расстояния до заряда, связанного с этим полем и величин их зарядов. Чем меньше расстояние между взаимодействующими заряженными телами, взаимодействуют, тем больше сила их взаимодействия и наоборот, чем больше расстояние между

взаимодействующими телами, тем меньше сила их электрического взаимодействия.

В каждой точке электрического поля вектор напряженности имеет определенное значение и направление. Поэтому электрическое поле можно графически изображать с помощью векторов напряженности. Однако такой способ неудобен. В случае сложных полей вектора напряженности накладываются один на другой и получается довольно запутанная картина. Более наглядным можно изображать электрическое поле с помощью **линий напряженности** (рис. 3).

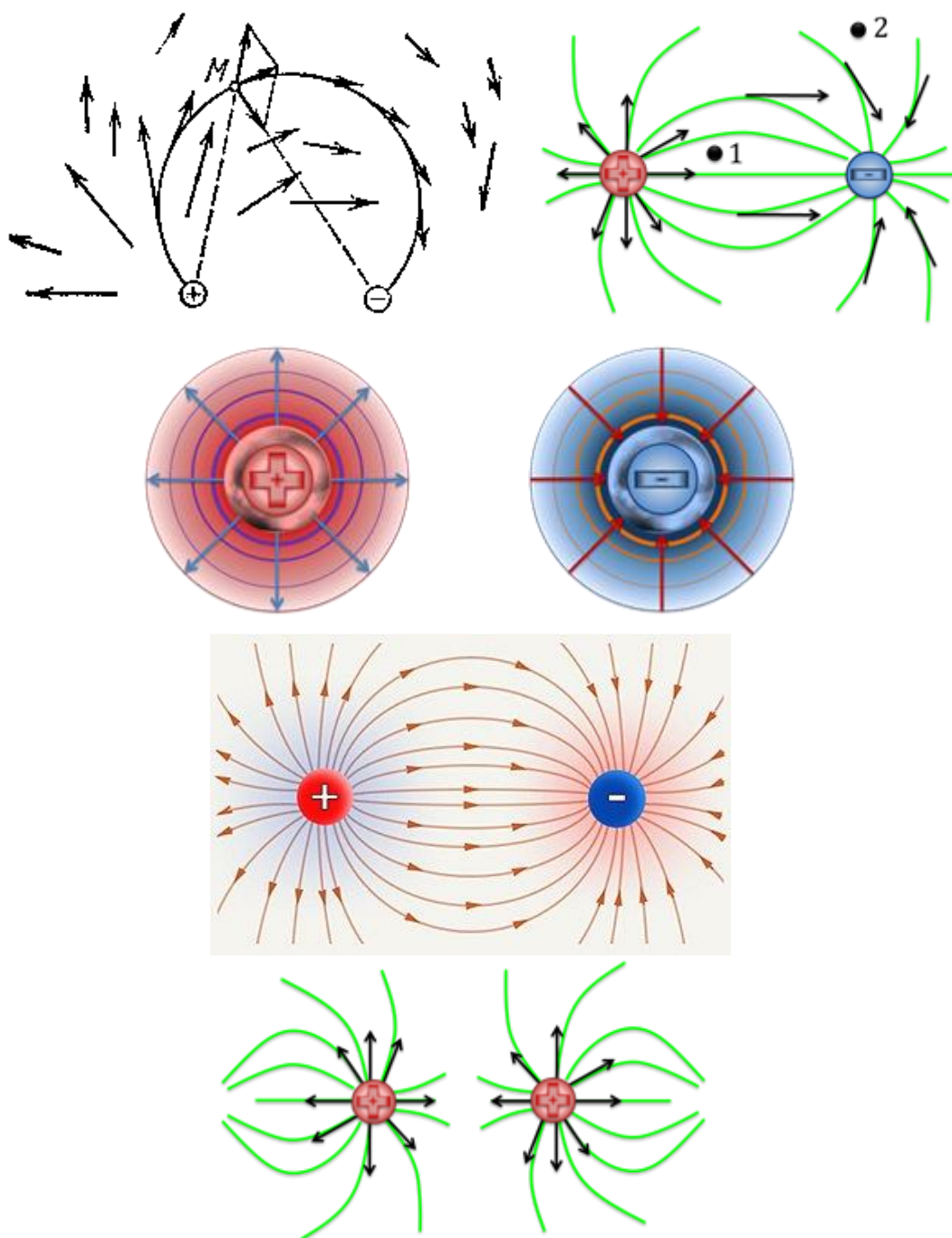


Рисунок 3 – Линии напряженности электрического поля

**Линия напряженности** в электрическом поле проводится таким образом, чтобы в каждой ее точке вектор напряженности был направлен по касательной. Линиям напряженности приписывается направление, совпадает с направлением векторов напряженности в каждой точке этих линий.

#### **Свойства линий напряженности:**

- так как напряженность в каждой точке поля имеет только одно направление, то линии напряженности нигде не пересекаются.
- считается, что линии напряженности всегда начинаются на поверхности положительно заряженного тела и заканчиваются на поверхности отрицательно заряженного тела, то есть они являются незамкнутыми линиями. Поле, силовые линии которого незамкнуты, называется потенциальным.
- между зарядами линии напряженности нигде не прерываются.
- при расчетах условно считают, что через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно к линиям напряженности, проходит количество линий, которая по значению равен  $E$  в том месте, где находится эта поверхность.

Возьмем две одинаковые металлические пластины и расположим их параллельно друг другу. Если одной пластине предоставить заряд  $+q$ , а другой  $-q$ , то между ними возникнет электрическое поле. Линии напряженности этого поля оказываются параллельными, если расстояние между ними мало по сравнению с линейным размером этих пластин. Плотность линий напряженности в поле между пластинами всюду одинакова и, значит,  $E = const$

Когда векторы напряженности во всех точках поля имеют одинаковое значение и направление, линии напряженности представляют собой прямые линии, параллельные вектору напряженности, и плотность линий напряженности на всех участках этого поля постоянна, такое поле называют однородным (рис. 4).

Еще раз напомним, что линии напряженности направлены от плюса к минусу. Обратите внимание на центральную часть электрического поля между этими пластинами: линии напряженности здесь параллельны и расположены с одинаковой густотой. Такое электрическое поле называется **однородным**. То есть, **однородное электрическое поле – это поле, линии напряженности которого, параллельны друг другу и расположены с одинаковой густотой**. Если в качестве примера мы опять рассмотрим точки 1 и 2, то можем сказать, что поле в точке 1 однородное, а в точке 2 – неоднородное.

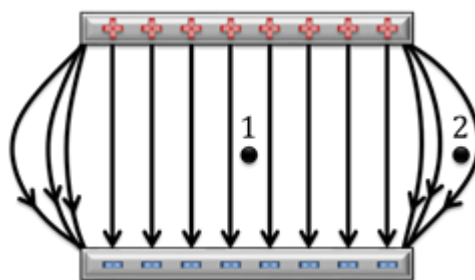


Рисунок 4 – Однородное электрическое поле

**Пример решения задачи.**

**Задача 1.** Два равных по модулю заряда находятся в вершинах равностороннего треугольника, сторона которого равна 2 м. Найдите модуль и направление напряженности в третьей вершине треугольника, если модуль заряда равен 150 нКл.

Дано:

$$q_1 = 150 \text{ нКл}$$

$$q_2 = -150 \text{ нКл}$$

$$a = 2 \text{ м}$$

$$\vec{E} - ?$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - E_1 E_2 \cos \alpha}$$

$$E = \sqrt{2E_1^2 - 2E_1^2 \cos \alpha}$$

$$E_1 = E_2 = \frac{k|q_1|}{r^2}$$

$$\alpha = 180 - 120 = 60^\circ$$

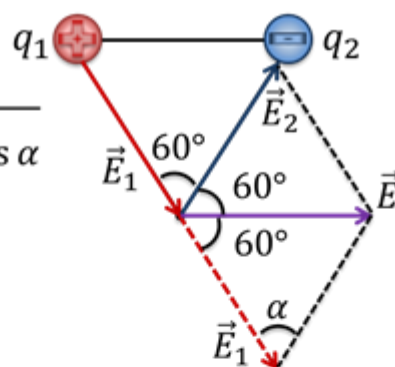
$$r = a$$

$$E = E_1 \sqrt{2(1 - \cos 60^\circ)}$$

$$E_1 = E_2 = \frac{k|q_1|}{a^2}$$

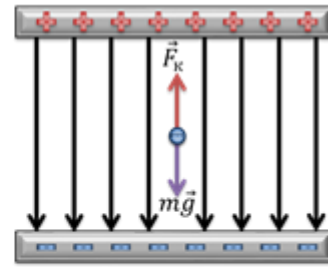
$$E = \frac{k|q_1|}{a^2} \sqrt{2(1 - \cos 60^\circ)}$$

$$E = \frac{9 \times 10^9 \times 150 \times 10^{-9}}{2^2} \sqrt{2(1 - \cos 60^\circ)} = 337,5 \text{ Н/Кл}$$



**Задача 2.** Пылинка массой  $6 \times 10^{-6}$  кг неподвижно висит в однородном поле между параллельными противоположно заряженными пластинами. Если модуль напряженности электрического поля между пластинами составляет 300 Н/Кл, то каков заряд пылинки?

$$\begin{array}{l|l} \text{Дано:} & \\ m = 6 \times 10^{-6} \text{ кг} & F_k = mg \\ E = 300 \text{ Н/Кл} & F_k = Eq \\ q - ? & Eq = mg \\ & q = \frac{mg}{E} \end{array}$$

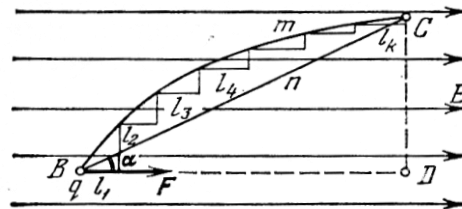


$$|q| = \frac{6 \times 10^{-6} \times 9,8}{300} = 2 \times 10^{-7} \text{ Кл}$$

$$q = -200 \text{ нКл}$$

## 2. Потенциал электростатического поля.

Электрическое поле имеет энергию: действуя с некоторой силой на заряженное тело, поле может выполнить работу по перемещению этого тела, и работа выполняется за счет энергии поля.



Выясним, как можно найти работу электрических сил при перемещении заряда  $q$  в однородном электрическом поле. Пусть заряд  $q$  находится в точке  $B$  однородного электрического поля.

Из механики известно, что работа равна произведению силы на путь и на косинус угла между ними. Поэтому работу электрических сил при перемещении заряда  $q$  в точку  $C$  по прямой  $BnC$  выразим следующим образом

$$A_{BnC} = F \cdot BC \cdot \cos \alpha$$

Так как  $BC \cdot \cos \alpha = BD$ , то есть  $A_{BnC} = qE \cdot BD$

Когда заряд перемещается по линии напряженности, а затем перпендикулярно к ней, то силы поля совершают работу только при перемещении заряда вдоль линии напряженности поля.

Выясним теперь, чему будет равняться работа сил поля на криволинейном участке  $BmC$ . Разобьем этот участок настолько малые участки, что каждую из них можно принять за прямую линии. Работа на пути  $BmC$  будет равняться сумме работ на участках 1, 2 и т. Д. Таким образом,

$$A_{BmC} = qE(l_1 + l_2 + \dots + l_k)$$

Поскольку сумма в скобках равна длине  $BD$ , имеем:

$$A = qE \cdot BD = qEd$$

Итак, в однородном электрическом поле работа электрических сил не зависит от формы пути. Действительно, если на участке  $BmC$  работа сил поля положительна, то на участке  $CnB$  она отрицательная. Следовательно, работа сил электрического поля на замкнутой траектории всегда равна нулю.

Потенциал. Напряжение. Связь между напряженностью и напряжением электрического поля.

Потенциальная энергия электрического заряда зависит от его положения в электрическом поле. Поэтому целесообразно ввести энергетическую характеристику точек электрического поля. Поскольку сила, действующая на заряд  $q$  в электрическом поле, прямо пропорциональна заряду  $q$ , то работа сил поля при перемещении заряда также прямо пропорциональна заряду  $q$ . Следовательно, и потенциальная энергия заряда в произвольной точке электрического поля пропорциональна этому заряду:  

$$П = \varphi \cdot q$$

Энергетическая характеристика  $\varphi$  электрического поля в данной точке называется потенциалом поля в этой точке. Потенциал измеряется потенциальной энергией единичного положительного заряда, который находится в заданной точке поля:

$$\varphi = \frac{П}{q}$$

Получается, что потенциал точки электрического поля численно равен работе, осуществляемой силами поля при перемещении единичного положительного заряда из этой точки в бесконечность.

Стоит обратить внимание на то, что потенциал поля положительного заряда уменьшается при удалении от заряда, а потенциал поля отрицательного заряда - увеличивается.

Поскольку потенциал величина скалярная, то, когда поле построено многими зарядами, потенциал в любой точке поля равен алгебраической сумме потенциалов, созданных каждым зарядом в отдельности. Для потенциала, как и для напряженности, выполняется принцип суперпозиции, то есть потенциал в каждой точке поля, который образован системой зарядов, равен сумме потенциалов полей, которые образовывали бы в этой точке заряды системы по отдельности:  $\varphi = \sum_i \varphi_i$ .

Работу сил поля можно выразить с помощью разности потенциалов. Зная потенциал, можно вычислять работу, которая выполняется силами поля

при перемещении пробного заряда из одной точки пространства В в другую точку С:

$$W_{BC} = q_0(\varphi(B) - \varphi(C))$$

Таким образом, работа определяется разностью потенциалов в начальной и конечной точках пути. Из этой формулы следует также физический смысл разности потенциалов: она численно равна работе сил электростатического поля по перемещению единичного пробного заряда из начальной точки в конечную.

Потенциал является энергетической характеристикой электростатического поля и как скалярная величина может принимать положительных или отрицательных значений.

Разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  называется *напряжением* между точками 1 и 2 и обозначается  $U$ . Единица измерения напряжения в СИ называется вольт (В).

Таким образом,  $A = q \cdot U$ . Работа сил поля при перемещении заряда  $q$  между двумя точками поля прямо пропорциональна напряжению между этими точками.

Графически электрическое поле можно изображать не только силовыми линиями, но и с помощью *экипотенциальных поверхностей* - совокупности точек, которые имеют одинаковый потенциал. Пересекаясь с плоскостью рисунка, экипотенциальные поверхности дают экипотенциальные линии (рис 7).

*Поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал, называется экипотенциальной (латинском экви - равный)*

Оказывается, что линии напряженности электрического поля всегда нормальные к экипотенциальной поверхности. Это означает, что работа сил поля при перемещении заряда по экипотенциальной поверхности равна нулю.

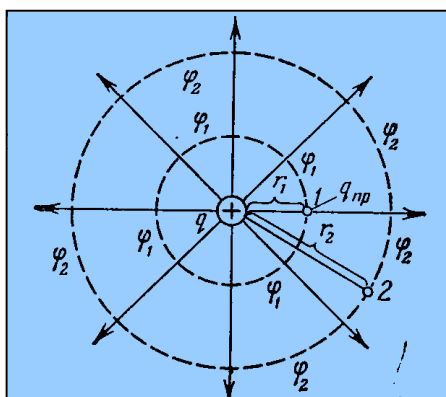


Рисунок 7 – Экипотенциальные поверхности

Установим связь между напряженностью и разностью потенциалов однородного поля.

Пусть между двумя точками имеем напряжение  $U = \varphi_1 - \varphi_2$

Тогда при перемещении заряда  $q$  от одной точки к другой поле совершает работу:  $A = qEd = qU$ .

Следовательно, напряженность однородного поля численно равна разности потенциалов на единицу длины линии напряженности. В СИ единица напряженности имеет наименование *вольт на метр* (В / м).

$$E = \frac{U}{d}$$

Свойства электростатического поля:

- Материально, существует объективно.
- Создается неподвижными электрическими зарядами.
- Действует на заряд с некоторой силой.
- Действие поля уменьшается с увеличением расстояния от заряда.
- Исследуют электрическое поле с помощью пробного заряда.
- Графически изображается с помощью силовых линий (линий напряженности).
- Имеет две характеристики: силовую ( $E$ ), энергетическую ( $\varphi, \Delta\varphi, U$ ).
- Справедлив принцип суперпозиции.
- Имеет энергию, способно выполнять работу.
- Электростатические явления: поляризация диэлектриков, электростатическое индукция.



## Самостоятельное изучение. Электроёмкость. Конденсаторы.

### План

1. Электрическая ёмкость проводника.
2. Конденсаторы.
3. Соединение конденсаторов в батарею. Энергия заряженного конденсатора.

### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называют электроёмкостью изолированного проводника? От чего она зависит?
2. Зависит ли электроёмкость уединенного проводника от его массы и формы?
3. Зависит ли электроёмкость уединенного проводника от присутствия рядом с ним других проводников?
4. Что называют конденсатором?
5. Охарактеризуйте известные вам виды конденсаторов.
6. Какие бывают виды соединений конденсаторов и какие свойства напряжения, заряда, электроёмкости при этих соединениях?
7. Ёмкость конденсатора 5 мкФ. Что это значит?

## 1. Электрическая ёмкость проводника.

Возьмем проводник, изолированный от земли, и, не меняя его расположения относительно других проводников, будем электризовать. Опыт показывает, что заряд  $q$  такого проводника изменяется прямо пропорционально потенциалу  $\varphi$  проводника:

$$q = C\varphi$$

Здесь коэффициент пропорциональности  $C$  остается постоянным только в условиях данного опыта. Если же провести такой опыт с другим проводником, или изменить внешние условия, то  $C$  будет иметь другое численное значение.

Величина  $C$ , характеризующая зависимость заряда наэлектризованного проводника от размеров и формы проводника и от внешних условий, называется **электрической емкостью проводника**. Электрическая емкость проводника измеряется количеством электричества, необходимого для повышения потенциала этого проводника на единицу.

Выведем единицу электрической емкости  $C$  в СИ:

$$C = q/\varphi = 1\text{Кл}/1\text{В} = 1\text{А}^2 \cdot \text{с}/(\text{кг} \cdot \text{м}^2) = 1\text{Ф}$$

В СИ за единицу электрической емкости принят **фарад (Ф)**.

**Фарад** – электрическая емкость такого проводника, которому для повышения потенциала на 1В необходимо передать заряд в 1Кл. Фарад очень крупная единица, и на практике электрическую емкость часто выражают в микрофарадах (мкФ) и пикофарад (пФ)

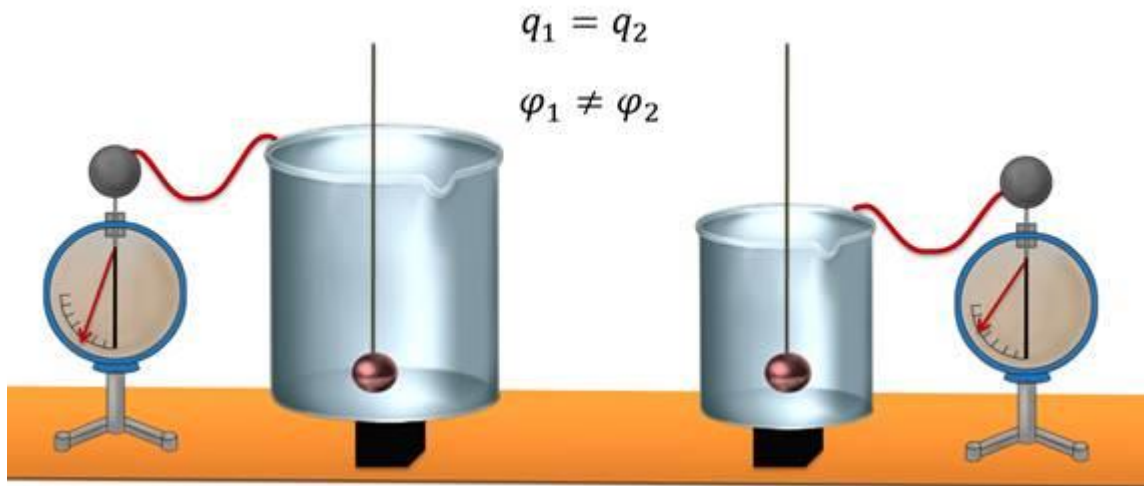
$$1\text{мкФ} = 10^{-6}\text{Ф}, 1\text{пФ} = 10^{-12}\text{Ф}.$$

Так как заряд располагается только на внешней поверхности проводника, то емкость проводника зависит от его формы и площади внешней поверхности; ни материал проводника, ни его масса емкость не влияют.

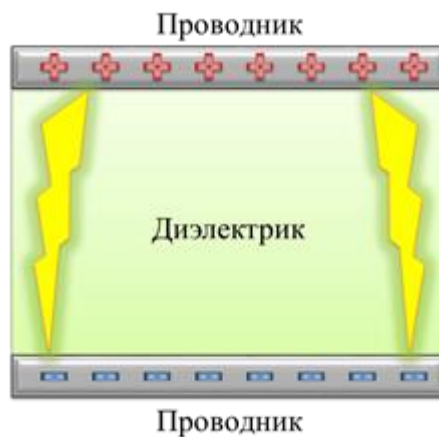
Поскольку проводник электризуется через влияние, емкость проводника должна зависеть от расположения вблизи него других проводников и от окружающей среды

## 2. Конденсаторы.

Возьмем две стеклянные банки разных размеров, предварительно изолировав их от земли. Поднесем к каждой из этих банок одинаковый заряженный шар на изолированной ручке.



Если теперь мы измерим потенциалы каждой из банок, с помощью электрометров, то убедимся, что эти потенциалы не равны. Это наводит на мысли о том, что на различных телах накопление заряда происходит по-разному. Другой опыт, который мы можем провести — это разноименно зарядить два проводника.



Как вы понимаете, с увеличением заряда, будет расти напряженность электрического поля между данными проводниками. При неизменном расстоянии между проводниками, с увеличением напряженности будет расти и разность потенциалов, то есть, электрическое напряжение. При достаточно большом напряжении, диэлектрик становится проводящим (поскольку не существует идеальных диэлектриков). Возникает явление, которое называется **пробоем диэлектрика: между проводниками проскакивает искра, в результате чего они разряжаются**. Это говорит нам о том, что чем меньше увеличивается напряжение с увеличением заряда, тем больший заряд можно накопить. Таким образом, мы можем заключить, что необходимо ввести физическую величину, которая характеризует способность накапливать электрический заряд. Эта величина называется **емкостью** или просто **емкостью**.

Поскольку напряжение между двумя проводниками пропорционально напряженности электрического поля, а напряженность, в свою очередь, пропорциональна зарядам на проводниках, можно сделать вывод, что напряжение пропорционально зарядам на проводниках:

$$E \sim q \Rightarrow q \uparrow, E \uparrow$$

$$U = Ed \Rightarrow E \uparrow, U \uparrow$$

$$U \sim q \Rightarrow q \uparrow, U \uparrow$$

Как мы уже сказали, чем меньше увеличивается напряжение с увеличением заряда, тем больший заряд можно накопить. Поэтому, определение емкости для двух проводников звучит так: **емкость двух проводников — это отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними:**

$$C = \frac{q}{U}$$

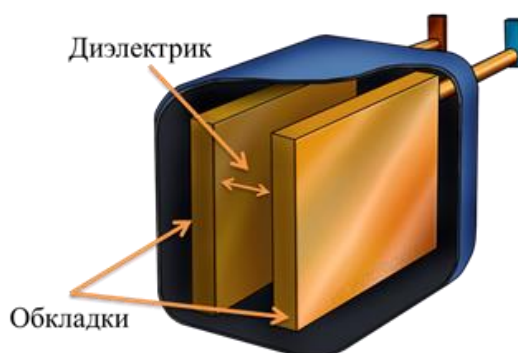
Единицей измерения емкости является фарад (в честь Майкла Фарадея):

$$[C] = \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{В}} \right] = [\Phi]$$

Как видно из формулы емкость двух проводников равна 1 Ф, если при сообщении им зарядов 1 Кл и -1 Кл, между ними возникает напряжение в 1 В.

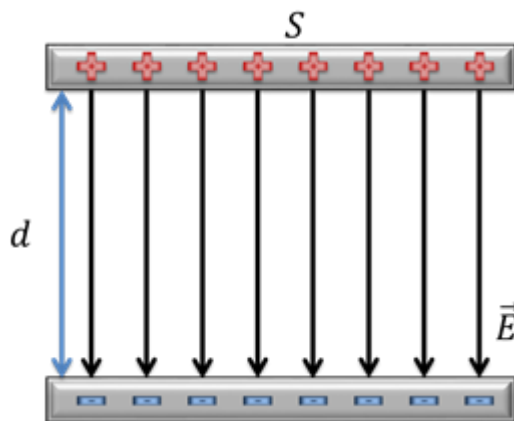
Как мы уже говорили, заряд в 1 Кл — это очень большой заряд, поэтому, емкость в 1 Ф — тоже очень большая. На практике используются такие величины, как микрофарады и нанофарады.

Итак, мы дали определение емкости для двух проводников. **Система проводников, используемых для накопления электрического заряда, называется конденсатором.** Конденсатор состоит из двух проводников, которые разделены слоем диэлектрика.



Толщина диэлектрика должна быть невелика по сравнению с размерами проводников. **Проводники в конденсаторе называются обкладками.** В качестве обкладок часто используют очень тонкие металлические пластины, а в качестве диэлектрика – бумагу или воздух.

На сегодняшнем уроке мы рассмотрим плоский конденсатор. **Плоский конденсатор состоит из двух параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга.**



Поле внутри такого конденсатора будет однородным. Для того, чтобы зарядить конденсатор, достаточно подключить его к полюсам источника тока. Накопив заряд, конденсатор может сам являться источником тока некоторое время. Но, надо сказать, что конденсатор разряжается очень быстро. Электроемкость плоского конденсатора характеризуется площадью пластин и расстоянием между этими пластинами:

$$C \sim S$$

Очевидно, что чем больше площадь пластин, тем больший заряд можно на них накопить. Тем не менее, чем больше расстояние между пластинами, тем выше напряжение между ними:

$$C \sim \frac{1}{U}$$

Поскольку электроемкость обратно пропорциональна напряжению, мы можем заключить, что чем больше расстояние между пластинами, тем меньше электроемкость плоского конденсатора:

$$C \sim \frac{1}{d}$$

Таким образом, мы выяснили, что **электроемкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между ними:**

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

Конечно же, емкость зависит и от диэлектрика, который используется в конденсаторе, поэтому в формуле мы видим диэлектрическую проницаемость. Также, в формуле есть коэффициент пропорциональности, который называется электрической постоянной. Значение электрической постоянной соответствует диэлектрической проницаемости вакуума:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

Конденсаторы классифицируются по нескольким признакам: *по форме обкладок, по типу диэлектрика и по назначению.*

В основном конденсаторы бывают трех форм: *плоские, сферические и цилиндрические.*



Также конденсаторы разделяют по типу диэлектрика на *керамические, бумажные и электролитические конденсаторы.*



Кроме этого, конденсаторы классифицируются по назначению.

## Назначения конденсаторов

Постоянная  
электроёмкость



Переменная  
электроёмкость



Помимо конденсаторов с постоянной электроемкостью, существуют также конденсаторы, которые обладают переменной электроемкостью. В таком конденсаторе есть статор и ротор. Вращая ротор, можно изменять суммарную площадь перекрываемую пластинами и, таким образом, изменять электроемкость. Конденсаторы с переменной емкостью широко используются в радиотехнике. Например, изменяя емкость конденсатора, можно настраивать радиоприемник на нужную частоту (или, как мы говорим, на нужную волну).

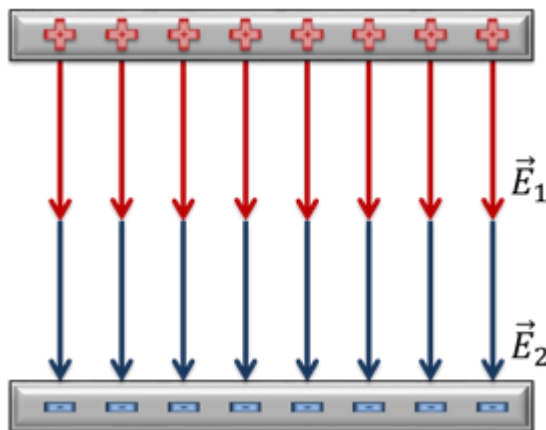
### 3. Соединение конденсаторов в батарею. Энергия заряженного конденсатора.

Во многих случаях для получения необходимой емкости конденсаторы соединяют в группу, которая называется батареей.

**Конденсаторная батарея представляет собой набор из нескольких конденсаторов постоянной емкости, соединенных между собой параллельно или последовательно.** В зависимости от соединения, между параметрами конденсатора наблюдаются различные закономерности, которые сведены в таблицу:

Параллельное соединение	Последовательное соединение
Заряд: $q = q_1 + q_2 + q_3$ Напряжение: $U_1 = U_2 = U_3$ Емкость батареи: $C = C_1 + C_2 + C_3$	Заряд: $q = q_1 = q_2 = q_3$ Напряжение: $U = U_1 + U_2 + U_3$ Емкость батареи: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$

Любая система заряженных тел (в частности конденсатор) обладает определенной энергией. В одном из прошлых уроков мы рассматривали пример, в котором конденсатор сначала накопил заряд, заряжаясь от источника тока, а потом – разрядился, когда к нему подключили лампочку. Поскольку лампочка излучала тепло и свет, конденсатор обладал некоторой энергией. Давайте вычислим энергию конденсатора.



Как мы помним, одна из пластин конденсатора заряжена отрицательно, а другая – положительно. Это значит, что напряженности, создаваемые обеими пластинами сонаправлены. По принципу суперпозиции, напряженность поля внутри конденсатора складывается из напряженностей, создаваемых каждой пластиной:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Поскольку модули зарядов равны, напряженность, созданная любой пластиной, равна половине напряженности поля внутри конденсатора:

$$|q_1| = |q_2| \Rightarrow E_1 = E_2 = \frac{E}{2}$$

Применим теперь формулу, по которой вычисляется потенциальная энергия заряженного тела в однородном поле:

$$W = q \frac{E}{2} d = \frac{qU}{2}$$

Как мы знаем, произведение напряженности и расстояния между пластинами равно напряжению между пластинами конденсатора. По закону сохранения энергии, именно эта энергия была затрачена на разделение положительных и отрицательных зарядов в процессе зарядки конденсатора. Заметим, что мы можем выразить энергию конденсатора через его емкость. Вместо заряда мы можем подставить произведение напряжения и емкости:



$$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU \times U}{2} = \frac{CU^2}{2}$$

Аналогично, мы можем вместо напряжения подставить отношение заряда к емкости:

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{q \times q}{2C} = \frac{q^2}{2C}$$

Данные формулы справедливы для любого конденсатора.

**Пример решения задачи.**

**Задача.** Изначально напряжение между обкладками конденсатора с емкостью 100 нФ составляет 300 В. Если к нему подключить лампочку, рассчитанную на ток в 30 мА, то она прогорит 2 с. Каково сопротивление данной лампочки? Потерями энергии в цепи можно пренебречь.

Дано:	
$U = 300 \text{ В}$	$C = \frac{q}{U} \quad I = \frac{q}{t} \Rightarrow q = It$
$t = 1,5 \text{ с}$	$C = \frac{It}{U}$
$I = 0,02 \text{ А}$	
$C - ?$	$C = \frac{0,02 \times 1,5}{300} = 10^{-4} \text{ Ф}$
	$C = 100 \text{ мкФ}$



## Лекция №17

### Электрический ток. Закон Ома для участка цепи. Последовательное и параллельное соединение проводников.

#### План

1. Электрический ток.
2. Закон Ома для участка цепи.
3. Последовательное и параллельное соединение проводников.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что такое электрический ток?
2. Что представляет собой ток в металлах?
3. Что принимают за направление тока?
4. Какие действия тока вам известны?
5. Назовите основные величины, характеризующие электрический ток.
6. Как рассчитать силу тока?
7. Какие условия необходимы для создания электрического тока?
8. Что собой представляет вольт-амперная характеристика проводника с током?
9. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
10. Что характеризует электрическое сопротивление проводника?
11. Как рассчитать сопротивление проводника?
12. Какое соединение проводников называется последовательным?
13. Какое соединение проводников называется параллельным?
14. Какие преимущества имеет параллельное соединение проводников над последовательным?
15. Какая электрическая величина одинакова для всех проводников, соединенных последовательно?
16. Как найти общее сопротивление при последовательном соединении?
17. Как найти полное напряжение в цепи при последовательном соединении?
18. Какая из основных электрических величин одинакова для всех ветвей параллельного соединения?
19. Как выражается сила тока в цепи до его разветвления через силы токов в отдельных ветвях ветвления?

## 1. Электрический ток.

С понятием электрического тока вы познакомились еще в восьмом классе. Напомним, что **электрический ток – это упорядоченное движение заряженных частиц под действием электрического поля.**

Как мы знаем, все тела состоят из частиц, и эти частицы совершают беспорядочные движения. В частности, свободные электроны в металле участвуют в тепловом движении. В этом случае, через поперечное сечение проводника в среднем проходит одинаковое число электронов в обе стороны. **Для того, чтобы все частицы начали двигаться направлено, в проводнике должно существовать электрическое поле.** В этом случае, под действием электрического поля, свободные заряды начнут смещаться в определенном направлении. Как вы уже знаете, **за направление электрического тока принято направление движения положительно заряженных частиц.** Надо сказать, что это не очень удачный выбор, поскольку, чаще всего, ток представляет собой движение электронов, которые являются отрицательно заряженными частицами. Хотя, ток также может быть вызван движением положительных ионов.

В ближайшее время мы будем рассматривать простейший случай электрического тока, который называется постоянным током. **Постоянный ток – это электрический ток, при котором заряженные частицы не изменяют ни направление, ни скорость своего движения.**

Конечно, мы не имеем возможности увидеть движение частиц в проводнике. Об электрическом токе мы привыкли судить по его действиям. Напомним, что существует *тепловое, химическое и магнитное действие электрического тока.*

Как вы знаете, электрический ток сопровождается нагреванием проводников, то есть, тепловым действием. Это действие широко используется при создании электронагревательных приборов, таких, как, например, утюг, обогреватель или чайник. Также при протекании электрического тока по определенным проводникам, может измениться их состав (то есть ток оказывает химическое действие). Это действие успешно используется для очистки металлов от примеси, например, или для разложения солей и щелочей на составные части.

Кроме этого существует магнитное действие: вокруг любого проводника с током возникает магнитное поле. Примеров использования этого действия можно привести очень много: к примеру, на магнитном действии тока основан электромагнит, генератор и многие электроизмерительные приборы. Также, магнитное действие тока легло в

основу единицы измерения силы тока, о которой мы и поговорим. Напомним, что **сила тока определяется как отношение заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за определенный промежуток времени к этому промежутку времени:**

$$I = \frac{q}{t}$$

Единицей измерения силы тока является ампер:

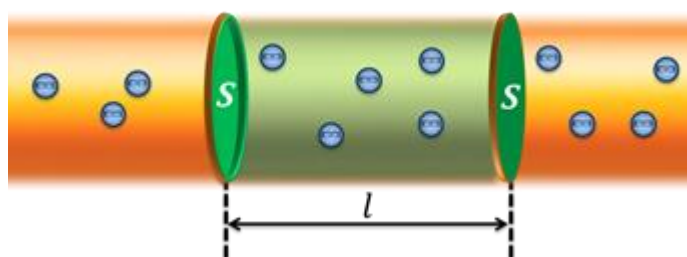
$$[I] = \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{с}} \right] = [\text{А}]$$

Как вы уже знаете, если по проводникам, находящимся вблизи пустить ток в одном направлении, то они начнут притягиваться, а если по ним пустить ток в разных направлениях, то они начнут отталкиваться. Это явление возникает как раз в результате магнитного действия тока. Так вот, если по очень длинным и тонким проводникам, находящимся на расстоянии 1 м друг от друга, проходит одинаковый ток, при котором сила их притяжения или отталкивания составляет 0,2 мкН, то сила тока в этих проводниках равна 1 А.

Конечно, нужно понимать, что, несмотря на подобное определение силы тока, слово «сила», применяемое к току, не имеет ничего общего с понятием силы в механике. **Сила тока, скорее характеризует скорость прохождения электрического заряда через поперечное сечение проводника.**

Давайте попытаемся установить связь между силой тока и скоростью движения электронов в металлическом проводнике цилиндрической формы.

Рассмотрим небольшой участок проводника длиной.



Применим формулу, по которой вычисляется сила тока:

$$I = \frac{q}{t}$$

Очевидно, что суммарный заряд, прошедший через поперечное сечение толщиной  $l$ , будет равен произведению количества частиц, находящихся в данном участке проводника, и величины заряда одной частицы:

$$q = Ne$$

Поскольку в нашем случае, частицы — это электроны, за заряд частицы следует принять модуль заряда электрона. Число частиц мы можем представить, как произведение концентрации и объема:

$$q = nVe$$

Не трудно догадаться, что объем, в данном случае, — это

$$q = nSle$$

Подставим полученное выражение в уравнение для силы тока:

$$I = \frac{nSle}{t}$$

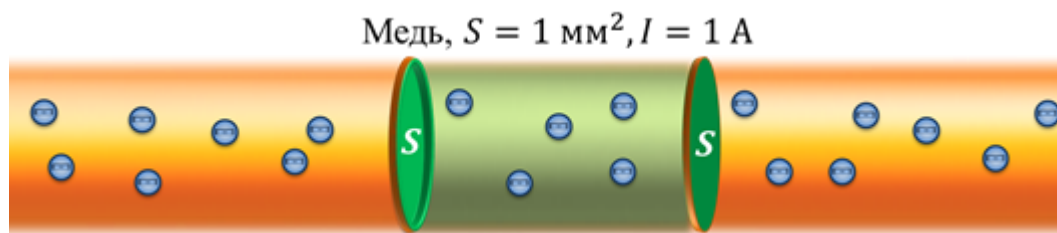
Заметим теперь, что отношение длины к промежутку времени — это и есть скорость движения электронов:

$$I = enSv$$

Выразим скорость из полученного выражения:

$$v = \frac{I}{enS}$$

Теперь мы можем заключить, что скорость движения частиц в проводнике прямо пропорциональна силе тока. Конечно, концентрация заряженных частиц в данном объеме проводника зависит от того, из какого вещества состоит проводник. Мы можем подсчитать скорость электронов в медном проводнике с поперечным сечением  $1 \text{ мм}^2$  при силе тока в  $1 \text{ А}$ . Наши расчеты будут основываться на предположении, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон.



$$v = \frac{m}{M} \quad v = \frac{N}{N_A} \quad \frac{N_A}{M} = \frac{N}{\rho V} \quad v = \frac{I}{enS} = 7,4 \times 10^{-5} \text{ м/с}$$

$$\frac{m}{M} = \frac{N}{N_A} \quad \frac{N_A}{M} = \frac{N}{m} \quad n = 8,37 \times 10^{28} \text{ м}^{-3} \quad e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$$

Если мы подсчитаем скорость движения электронов в других металлах, то она не будет сильно отличаться.

Это говорит нам о том, что скорость движения электронов очень невелика. Возникает вопрос, как же тогда получается так, что когда мы включаем свет в комнате, лампочка загорается мгновенно? Дело в том, что **скорость распространения электрического тока зависит не от скорости движения самих зарядов, а от скорости распространения электрического поля.**

Как мы уже убедились ранее, эта скорость равна скорости света. Поэтому, смело можно считать, что при нажатии на выключатель, все электроны в цепи приходят в движение мгновенно, немедленно создавая электрический ток в лампочке.

Итак, теперь мы можем оговорить **условия, необходимые для существования электрического тока: наличие свободных зарядов, наличие электрического поля и замкнутость цепи.**

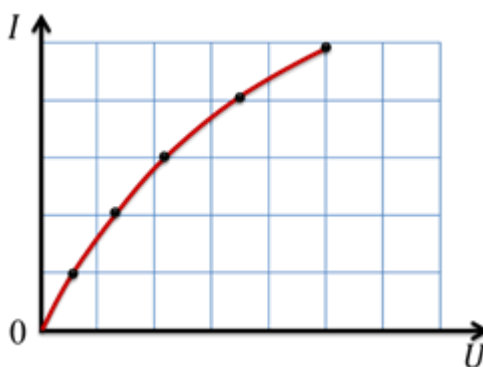
Как мы уже сказали, в первую очередь, необходимо наличие свободных зарядов, иначе никакого упорядоченного движения частиц не возникнет, ввиду отсутствия этих самых частиц. Второе условие – это наличие электрического поля. Чтобы заряды двигались в определенном направлении, на них должна действовать определенная сила. Эта сила, как мы знаем, прямо пропорциональна напряженности электрического поля. То есть для существования тока, необходимо наличие электрического поля, со стороны которого будет действовать сила, приводящая заряды в упорядоченное движение. Ну и, конечно, как мы только что убедились, для существования электрического тока, нужна замкнутая цепь. В противном случае, заряды просто накопятся на концах проводника и сами начнут создавать электрическое поле. То есть возникнет явление электростатической индукции и суммарная напряженность поля внутри проводника станет равной нулю, а, значит, перестанет существовать электрический ток. Поэтому, необходимо, чтобы цепь была замкнута, и заряды продолжали перемещаться. Заметим, однако, что при перемещении зарядов по замкнутому контуру, работа электрического поля равна нулю. Поэтому в цепь необходимо включить источник тока. Между полюсами источника существует определенная разность потенциалов, поэтому, в проводнике возникает электрический ток. Для измерения силы тока, как вы знаете, используется амперметр, который включается в цепь последовательно.

Следует отметить, что, все-таки, необходимость замкнутости электрической цепи для существования электрического тока, вызывает сомнения. Еще в 1897 году, величайший ученый и изобретатель Никола Тесла теоретически обосновал передачу электрического тока с помощью волновода и проводил соответствующие эксперименты. То есть, от одного

заряженного тела энергия передавалась другому телу по одиночному проводу. Причем, этот провод, не являлся проводящим. Он, скорее, являлся направляющим проводом, который определял направление передачи электромагнитной энергии. На сегодняшний день российскими учеными разработана установка, позволяющая осуществить идею Николы Тесла, но, пока что, этот метод не торопятся внедрять в жизнь. Тем не менее, этот метод принципиально отличается от того, метода, который используется в настоящее время. Поэтому, при изучении законов постоянного тока мы, все же будем считать замкнутость электрической цепи необходимым условием для существования электрического тока.

## 2. Закон Ома для участка цепи.

Как мы уже говорили, чтобы создать электрический ток в проводнике, необходимо существование электрического поля. Иными словами, на концах этого проводника должны быть разные потенциалы, то есть проводник должен находиться под напряжением. Как вы понимаете, чем больше будет разность потенциалов, тем больше будет напряженность электрического поля. Следовательно, поле будет действовать на заряды сильнее, и они будут двигаться по проводнику быстрее. Это приведет к увеличению силы тока. Таким образом, мы можем заключить, что для каждого проводника существует определенная взаимосвязь между напряжением и силой тока. Зависимость силы тока от напряжения в данном проводнике называют вольт-амперной характеристикой проводника.



Подавая различное напряжение на концы проводника можно измерять силу тока и, таким образом, вывести зависимость между силой тока и напряжением. Наиболее простую форму имеет вольт-амперная характеристика металлов и растворов электролитов. Итак, эту вольт-амперную характеристику установил Георг Ом, проведя многочисленные опыты. Он доказал, что **сила тока в проводнике прямо пропорциональна напряжению на концах этого проводника.**

Как вы знаете из курса физики восьмого класса, закон Ома для участка цепи звучит так: **сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению данного участка:**

$$I = \frac{U}{R}$$

Единица измерения сопротивления названа в честь Георга Ома:

$$[R] = \left[ \frac{\text{В}}{\text{А}} \right] = [\text{Ом}]$$

Как вы знаете из курса физики восьмого класса, закон Ома для участка цепи звучит так: **сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению данного участка:**

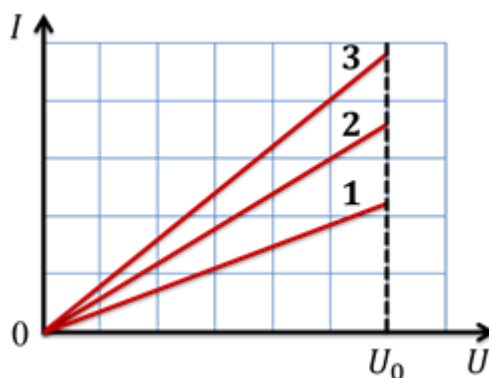
$$I = \frac{U}{R}$$

Единица измерения сопротивления названа в честь Георга Ома:

$$[R] = \left[ \frac{\text{В}}{\text{А}} \right] = [\text{Ом}]$$

Как видно из формулы, проводник обладает сопротивлением 1 Ом, если при напряжении 1 В, в этом проводнике возникает сила тока в 1 А.

Если мы изобразим эту зависимость графически, то графики будут представлять собой прямые линии. Это говорит нам о линейной зависимости силы тока от напряжения.



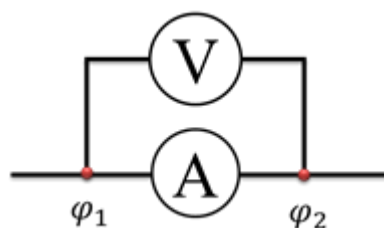
Угол наклона прямой, соответствующей каждому проводнику будет обусловлен сопротивлением проводника. Используя наш график, мы можем с уверенностью сказать, что проводник номер 3 обладает самым маленьким сопротивлением, а проводник номер 1 обладает самым большим сопротивлением:

$$R_1 > R_2 > R_3$$



То есть, при одинаковом напряжении во всех трех проводниках будет различная сила тока, в зависимости от сопротивления данного проводника.

Очевидно, что сопротивление — это основная электрическая характеристика проводника, которая и обуславливает индивидуальную вольт-амперную характеристику. Разумеется, пользуясь законом Ома, можно определить сопротивление того или иного проводника экспериментально. Рассмотрим участок цепи между точками 1 и 2, обладающими различными потенциалами.



Подключим вольтметр для измерения разности потенциалов и подключим амперметр для измерения силы тока в проводнике. Тогда сопротивление проводника будет равно отношению напряжения между точками 1 и 2 к силе тока:

$$R = \frac{U}{I}$$

В восьмом классе мы уже говорили, чем обусловлено сопротивление проводников. Дело в том, что свободные электроны, перемещаясь по проводнику, неизбежно взаимодействуют с кристаллической решеткой, соударяясь с ее узлами, с ионами или различными примесями. Все это приводит к замедлению движения электронов, то есть, к уменьшению силы тока. Исходя из этого, можно сделать вывод, что **чем длиннее проводник, тем больше его сопротивление.**

**Чем толще проводник, тем меньше его сопротивление.**

И, конечно же, **сопротивление проводника зависит от самого вещества, из которого сделан проводник.**

Также, сопротивление зависит от внешних условий (в первую очередь от температуры), но к этому вопросу мы вернемся чуть позже — при изучении полупроводников. Таким образом, сопротивление проводника рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

Напомним, какие величины входят в эту формулу.  $l$  — это длина проводника,  $S$  — это площадь поперечного сечения проводника, а  $\rho_0$  — это удельное сопротивление проводника.

**Удельным сопротивлением проводника называется сопротивление проводника из данного вещества длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>.**

Если мы выразим удельное сопротивление из формулы, по которой рассчитывается сопротивление проводника, то убедимся, что удельное сопротивление измеряется в омах умноженных на метр:

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

$$[\rho] = \left[ \frac{\text{Ом} \times \text{м}^2}{\text{м}} \right] = [\text{Ом} \cdot \text{м}]$$

Конечно, удельные сопротивления многих материалов уже давно измерены экспериментально и сведены в таблицы.

Вещество	$\rho$ , Ом · м при 20 °С	Вещество	$\rho$ , Ом · м при 20 °С
<b>Проводники</b>		<b>Полупроводники</b>	
Серебро	$1,6 \times 10^{-8}$	Углерод	$3,5 \times 10^{-5}$
Медь	$1,7 \times 10^{-8}$	Германий	0,5
Золото	$2,4 \times 10^{-8}$	Кровь	1,5
Алюминий	$2,8 \times 10^{-8}$	Кремний	2300
Вольфрам	$5,5 \times 10^{-8}$	<b>Диэлектрики</b>	
Платина	$10^{-7}$	Полиэтилен	$10^8 - 10^9$
Сталь	$2 \times 10^{-7}$	Дерево	$10^8 - 10^{11}$
Нихром	$10^{-6}$	Резина	$10^{13}$
Ртуть	$9,6 \times 10^{-6}$	Стекло	$10^{11} - 10^{14}$


Как вы видите, в таблице все вещества разделены на три группы: проводники, полупроводники и диэлектрики. Нетрудно догадаться, что проводники обладают очень маленьким удельным сопротивлением (поэтому они и хорошо проводят ток). Диэлектрики, напротив, обладают огромным удельным сопротивлением (поэтому их используют для изоляции). Полупроводники занимают промежуточную стадию, но их удельные сопротивления интереснее рассматривать в таблицах, показывающих зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры. Если вы обратили внимание, то в таблице указано, что данные значения удельных сопротивлений тех или иных веществ наблюдаются при определенной температуре. Поэтому, следует понимать, что при других температурах, эти значения могут быть иными.

Закон Ома для участка цепи имеет огромное значение для расчета электрических цепей, поэтому, было бы хорошо, если бы вы запомнили формулу, описывающую закон Ома.

### Пример решения задачи.

**Задача.** В лампе накаливания используется вольфрамовая нить, радиус которой равен 0,01 мм. Длина этой нити составляет 20 см. Если лампочка рассчитана на 80 мА, то, каково напряжение на ней?

Дано:	СИ		
$r = 0,01 \text{ мм}$	$10^{-5} \text{ м}$	$U = IR$	$R = \frac{\rho l}{S}$
$l = 20 \text{ см}$	$0,2 \text{ м}$		
$\rho = 5,5 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$		$U = \frac{I\rho l}{\pi r^2}$	$R = \frac{\rho l}{\pi r^2}$
$I = 80 \text{ мА}$	$0,08 \text{ А}$		
$U - ?$		$U = \frac{0,08 \times 5,5 \times 10^{-8} \times 0,2}{\pi(10^{-5})^2}$	
		$U = 2,8 \text{ В}$	

$S = \pi r^2$   


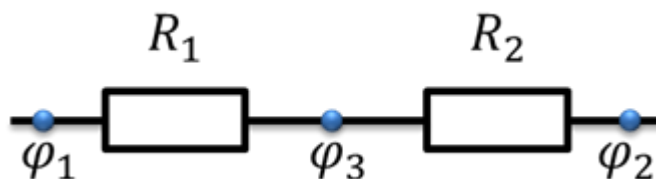
### 3. Последовательное и параллельное соединение проводников.

Электрические цепи составляют для осуществления передачи энергии от источника тока к различным потребителям. Для соединения источника и потребителей, конечно же, нужны соединительные провода. Часто в цепях используются выключатели, чтобы иметь возможность размыкать и замыкать цепь, когда это нужно. Также, в цепь могут быть включены приборы, контролирующие силу тока, например, реостаты. Кроме этого, в цепь часто включаются измерительные приборы (например, амперметр). Все вы прекрасно знаете пример самой простой электрической цепи – это лампочка, подключенная к источнику тока. С помощью выключателя вы можете размыкать и замыкать цепь, тем самым выключая или включая лампочку.



На сегодняшнем занятии мы рассмотрим наиболее простые типы соединений проводников, которые называются последовательным и параллельным соединениями.

**Последовательное соединение проводников** – это такое соединение, в котором нет разветвлений. Иными словами, конец одного проводника присоединяется к началу другого. На рисунке показан участок цепи, состоящий из двух последовательно подключенных проводников.



В этом случае, сила тока в обоих проводниках одинакова, поскольку через них проходит одинаковый заряд с одинаковой скоростью (то есть заряд не накапливается в точке соединения):

$$I = I_1 = I_2$$

Рассмотрим теперь три точки: две точки на концах рассматриваемого участка и третья точка между проводниками. Поскольку линии напряженности направлены в сторону убывания потенциала, очевидно, что третья точка не может иметь самый низкий потенциал. Значит, разность потенциалов между точками на концах рассматриваемого участка будет складываться из разностей потенциалов между точками на концах проводника и точкой между ними. Таким образом, **суммарное напряжение на концах рассматриваемого участка цепи равно сумме напряжений на обоих проводниках:**

$$U = U_1 + U_2$$

Применим теперь закон Ома для участка цепи:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_1}{I_1} + \frac{U_2}{I_2}$$

Тогда мы можем заключить, что **сопротивление рассматриваемого участка складывается из сопротивлений обоих проводников:**

$$R = R_1 + R_2$$

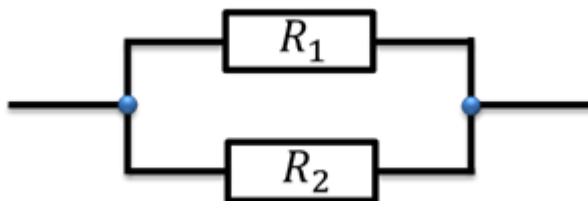
Данные правила применимы для любого числа последовательно соединенных элементов цепи. То есть, при последовательном подключении на участке цепи верны следующие утверждения:

Сила тока на всем участке цепи одинакова.

Общее напряжение на концах участка цепи равно сумме напряжений на всех элементах данного участка цепи.

Общее сопротивление участка цепи равно сумме сопротивлений всех элементов данного участка цепи.

Теперь поговорим о параллельном соединении проводников. **Параллельное соединение – это соединение с разветвлениями.** Пример параллельного соединения представлен на рисунке.



Как раз при таком подключении цепь может разветвляться в точках, которые называются **узлами**. В этом случае по ответвлениям может течь разный ток. Поскольку в узлах заряды не накапливаются, сумма токов в обоих проводниках должна быть равна току, в узле:

$$I = I_1 + I_2$$

А вот напряжение на концах обоих проводников будут одинаковы:

$$U = U_1 = U_2$$

Дело в том, что оба этих проводника подключены к одним и тем же точкам, между которыми может существовать одно единственное напряжение. Чтобы узнать, как выразить общее сопротивление участка через сопротивление каждого из проводников, мы снова применяем закон Ома для участка цепи:

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{I_1}{U_1} + \frac{I_2}{U_2}$$

Отношение силы тока к напряжению – это величина, обратная сопротивлению:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Если мы приведем правую часть полученного уравнения к общему знаменателю, то получим формулу, по которой вычисляется общее сопротивление участка из двух параллельно подключенных проводников:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Исходя из этого, можно заключить, что **при параллельном подключении общее сопротивление участка не больше каждого из сопротивлений проводников на этом участке.**

Данные правила применимы для любого числа параллельно соединенных элементов участка цепи. То есть, при параллельном подключении на участке цепи верны следующие утверждения:

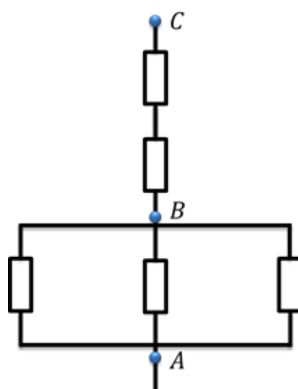
Сила тока в неразветвленной части участка равна сумме токов во всех ответвлениях параллельно подключенных элементов на этом участке.

Напряжения на всех элементах данного участка цепи одинаковы и равны напряжению на концах этого участка.

Общее сопротивление участка цепи не больше сопротивления любого из элементов этого участка, подключенного параллельно.

В бытовых целях чаще всего используется параллельное подключение к сети. В первую очередь, это позволяет включать и выключать в цепь различные приборы, не влияя на работу других приборов. Мы легко можем выключить из сети микроволновую печь после окончания использования, но это никак не повлияет на работу, например, стиральной машины, чайника или освещения. Во-вторых, в сети, к которой подключаются дома, поддерживается постоянное напряжение (как правило, 220 вольт). Именно на это напряжение и рассчитывают производители той или иной бытовой техники.

Конечно, цепь может одновременно включать в себя и последовательно соединенные участки, и параллельно соединенные участки. Такое соединение называется **смешанным**. Пример смешанного соединения представлен на рисунке.



На участке  $AB$  мы видим параллельное подключение, а на участке  $BC$  мы видим последовательное подключение. В реальных электрических цепях, как раз, чаще всего встречается смешанное соединение. Тем не менее, каждые отдельные участки цепи являются параллельно или последовательно соединенными, а потому, подчиняются соответствующим правилам, которые мы рассмотрели на сегодняшнем занятии.

## Лекция №18

ЭДС. Закон Ома для полной цепи. Работа и мощность электрического тока.

План

1. ЭДС. Закон Ома для полной цепи.
2. Работа и мощность электрического тока.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

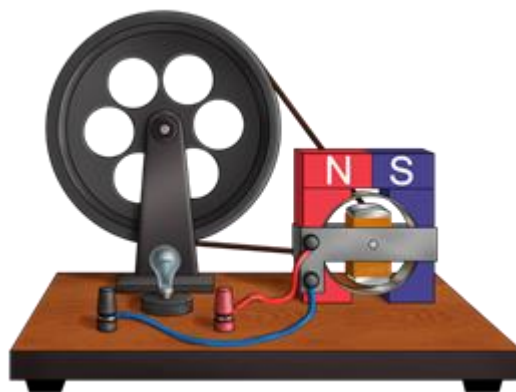
Вопросы для самоконтроля:

1. Как выражается сила тока в цепи до его разветвления через силы токов в отдельных ветвях ветвления?
2. Как определяют работу электрического тока?
3. Как определяют мощность?
4. Назовите единицы измерения работы и мощности.
5. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца.

## 1. ЭДС. Закон Ома для полной цепи.

Как вы знаете, для существования электрического тока, необходимо наличие электрического поля. Причем, это поле должно постоянно поддерживаться неким источником тока. Сегодня мы поговорим об основной характеристике источника тока, которая называется электродвижущей силой (или, сокращенно, ЭДС). Для начала рассмотрим простой опыт: возьмем два противоположно заряженных шарика и соединим их проводником. В этом случае, в проводнике возникнет электрический ток, но он будет очень кратковременным. Дело в том, что очень скоро произойдет перераспределение заряда, и потенциалы шариков уравниваются. Значит, перестанет существовать электрическое поле.

Из этого можно сделать вывод, что для поддержания постоянного тока необходимо наличие неких сил неэлектрического происхождения, чтобы эти силы могли перемещать заряды против поля. Такие силы называются сторонними силами. То есть, **сторонние силы – это любые силы, которые действуют на электрические заряды, но при этом не являются силами электрического происхождения.** Например, это могут быть силы, действующие на заряды со стороны магнитного поля – это используется в генераторах.



В батареях или аккумуляторах работу по разделению электрических зарядов выполняют химические реакции.





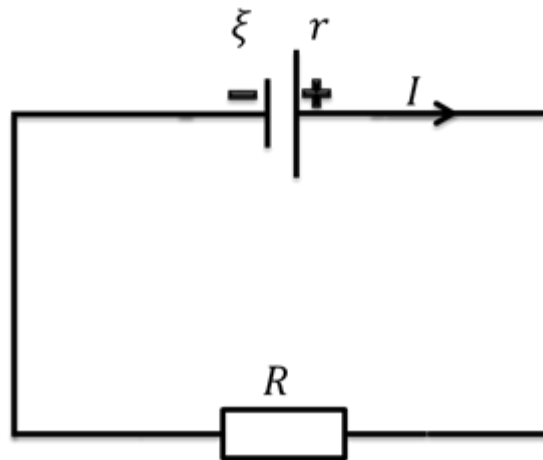
**Устройство для поддержания электрического тока, называется источником тока.** В любом источнике тока сторонние силы действуют на заряды, совершая работу против кулоновских сил. Стало быть, характеристикой источника должна быть величина, не зависящая от величины заряда. Эта величина называется электродвижущей силой. **Электродвижущая сила равна отношению работы сторонних сил при перемещении заряда по замкнутому контуру, к величине этого заряда:**

$$\xi = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$$

Из формулы видно, что электродвижущая сила, как и напряжение, измеряется в вольтах:

$$[\xi] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = [\text{В}]$$

Теперь, когда мы познакомились с ЭДС, мы можем перейти к изучению закона Ома для полной цепи. **Полной цепью называется замкнутая цепь, включающая в себя источник тока.** Для удобства, мы рассмотрим простейшую электрическую цепь, состоящую только из источника тока, резистора и соединительных проводов:



Как мы уже сказали, источник тока характеризуется ЭДС. Тем не менее, любой источник тока обладает определенным сопротивлением, которое называется **внутренним сопротивлением**. Закон Ома для полной цепи представляет собой связь между ЭДС, внутренним и внешним сопротивлением и силой тока в цепи. Для того, чтобы установить эту связь, воспользуемся законом сохранения энергии. Запишем, что работа сторонних сил равна произведению ЭДС источника и величины заряда:

$$A_{\text{ст}} = \xi q \quad q = It \Rightarrow A_{\text{ст}} = \xi It$$

**Закон Ома для полной цепи звучит так: сила тока в замкнутой цепи равна отношению ЭДС источника к полному сопротивлению цепи:**

$$I = \frac{\xi}{R + r}$$

Вывести закон Ома для полной цепи можно, рассуждая несколько иначе. Как мы знаем, при последовательном соединении полное напряжение цепи равно сумме падений напряжений на всех участках цепи:

$$\xi = U_R + U_r$$

Мы видим, что произведение силы тока и сопротивления резистора есть не что иное, как напряжение на этом резисторе. А произведение силы тока и внутреннего сопротивления — это падение напряжения на самом источнике:

$$\xi = IR + Ir$$

Надо сказать, что внутреннее сопротивление источника во многих случаях пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением внешней части цепи. В этом случае, мы можем считать, что напряжение на зажимах источника примерно равно ЭДС (то есть падение напряжения на источнике считается приблизительно равным нулю):

$$I \approx \frac{\xi}{R} \Rightarrow \xi \approx U_R$$

Тем не менее, именно внутренним сопротивлением определяется сила тока в цепи при коротком замыкании. Напомним, что **при коротком замыкании, внешнее сопротивление становится почти нулевым, поэтому в цепи резко возрастает сила тока:**

$$I \approx \frac{\xi}{r}$$

Замыкание полюсов генератора проводником с очень маленьким сопротивлением называется *коротким замыканием*. Сила тока в этом случае ограничивается только внутренним сопротивлением генератора  $r$ .

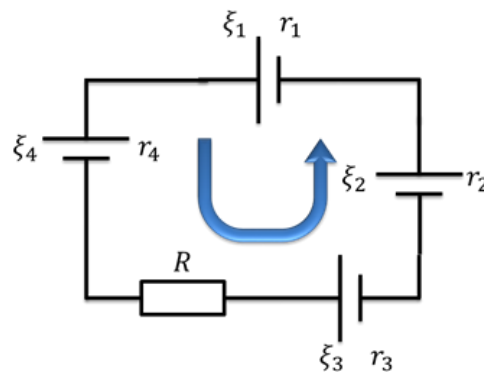
Действительно, когда  $R$  гораздо меньше  $r$ , можно принять, что сопротивление  $R$  проводника, который замыкает генератор, равна нулю. Тогда из формулы  $I = \varepsilon / (R + r)$  получаем ток короткого замыкания:

Это наибольший ток, который может дать источник электрической энергии.

Короткое замыкание – явление негативное. Кроме ненужных расходов электрической энергии, при коротком замыкании портится генератор, а

перегрев проводников, замыкают генератор, может вызвать пожар. Поэтому провода, которые составляют замкнутую цепь, должны быть хорошо изолированы не только друг от друга, но и от Земли, то есть от стен, пола и др. Для того, чтобы предотвратить пожаров и порчи генераторов при коротком замыкании, в электрическую цепь обязательно включают предохранители. Ток, который идет к потребителю проходит через провод из легкоплавкого металла. При коротком замыкании ток сильно увеличивается и плавит проволоку, при этом цепь размыкается. Заметим, что сопротивление единицы длины плавкого предохранителя должен быть значительно больше, чем в подводящих.

Рассмотрим теперь цепь, содержащую несколько последовательно соединенных источников тока.



В этом случае, ЭДС всей цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных источников.

В таких случаях необходимо выбрать так называемое «направление обхода тока». Это направление выбирается условно (в нашем случае — против часовой стрелки). Тогда,  $\xi_1 > 0; \xi_2 > 0$ , поскольку они стремятся вызвать ток в направлении обхода.

А  $\xi_3 < 0; \xi_4 < 0$ , поскольку они стремятся вызвать ток в направлении, противоположном направлению обхода.

Отрицательная ЭДС означает, что сторонние силы внутри источника совершают отрицательную работу. Таким образом, ЭДС нашей цепи будет равна:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 - \xi_3 - \xi_4$$

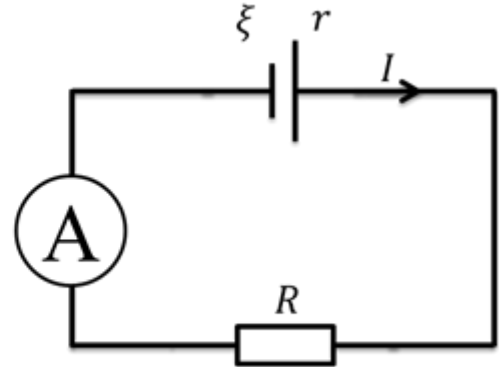
В соответствии с правилами последовательного соединения, суммарное сопротивление цепи равно сумме внешнего сопротивления и внутренних сопротивлений всех источников тока:

$$R_{\text{общ}} = R + r_1 + r_2 + r_3 + r_4$$

### Пример решения задачи.

**Задача.** К источнику тока с внутренним сопротивлением 1 Ом подключили резистор с сопротивлением 15 Ом. После этого в цепь включили амперметр, который показал, что сила тока равна 5 А. Найдите работу сторонних сил внутри источника, совершенную за 2 минуты.

Дано:	$A_{\text{ст}} = \xi I t$
$r = 1 \text{ Ом}$	$I = \frac{\xi}{R + r} \Rightarrow \xi = I(R + r)$
$R = 15 \text{ Ом}$	$A_{\text{ст}} = I^2(R + r)t$
$I = 5 \text{ А}$	$A_{\text{ст}} = 5^2 \times (15 + 1) \times 120$
$t = 2 \text{ мин}$	$A_{\text{ст}} = 48000 \text{ Дж} = 48 \text{ кДж}$
$A_{\text{ст}} - ?$	



## 2. Работа и мощность электрического тока.

Все вы прекрасно знаете, что сегодня электрический ток используется повсеместно. С его помощью работают компьютеры и телевизоры, ноутбуки и планшеты. С помощью электрического тока обеспечивается освещение улиц и различных помещений. Стиральная машина, микроволновка, утюг и многие другие приборы – все они работают на электрическом токе. Все это говорит нам о том, что ток несет в себе энергию, а, значит, с его помощью можно совершать работу.

Как мы уже убедились, при протекании тока, электрическое поле совершает определенную работу. Эта работа называется **работой тока**. Рассмотрим произвольный участок цепи, находящийся под некоторым напряжением  $U$ . За некоторый промежуток времени  $t$ , через поперечное сечение проводника пройдет определенный заряд  $q$ . Как вы знаете, работа электрического поля по переносу заряда определяется как произведение этого заряда и напряжения:

$$A = qU$$

Также мы знаем, что заряд можно выразить как произведение силы тока и времени:

$$q = It$$

Тогда получим формулу, с которой вы уже знакомы из курса физики восьмого класса: работа тока равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого шел ток:

$$A = UIt$$

Все вы прекрасно знаете, что сегодня электрический ток используется повсеместно. С его помощью работают компьютеры и телевизоры, ноутбуки и планшеты. С помощью электрического тока обеспечивается освещение улиц и различных помещений. Стиральная машина, микроволновка, утюг и многие другие приборы – все они работают на электрическом токе. Все это говорит нам о том, что ток несет в себе энергию, а, значит, с его помощью можно совершать работу.

Как мы уже убедились, при протекании тока, электрическое поле совершает определенную работу. Эта работа называется **работой тока**. Рассмотрим произвольный участок цепи, находящийся под некоторым напряжением  $U$ . За некоторый промежуток времени  $t$ , через поперечное сечение проводника пройдет определенный заряд  $q$ . Как вы знаете, работа электрического поля по переносу заряда определяется как произведение этого заряда и напряжения:

$$A = qU$$

Также мы знаем, что заряд можно выразить как произведение силы тока и времени:

$$q = It$$

Тогда получим формулу, с которой вы уже знакомы из курса физики восьмого класса: работа тока равна произведению силы тока, напряжения и времени, в течение которого шел ток:

$$A = UIt$$

Используя закон Ома для участка цепи, мы можем получить еще два эквивалентных выражения.

$$A = \frac{U^2 t}{R}$$

$$A = I^2 R t$$

При последовательном соединении удобнее использовать формулу, в которой нет напряжения, поскольку сила тока на всем участке цепи одинакова. Аналогично, при параллельном подключении удобнее использовать формулу, в которой нет силы тока, поскольку напряжение на всех элементах участка цепи одинаково.

Исходя из закона сохранения энергии, работа равна изменению энергии рассматриваемого участка цепи:

$$A = \Delta E$$

Если предположить, что на этом участке не совершается механическая работа и не происходят химические реакции, то можно заключить, что вся работа электрического тока идет на нагревание проводника. Именно к такому выводу, пришли ученые Джеймс Джоуль и Эмилий Ленц, работая независимо друг от друга. Поэтому, открытый ими закон получил название «закон Джоуля-Ленца». Итак, **закон Джоуля-Ленца** звучит следующим образом: **количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления и времени прохождения тока по проводнику:**

$$Q = I^2 R t$$

Нагревание проводников происходит следующим образом: при протекании электрического тока по проводнику, электроны неизбежно сталкиваются с ионами кристаллической решетки. В результате, ионы приобретают все бóльшую и бóльшую кинетическую энергию, то есть их движение становится более интенсивным. Это, как мы знаем из молекулярной физики, и означает повышение температуры.

Помимо работы тока, есть еще одна важная величина, которой характеризуются все электроприборы — это мощность электрического тока. Как вы знаете, **мощность определяется как работа, произведенная в единицу времени.** Таким образом, мощность равна отношению работы к промежутку времени, за который эта работа была совершена:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{U I t}{t} = U I$$

Опять же, используя закон Ома, мы можем получить еще два равноправных выражения для мощности:

Опять же, используя закон Ома, мы можем получить еще два равноправных выражения для мощности:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad P = I^2 R$$

Как видно из формулы, мощность измеряется в джоулях на секунду. Напомним, что такая единица измерения называется ваттом:

$$[P] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right] = [\text{Вт}]$$

Необходимо отметить, что есть и другие единицы измерения работы и мощности электрического тока. Например, для измерения работы электрического тока на практике часто используется такая единица измерения, как киловатт-час. Как видно из названия этой единицы измерения, **работа в 1 кВт·час – это работа, совершаемая прибором мощностью 1 кВт за 1 час:**

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3600000 \text{ Дж}$$

Когда мы платим за электроэнергию, мы платим именно за количество киловатт-часов. То есть, существует тариф за использование одного киловатт-часа энергии, в соответствии с которым нам и приходит счет за электроэнергию в конце месяца.

Внесистемной единицей измерения мощности, которая часто используется на практике, является лошадиная сила. В этих единицах измерения, как правило, измеряется мощность многих автомобильных двигателей:

$$1 \text{ л. с.} = 746 \text{ Вт}$$

При последовательном соединении проводников с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  количество выделенного в них тепла можно выразить следующим образом:  $Q_1 = I^2 R_1 t$ ,  $Q_2 = I^2 R_2 t$ ,

Отсюда получается, что:

$$Q_1 / Q_2 = R_1 / R_2$$

Итак, количество теплоты, выделяемое током в каждом проводнике при последовательном соединении, прямо пропорционально сопротивлению этих проводников.

При параллельном соединении двух участков цепи без ЭДС с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  количество теплоты, выделяемое током в каждой области отдельно, равно:  $Q_1 = U^2 t / R_1$ ,  $Q_2 = U^2 t / R_2$ .

Количество теплоты, выделяемое током в параллельно соединенных участках цепи без ЭДС, обратно пропорционально сопротивлению этих участков.

При последовательном соединении большее количество тепла выделяется в проводнике с большим сопротивлением, а при параллельном соединении – с меньшим.

## Лекция №19

### Электрический ток в полупроводниках. Применение полупроводниковых приборов.

#### План

1. Чистые полупроводники.
2. Примесные полупроводники.
3. *p-n*-переход. Полупроводниковый диод.
4. Транзистор.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 2-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 416 с. : ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Какие вещества называют полупроводниками?
2. Как влияют примеси на электропроводность проводников, диэлектриков, полупроводников?
3. Какие полупроводники называют чистыми полупроводниками?
4. Какая связь между атомами в чистых полупроводниках?
5. Что является свободными носителями зарядов в полупроводниках?
6. Какую проводимость называют собственной проводимостью полупроводников?
7. Что называют электронно-дырочным переходом?



## 1. Чистые полупроводники.

Для проводников значения удельного сопротивления находятся в пределах от  $10^{-5}$  до  $10^{-8}$  Ом·м, а для диэлектриков оно меняется в пределах от  $10^8$  до  $10^{17}$  Ом·м. Эти числа показывают, насколько большой интервал значений удельного сопротивления проводников и диэлектриков. Дальнейшее изучение электропроводности веществ привело к открытию таких материалов, у которых электропроводность оказалась промежуточной между проводниками и диэлектриками. Эти вещества назвали полупроводниками. К ним в первую очередь относятся элементы IV группы таблицы Менделеева германий и кремний, селен, мышьяк, фосфор, сера, а также карбид кремния, селена, соединения элементов III группы с элементами V группы и многие другие вещества. Удельное сопротивление полупроводников находится в пределах от  $10^4$  до  $10^{-5}$  Ом·м.

Сопротивление различных веществ, в том числе и полупроводников, зависит от их чистоты. Присутствие в металлических проводниках посторонних примесей мало влияет на концентрацию подвижных носителей зарядов, но сильно меняет их подвижность. Это объясняется тем, что примеси создают дефекты в кристаллической решетке, которые увеличивают сопротивление металлов электрическому току. Посторонние примеси в металлах, как правило, увеличивают их сопротивление.

У диэлектриков атомы примесей обычно имеют электроны, слабо связанные с атомами. Эти электроны легко отрываются от атомов и переходят в свободное состояние. Поэтому электропроводность диэлектриков в основном определяется количеством примесей в них. Итак, примеси в диэлектрике, как правило, уменьшают его сопротивление.

В полупроводниках, как и в диэлектриках, примеси снижают их сопротивление. Специальным подбором примесей можно изменять сопротивление полупроводников в нужном направлении.

Интересно сравнить зависимость сопротивления различных веществ от температуры. Вспомним, что у металлов сопротивление при нагревании возрастает, а при охлаждении уменьшается. Сопротивление диэлектриков при нагревании уменьшается, но остается большим. Твердые диэлектрики в основном успевают расплавиться прежде, чем получают достаточно большую проводимость (рис. 1).

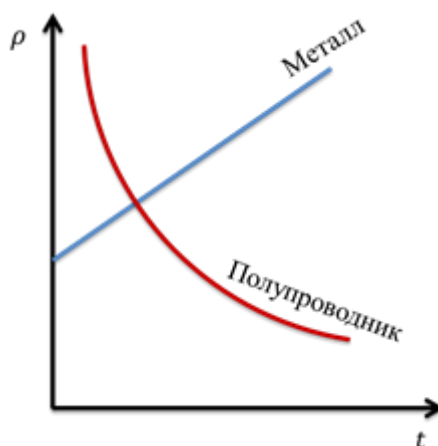
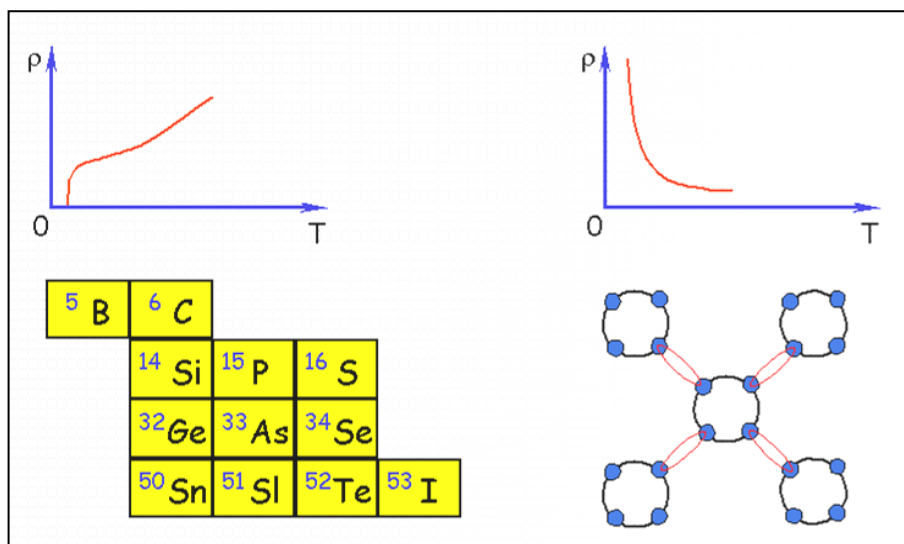


Рисунок 1 – Зависимость электропроводности металлов и полупроводников от температуры

При нагревании полупроводников количество подвижных носителей зарядов в них быстро растет, и их сопротивление сильно уменьшается. При снижении температуры сопротивление полупроводников растет, и при низких температурах их сопротивление так же велико, как и у диэлектриков. Опыт показал, что на сопротивление полупроводников сильно влияет не только температура. Освещение полупроводника значительно уменьшает его сопротивление, так как излучение приносит энергию, достаточную для образования подвижных носителей зарядов в полупроводнике.

Следовательно, проводимость полупроводников сильно зависит от температуры и от освещенности. Эти особенности полупроводников имеют важное практическое значение.

Рассмотрим подробнее, как образуются подвижные носители зарядов в чистых полупроводниках на примере германия и кремния.

У атомов этих элементов на внешней оболочке имеется по четыре валентных электрона. В твердом состоянии эти вещества имеют

кристаллическую решетку типа алмаза, в которой каждый атом имеет четыре ближайших соседа. Связь между соседними атомами в такой решетке ковалентная, то есть два соседних атома объединяют два своих валентных электрона (по одному от каждого атома), которые образуют электронную пару. При низкой температуре все электроны полупроводника связаны с атомами.

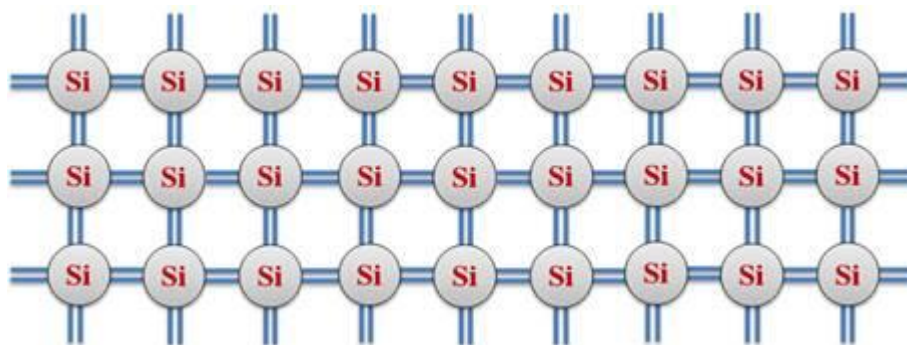
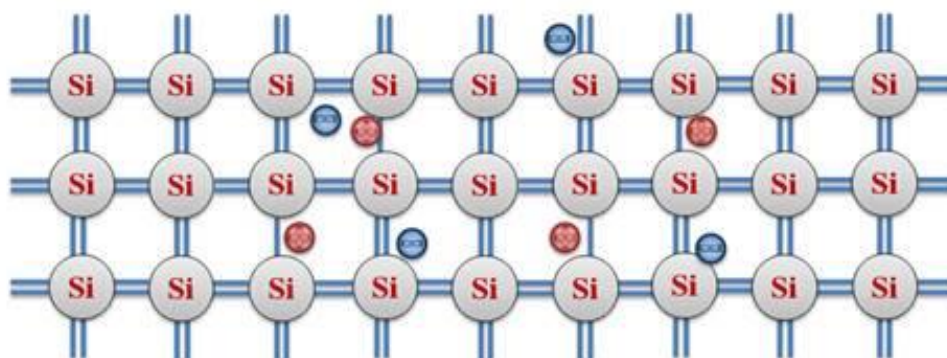


Рисунок 2 – Кристалл кремния

В таком кристалле нет свободных носителей зарядов, и он является диэлектриком. Если постепенно повышать температуру такого кристалла, то отдельные электроны могут получить избыточную энергию (за счет энергии хаотического движения), которой оказывается достаточно для их отрыва от атома. Появление таких электронов и создает проводимость кристалла полупроводника. При комнатной температуре в кристаллах германия и кремния уже есть свободные электроны.

При переходе электрона в свободное состояние в оболочке атома полупроводника остается свободное место, которое называют дыркой. Поскольку до отрыва электрона атом был нейтрален, то после отрыва получает положительный заряд, который приписывают дырке.

Поскольку соседние атомы полупроводника непрерывно обмениваются электронами, то дырку в атоме может заполнить электрон другого атома, у которого в свою очередь появляется дырка (рис. 3).



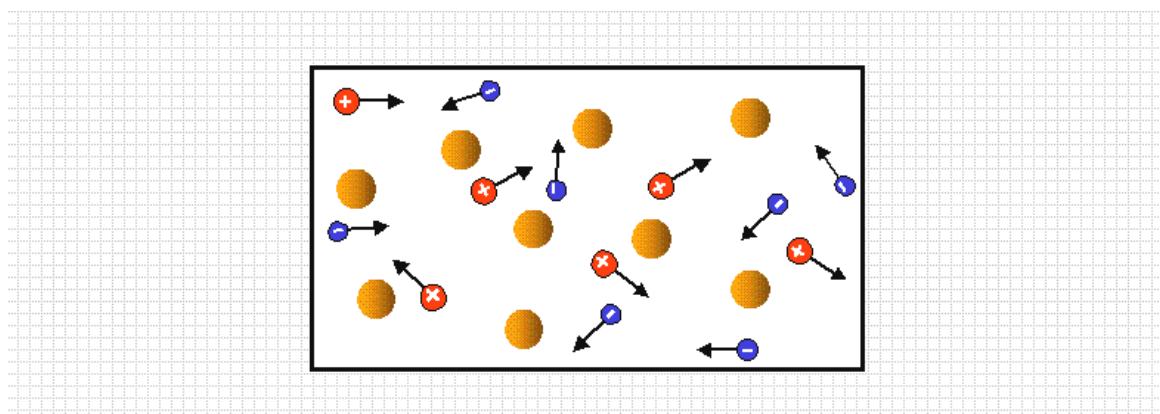
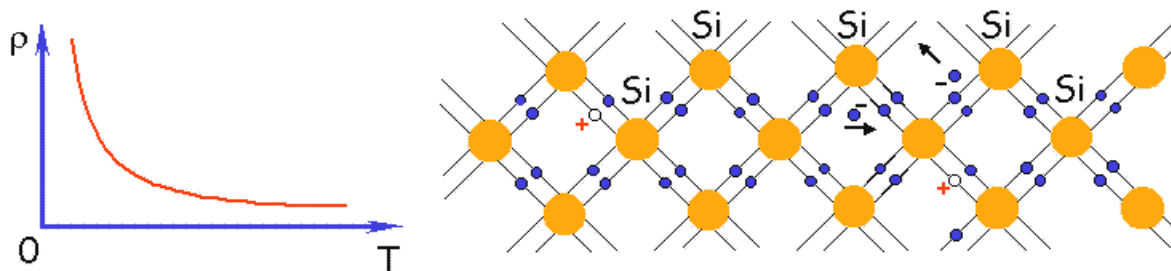


Рисунок 3 – Образование свободных носителей зарядов в чистых полупроводниках

Таким образом, дырки, обладающие положительным зарядом, осуществляют в полупроводнике такое же хаотическое движение, как и свободные электроны. Поэтому дырки в полупроводнике условно считают подвижными носителями зарядов. Действительно, если при отсутствии электрического поля в полупроводнике дырки движутся хаотично, то при наложении внешнего поля они движутся преимущественно по направлению этого поля, то есть создают электрический ток.

Итак, нагрев полупроводника ведет к образованию, или к генерации, пары подвижных носителей зарядов «электрон-дырка». Когда свободные электроны и дырки осуществляют хаотическое движение в полупроводнике, то они могут встретиться. Тогда свободный электрон заполняет вакантное место в оболочке атома, то есть в полупроводнике исчезают сразу два свободных носителя зарядов – происходит рекомбинация пары «электрон-дырка».

В чистом полупроводнике всегда есть равное количество свободных электронов и дырок. Поэтому проводимость чистых полупроводников наполовину дырочная и наполовину электронная. Такую проводимость принято называть собственной проводимостью полупроводников.

Итак, если чистый полупроводник включить в цепь, то в нем потечет ток. При этом свободные электроны будут двигаться от отрицательного полюса к положительному, а дырки – в обратную сторону (рис. 4).

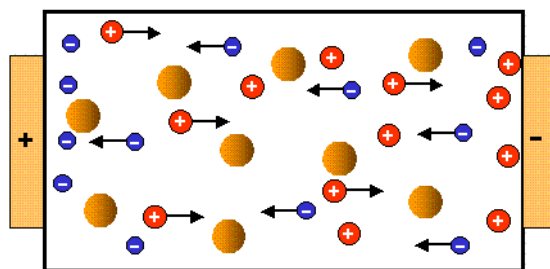


Рисунок 4 – Электрический ток в полупроводниках

Поскольку температурный коэффициент сопротивления полупроводников во много раз больше, чем у металлов, и имеет отрицательный знак, собственную проводимость полупроводников можно использовать для устройств, замыкающих цепь при недопустимом повышении температуры в автоматических устройствах. Полупроводник, сопротивление которого при нормальных условиях большое, включается в сигнальную цепь со звонком или в цепь управляющей подачи тока. Когда температура недопустимо повышается, сопротивление полупроводника падает и в сигнальной цепи появляется ток, приводящий в действие звонок, или прекращается подача тока, вызывающая перегрев. Такие полупроводниковые приборы называются термисторами.

## 2. Примесные полупроводники.

С помощью добавления в чистый полупроводник специально подобранных примесей можно искусственно приготовить такие полупроводники, которые обладают преимущественно электронной или дырочной проводимостью.

Если добавить в чистый расплавленный кремний у 10-5% примеси, состоящий из атомов какого-либо элемента V группы таблицы Менделеева, например, мышьяка, то при затвердевании образуется обычная решетка кремния, но в некоторых узлах вместо атомов кремния будут находиться атомы мышьяка. Четыре валентных электрона атома мышьяка при этом образуют ковалентные связи с соседними атомами кремния, а пятый электрон в этих условиях оказывается настолько слабо связанным с атомом мышьяка, для его отрыва нужна очень маленькая энергия.

Поэтому при обычной температуре все атомы мышьяка в полупроводнике оказываются ионизированными. Положительно заряженные

атомы мышьяка связаны с решеткой (локализованные) и не могут перемещаться под действием сил внешнего электрического поля, а свободные электроны (по одному от каждого атома примеси) являются носителями зарядов (рис. 5).

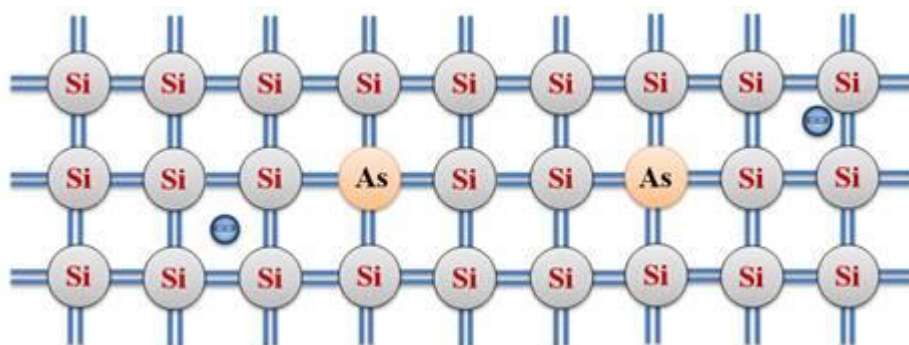


Рисунок 5 – Полупроводник *n*-типа

Проводимость такого кристалла будет преимущественно электронной и ее называют проводимостью *n*-типа (от «негатив» – отрицательный), а сам кристалл называют полупроводником *n*-типа. Примесь, которая создает в полупроводнике свободные электроны, называется донорной или примесью *n*-типа.

Если в чистый кремний добавить атомы элементов III группы таблицы Менделеева, например индия, в которых по три валентных электрона, то этих электронов хватит для установления ковалентной связи с тремя соседними атомами кремния. Для установления связи с четвертым атомом кремния атом индия позаимствует электрон у одного из своих соседей и превратится в отрицательный ион, а у одного из атомов кремния возникает дырка, хаотично движущаяся по кристаллу (рис. 6).

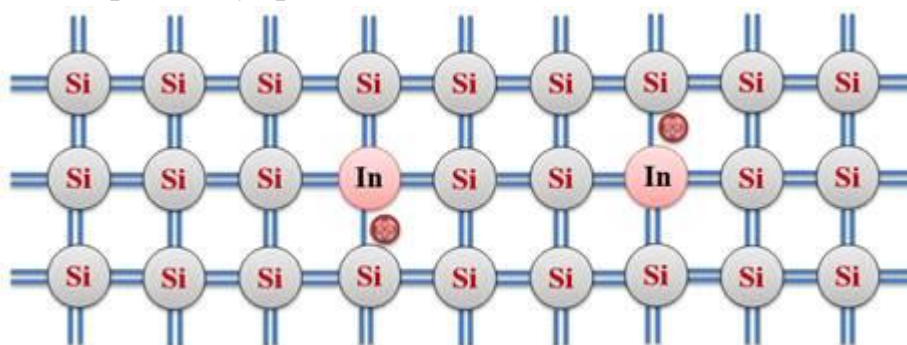


Рисунок 6 – Полупроводник *p*-типа

У кристалла кремния с примесью атомов элементов III группы проводимость преимущественно дырочная. Ее называют проводимостью *p*-типа (от «позитив» – положительный). Примесь, создающая такую проводимость, называется акцепторной или примесью *p*-типа.



Заметим, что в примесных полупроводниках уже при обычных температурах происходит генерация пар электрон-дырка. Поэтому помимо основных носителей тока там есть в небольшом количестве и носители тока противоположного знака (неосновные носители). При невысоких температурах неосновные носители тока существенной роли в электропроводности не играют. Однако при высоких температурах, когда происходит интенсивная генерация пар электрон-дырка, полупроводник приобретает смешанную проводимость. Таким образом, преимущественно дырочная или электронная проводимость в примесных полупроводниках сохраняется только при температурах ниже той, при которой начинает играть существенную роль собственная проводимость полупроводника (рис. 7).

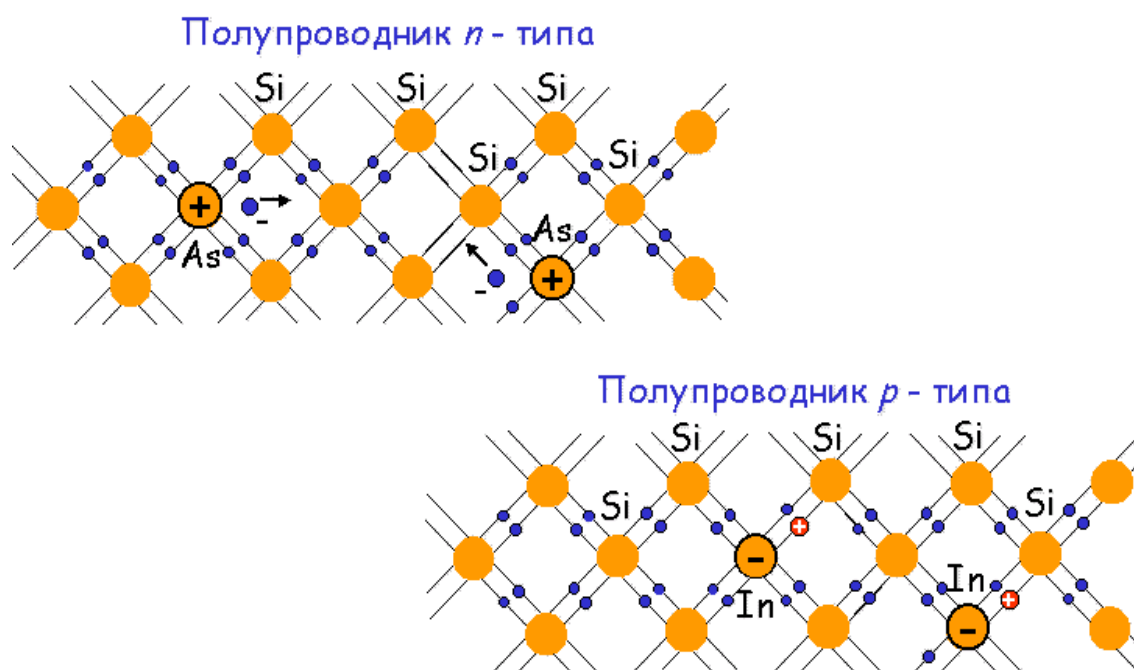


Рисунок 7 – Примесные полупроводники

### 3. *p-n*-переход. Полупроводниковый диод.

Представим себе кристалл германия, у которого одна половина содержит донорную примесь, а другая – акцепторную (рис. 8).

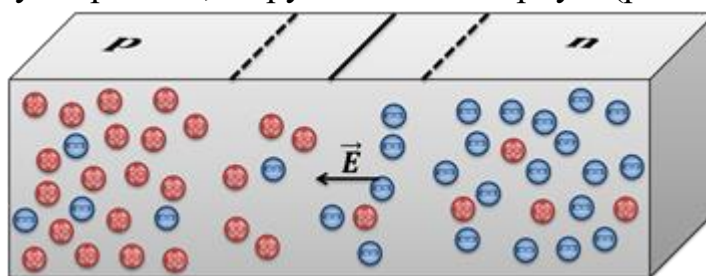


Рисунок 8 – *p-n*-переход

Границу в кристалле полупроводника между областями  $n$ -типа и  $p$ -типа называют электронно-дырочным переходом или  $p$ - $n$ -переходом. Рассмотрим свойства этого перехода.

Представим себе, что эти части полупроводника только приведены в соприкосновение (хотя в действительности это две части одного кристалла). Тогда сразу начнется переход электронов из  $n$ -области, где их много, в  $p$ -область, где их мало, и перемещение дырок в обратном направлении. Эта диффузия электронов и дырок (аналогичная взаимной диффузии двух жидкостей или газов) происходила бы до полного выравнивания их концентраций в обеих частях кристалла, если бы они не переносили заряды. Однако в результате такого перемещения носителей зарядов  $n$ -область заряжается положительно, а  $p$ -область – отрицательно, то есть между  $p$  и  $n$ -областями возникает контактная разность потенциалов

На границе  $p$  и  $n$ -областей, в переходной области появляется электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии основных носителей через границу, отбрасывая основные носители обратно в свои области. Только дырки и электроны с достаточно большой кинетической энергией могут преодолеть противодействие поля и перейти через переходную область. С другой стороны, это поле вызывает обратный переход неосновных носителей дырок с  $n$ -области в  $p$ -область и электронов из  $p$ -области в  $n$ -область.

Действительно, достаточно свободному электрону, который находится в  $p$ -области, при хаотическом движении пересечь переходный слой, как он полем будет переброшен в  $n$ -область; то же будет происходить и с дырками в  $n$ -области.

В результате в переходном слое устанавливается такая разность потенциалов (около одного вольта), при которой диффузный поток дырок из  $p$ -области в  $n$ -область уравнивается встречным потоком дырок из  $n$ -области в  $p$ -область, который создается полем переходного слоя. Одновременно уравниваются и встречные потоки электронов. Результирующие потоки и дырок, и электронов становятся равными нулю.

В переходном слое почти нет подвижных носителей зарядов – они не могут удержаться там и только быстро пролетают через него. Обедненный подвижными носителями заряда переходный слой, толщина которого всего порядка 1 мкм, имеет очень большое сопротивление по сравнению с другими частями кристалла; поэтому, когда кристалл с  $p$ - $n$ -переходом включается в цепь, практически все подведенное к кристаллу напряжение концентрируется на  $p$ - $n$ -переходе.



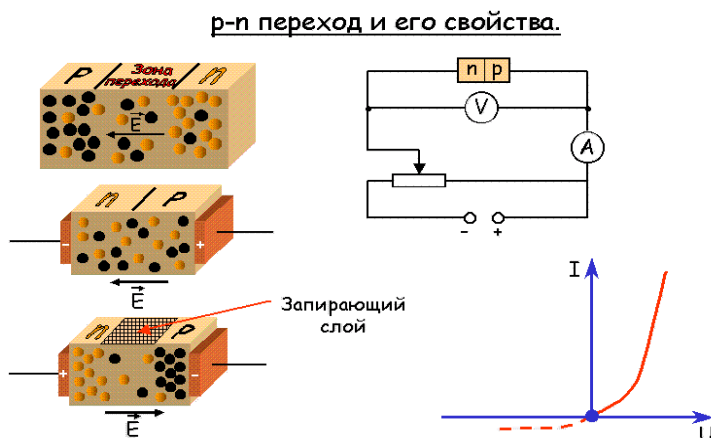
## Полупроводниковый диод.

Выясним теперь, как проходит ток через кристалл с  $p-n$ -переходом. При отсутствии внешнего напряжения все потоки подвижных носителей зарядов через переход уравновешенные и ток равен нулю.

Включим кристалл в цепь так, чтобы внешнее поле было направлено противоположно полю перехода. Поле в  $p-n$ -переходе поле будет ослаблено и диффузные потоки основных носителей (дырочек из  $p$ -области и электронов из  $n$ -области) устремятся через переход. Встречные же потоки неосновных носителей почти не меняются. В результате через переход потечет большой ток. Приложенное напряжение и ток в этом случае называются прямыми. Сила тока при увеличении напряжения растет очень быстро, и закон Ома здесь совсем не выполняется (рис.9).

Подадим теперь на кристалл напряжение обратной полярности. В этом случае внешнее напряжение совпадает по знаку с контактной разностью потенциалов. Внешнее поле усиливает поле  $p-n$ -перехода и диффузные потоки основных носителей через переход значительно уменьшаются. Потоки неосновных носителей, примерно такие же, как и при отсутствии внешнего поля, создают слабый ток через переход. Приложенное напряжение и ток в этом случае называют обратными.

Получается, что при прямом напряжении ток через  $p-n$ -переход в миллионы раз больше, чем при обратном. Это означает, что  $p-n$ -переход работает подобно вентилю, то есть пропускает ток в одном направлении (переход открыт) и не пропускает его в обратном направлении (переход закрыт). Итак, если включить кристалл с  $p-n$ -переходом в цепь переменного тока последовательно с нагрузочным сопротивлением  $R$ , то ток в этом сопротивлении практически будет постоянным по направлению. Поэтому кристалл с  $p-n$ -переходом называют полупроводниковым выпрямителем или полупроводниковым диодом.

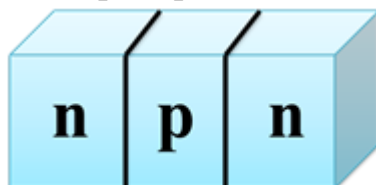


Полупроводниковые диоды имеют высокий КПД (до 98%), маленькие размеры и большой срок службы. К недостаткам полупроводниковых диодов относится ухудшение их работы при повышении температуры. Выше говорилось, что обратный ток через  $p$ - $n$ -переход создается неосновными носителями, концентрация которых мала при обычных температурах, но быстро возрастает при повышении температуры из-за генерации пар электрон-дырка. Поэтому обратный ток полупроводниковых диодов быстро растет с увеличением температуры: кремниевые диоды перестают выпрямлять ток при температуре около 200 °С, а предельная температура для германиевых диодов еще меньше.

Заметим, что полупроводниковый диод нельзя включать в сеть без нагрузочного сопротивления. Если нагрузку убрать, то все напряжение окажется приложенным к диоду. Когда диод будет включен в прямом направлении, внешнее напряжение превысит контактную разность потенциалов,  $p$ - $n$ -переход практически исчезнет, через диод потечет очень большой ток и диод выйдет из строя.

#### 4. Транзистор.

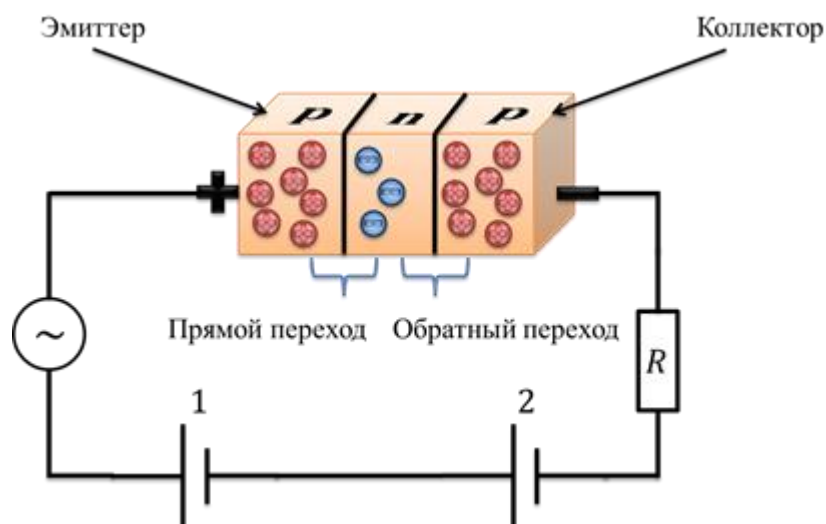
Рассмотрим приборы, которые включают в себя два  $p$ - $n$  перехода – транзисторы. Между двумя полупроводниками  $n$ -типа создается тонкая прослойка из полупроводника  $p$ -типа (на рисунке толщина полупроводников обозначена чисто условно, а не пропорционально их реальным размерам).



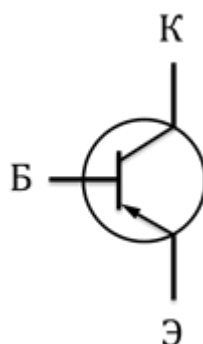
Или же, можно сделать наоборот: между двумя полупроводниками  $p$ -типа помещают тонкую прослойку полупроводника  $n$ -типа.



Соответственно, транзисторы делятся на два типа:  $pnp$  транзисторы и  $npn$  транзисторы. Прослойку, находящуюся между полупроводниками одного типа называют базой (иногда основанием). Транзистор может быть включен в цепь, представленную на рисунке.



Обратите внимание на то, как подключена первая батарея: ток обусловлен движением основных носителей, то есть переход в левой части схемы является прямым. В этом случае, полупроводник в левой части нашей схемы называется эмиттером. Обратимся теперь к правой части нашей схемы. Вторая батарея включена таким образом, что ток обусловлен движением неосновных носителей, то есть этот  $p-n$  переход является обратным. В этом случае, полупроводник в правой части схемы называется коллектором. На нашей схеме для наглядности мы подробно показали транзистор, но на стандартных схемах он обозначается более компактно.



На условном обозначении транзистора вы можете найти букву Э, обозначающую эмиттер, букву К, обозначающую коллектор и букву Б, обозначающую база.

Давайте рассмотрим протекание тока в каждом из полупроводников, входящих в транзистор. Обратим внимание сначала на  $p-n$  переход между эмиттером и базой. Эмиттер является полупроводником  $p$ -типа в данном случае, поэтому основными носителями заряда в нем являются дырки. Эти дырки проникают в базу, где основными носителями заряда являются электроны. Но, поскольку толщина базы очень мала, число электронов там очень невелико, несмотря на то, что они являются основными носителями.

Попавшие в базу дырки практически не объединяются с электронами, в результате чего проникают в коллектор посредством диффузии.

Теперь обратим внимание на *p-n* переход между базой и коллектором. Этот переход обратный, и образует заслон для основных носителей базы, то есть, электронов. Однако, дырки проникают в коллектор под воздействием электрического поля, в результате чего цепь замыкается. Сила тока в эмиттере равна сумме токов в базе и коллекторе:  $I_3 = I_6 + I_K$ . Но ток в базе ничтожно мал, поэтому мы можем считать, что сила тока в коллекторе почти такая же, как и в эмиттере:  $I_3 \approx I_K$ .

Мы еще ни слова не сказали о сопротивлении, которое создается включенным в нашу цепь резистором. Надо сказать, это сопротивление практически не влияет на ток в коллекторе. Дело в том, что ток в коллекторе практически полностью обусловлен строением самого транзистора, а именно – свойствами полупроводников, из которых он изготовлен, и напряжением, которое подается на эмиттер. В данном случае, конечно, речь идет о применении источника переменного тока. Итак, сопротивление может быть довольно большим, но при этом оно не будет влиять на ток в коллекторе. Изменение же напряжения на эмиттере будет вызывать синхронное изменение напряжения на резисторе. Таким образом, если мы используем резистор с очень большим сопротивлением, мы сможем получать мощные сигналы на нем, создавая лишь небольшие изменения напряжения на эмиттере. Это свойство, так или иначе, используется во многих микросхемах, микропроцессорах и так далее. Транзисторы используются повсеместно: в приемниках, компьютерах и даже в приборах, предназначенных для космических исследований. Транзисторы с успехом заменили электронные лампы, которые были громоздкими и значительно менее безопасными. Первый компьютер, как раз, работал на электронных лампах, и занимал помещение, сравнимое с размерами спортзала. Сегодня в компьютерах используются маленькие микросхемы с транзисторами, каждый из вас знает, насколько меньшее пространство занимает современный компьютер, чем спортзал.

Возможно, вас впечатлит тот факт, что на сегодняшний день, на каждого жителя Земли приходится приблизительно 10 миллиардов транзисторов.

Рассмотренные выше свойства *p-n*-перехода используют в полупроводниковых усилителях электрических сигналов.

Полупроводниковые приборы, предназначенные для усиления изменений напряжения и тока, называют полупроводниковыми триодами или транзисторами (рис 9).

Среднюю область транзистора называют базой, левую часть, которая поставляет в базу подвижные носители зарядов – эмиттером, а правую, которая собирает заряды, – коллектором и обозначают соответственно б, э, к. Переход, включаемый в прямом направлении, называют эмиттерным, а переход, который включается в обратном направлении, – коллекторным.

Узкая *n*-область (порядка 1 мкм) разделяет две *p*-области кристалла. Эти области кристалла имеют самостоятельные выводы э, б и к для включения в цепь.

Соединив выводы э и б с внешней цепью, можно подать напряжение на левый *p-n*-переход, а через выводы б и к – на правый.

Выясним, как происходит усиление изменения напряжения в таком транзисторе. Подключим к правому переходу сопротивление нагрузки и подадим большое обратное напряжение (десятки вольт). Поскольку переход закрыт, через него должен протекать очень малый обратный ток, который не может создать заметного падения напряжения на сопротивлении *R*.

### Полупроводниковые приборы.

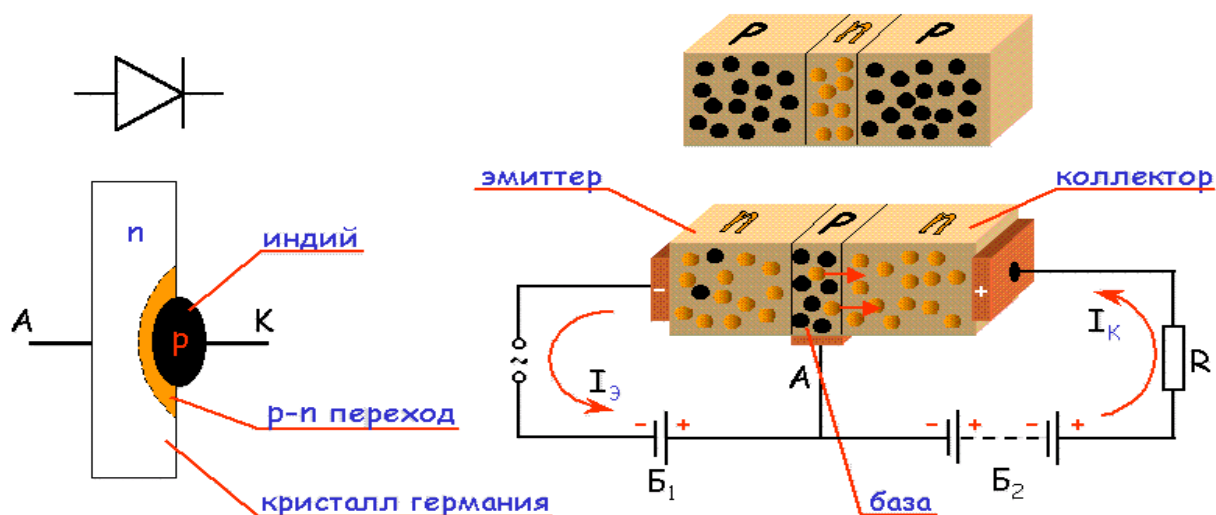


Рисунок 10 – Полупроводниковый транзистор

Подадим на левый переход небольшое прямое напряжение. Через него потечет прямой ток, состоящий почти из одних электронов, диффундирующих из *n*-области в *p*-область. Поскольку *p*-область очень узкая (ее ширина во много раз меньше средней длины пробега электрона к ее рекомбинации), то большинство электронов, не успев рекомбинировать, достигает правого перехода. Электроны в *p*-области являются неосновными носителями, и, попадая в правый переход, они отбрасываются его полем в правую *p*-область. Таким образом, когда открыт левый переход, через правый

переход вместо очень малого обратного тока протекает почти такой же ток, как через левый переход; на сопротивлении  $R$  получается значительное напряжение  $U = IR$ .

Так как прямой ток через  $p$ -переход очень сильно зависит от напряжения, то ток в транзисторе при небольших изменениях напряжения на левом переходе меняется очень сильно. Работа транзистора типа  $pnp$  ничем не отличается от работы описанного транзистора типа  $npn$ , только напряжения на переходах имеют другую полярность и ток в транзисторе в основном состоит из электронов.

Транзисторы имеют большой срок службы, очень экономичны и отличаются миниатюрными размерами. Они широко используются в радиоэлектронике: в усилителях, радиоприемниках и телевизорах, в электронных вычислительных машинах (ЭВМ) и других устройствах. Особенно важные преимущества транзисторов для бортовой аппаратуры самолетов и ракет.

## Лекция №21

### Взаимодействие токов. Магнитное поле.

#### План

1. Опыты Эрстеда и Ампера. Постоянные магниты.
2. Силовые линии магнитного поля. Магнитная индукция.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. В чем заключается опыт Эрстеда?
2. Опишите опыты Ампера.
3. Дайте характеристику магнитного поля.
4. Как называется свойство тел сохранять долгое время магнитные свойства?
5. Какие тела называют постоянными магнитами?
6. Какие части магнита называют полюсами?
7. Как взаимодействуют между собой полюса магнитов?
8. Как Ампер объяснял наличие магнитного поля постоянных магнитов?
9. Что называют индукцией магнитного поля?
10. Дайте определение силовых линий магнитного поля.
11. Перечислите основные свойства магнитного поля.
12. Как определить направление линий магнитного поля проводника с током?
13. Чем отличаются вихревые и потенциальные поля?
14. Почему вокруг нашей планеты возникает магнитное поле?

## 1. Опыты Эрстеда и Ампера. Постоянные магниты.

Неподвижные электрические заряды создают вокруг себя электрическое поле. Между неподвижными электрическими зарядами действуют силы, определяемые законом Кулона. Согласно теории близкодействия это взаимодействие осуществляется так: каждый из зарядов создает электрическое поле, которое действует на другой заряд. Однако между электрическими зарядами могут существовать силы и иной природы. Их можно обнаружить с помощью следующего опыта.

Возьмем два гибких проводника, укрепим их вертикально, а затем присоединим нижними концами к полюсам источника тока (рис. 1.1). Притяжения или отталкивания проводников при этом не обнаружится.

Проводники заряжаются от источника тока, но заряды проводников при разности потенциалов между ними в несколько вольт ничтожно малы. Поэтому кулоновские силы никак не проявляются.

Если теперь другие концы проводников замкнуть проволокой так, чтобы в проводниках возникли токи противоположного направления, то проводники начнут отталкиваться друг от друга (рис. 1.2). В случае же токов одного направления проводники притягиваются (рис. 1.3).



Рис. 1.1

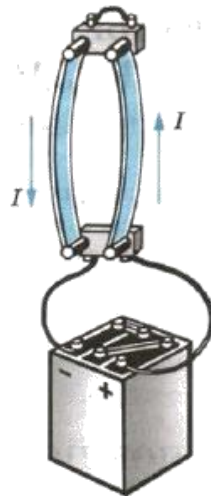


Рис. 1.2



Рис. 1.3

Для объяснения взаимодействия токов учёными была высказана гипотеза о существовании особого физического объекта – магнитного поля.

Взаимодействия между проводниками с током, т. е. взаимодействия между направленно движущимися электрическими зарядами, называют магнитными. Силы, с которыми проводники с током действуют друг на друга, называют магнитными силами.

**Магнитное поле.** Согласно теории близкодействия, подобно тому как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает



электрическое поле, в пространстве, окружающем токи, возникает поле, называемое **магнитным**.

Электрический ток в проводнике создает вокруг себя магнитное поле, которое действует на ток в другом проводнике. А поле, созданное электрическим током второго проводника, действует на первый.

Магнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами.

Перечислим основные свойства магнитного поля, которые установлены экспериментально.

1. Магнитное поле порождается электрическим током (направленно движущимися зарядами).

2. Магнитное поле обнаруживается по действию на электрический ток (на движущиеся заряды).

Подобно электрическому полю, магнитное поле существует реально, независимо от нас, от наших знаний о нем.

Что может служить индикатором магнитного поля? (Электрический ток, магнитная стрелка.)

Простые вещи всегда имеют сложную историю. История магнита насчитывает свыше двух с половиной тысяч лет.

Первые залежи магнетита были обнаружены на территории современной Греции, в области Магнися. Так и получилось название «магнит»: сокращение от «камень из Магнисии». Кстати, сама область называется по племени магнетов, а те, в свою очередь, берут своё имя у мифического героя Магнета, сына бога Зевса и Фии.

Конечно, такое прозаическое объяснение происхождения названия не удовлетворило людские умы. И была придумана легенда о пастухе по имени Магнус. Рассказывали, что он странствовал со своими овцами и вдруг обнаружил, что железный наконечник его посоха и гвозди в его башмаках прилипают к странному чёрному камню. Так был открыт магнит.

Использовать магнит как указатель сторон света догадались в Китае, но никто не проводил теоретических исследований на эту тему.

А вот научные труды европейских средневековых учёных не обошли магнит стороной. В 1260 году Марко Поло привёз магнит из Китая в Европу – и понеслось. Пётр Перегрин в 1296 году издал «Книгу о магните», где было описано такое свойство магнита, как полярность. Пётр установил, что полюса магнита могут притягиваться и отталкиваться.

В 1300 году Иоанн Жира создал первый компас, облегчив жизнь путешественникам и мореплавателям. Впрочем за честь считаться

изобретателям компаса борется несколько учёных. Например, итальянцы свято уверены, что первым изобрёл компас их соотечественник Флавио Джойя.

В 1600 труд «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов» английского врача Уильяма Гильберта расширил границы знаний об этом предмете. Стало известно, что нагревание способно ослабить магнит, а железная арматура может усилить полюса. Так же оказалось, что сама Земля является огромным магнитом.

Настоящий прорыв произошёл в 1820 году. Как всякие великие открытия, и это произошло случайно. Просто преподаватель в университете, Ганс Христиан Эрстед, на лекции решил продемонстрировать студентам, что между электричеством и магнитом нет никакой связи, они не влияют друг на друга. Для этого физик включил электрический ток рядом с магнитной стрелкой. Велик же был его шок, когда стрелка отклонилась! Это позволило открыть связь электричества и магнитных полей. Так наука сделал огромный рывок вперёд.

Узнав об открытии Эрстеда, французский физик Андре Ампер провёл ряд опытов (рис. 2).

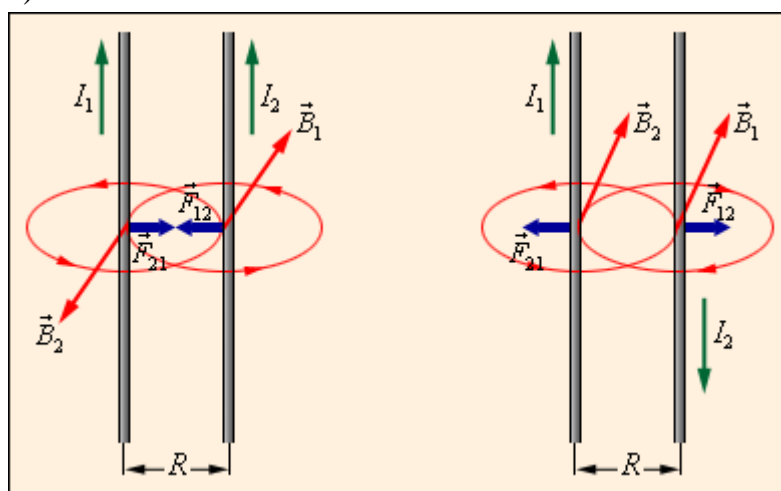


Рисунок 2 – Магнитная взаимодействие параллельных и антипараллельных токов

В 1820 году А. Ампер установил основные законы магнитного взаимодействия токов. Он применил в физике новый термин – «молекулярные токи», протекающие в твердых веществах. Наличием таких токов Ампер объяснил магнитные свойства веществ. Позже было установлено, что роль молекулярных токов в твердых телах выполняют электроны, которые постоянно движутся по круговым орбитам вокруг ядер.

В магнетизме все токи подразделяются на макротоки, обусловленные направленным движением свободных носителей (электронов, дырок, ионов), и микротоки, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах; именно микротоки создают магнитные поля постоянных магнитов.

Металлические предметы имеют свойство намагничиваться и сохранять длительное время такое состояние. Такие магниты называют постоянными искусственными магнитами. Различные частицы искусственного и естественного магнитов притягивают различные предметы по-разному. На концах магнита это привлечение максимальное, а в средней части оно практически отсутствует. Концы магнита называют полюсами, а среднюю часть нейтральной зоной. Если магниту придать форму стрелки и дать ей возможность свободно вращаться вокруг оси, то стрелка всегда занимает одно и то же положение: одним концом она будет направлена в сторону географического северного полюса, противоположным концом – в сторону географического южного полюса. Тот полюс магнита, который повернут на север, называют южным (**S-south**), тот, что обращен на юг – северным (**N-north**).

Опыты доказывают, что северный и южный полюса невозможно отделить, то есть невозможно получить монополярный магнит.

Магнитное поле – составная часть «электромагнитного поля», что является отдельным видом материи. Особенность магнитного поля проявляется в его механическом воздействии только на движущиеся электрические заряды или на тела, которые имеют магнитный момент, независимо от того, движутся они или нет. Источниками магнитного поля являются движущиеся электрические заряды, например, ток в проводниках. Магнитное поле, существует вокруг намагниченных тел, в том числе и магнитов, вызывается движением электрических частиц, из которых состоят тела (электронов, нуклонов).

## 2. Силовые линии магнитного поля. Магнитная индукция.

Величину  $\vec{B}$ , являющуюся силовой характеристикой магнитного поля в данной точке, называют магнитной индукцией.

Магнитная индукция в какой-либо точке поля измеряется силой, действующей на единицу длины проводника, расположенного в этой точке перпендикулярно линиям индукции, при силе тока в нем в 1 А.

Выведем единицу магнитной индукции В:

$$B = 1 \text{ Н}/(1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}) = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м}) = 1 \text{ кг}/(\text{с}^2 \cdot \text{А}) = 1 \text{ Тл.}$$

Единица магнитной индукции – тесла (Тл), ее назвали в честь югославского ученого электротехника Н. Тесла.

Тесла – магнитная индукция такого однородного поля, в котором на проводник с током в 1 А, расположенный перпендикулярно линиям индукции, действует сила в 1 Н на каждый метр длины.

Для наглядной характеристики магнитного поля введено понятие линий магнитной индукции.

Линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым в любой их точке совпадают с вектором  $\vec{B}$  в данной точке поля (рис. 3). Линии вектора магнитной индукции аналогичны линиям вектора напряженности электростатического поля. Для наглядного изображения магнитного поля используют магнитные стрелки или железные опилки.

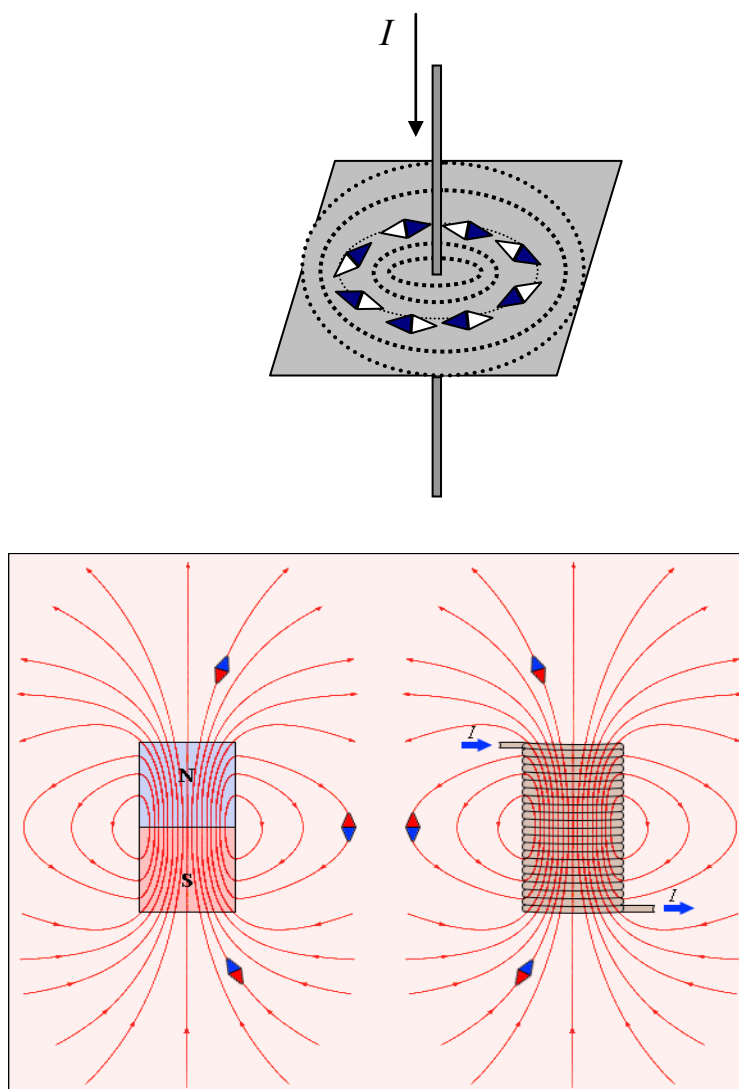


Рисунок 3 – Линии магнитной индукции постоянного магнита и катушки с ТОКОМ

Условились проводить через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно линиям индукции, такое их число, которое пропорционально значению  $B$  в том месте, где находится поверхность. Это означает, что на схемах линии индукции располагают чаще там, где действуют большие магнитные силы.

Свойства силовых линий магнитного поля:

- Силовые линии замкнуты, то есть не имеют ни начала, ни конца, а их направление задается направлением индукции, которое можно определить пробным контуром. Поля, силовые линии которых замкнуты, называют вихревыми. Магнитное поле – вихревое.
- В каждой точке силовой линии вектор  $\vec{B}$  лежит на касательной к силовой линии.
- Силовые линии в пространстве не пересекаются.
- Выходят из северного полюса и заходят в южный.
- Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводник с током. Для определения направления линий магнитной индукции можно воспользоваться правилом буравчика: если буравчик вращать так, чтобы его поступательное движение совпадало с направлением тока в проводнике, тогда вращательное движение рукоятки покажет направление линий магнитной индукции (рис. 4).

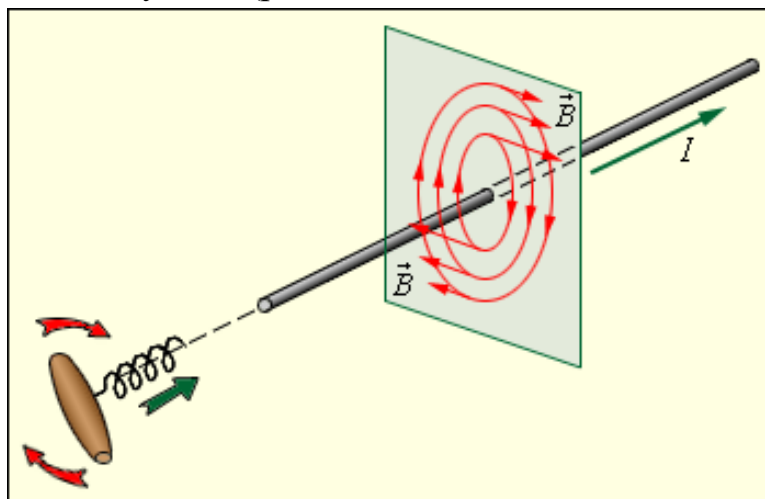


Рисунок 4 – Правило правого винта

Удобно также и правило охвата правой рукой: если большой палец правой руки направить в направлении тока, а остальными пальцами обхватить проводник с током, то они укажут направление линий магнитной индукции (и вектора  $\vec{B}$ ).

Для магнитного поля прямолинейного проводника с током из приведенных ранее опытов следует, что линии магнитной индукции –

концентрические окружности, лежащие в плоскости, перпендикулярной этому проводнику с током (рис. 4). Центр окружностей находится на оси проводника. Стрелки на линиях указывают, в какую сторону направлен вектор магнитной индукции, касательный к данной линии.

Магнитное поле внутри соленоида характеризуется не только тем, что его линии параллельны. Оказывается, векторы индукции во всех точках этого поля одинаковые по модулю и направлению. Такое поле называют однородным. Однородное магнитное поле образуется не только в соленоиде. Магнитное поле между разноименными полюсами магнитов, при больших размерах полюсов по сравнению с расстоянием между ними, тоже однородное (рис. 5).

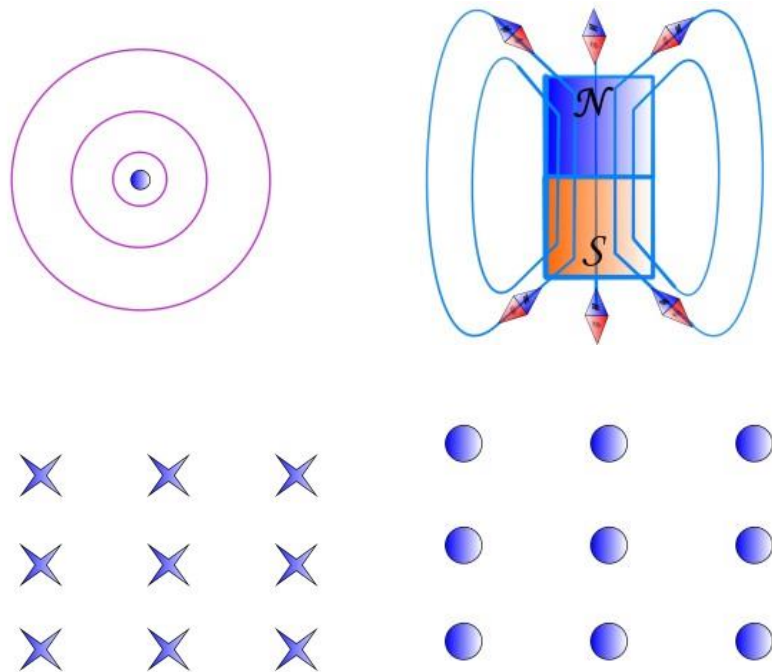


Рисунок 5 – Однородное магнитное поле

## Лекция №22

### Сила Ампера. Сила Лоренца.

#### План

1. Действие магнитного поля на прямолинейный проводник с током. Сила Ампера.
2. Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле. Магнитный поток.
3. Сила Лоренца.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Сформулируйте закон Ампера.
2. Как определить направление силы Ампера?
3. Чему равна сила Лоренца?
4. Как определить направление силы Лоренца?
5. Чему равна сила Лоренца, действующая на движущийся заряд вдоль силовых линий магнитного поля?
6. Какое направление имеет сила Лоренца относительно направления скорости и направления индукции магнитного поля?
7. Что называется магнитным потоком? Единица измерения.
8. Чему равна работа по перемещению проводника с током в магнитном поле?

## 1. Действие магнитного поля на прямолинейный проводник с током. Сила Ампера.

Мы выяснили, что магнитное поле, созданное проводником с током, действует на магнитную стрелку (магнит). Оказывается, что в свою очередь, магнитное поле действует на проводник, по которому проходит электрический ток.

Закрепим проводник  $AB$  на штативе с помощью гибких проводов (рис. 1). Расположим проводник  $AB$  между полюсами постоянного подковообразного магнита и включим электрический ток. Проводник начнет двигаться. Если выключить ток, проводник вернется в исходное положение.

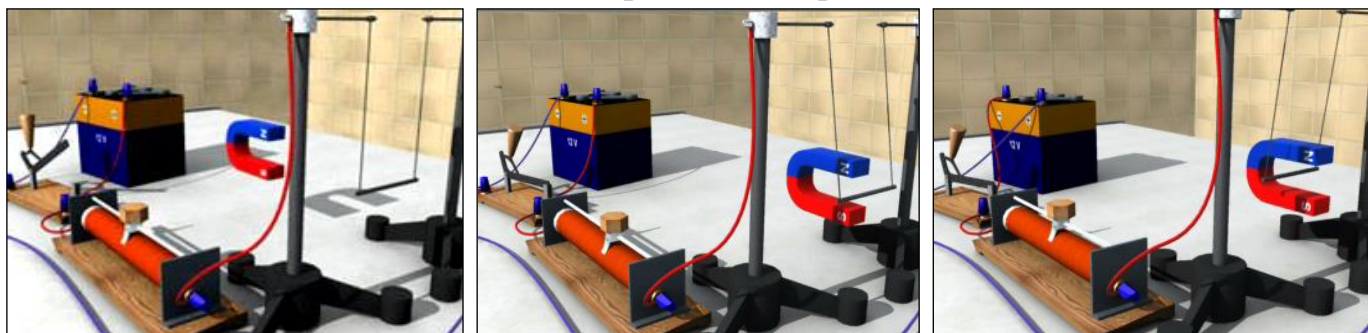


Рисунок 1 – Действие магнитного поля на проводник с током

Проводник движется в результате взаимодействия магнитного поля, создаваемого током, и поля постоянного магнита. Таким образом, на проводник  $AB$  со стороны магнитного поля действует механическая сила, которую называют силой Ампера. Сила Ампера является суммарным результатом действия магнитного поля на отдельные движущиеся заряженные частицы, которые создают ток в проводнике. Она возникает в результате взаимодействия электронов, которые отклоняются под влиянием поля постоянного магнита, с ионами кристаллической решетки металла. Если поменять направление тока в проводнике на противоположный, проводник  $AB$  в магнитном поле подковообразного магнита будет двигаться в противоположную сторону. Направление движения проводника изменится на противоположное и тогда, когда поменять направление магнитного поля (положение полюсов магнита).

Направление силы  $F_A$ , действующего на прямолинейный проводник с током в магнитном поле, определяется правилом левой руки:

если расположить левую руку вдоль проводника так, чтобы четыре пальца указывали направление тока в нем, а линии магнитной индукции входили в ладонь, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец будет указывать направление силы, действующей на проводник с током (силы Ампера) (рис. 2).



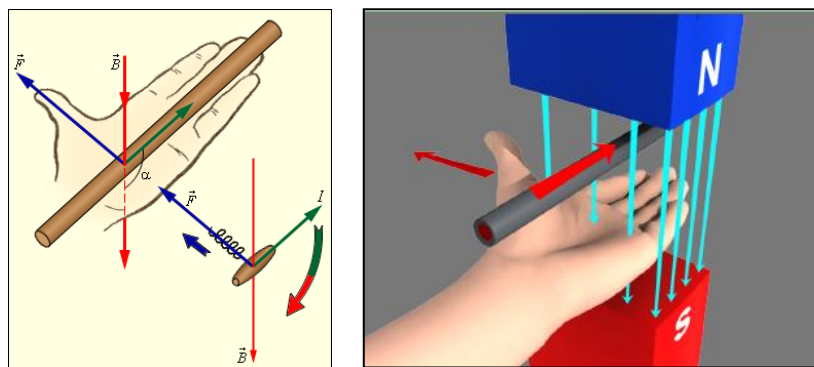


Рисунок 2 – Правило левой руки для определения направления действия силы Ампера

Ампер показал, что сила  $F_A$  прямо пропорциональна длине проводника  $l$  и силе тока в нем  $I$ . Она зависит еще от угла  $\alpha$  между направлением тока и направлением линий индукции в том месте, где находится проводник. Оказалось, что сила  $F_A$  пропорциональна  $\sin \alpha$  и имеет максимальное значение  $F_{A\max}$ , когда проводник перпендикулярен силовым линиям магнитного поля. Таким образом, сила Ампера выражается формулами:

$$F_A = BIl \sin \alpha \quad F_{A\max} = BIl$$

Это выражение называется законом Ампера.

Перемещение проводника с током под действием силы Ампера замечательно тем, что при этом происходит преобразование электрической энергии в механическую. Это явление лежит в основе принципа действия электродвигателей.

## 2. Работа при перемещении проводника с током в магнитном поле. Магнитный поток.

Так как на проводник с током в магнитном поле действуют силы, то при перемещении этого проводника будет осуществляться работа. Выясним, чем определяется эта работа.

Присоединим два медных стержни к источнику электрической энергии и замкнем их подвижным проводником  $l$ . Тогда в цепи пойдет ток  $I$ . Создадим в окружающем пространстве перпендикулярно к плоскости контура однородное магнитное поле с индукцией  $B$ . На проводник  $l$  будет действовать сила Ампера, и он начнет перемещаться вправо. Подсчитаем работу при перемещении проводника  $l$  на расстояние  $b$ .

Поскольку в рассматриваемом случае направления силы и перемещения совпадают, то имеем:

$$A = F_A b$$

Если площадь, охваченную замкнутой цепью, при исходном положении проводника  $l$  обозначить через  $S_1$ , а при его конечном положении – через  $S_2$ , то  $\Delta S = S_2 - S_1$  является изменением площади при перемещении проводника  $l$ .

$$A = BI\Delta S$$

Обозначив произведение  $BS$  через  $\Phi$  получим:

$$B\Delta S = B(S_2 - S_1) = \Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi$$

Итак, работа при перемещении проводника с током в магнитном поле выражается формулой:  $A = I\Delta\Phi$ .

Выясним физический смысл величины  $\Phi$ . Поскольку значение  $B$  численно равно количеству линий индукции, проходящих через единицу площади  $S_{\perp}$ , перпендикулярной к ним, то  $\Phi = BS_{\perp}$  является общим числом линий индукции магнитного поля, пронизывающих площадь  $S_{\perp}$ , если индукция  $B$  во всех точках поверхности  $S_{\perp}$ , одинакова.

Величину  $\Phi$  принято называть магнитным потоком или потоком вектора  $B$  через поверхность  $S_{\perp}$ .

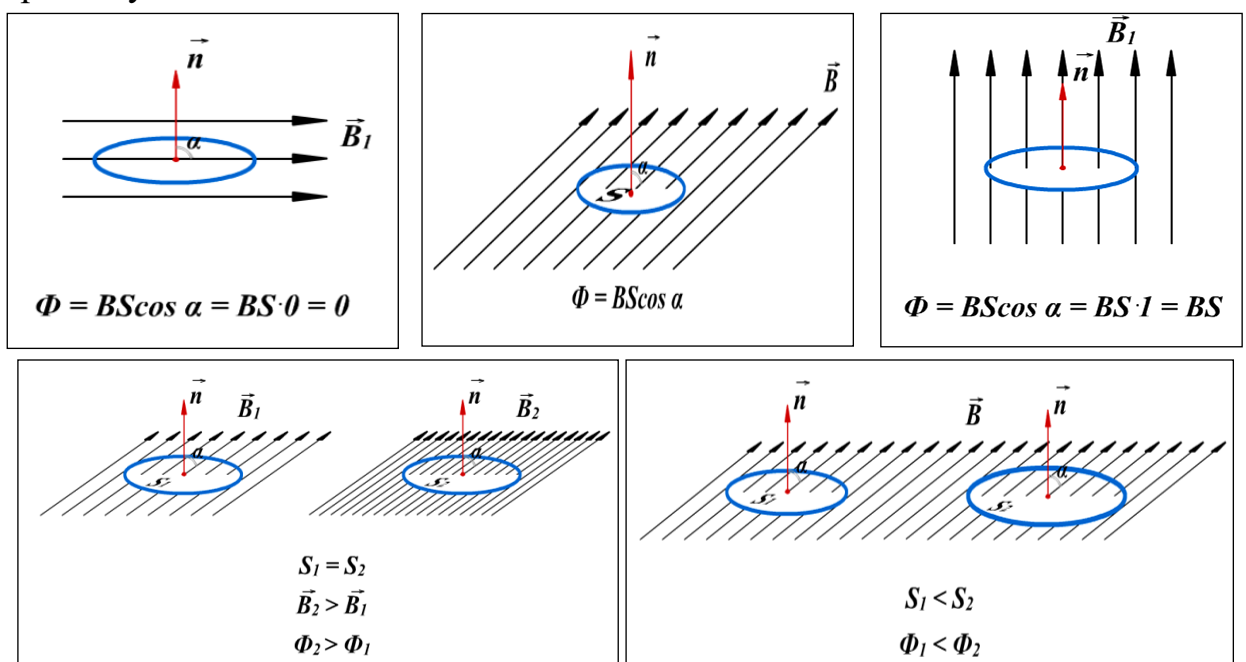
Следовательно, при однородном поле магнитный поток измеряется произведением  $B$  на  $S_{\perp}$ :

$$\Phi = BS_{\perp}$$

Магнитный поток  $\Phi$  является скалярной величиной. Выведем единицу магнитного потока в СИ:

$$\Phi = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{с}^2 \cdot \text{А}) = 1 \text{ Вб}$$

В СИ за единицу  $\Phi$  принят вебер (Вб). Вебер – это магнитный поток, пронизывающий перпендикулярную линиям индукции поверхность в  $1 \text{ м}^2$  при индукции магнитного поля на ней в  $1 \text{ Тл}$ .



### 3. Сила Лоренца.

Сила Ампера является результатом действия всех сил на отдельные движущиеся заряды. Найдем силу, которая действует на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле.

$$F = \frac{F_A}{N} = \frac{B l \sin \alpha}{N} = \frac{B q n v S l \sin \alpha}{N} = B q v \sin \alpha$$

$$F_{\vec{E}} = B q v \sin \alpha$$

Сила, действующая на заряженную частицу, которая движется в магнитном поле, прямо пропорциональна заряду частицы, скорости ее перемещения и индукции магнитного поля. Эта сила называется силой Лоренца в честь голландского физика Г. Лоренца.

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки:

если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции, перпендикулярная вектору скорости, входила в ладонь, а четыре пальца показывали направление движения положительно заряженной частицы, то большой отогнутый на  $90^\circ$  палец покажет направление действия силы Лоренца (рис. 3).

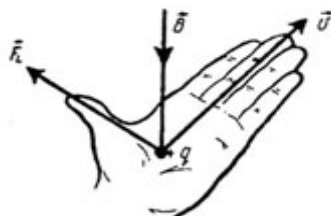
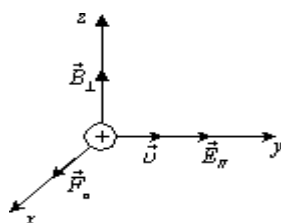


Рисунок 3 – Правило левой руки для определения направления действия силы Лоренца

Так как сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости, то она не осуществляет работы, то есть не может изменить кинетическую энергию частицы. Согласно теореме о кинетической энергии это означает, что она не изменяет кинетической энергии частицы и, следовательно, модуля ее скорости. Под действием силы Лоренца меняется лишь направление скорости частицы, движущейся в магнитном поле.

Рассмотрим движение заряженной частицы во внешнем магнитном поле.

а) пусть заряженная частица влетает перпендикулярно к направлению силовых линий внешнего магнитного поля.



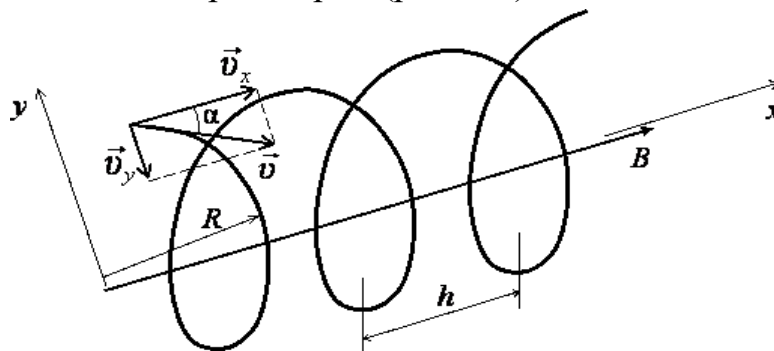
Сила Лоренца в этом случае выполняет роль центростремительной силы, под действием которой заряженная частица будет двигаться по круговой траектории. Уравнение движения заряженной частицы запишется в виде  $\frac{mv^2}{R} = Bqv$ , где  $m$  – масса частицы.

Определим радиус траектории вращения, а также период обращения:

$$R = \frac{mv}{Bq} \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

б) в случае движения заряженной частицы параллельно направлению силовых линий внешнего магнитного поля сила Лоренца будет равна нулю. Внешнее магнитное поле не будет действовать на магнитное поле движущейся заряженной частицы, если она движется параллельно силовым линиям внешнего магнитного поля.

в) если заряженная частица попадает в внешнее магнитное поле под некоторым углом к направлению силовых линий поля, то она будет двигаться вдоль винтовой траектории (рис. 1.4).



Когда электрический заряд одновременно движется в электрическом и магнитном полях, результирующая сила, действующая на частицу, равна  $\vec{F}_L = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$ , и называется полной силой Лоренца.

Полная сила Лоренца имеет две составляющие: силу, действующую со стороны электрического поля, и силу, действующую со стороны магнитного поля. Между этими силами принципиальная разница. Под действием сил электрического поля частица приобретает ускорение, что приводит к изменению ее скорости, однородное магнитное поле меняет только траекторию движения частицы.

## Лекция №23

Открытие электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции.

План

1. Опыты Фарадея. Правило Ленца.
2. Закон электромагнитной индукции.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Опишите опыты Фарадея.
2. Назовите способы получения индукционного тока.
3. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
4. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
5. Сформулируйте закон Ленца.

## 1. Опыты Фарадея. Правило Ленца.

На предыдущих занятиях мы с вами рассмотрели тему «Магнитное поле» и выяснили, что источником магнитного поля является электрический ток. Если с помощью электрического тока можно получить магнитное поле, то возникает вопрос: «Можно ли с помощью магнитного поля получить электрический ток?»

Ученые всего мира пытались дать ответ на этот вопрос. Одним из таких ученых был английский ученый, химик, физик Майкл Фарадей (1791-1867 гг.). «Превратить магнетизм в электричество» – так записал в своем дневнике в 1822 году Майкл Фарадей. Почти 10 лет упорного труда понадобилось Фарадею для решения этой задачи.

Сегодня на занятии мы попробуем дать ответ на вопрос «Можно ли с помощью магнитного поля получить электрический ток»? Мы откроем новое явление, которое относится к числу ярких научных достижений первой половины 19 в., которое вызвало появление и бурное развитие электротехники и радиотехники. Открытие этого явления сыграло решающую роль в техническом прогрессе. Оно является физической основой современной электротехники, которая обеспечивает промышленность, транспорт, связь, быт и культуру людей электрической энергией. И называется это явление – явление электромагнитной индукции. Следует заметить, что оно имеет большое значение в объяснении принципа действия многих технических устройств: генераторов и двигателей, трансформаторов, электродинамических микрофонов, а также катушки зажигания автомобиля.

В простейшем случае для попытки получить с помощью магнитного поля электрический ток нам понадобится магнит, вокруг которого существует магнитное поле, проводник (катушка), в которой, возможно, будет протекать электрический ток, гальванометр, прибор для регистрации наличия в катушке электрического тока, и соединительные проводники.

В 1831 году английский физик Майкл Фарадей проводил опыты по получению электрического тока с помощью магнитного поля (рис. 1).

Стрелка гальванометра отклоняется, значит, в цепи появляется электрический ток. Мы вспомнили, что одним из условий существования электрического тока, является источник электрической энергии. У нас это условие не выполняется. Давайте попробуем установить причину появления тока в катушке, опираясь на ваши знания.

Возьмем замкнутый контур. Наглядно магнитный поток – это число линий магнитной индукции, пронизывающей площадь, ограниченную контуром. При неподвижном магните площадь, ограниченную контуром,

пронизывает определенное количество линий магнитной индукции. При введении магнита в контур количество линий магнитной индукции, пронизывающих площадь, ограниченную контуром, изменяется, а именно увеличивается. Именно в этот момент, пока меняется магнитный поток через площадь, ограниченную контуром, в замкнутом контуре возникает ток (рис. 2).

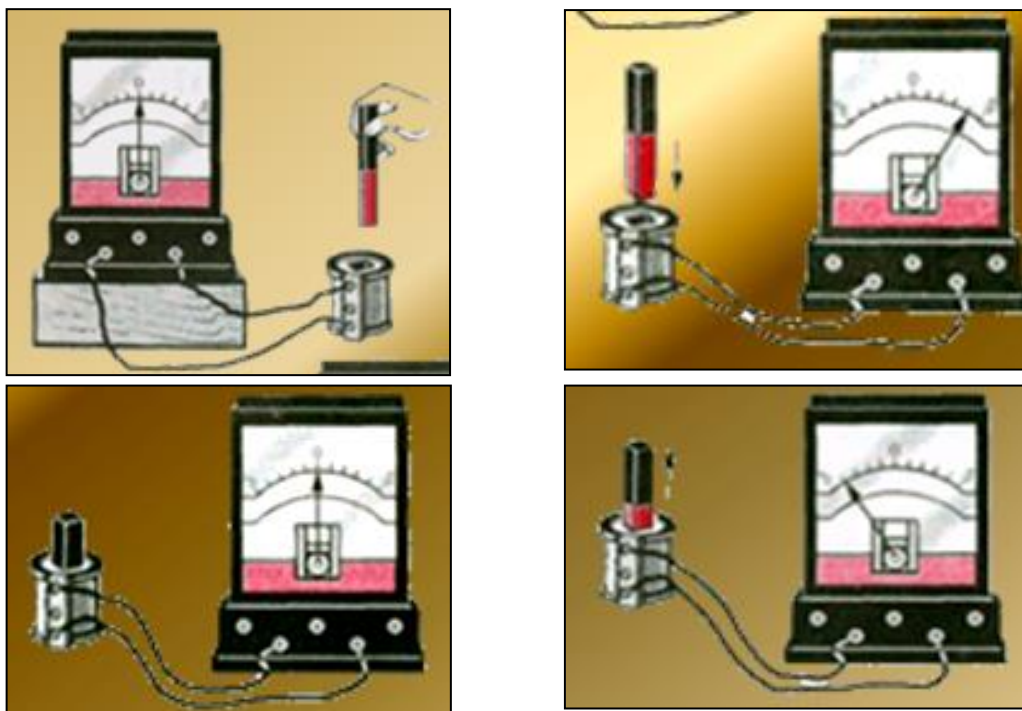


Рисунок 1 – Получение индукционного тока при движении магнита относительно катушки

При выводе магнита из контура количество линий магнитной индукции, то есть магнитный поток, пронизывающий площадь, ограниченную контуром, также меняется, только теперь уменьшается. Однако, опять же при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную контуром, в контуре возникает ток противоположного направления.

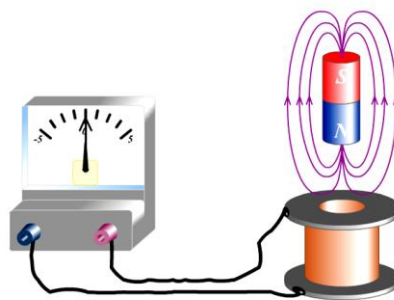


Рисунок 2 – Изменение магнитного потока через площадь, ограниченную контуром.

Вывод: Единственной причиной появления тока в замкнутом контуре при движении магнита является изменение магнитного потока через площадь, ограниченную контуром.

При изменении магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную контуром, в замкнутом контуре возникает ток. Этот ток называют индукционным током.

Способы получения индукционного тока:

1. Движение магнита относительно катушки.
2. Движение катушки относительно магнита.
3. Движение одной катушки относительно другой (с током).
4. Замыкание и размыкание электрической цепи.
5. Изменение величины тока в одной катушке.

Мы с вами выяснили, что при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную контуром в замкнутом контуре возникает индукционный ток, который меняет свое направление в зависимости от того увеличивается или уменьшается магнитный поток, а также от того, куда направлены линии индукции этого потока.

В 1833 году профессор Петербургского университета Э. Х. Ленц (1804-1865 гг.) исследовал связь между направлением индукционного тока и характером изменения магнитного потока, его вызвал.

Эмилий Ленц сформулировал правило, позволяющее определить направление индукционного тока в контуре. Давайте рассмотрим суть этого правила.

Ленцем был сконструирован прибор, представляющий собой два алюминиевых кольца, сплошное и с разрезом, закрепленные на алюминиевой перекладине. Кольца могут вращаться вокруг оси, как коромысло.



Рисунок 3 – Опыт с алюминиевыми кольцами



При внесении магнита внутрь разрезанного кольца никакого эффекта не наблюдается. При внесении магнита в сплошное кольцо оно начинает отталкиваться от магнита, поворачивая соответственно коромысло. При выводе магнита из кольца оно тянется за магнитом.

Ленц объяснил опыт тем, что магнитное поле индукционного тока пытается компенсировать изменение внешнего магнитного потока.

Почему кольцо с сечением не взаимодействует с магнитом?

Так как кольцо с разрезом представляет собой контур незамкнутый, индукционный ток в нем не возникает.

Согласно правилу Ленца, индукционный ток, возникающий в замкнутом контуре противодействует тому изменению магнитного потока, которым вызван этот ток.

Алгоритм определения направления индукционного тока:

1. Определить направление линий индукции внешнего поля  $B$  (выходят из  $N$  и входят в  $S$ ).
2. Определить, увеличивается или уменьшается магнитный поток через контур (если магнит входит в кольцо, то  $\Delta\Phi > 0$ , если выходят, то  $\Delta\Phi < 0$ ).
3. Определить направление линий индукции магнитного поля  $B'$ , создаваемого индукционным током (если  $\Delta\Phi > 0$ , то линии  $B$  и  $B'$  направлены противоположно: если  $\Delta\Phi < 0$ , то линии  $B$  и  $B'$  направлены в одну сторону).
4. Пользуясь правилом буравчика (правой руки), определить направление индукционного тока.

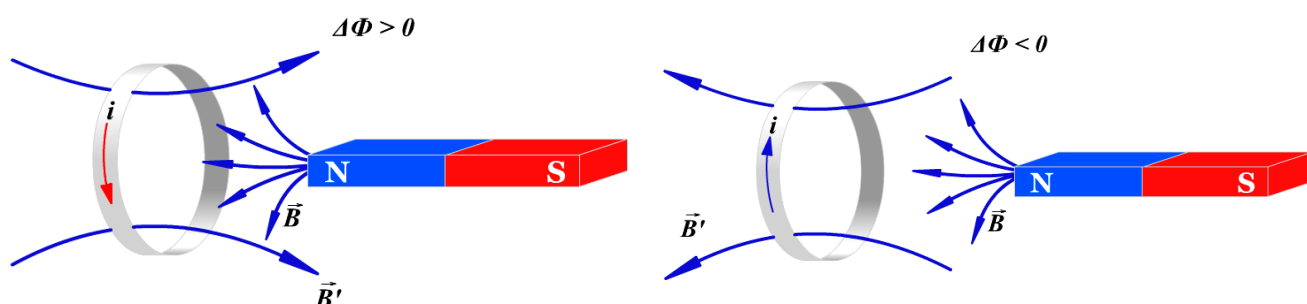


Рисунок 4 – Определение направления индукционного тока по правилу Ленца

Индукционный ток меняет свое направление в зависимости от того увеличивается или уменьшается магнитный поток, а также от того, куда направленные линии индукции этого потока.

## 2. Закон электромагнитной индукции.

Явление возникновения ЭДС индукции при изменении магнитного потока через площадь ограниченную контуром называется явлением электромагнитной индукции.

Для определения направления индукционного тока используют правило правой руки: если правую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а большой отогнутый на  $90^\circ$  палец показывал направление движения проводника, то четыре вытянутых пальца покажут направление индукционного тока.

Опыт на установление закона электромагнитной индукции.

Оборудование: катушка; гальванометр; соединительные проводники; дугообразный магнит.

1. Катушку присоединить к гальванометру.
2. Двигать магнит относительно катушки с разной скоростью.
3. Наблюдать за показаниями гальванометра.

Вывод: Чем быстрее движется магнит, то есть чем с большей скоростью меняется магнитный поток, пронизывающий площадь, ограниченную контуром, тем больше величина индукционного тока, тем больше ЭДС индукции, возникающая.

Экспериментальное исследование зависимости ЭДС индукции от изменения магнитного потока привело к установлению закона электромагнитной индукции: ЭДС индукции, возникающая в контуре, прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную контуром.

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Знак «-» в формуле возникает с учетом правила Ленца.

При изменении магнитного потока в катушке, состоящей из  $N$  витков, общая ЭДС в  $N$  раз больше ЭДС одного витка.

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta\psi}{\Delta t}$$

Величину  $\psi$ , характеризующий связь («сцепление») магнитного потока с замкнутой цепью, через который он проходит, называют потокосцеплением.

## Лекция №24,25

### Вихревое электрическое поле. Самоиндукция. Индуктивность.

#### План

1. ЭДС индукции в движущихся проводниках.
2. Вихревое электрическое поле.
3. Самоиндукция. Индуктивность.
4. Энергия магнитного поля.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Сформулируйте правило правой руки для определения направления индукционного тока.
2. Что является доказательством вихревого характера электрического поля, возбужденного переменным магнитным полем?
3. В чем заключается явление самоиндукции?
4. Какая величина называется индуктивностью контура, от чего она зависит?
5. В каких единицах измеряется индуктивность?
6. Назовите выражение для ЭДС самоиндукции.
7. Может ли возникнуть ток самоиндукции в прямом проводнике с током? Если нет, то объясните почему; если да, то при каком условии.
8. Чему равна энергия магнитного поля?

## 1. ЭДС индукции в движущихся проводниках.

Мы рассмотрели с вами общее правило определения направления индукционного тока. Оказывается, что вместе с этим для частного случая возникновения индукционного тока можно использовать другое правило. Сейчас мы с вами выясним, что это за случай и какое это правило. Переходим к рассмотрению второго вопроса нашего плана «Закон электромагнитной индукции».

Пусть проводник без тока длиной  $l$  движется в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  со скоростью  $\vec{v}$  (рис. 1).

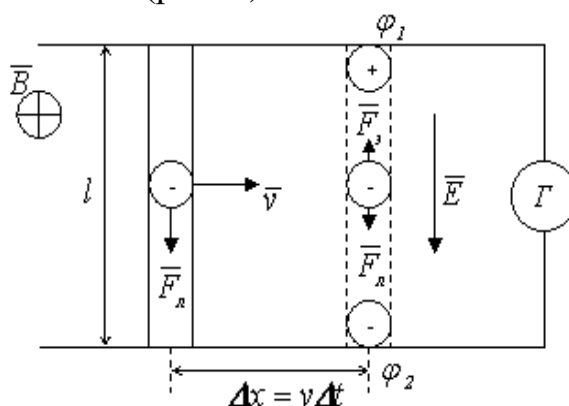


Рисунок 1 – Возникновение ЭДС индукции при движении проводника в магнитном поле

При движении проводника его свободные электроны также будут двигаться вправо. На каждый свободный электрон со стороны магнитного поля будет действовать сила Лоренца  $\vec{F}_L$ . Под ее действием электроны сосредотачиваются в нижней части проводника, соответственно в верхней части возникает избыток положительного заряда, возникает разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$ . Образуется электрическое поле, которое противодействует дальнейшему движению электронов. Это перемещение прекращается, когда  $F_e = F_L$ , то есть  $Bqv \sin \alpha = qE$ .

$$\varepsilon = \frac{A_{em}}{q} = \frac{Bqv l \sin \alpha}{q} = Bvl \sin \alpha$$

$$\varepsilon_i = Bvl \sin \alpha$$

## 2. Вихревое электрическое поле.

Появление ЭДС индукции в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле, объясняется действием силы Лоренца на движущиеся заряды. Как объяснить возникновение тока (ЭДС индукции) в катушке, которая неподвижна относительно вторичной катушки.

Объяснение явления электромагнитной индукции впервые дал Максвелл. Согласно теории Максвелла, в пространстве, где меняется магнитное поле, обязательно возникает электрическое поле с замкнутыми линиями напряженности (вихревое электрическое поле). Направление его силовых линий совпадает с направлением индукционного тока.

Главное в явлении электромагнитной индукции – это процесс порождения магнитным полем электрического.

При увеличении магнитной индукции вектор  $\vec{A}$  образует левый винт, при уменьшении напряженности электрического поля вектор  $\vec{A}$  образует правый винт. В случае возбуждения электрическим полем магнитного – правила применяются наоборот.



Утверждение, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, не имеет смысла, если не указать, по отношению к какой системе отсчета эти поля рассматриваются.

Электрические и магнитные поля – проявление единого электромагнитного поля.

### 3. Индуктивность. Самоиндукция.

Современник Фарадея американский физик Джозеф Генри независимо от своего английского коллеги открыл некоторые из электромагнитных эффектов. В 1829 году Генри обнаружил, что ЭДС индукции возникает в неподвижном контуре и в отсутствии изменения внешнего магнитного поля. Оказалось, что изменяющийся электрический ток, проходящий в контуре, создает изменяющийся магнитный поток. Это явление было названо явлением самоиндукции.

Явление самоиндукции – это возникновение в проводящем контуре ЭДС, создаваемой вследствие изменения силы тока в самом контуре.

Магнитный поток создаваемый контуром, пропорционален силе тока, протекающего в контуре  $\hat{O} = L I$ .

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется индуктивностью контура. Индуктивность характеризует способность контура образовывать магнитный поток. Индуктивность контура зависит от формы, размеров контура и магнитных свойств среды, окружающей контур.

Единица измерения индуктивности 1 Генри (Гн) – это индуктивность контура, при силе тока в 1 Ампер образует магнитный поток в 1 Вебер (Вб).

$\Phi$  – собственный магнитный поток

$L$  – индуктивность контура

$I$  – сила тока в контуре

$$\Phi = LI$$

$$[\Phi] = 1\text{Вб} \quad [L] = 1\text{Гн (Генри)} \quad [I] = 1\text{А}$$

Индуктивность контура зависит от его формы и размеров, от магнитных свойств окружающей среды и не зависит от силы тока в контуре.

ЭДС самоиндукции определяется по формуле:

$$\varepsilon_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$\varepsilon_{si}$  – ЭДС самоиндукции

$\Delta\Phi$  – изменение собственного магнитного потока

$L$  – индуктивность контура

$\Delta I$  – изменение силы тока в контуре

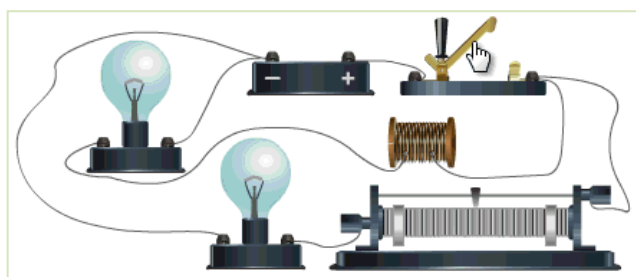
$\Delta t$  – промежуток времени

$$[\varepsilon_{si}] = 1\text{В} \quad [\Phi] = 1\text{Вб} \quad [L] = 1\text{Гн} \quad [I] = 1\text{А} \quad [t] = 1\text{с}$$

ЭДС самоиндукции при отсутствии ферромагнетиков определяется по формуле:  $\varepsilon_{si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ .

Направление тока самоиндукции, как и индукционного тока, определяется по правилу Ленца. При увеличении тока в контуре ток самоиндукции направлен ему навстречу, а при уменьшении – в ту же сторону.

Явление самоиндукции подобно явлению инерции. Так же, как в механике нельзя мгновенно остановить движущееся тело, так и ток не может мгновенно приобрести определенное значение за счет явления самоиндукции. Если в цепь, состоящую из двух параллельно подключенных к источнику тока одинаковых ламп, последовательно со второй лампой включить катушку, то при замыкании цепи первая лампа загорается практически сразу, а вторая с заметным запаздыванием.



При размыкании цепи сила тока быстро уменьшается, и возникающая ЭДС самоиндукции препятствует уменьшению магнитного потока. При этом индуцированный ток направлен так же, как и исходный. ЭДС самоиндукции может во многом раз превысить внешнюю ЭДС. Поэтому электрические лампочки очень часто перегорают при выключении света.

Конечно, ток самоиндукции возникает не только в катушках, но и в любых других проводниках, если сила тока изменяется. Но, как уже отмечалось, в катушках с относительно небольшим числом витков, не имеющих сердечника, и тем более в прямых проводниках (т. е. в элементах цепи, обладающих малой индуктивностью) ток самоиндукции обычно невелик и не оказывает существенного влияния на процессы в электрической цепи.

#### Природа вихревых токов

Вихревые токи или токи Фуко – это замкнутые токи, которые индуцируются вихревым электрическим полем в массивных проводниках. Токи Фуко являются одним из проявлений электромагнитной индукции. Вследствие замкнутости силовых линий вихревого электрического поля линии тока также замыкаются внутри проводника, поэтому энергия вихревого тока полностью идет на нагрев проводника. Сопротивление массивного проводника мало, поэтому вихревые токи могут достигать значительной величины. Это явление используется в высокочастотных индукционных металлургических печах для плавления металлов и производства сплавов из них, если процесс требует высокой химической чистоты. Известны также бытовые приборы – сверхвысокочастотные (СВЧ) печи, где также используется тепловое действие вихревого тока.

В других случаях вихревой ток является нежелательным явлением, так как он вызывает перегрев электромагнитных приборов и потерю электрической энергии. Вихревые токи можно существенно уменьшить, конструируя магнитопроводы устройств (трансформаторы, электромагниты переменного тока, электродвигатели, электромашинные генераторы и др.) из тонких ферромагнитных металлических пластин, электрически изолированных друг от друга.

#### 4. Энергия магнитного поля.

Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии. Если включить электрическую лампу параллельно катушке с большой индуктивностью в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании ключа наблюдается кратковременная вспышка лампы (рис. 1). Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

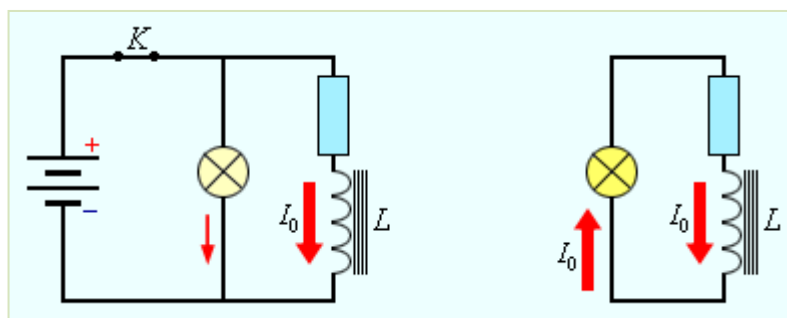


Рисунок 1 – Магнитная энергия катушки. При размыкании ключа  $K$  лампа ярко вспыхивает

Контур с индуктивностью, в котором существует ток, обладает энергией  $W_m = \frac{1}{2}LI^2$ , которую называют магнитной энергией тока.



## Тема 5. Колебания и волны

### Лекция №26

Свободные и вынужденные колебания. Гармонические колебания.

План

1. Механические колебания. Условия возникновения колебаний.
2. Классификация колебаний. Характеристики колебаний.
3. Гармонические колебания.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какое движение называется колебательным?
2. Как вы понимаете термин «Механические колебания»?
3. Какие условия необходимы для возникновения и поддержания колебаний?
4. Как классифицируют колебания в зависимости от характера действующих сил?
5. Что называют периодом, частотой и амплитудой колебаний?
6. Назовите формулу, связывающую период и частоту колебаний.
7. Как классифицируют колебания в зависимости от сохранения амплитуды?
8. Что называют смещением и фазой колебаний?
9. Какие колебания называются гармоническими?
10. Назовите уравнение гармонических колебаний.

## 1. Механические колебания. Условия возникновения колебаний.

В природе и технике очень часто встречаются процессы, которые периодически повторяются. В основе таких процессов лежат колебания и волны, создаваемые этими колебаниями. Природа колебаний разнообразна, но для всех них можно ввести величины, которые можно одинаково применять ко всем колебаниям. Проще выяснить физический смысл этих величин на примере механических колебаний, которые являются наиболее наглядными.

Колебания поршня в двигателе автомобиля, поплавок на поверхности воды, маятника часов, веток деревьев на ветру – примеры механических колебаний.

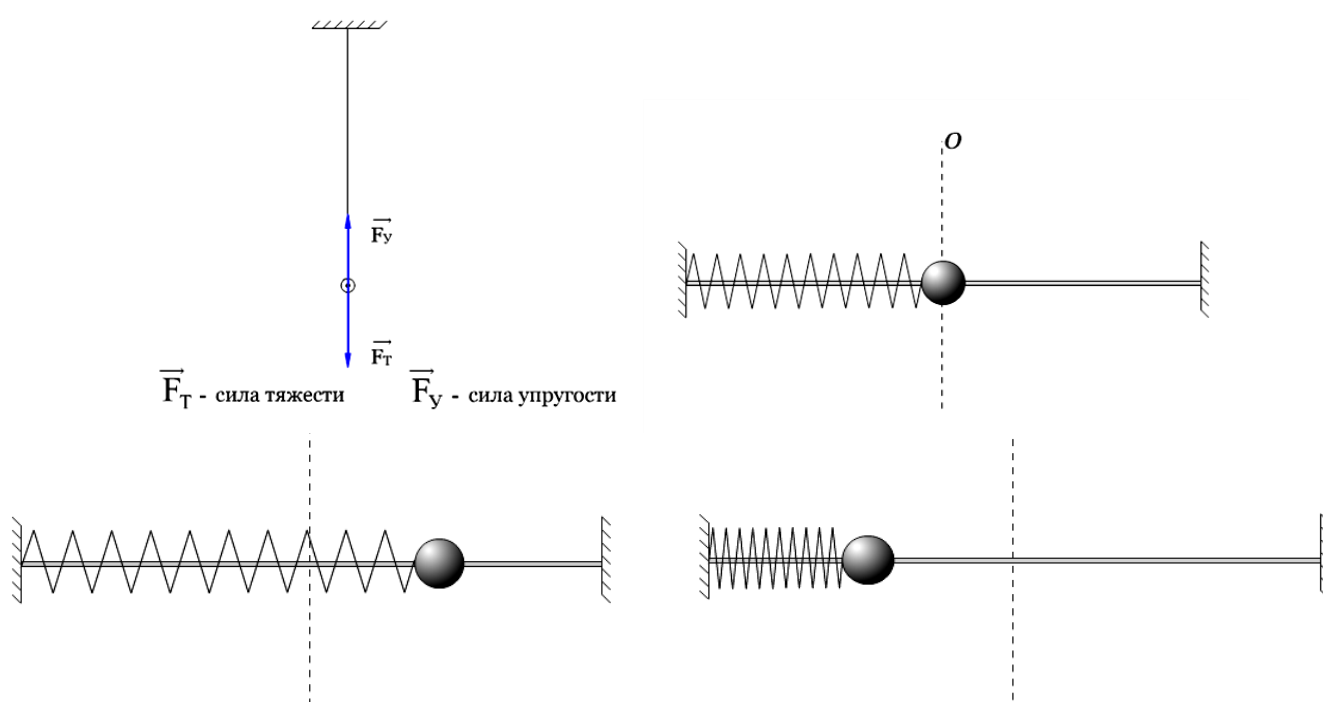


Рисунок 3. Механические колебания

Колебательное движение, или просто колебание, – это движение или процесс, обладающий свойством повторяемости во времени.

Важной характеристикой колебательного движения является его повторяемость через равные промежутки времени, то есть его периодичность.

*Механическим колебанием* называется периодическое движение материальной точки по некоторой траектории, которую эта точка проходит поочередно в противоположных направлениях.

Движения тел, повторяющиеся точно или приблизительно через одинаковые промежутки времени называются *механическими колебаниями*.

Один законченный цикл колебательного движения, после которого оно повторяется в том же порядке, называется *полным колебанием*.

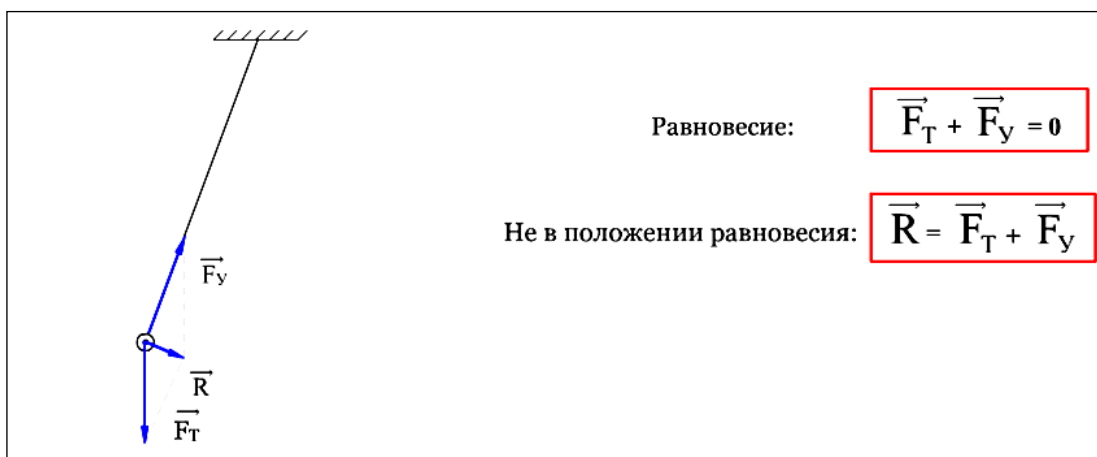


Рисунок 4. Возникновение механических колебаний

Условия необходимые для возникновения колебаний:

1. Наличие у материальной точки дополнительной энергии.
2. Действие возвращающей силы.
3. Дополнительная энергия, которую получает материальная точка при смещении из положения устойчивого равновесия, не должна полностью расходоваться на преодоление сил трения при возвращении в это положение.

## 2. Классификация колебаний. Характеристики колебаний.

Силы, действующие между телами системы, называют *внутренними силами*. *Внешними силами* называют силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в систему.

Механические колебания (в зависимости от характера сил):

- собственные (только под действием возвращающей силы),
- свободные (под действием возвращающей силы и силы трения),
- вынужденные (под действием внешней силы, которая периодически меняется).

Существует ряд физических величин, характеризующих именно периодические колебания: амплитуда, период, частота, циклическая частота, фаза колебаний.

*Смещение*  $x$  – это физическая величина, равная расстоянию, на которую тело в ходе колебания отклонилось от положения равновесия в данный момент времени.

*Амплитуда*  $A$  – максимальное (по модулю) смещение тела от положения равновесия.

Единица смещения и единица амплитуды колебаний в СИ – метр (м).

Амплитуда свободных колебаний определяется начальными условиями, то есть той энергией, которая была передана телу в момент, когда оно было выведено из положения равновесия.

*Период*  $T$  – время одного полного колебания:

$$T = \frac{t}{N}$$

где  $t$  – время колебаний,  $N$  – число полных колебаний за этот промежуток времени.

Единица периода колебаний в СИ – секунда (с).

*Частота*  $\nu$  – число полных колебаний в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{t}$$

Единица частоты колебаний в СИ – герц (Гц). 1 Гц соответствует частоте колебаний, в ходе которых тело за 1с осуществляет одно полное колебание.

Частота и период колебаний связаны соотношением:

$$\nu = \frac{1}{T}$$

*Циклическая, или круговая, частота колебаний*  $\omega$  – это физическая величина, равная количеству полных колебаний, совершаемых телом за  $2\pi$  секунд:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

Единица циклической частоты колебаний в СИ – радиан в секунду (рад/с или  $\text{с}^{-1}$ ).

Механические колебания (в зависимости от сохранения или уменьшения амплитуды):

- затухающие;
- незатухающие.

### 3. Гармонические колебания.

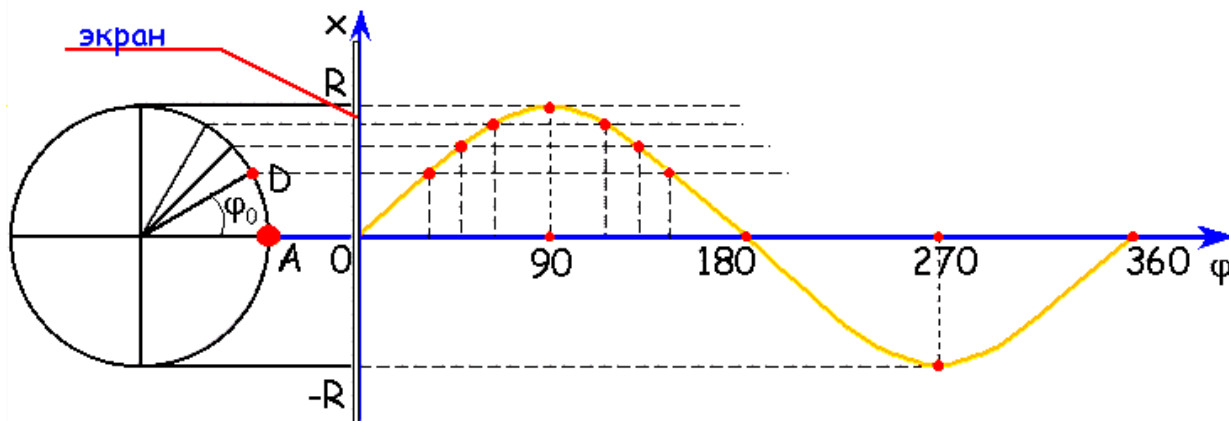
*Гармонические колебания* – это колебания точки, смещение которой изменяется по закону синуса или косинуса. Такие колебания являются незатухающими.

Гармонические колебания – механические колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению и направленной противоположно ему  $F = -kx$ .

Величину, стоящую под знаком синуса или косинуса называют *фазой колебания*.

Фаза колебаний  $\varphi$  – величина, характеризующая состояние колебательного процесса в каждый заданный момент времени. Измеряется в радианах.

$$\varphi = \omega t = 2\pi \nu t = \frac{2\pi}{T}$$



$$x = R \sin \varphi = R \sin \omega t$$

$$\varphi = \omega t$$

$$x = R \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Рисунок 5. Гармонические колебания

#### Уравнение гармонических колебаний

$$x = A \sin \varphi$$

$$x = A \sin(\varphi_0 + \omega t)$$

$$x = A \sin(\varphi_0 + 2\pi t / T)$$

$$x = A \sin(\varphi_0 + 2\pi \nu t)$$

где  $\varphi = \varphi_0 + \omega t$  – фаза колебаний,  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний – фаза колебаний в момент начала отсчета времени.

Скорость движения – это первая производная от смещения. Ускорение – это первая производная от скорости.

#### Задачи

1. Уравнение колебательного движения  $x = 0,4 \sin 5\pi t$ . Определить амплитуду, период колебания и смещения при  $t = 0,1$  с.

2. Материальная точка совершает гармоническое колебание с амплитудой 0,03 м и периодом 0,2 с. Составить уравнение гармонических колебаний и определить смещение при  $t = 0,1$  с.

## Лекция №27

### Математический маятник. Колебания груза на пружине.

#### План

1. Математический маятник.
2. Пружинный маятник.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Дайте определение математического маятника.
2. Опишите колебания математического маятника.
3. По какой формуле определяют период колебаний математического маятника?
4. Кто впервые вывел эту формулу?
5. Что такое пружинный маятник? Приведите примеры.
6. Опишите процесс колебаний пружинного маятника.
7. Почему в ходе колебаний тело не останавливается, когда проходит положение равновесия?
8. По какой формуле определяют период колебаний пружинного маятника?
9. Какие преобразования энергии происходят во время колебаний пружинного маятника? математического маятника?
10. В каком положении потенциальная энергия маятника достигает максимального значения? минимального значения? Что можно сказать о его кинетической энергии в эти моменты?

## 1. Математический маятник.

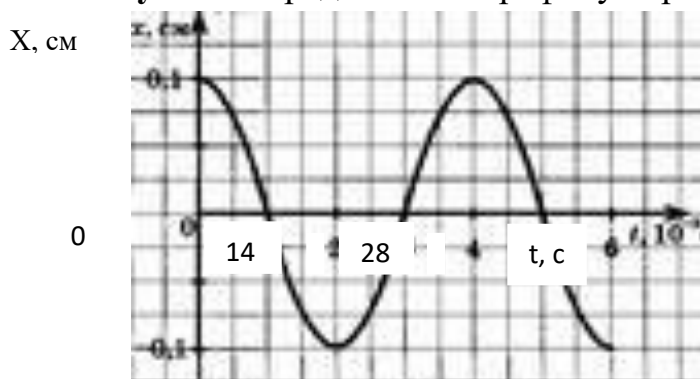
Ребята! Я вам сейчас раздам листы с задачами. Решая эти задачи, вы повторите не только пройденный материал, но и сможете отгадать, о каком физическом теле пойдёт речь сегодня на занятии. Вам предстоит решить семь задач, т.е. получить семь числовых ответов, каждой цифре соответствует буква. Таким образом, зашифрованное слово состоит из 7 букв.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
а	б	в	г	д	е	ж	з	и	к	л	м	н	о	п	р	с	т	у	ф	х	ц	ч	ш	ь	э	ю	я

**1 буква:** Определите период колебаний, если за 24 с тело совершает 2 колебания;

**2 буква:** Определите, с какой скоростью тело, подвешенное на нити, будет проходить положение равновесия, если его отклонили на высоту 5 см от земли;

**3 буква:** Определите по графику период колебаний:



**4 буква:** Определите частоту колебаний, если за 2 с тело совершает 36 колебаний;

**5 буква:** из уравнения координаты  $x=0,2 \cos \frac{2\pi}{13} t$  найдите период колебаний;

**6 буква:** из уравнения координаты  $x=9\cos(\pi t)$  найдите амплитуду колебаний;

**7 буква:** определите частоту колебаний, если период колебаний равен 0,1 с.

**Ответ:**

**маятник 12, 1, 28, 18, 13, 9, 10**

Итак, речь сегодня пойдёт о маятниках.

Маятник – система, подвешенная в поле тяжести и совершающая механические колебания. Колебания совершаются под действием силы тяжести, силы упругости и силы трения.

Маятником можно назвать любое твердое тело, совершающее колебания вокруг неподвижной точки или вокруг оси.

Ребята, приведите примеры маятников (качели, маятник в часах, колебания висячих мостов, тело на пружине, тело на нити и другие).

Рассмотрим пример с качелями. Так в парке качели длинные, а во дворах – короткие. Одинаковый ли период колебаний у длинных и коротких качелей?

*Нет. У длинных качелей период колебаний будет больше.*

В какой машине трясёт сильнее: в пустой или нагруженной?

*Трясёт сильнее в пустой машине, значит, у пустой машины период колебаний будет меньше.*

**Из примеров мы видим, что период колебаний маятников может быть различным.** Так что же сегодня на занятии мы должны изучить и исследовать? Сформулируйте тему занятия.

Простейшие колебательные системы, при помощи которых можно изучать параметры колебательных движений – пружинный и математический маятник. Не хватит пальцев на руках, если начать пересчитывать «профессии» маятника. И сейчас их число только увеличивается. Так, если раньше с маятником или лозой (рамкой) в руках искали воду – во все времена, и успешно, – то сейчас ещё ведут поиск затонувших кораблей и мест скопления рыбы. Ищут людей в завалах шахт, при землетрясениях и в снежных обвалах, ищут – и находят! А месторождения ископаемых открывают таким странным образом и до сих пор. Немало их открыл, к примеру, доктор геолого-минералогических наук Н.Н. Сочеванов.

А знаменитый экстрасенс Ури Геллер свой первый миллион долларов заработал, летая на самолёте на малой высоте над непроходимыми джунглями Бразилии, с маятником в руках. Он искал нефть, и нашёл её очень приличное количество. Что же представляет собой математический маятник?

Математический маятник – это физическая модель, которая представляет собой материальную точку, подвешенная на невесомой и нерастяжимой нити и совершает колебания под действием силы тяжести.

Как вы думаете, зачем необходимы такие ограничения – нить длинная и невесомая, груз – материальная точка (тело пренебрежимо малых размеров)?

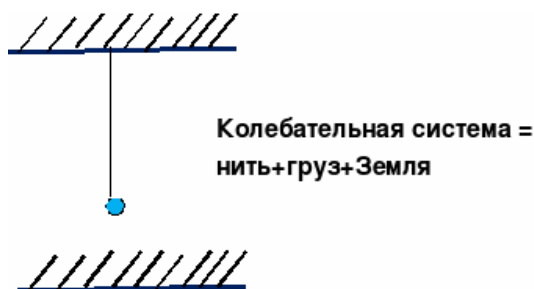


Рисунок 6. Математический маятник



От чего будет зависеть период колебаний такой колебательной системы? (масса, амплитуда, длина нити).

Экспериментально-исследовательская работа учащихся – по группам (20 минут)

Сегодня вы представители научно-экспериментальных лабораторий и вам предстоит в ходе выполнения экспериментальных заданий проверить правильность выдвинутых вами гипотез. Посоветуйтесь и определите необходимое оборудование, а также последовательность действий для проверки ваших предположений (если у обучающихся возникнут затруднения, преподаватель задает наводящие вопросы, приводя обучающихся к самостоятельному выбору лабораторного оборудования и порядка действий).

Прежде чем ответить на вопросы, наши исследователи должны поставить эксперимент, обработать его данные и сделать выводы, заполняя соответствующий лист-отчёт о своей работе. Пожалуйста, займите свои места и приступайте к работе.

*Преподаватель.* А теперь давайте послушаем выводы, к которым пришли наши исследовательские группы.

Зачитываем вопрос и полученные выводы. (Последняя группа должна отвечать на вопрос: зависит ли период колебаний от амплитуды?)

*Член исследовательской группы:* измеряя период колебаний при разных амплитудах, мы пришли к выводу, что при малом угле отклонения период колебаний практически не зависит от амплитуды.

*Преподаватель.* Эту особенность колебаний маятника открыл 19-летний Галилей, наблюдая за тем, как раскачиваются в соборе светильники, подвешенные на нитях одинаковой длины. Наручных часов тогда не было и юный Галилей пришёл к решению, которое для многих поколений будет служить образцом блеска и остроумия человеческой мысли: он сравнил колебания маятника с частотой биения собственного сердца! И на основе этого замечательного свойства колеблющихся тел Христиан Гюйгенс в 1657 году создал первые маятниковые часы с регулярным ходом.

*Преподаватель.* А как вы думаете, колебания математического маятника не изменятся, если мы перенесем установку с Земли на Луну, Венеру или Марс? Мы, конечно, не космические путешественники, и нам не удастся отправиться в путешествие на другую планету, но в ответе на данный вопрос нам поможет компьютерный эксперимент.

Теперь давайте попробуем обобщить все ваши данные, полученные в ходе выполнения экспериментальных заданий и сформулировать общий вывод.

Обобщая полученные результаты, обучающиеся самостоятельно формулируют вывод.

Период колебаний математического маятника зависит от длины нити и ускорения свободного падения и не зависит от амплитуды колебаний и массы груза.

После этого на экране с помощью презентации на ПК показывается вывод формулы периода колебаний математического маятника.

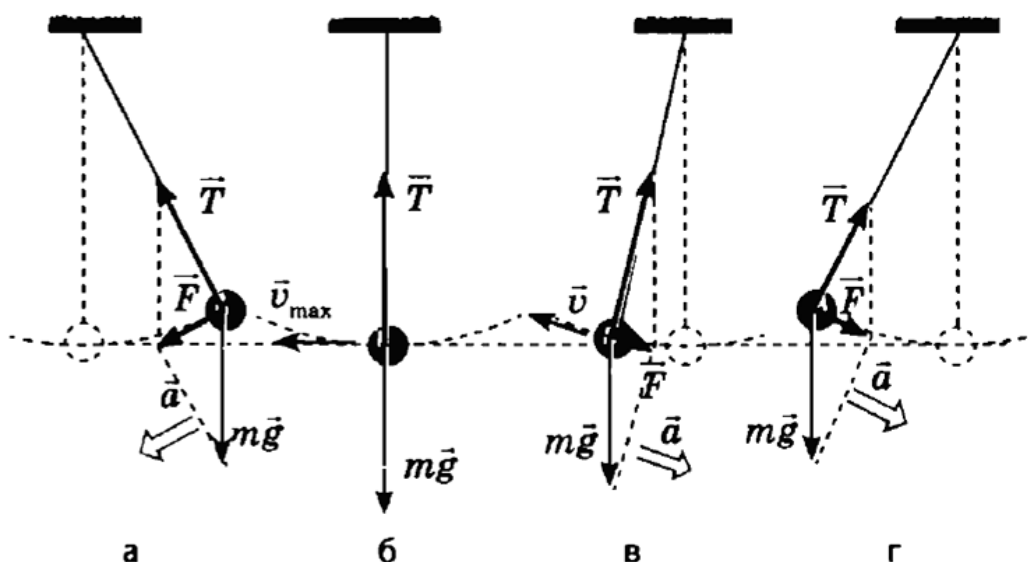


Рисунок 7. Вывод формулы периода колебаний математического маятника

На отклоненный от положения равновесия в крайнее положение шарик действует равнодействующая сил притяжения  $mg$  и силы натяжения нити  $T$ , направленная к положению равновесия (рис. 2).

Отпущенный шарик движется в положение равновесия. Опять же скорость и ускорение направлены в одну сторону, скорость растет.

В положении равновесия силы скомпенсированы, скорость максимальна. Вследствие инертности движение продолжается до отклонения в правое крайнее положение.

Остановившись на мгновение, шарик начнет движение в противоположную сторону – движение повторится.

Определим период колебаний маятника (рис. 3).

Ось  $OX$  направлена по касательной к траектории движения, ось  $OY$  – вдоль линии действия силы натяжения нити.

Вдоль оси  $OY$  тело не движется, поэтому запишем второй закон Ньютона только в проекции на ось  $OX$ .

$$\vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a};$$

$$T_x + (mg)_x = ma.$$

Поскольку:  $T_x = 0$ ,  $(mg)_x = -mg \sin \alpha$ , то уравнение проекции принимает вид:  $-mg \sin \alpha = ma_x$ ,

или

$$a_x = -g \sin \alpha.$$

Из прямоугольного треугольника АОВ,  
 $\sin \alpha = \frac{AO}{OB}$  или учитывая, что  $AB = l$ ,  $AO = x$ , то  $\sin \alpha = \frac{x}{l}$

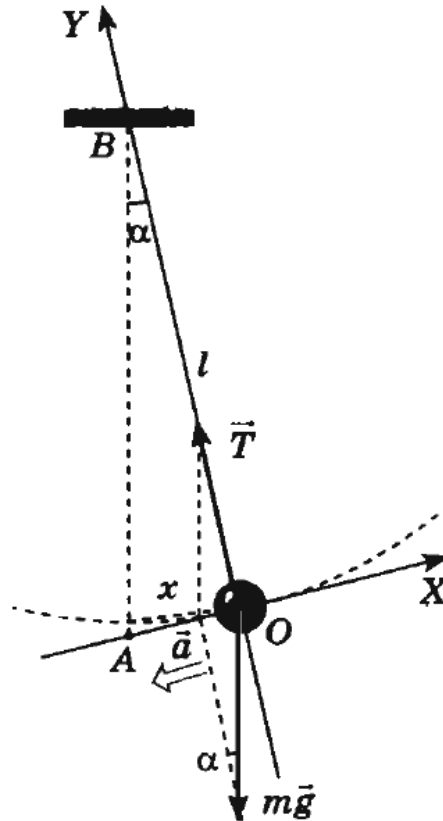


Рисунок 8. К выводу формулы периода колебаний математического маятника

Для уравнения колебаний математического маятника получаем:

$$a_x = -\frac{g}{l} x.$$

Это опять же гармоническое колебание, которое можно записать в виде:

$$a_x = -\omega^2 x.$$

Это уравнение называют уравнением свободных колебаний математического маятника.

Уравнения такого вида называют дифференциальными уравнениями. Решением такого уравнения является функция  $x = A \cos \omega t$ .

Для циклической частоты имеем:

$$\omega^2 = \frac{g}{l}, \text{ отсюда } \omega = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

Вспомним, что  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , получаем формулу периода колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Данную формулу впервые получил в XVII в. голландский ученый Х. Гюйгенс, поэтому ее называют формулой Гюйгенса. Формула справедлива при маленьких углах отклонения (не более 10-15°).

Период колебаний математического маятника не зависит от его массы, а определяется только длиной нити и ускорением свободного падения в том месте, где расположен этот маятник. Поэтому, измерив длину нити и период колебаний маятника, можно определить ускорение свободного падения в определенной местности.

Известно, что в разных точках земного шара ускорение свободного падения разное. Оно зависит не только от формы Земли, но и от наличия в ее недрах тяжелых (металлы) или легких (газ, нефть) веществ. А, следовательно, и период колебаний маятника в разных точках будет разным. Это свойство используется, в частности, во время поисков залежей полезных ископаемых.

## 2. Пружинный маятник.

Пружинный маятник – колебательная система, которая представляет собой тело, закрепленное на пружине.

Выдвинете гипотезу: от чего может зависеть период колебания пружинного маятника? *От коэффициента жёсткости, массы груза и амплитуды*

Преподаватель: необходимо провести эксперимент, чтобы доказать зависит ли период колебаний маятников от этих величин и если зависит, то как?

Экспериментально-исследовательская работа учащихся – по группам (20 минут)

### **Задания по группам:**

1. Выяснить, зависит ли период колебаний пружинного маятника от амплитуды колебаний.
2. Выяснить, зависит ли период колебаний пружинного маятника от коэффициента жёсткости пружины.
3. Выяснить, зависит ли период колебания пружинного маятника от массы груза.

Выводы по результатам эксперимента.

*Выводы обучающихся:* Период колебаний пружинного маятника не зависит от амплитуды и зависит от массы груза (чем больше масса, тем больше период) и коэффициента жёсткости (чем больше жёсткость пружины, тем меньше период).

Первую характерную примету колебаний пружинного маятника можно установить, постепенно увеличивая массу подвешенных к пружине грузиков. Подвешивая к пружине грузики разной массы, мы замечаем, что с увеличением массы тяжелый период колебаний груза увеличивается. Например, вследствие увеличения массы груза в 4 раза период колебаний увеличивается вдвое:

$$T \sim \sqrt{m}.$$

Вторую характерную примету можно установить, меняя пружины. Проведя серию измерений, легко обнаружить, что тот же груз быстрее колеблется на жесткой пружине и медленнее – на мягкой, то есть:

$$T \sim \frac{1}{\sqrt{k}}.$$

Третья особенность пружинного маятника заключается в том, что период его колебаний не зависит от ускорения свободного падения. В этом нетрудно убедиться, используя метод «увеличения земного притяжения» за счет сильного магнита, который подкладывается под колеблющийся груз я.

Таким образом, период колебаний пружинного маятника не зависит от ускорения свободного падения и тем меньше, чем меньше масса груза и более жесткая пружина:

После этого на экране с помощью презентации на ПК показывается вывод формулы периода колебаний математического маятника.

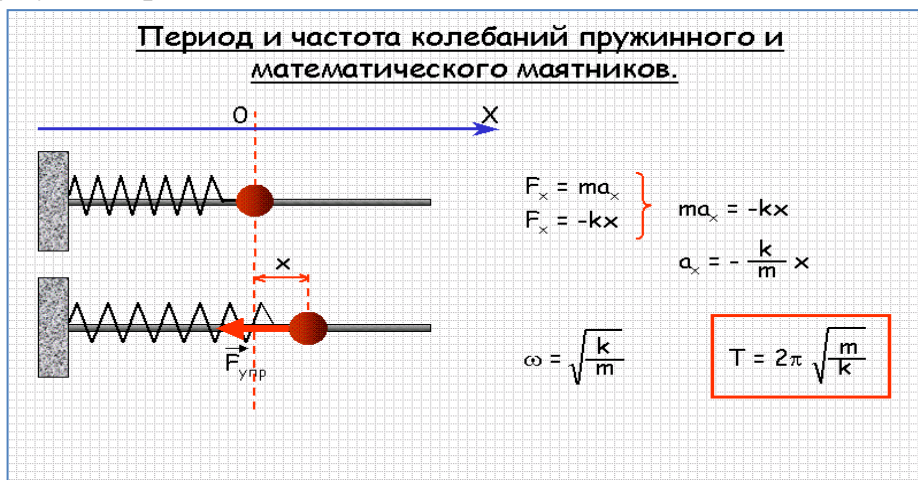


Рисунок 9. Вывод формулы периода колебаний пружинного маятника

Считаем:

1. Силы трения, действующие в системе, пренебрежимо малы (колебания маятника незатухающие).

2. Деформации пружины в процессе колебаний подчиняются закону Гука  $F_{\text{упр}} = k|x|$ .

Отклоним груз от положения равновесия на расстояние  $A$ . В таком положении сила упругости будет максимальной

$$F_{\text{упр}} = k|x_{\text{max}}| = kA.$$

Отпускаем груз

- он движется к положению равновесия, скорость и ускорение направлены в одну сторону, значит, скорость возрастает;
- вместе с тем удлинение пружины уменьшается, а следовательно уменьшается и ускорение.

Через четверть периода (в положении равновесия):

- сила упругости и ускорение равны нулю, а скорость достигнет максимальной величины;
- груз не останавливается и в результате инертности продолжает свое движение;
- пружина сжимается и возникает сила упругости, направленная противоположно движению.

Достигнув крайнего положения (при  $t=T/2$ ) груз на мгновение останавливается:

- груз начнет двигаться и повторит движение в противоположном направлении,
- через  $t = \frac{3}{4}T$  пройдет положение равновесия и в момент  $t=T$  отклонится на  $A$ .

Определим период колебаний маятника.

Запишем второй закон Ньютона:  $\vec{N} + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{упр}} = m\vec{a}$ .

Учитывая, что по закону Гука сила упругости  $F_{\text{упр}} = -kx$  в проекциях на оси  $Ox$  и  $Oy$  имеем:

$$\text{на } Ox: F_{\text{упр}} = ma_x,$$

$$\text{на } Oy: N - mg = 0,$$

Так что в результате имеем:

$$ma_x = -kx.$$

$$a_x = -\frac{k}{m}x.$$

Последнее выражение является уравнением колебаний пружинного маятника.

Из курса математики вы знаете, что ускорение – это вторая производная координаты по времени ( $a = x''$ ). Тогда последнее уравнение можно записать так:  $x'' + \frac{k}{m}x = 0$ ,

Или обозначив коэффициент  $\frac{k}{m}$  через  $\omega^2$ ,  $x'' + \omega^2 x = 0$ .

Решением этого уравнения являются гармонические функции:

$$x = x_m \cos \omega t,$$

$$x = x_m \sin \omega t.$$

Действительно, если

$$x = x_m \cos \omega t, \quad \text{то } x' = -\omega x_m \sin \omega t, \quad \text{а } x'' = -\omega^2 x_m \cos \omega t$$

$$x'' = -\omega^2 x$$

Доказано: если в любой момент времени движения тела его ускорение прямо пропорционально смещению и направлено в сторону, противоположную смещению, то такое движение представляет собой гармонические колебания (описывается законом синуса или косинуса) и уравнение этих колебаний можно записать в виде:

$$a_x = -\omega^2 x \qquad \omega^2 = \frac{k}{m} \quad \text{або} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Учитывая, что  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ , получаем формулу для расчета периода колебаний пружинного маятника:

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

Период колебаний пружинного маятника зависит от массы тела и жесткости пружины.

## Лекция №28

### Свободные колебания в колебательном контуре. Переменный электрический ток.

#### План

1. Колебательный контур. Формула Томсона.
2. Переменный электрический ток.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называют колебательным контуром?
2. Что называют электромагнитными колебаниями?
3. Какие энергетические преобразования происходят в колебательном контуре?
4. Какие электромагнитные колебания называют собственными?
5. Какие электромагнитные колебания называют свободными?
6. По какой формуле рассчитывают период собственных электромагнитных колебаний?
7. При каких условиях в электрической цепи возникают вынужденные электромагнитные колебания?
8. Какие электромагнитные колебания называют вынужденными?
9. Какой электрический ток называется переменным?
10. Почему во время равномерного вращения рамки в постоянном магнитном поле в ней индуцируется не постоянный, а переменный ток?
11. Какое явление используют во время производства электроэнергии на электростанциях? На каком явлении основано действие генераторов электрического тока?
12. На каком принципе основана работа генераторов переменного тока? Почему мы не замечаем мерцание лампочек, включенных в осветительную сеть переменного тока?
13. Назовите основные конструкционные элементы генераторов переменного тока и их назначение.
14. Какими преимуществами обладает переменный ток по сравнению с постоянным?



## 1. Колебательный контур. Формула Томсона.

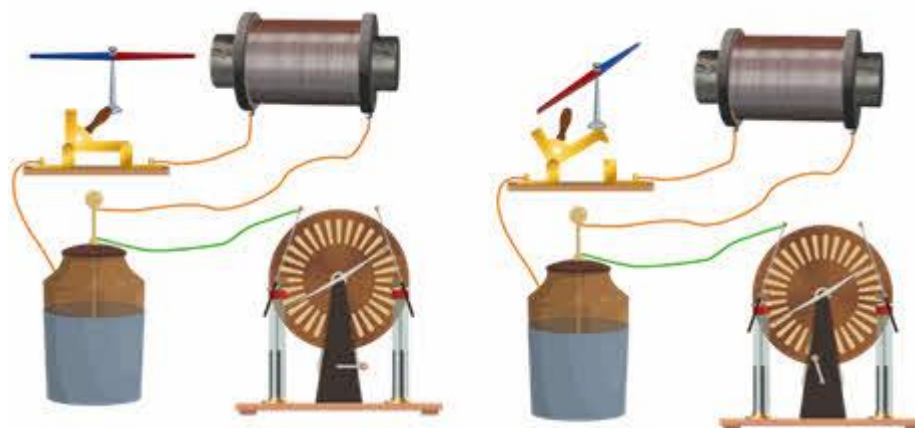
*"Кто действительно хочет понять все  
величие нашего времени, тот должен  
познакомиться с историей науки об электричестве.*

*И тогда он узнает сказку, какой нет и  
среди сказок "Тысячи и одной ночи"*

Никола Тесла «Сказка об электричестве»

Конденсатор – устройство, предназначенное для накопления электрического заряда и энергии электрического поля. Прототипом всех современных конденсаторов была лейденская банка, изобретённая в 1745 году Питером ван Мушенбруком.

После того как лейденской банке научились сообщать большой заряд с помощью электростатической машины, началось подробное изучение её электрического разряда. Так, замыкая обкладки лейденской банки на катушку со стальным сердечником, было обнаружено намагничивание последнего. С одной стороны, в этом нет ничего удивительного, ведь мы знаем, что электрический ток порождает магнитное поле, которое, собственно, и намагничивает сердечник. Интересно было другое. Невозможно было предсказать, какой конец сердечника катушки окажется северным полюсом, а какой – южным.

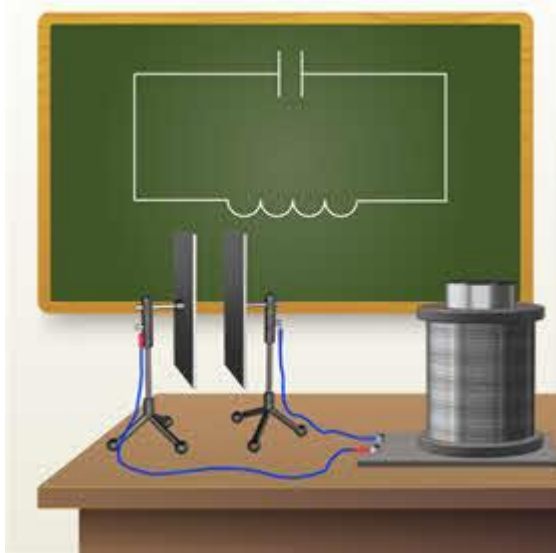


Далеко не сразу поняли, что при разрядке конденсатора через катушку в электрической цепи возникают колебания, названные позже электромагнитными. Поэтому за время разрядки конденсатора ток в цепи много раз меняет направление. В результате этого сердечник и намагничивался каждый раз по-разному.

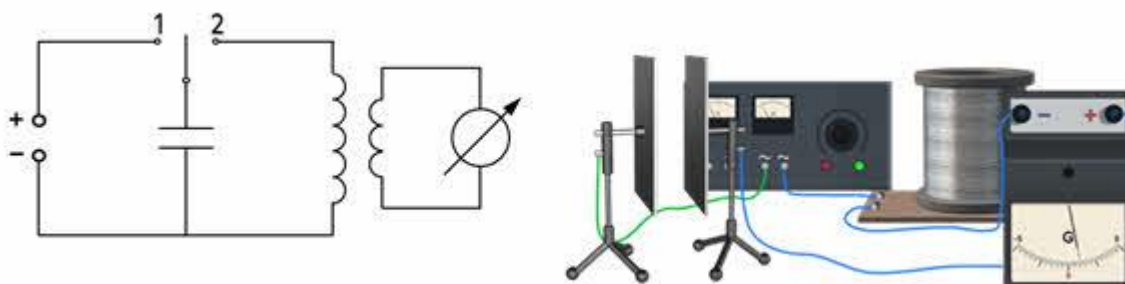
В настоящее время под электромагнитными колебаниями понимают периодические изменения заряда, напряжения и силы тока в электрической цепи.

Система, в которой могут происходить свободные электромагнитные колебания, называется колебательным контуром.

Простейший колебательный контур представляет собой электрическую цепь из последовательно соединённых катушки индуктивности и конденсатора.

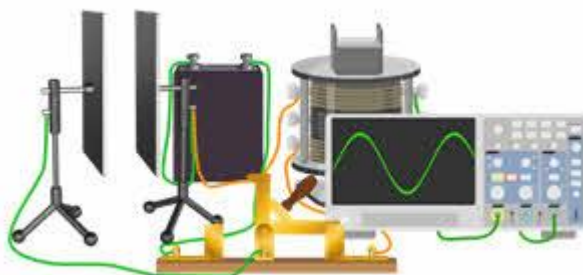


Давайте получим электромагнитные колебания. Для чего соберём цепь, состоящую из источника постоянного тока, катушки индуктивности с большим числом витков, на которую в средней её части, поверх первичной обмотки намотана вторичная обмотка с малым числом витков, и ключа. Вторичную обмотку катушки замкнём на гальванометр, с помощью которого будем регистрировать возникновение колебаний в контуре. Зарядим конденсатор, подключив его на некоторое время к источнику тока. А теперь перекинем ключ: стрелка гальванометра начала совершать колебания, фиксируя наличие переменного тока в катушке.



Если в такую цепь параллельно катушке включить электронный осциллограф, то на его экране мы получим временную развёртку колебаний, подобную той, что вычерчивает пружинный маятник на движущемся листе

бумаги. Как видим, эти колебания затухают с течением времени. Поэтому они являются свободными.



Теперь давайте подробно рассмотрим процесс разрядки конденсатора и проследим за происходящими превращениями энергии. Итак, пусть в начальный момент времени наш конденсатор заряжен, а между его обкладками существует электрическое поле:

$$W_c = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{CU_m^2}{2}.$$

Эта ситуация эквивалентна ситуации с механическими колебаниями математического маятника и соответствует состоянию, когда его вывели из положения равновесия, тем самым сообщив потенциальную энергию.

При замыкании цепи, конденсатор начнёт разряжаться, под действием электрического поля заряды начнут двигаться по виткам катушки, создавая в цепи ток, сила которого постепенно увеличивается. В результате, как мы знаем, в катушке возникнет ток самоиндукции, противодействующий росту тока во внешней цепи. По мере разрядки конденсатора электрическое поле в нём будет ослабевать, а в катушке возникнет магнитное поле. При этом уменьшение энергии электростатического поля конденсатора равно увеличению энергии магнитного поля катушки:

$$W = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}.$$

В тот момент, когда конденсатор полностью разрядится, магнитное поле катушки будет самым сильным. Это означает, что энергия электрического поля конденсатора полностью перейдёт в энергию магнитного поля катушки:

$$W_L = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Похожее происходит и с математическим маятником, при прохождении им положения равновесия, когда потенциальная энергия маятника полностью переходит в его кинетическую энергию.

Хотя в этот момент электрическое поле в конденсаторе отсутствует, заряды некоторое время будут двигаться в цепи в прежнем направлении по

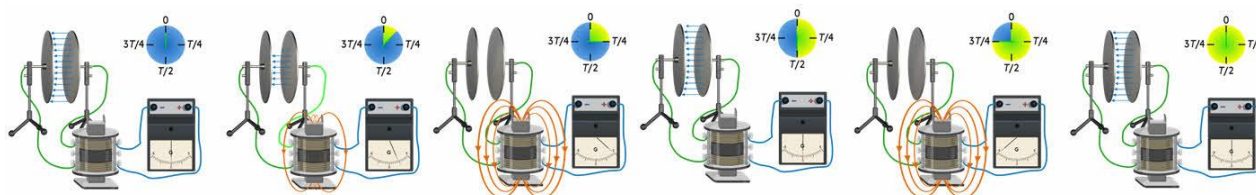
инерции. Сила тока в цепи начнёт постепенно уменьшаться, так как ток самоиндукции меняется на противоположный, поддерживающий убывающий ток в цепи.

В результате конденсатор снова зарядится, но заряды обкладок поменяются местами. Ток на мгновение прекратится и вся энергия магнитного поля катушки превратится обратно в энергию электрического поля конденсатора.

Эта ситуация эквивалентна ситуации с механическими колебаниями, в момент отклонения маятника от положения равновесия в противоположную сторону, когда его кинетическая энергия полностью переходит в потенциальную.

Далее явление повторится в обратном порядке: конденсатор начнёт разряжаться и энергия его электрического поля будет преобразовываться в энергию магнитного поля катушки индуктивности. Но в этом случае через катушку течёт ток противоположного направления. Сила тока в катушке вновь достигнет своего максимального значения, когда конденсатор полностью разрядится. А значит, вся электрическая энергия превратится в энергию магнитного поля, аналогично тому, как маятник, возвращаясь, вновь проходит положение своего равновесия, и его потенциальная энергия полностью переходит в кинетическую.

После этого сила тока начинает уменьшаться, а конденсатор будет перезарядаться. Когда ток в цепи прекратится, конденсатор окажется заряженным так, как в начальный момент времени. Теперь опять вся энергия колебательного контура заключена в его электрическом поле, вторая перезарядка возвращает контур в исходное состояние. Эта ситуация аналогично тому, как маятник возвращается в своё исходное положение, а его кинетическая энергия полностью переходит в потенциальную.



Таким образом, завершилось полное колебание в контуре, и в дальнейшем процесс повторяется в уже рассмотренной нами последовательности. **Минимальный промежуток времени, через который процесс в колебательном контуре полностью повторяется, называют периодом электромагнитных колебаний.**

Как вы могли заметить, если в контуре отсутствует активное сопротивление, то его полная энергия сохраняется неизменной и её значение

в любой момент времени равно либо максимальной энергии электрического поля, либо максимальной энергии поля магнитного:

$$W = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}$$

Почему при рассмотрении процессов, происходящих в колебательном контуре, мы их сравнивали с колебаниями математического маятника? Дело в том, что эти процессы описываются одинаковыми уравнениями, что позволяет переносить закономерности, полученные при изучении одного вида колебаний, на колебания другой природы.

Механические		Электромагнитные	
Координата/смещение	$x$	Заряд	$q$
Скорость	$v_x$	Сила тока	$I$
Жесткость/уск. св. падения	$k/g$	Вел-на, обратная ёмкости	$1/C$
Масса/длина	$m/l$	Индуктивность	$L$
Ускорение	$a_x$	Скорость изм. силы тока	$\Delta I/\Delta t$
Потенциальная энергия	$W_{\text{п}}$	Эл. энергия конденсатора	$W_{\text{э}}$
Кинетическая энергия	$W_{\text{к}}$	Энергия магн-го поля катушки	$W_{\text{м}}$

Для закрепления материала, решим с вами такую задачу: колебательный контур состоит из конденсатора ёмкостью 500 пФ и катушки, индуктивностью 20 мГн. Определите амплитудное значение силы тока в контуре, если амплитудное значение напряжения на конденсаторе составляет 350 В.

**ДАНО**

$$C = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

$$L = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$$

$$U = 350 \text{ В}$$

$$I = ?$$

**РЕШЕНИЕ**

$$\text{Энергия электрического поля конденсатора: } W_C = \frac{CU^2}{2}.$$

$$\text{Энергия магнитного поля катушки: } W_L = \frac{LI^2}{2}.$$

$$\text{Закон сохранения энергии: } W_C = W_L.$$

$$\frac{CU^2}{2} = \frac{LI^2}{2} \Rightarrow I^2 = \frac{2CU^2}{2L} \Rightarrow I = U \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$I = 350 \text{ В} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}}{2 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}}} \approx 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ А}$$



**ОТВЕТ:** амплитудное значение силы тока в контуре примерно равно 55 мА.

Рассмотрев качественную сторону теории процессов в колебательном контуре, перейдём к её количественной стороне. Для этого рассмотрим **идеальный колебательный контур, то есть контур, активное сопротивление которого пренебрежимо мало.**



В таком контуре, как мы показали ранее, полная электромагнитная энергия в любой момент времени равна сумме энергий электрического и магнитного полей, и она не меняется с течением времени:

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \text{const.}$$

А раз энергия контура неизменная, то производная полной энергии по времени равна нулю:

$$\left(\frac{q^2}{2C}\right)' + \left(\frac{Li^2}{2}\right)' = 0.$$

Напомним, что в записанной формуле заряд и сила тока в цепи являются функцией времени.

Чтобы понять физический смысл этого уравнения, перепишем его так:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)'$$

Из такой записи видно, что **скорость изменения магнитного поля по модулю равна скорости изменения энергии электрического поля**. А знак минус в формуле показывает на то, что увеличение энергии магнитного поля происходит за счёт убыли энергии поля электрического.

Вычислим производные в записанном уравнении, воспользовавшись для этого формулой вычисления производной сложной функции.

$$\frac{L}{2} \cdot 2ii' = -\frac{1}{2C} \cdot 2qq'.$$

А теперь вспомним, что производная заряда по времени есть сила мгновенного тока (то есть сила тока в данный момент времени):

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'.$$

Поэтому предыдущее уравнение можно переписать так, как показано на экране:

$$Lii' = -\frac{qi}{C}.$$

Производная силы тока по времени есть не что иное, как вторая производная заряда по времени, подобно тому, как производная скорости по времени (то есть ускорение) есть вторая производная координаты по времени:

$$i' = q''.$$

Перепишем предыдущее равенство с учётом этой поправки:

$$Li\dot{q}'' = -\frac{qi}{C}.$$

Разделив левую и правую части этого уравнения на «Эль И» ( $Li$ ), получим **основное уравнение, описывающее свободные гармонические электрические колебания в контуре:**

$$q'' = -\frac{1}{LC}q.$$

Данное уравнение аналогично уравнению, описывающему гармонические механические колебания:

$$a_x = -\omega_0^2 x.$$

Отсюда видно, что величина, обратная квадратному корню из произведения индуктивности и ёмкости, является циклической частотой свободных электрических колебаний:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Зная циклическую частоту колебаний, нетрудно найти и их период, то есть **минимальный промежуток времени, через который процесс в колебательном контуре полностью повторяется:**

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Эта формула впервые была получена английским физиком Уильямом Томсоном 1853 году, и в настоящее время носит его имя.

Из формулы видно, что **период колебательного контура определяется параметрами составляющих его элементов: индуктивностью катушки и ёмкостью конденсатора.** Из формулы Томсона также следует, что, например, при уменьшении ёмкости или индуктивности период колебаний должен уменьшиться, а их частота – увеличиться и наоборот.

Но вернёмся к уравнению свободных электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре. Его решением является уравнение, выражающее зависимость заряда конденсатора от времени:

$$q = q_m \cos \omega_0 t.$$

В записанной формуле  $q_m$  – это **начальное (или амплитудное) значение заряда**, сообщённому конденсатору. Из этой формулы следует, что заряд на конденсаторе изменяется со временем по гармоническому закону.

Если взять первую производную заряда конденсатора по времени, то мы получим уравнение, описывающее изменение силы тока в контуре:

$$I = q' = -q_m \omega_0 \sin \omega_0 t.$$

Величина, равная произведению максимального заряда конденсатора и циклической частоты колебаний, является амплитудным значением силы тока:

$$I = I_m \cos \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Перепишем уравнение для силы тока с учётом последнего равенства, а также воспользовавшись формулой приведения:

$$I = I_m \cos \left( \omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Из такой записи хорошо видно, что сила тока в колебательном контуре также совершает гармонические колебания с той же частотой, но по фазе она смещена на  $\pi/2$  относительно колебаний заряда.

Для закрепления материала, решим задачу. Конденсатор ёмкостью 2 мкФ зарядили до напряжения 100 В, а затем замкнули на катушку с индуктивностью 5 мГн. Определите заряд конденсатора через  $0,025\pi$  мс после замыкания.

**ДАНО**

$$C = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U = 100 \text{ В}$$

$$L = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$t = 0,025\pi \text{ с}$$

$$q(t) = ?$$

**РЕШЕНИЕ**

$$\text{Заряд конденсатора: } q(t) = q_m \cos \frac{2\pi}{T} t = CU \cos \frac{1}{\sqrt{LC}} t.$$

$$\text{Амплитудное значение заряда: } q_m = CU.$$

$$\text{Период ЭМК: } T = 2\pi\sqrt{LC} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{2\pi}{T}.$$

$$q(t) = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 100 \text{ В} \cdot \cos \left( \frac{1}{\sqrt{5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}}} \cdot 0,025\pi \text{ с} \right) =$$

$$= 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Кл}}{\text{В}} \cdot \text{В} \cdot \cos(10\,000 \cdot 0,025\pi) \cong 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}$$

**ОТВЕТ:** в заданный момент времени заряд обкладок конденсатора примерно равен 0,2 мКл.

Отметим, что в реальных колебательных контурах всегда имеется активное сопротивление, поэтому часть энергии контура всегда превращается во внутреннюю проводников, которая выделяется в виде излучения. Кроме того, часть энергии теряется на перемагничивание сердечника и изменение поляризации диэлектрика. Поэтому полная энергия контура с течением времени уменьшается, в результате уменьшается и амплитуда колебаний. Следовательно, **реальные электромагнитные колебания в контуре являются затухающими.**



## 2. Переменный электрический ток.

**Электромагнитные колебания** – это периодические изменения со временем электрических и магнитных величин в электрической цепи.

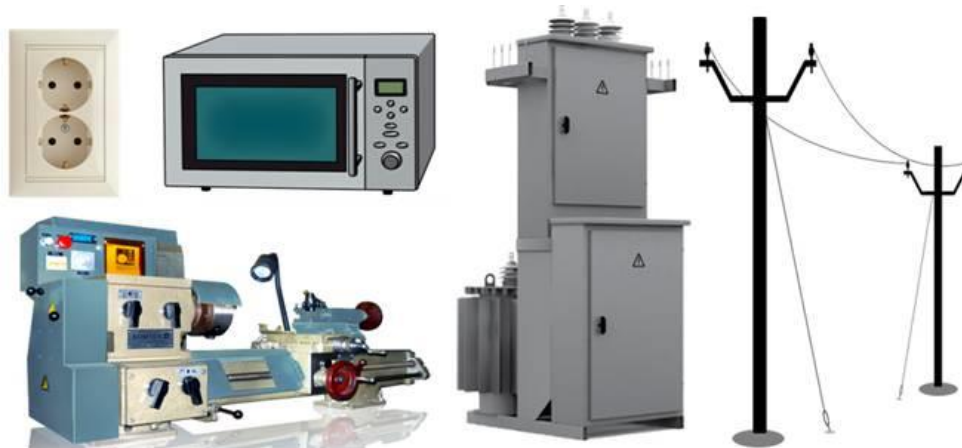
**Свободные электромагнитные колебания** – это колебаниями, которые происходят в идеальном колебательном контуре за счет расходования сообщенной этому контуру энергии, которая в дальнейшем не пополняется.

**Свободные колебания не могут существовать сколь угодно долго и со временем затухают.** Поэтому, наибольшее практическое значение в настоящее время получили **вынужденные электромагнитные колебания**, которые представляют собой периодические изменения силы тока в контуре и других электрических величин под действием переменной электродвижущей силы от внешнего источника.

С такими колебаниями знаком каждый человек. Только люди их называют **переменным электрическим током**.

**Переменный электрический ток – это ток, периодически изменяющийся со временем.**

В каждом доме есть розетки, в которые включают всю домашнюю технику и осветительные приборы, «питающиеся» переменным током напряжением 220 вольт. В школьных мастерских имеются станки – к ним тоже подведен переменный ток, только более высокого напряжения. Во всех микрорайонах стоят будки с надписями «Трансформатор», в которых находятся трансформаторы, преобразующие переменный ток; вдоль дорог и по лесным просекам протянулись линии электропередачи опять же переменного тока. Миллионы и миллионы генераторов, трансформаторов, электродвигателей во всем мире производят, передают и используют электрическую энергию благодаря особенностям этого вида тока, обнаруженным без малого двести лет назад.



Крупнейший ученый XIX века **Герман Гельмгольц** говорил, что до тех пор, пока люди пользуются благами электричества, они всегда будут с благодарностью вспоминать имя **Фарадея**. Явление электромагнитной индукции – фундаментальное научное открытие, совершенное английским физиком **Майклом Фарадеем**, – легло в основу современной технической цивилизации и кардинально преобразило окружающий нас мир.

Долгие десятилетия шли активные поиски наилучшей реализации этого открытия – вплоть до отчаянной борьбы между сторонниками постоянного и приверженцами переменного тока. Правда, начавшаяся более ста лет назад «война» давно закончилась тесным и плодотворным взаимодействием, когда недостатки одного из видов тока компенсируются достоинствами другого.

*Каким способом можно получить переменный электрический ток?*

В настоящее время основная часть электроэнергии в мире вырабатывается с помощью электромеханических индукционных генераторов переменного тока, создающими синусоидальное напряжение.

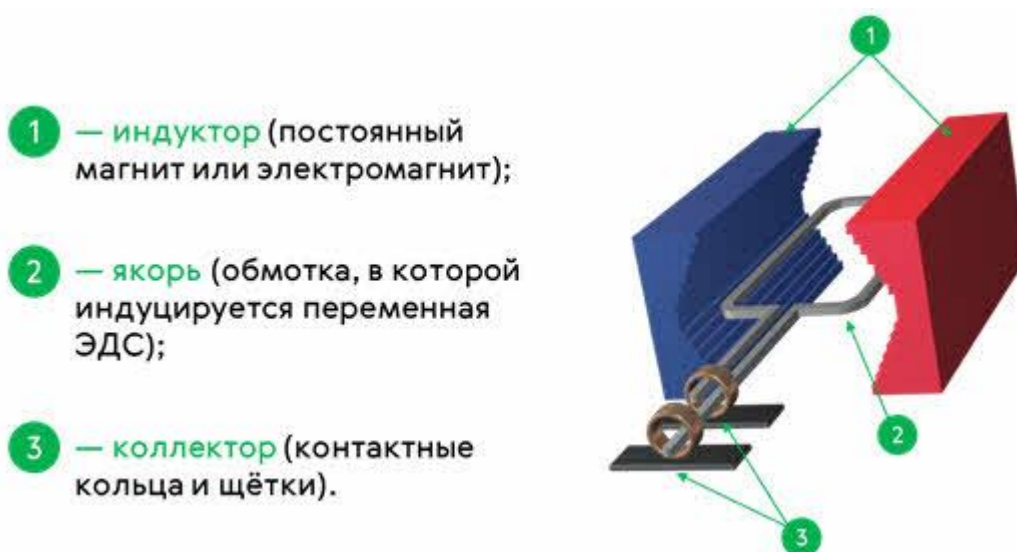
**Индукционным генератором переменного тока называется устройство, предназначенное для преобразования механической энергии в энергию переменного тока.**

Как следует из названия устройства, принцип действия такого генератора основан на явлении электромагнитной индукции. Основными частями индукционного генератора переменного тока являются:

**Индуктор** – это постоянный магнит или электромагнит, который создаёт магнитное поле;

**якорь** – это обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС;

и **коллектор** – это контактные кольца и скользящие по ним контактные пластины (щётки). С помощью коллектора ток снимается или подводится к вращающимся частям.



Давайте рассмотрим принцип действия простейшего индукционного генератора на примере проводящей рамки с током, вращающейся в однородном магнитном поле с постоянной угловой скоростью.

Пусть в начальный момент времени угол между нормалью к плоскости рамки и линиями индукции магнитного поля равен нулю. Так как рамка вращается с постоянной угловой скоростью, то данный угол будет меняться с течением времени по линейному закону:

$$\alpha = \omega t.$$

Тогда будет меняться и магнитный поток через поверхность, ограниченную плоскостью рамки:

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t.$$

Поскольку магнитный поток, пронизывающий рамку, изменяется со временем, то в ней согласно закону Фарадея индуцируется ЭДС индукции, равная первой производной магнитного потока по времени, взятой с обратным знаком:

$$\xi = -\Phi' = \omega BS \sin \omega t.$$

Произведение величин, стоящих перед функцией синуса есть ничто иное, как амплитудное значение ЭДС индукции:

$$\xi_m = \omega BS.$$

Отсюда следует, что изменение ЭДС индукции в контуре со временем происходит по закону синуса:

$$\xi = \xi_m \sin \omega t.$$

Это достаточно легко проверить, если подключить выводы вращающейся рамки к осциллографу. Нетрудно увидеть, что временная развёртка представляет собой синусоиду.

Если к выводам рамки подключить нагрузку с достаточно большим сопротивлением (намного большим, чем сопротивление рамки), то по ней будет проходить переменный ток.

По закону Ома для полной цепи его сила будет также изменяться по синусоидальному закону:

$$i = \frac{\xi}{R} = I_m \sin \omega t.$$

Анализируя последние два выражения, мы можем сделать вывод, что в цепи, содержащей, кроме рамки, только сопротивление, колебания напряжения и колебания силы тока совпадают по фазе, одновременно достигая максимумов и минимумов.

Однако в общем случае (например, когда в цепи присутствует конденсатор, или катушка, или то и другое одновременно) колебания силы тока в цепи и напряжения будут происходить с одинаковой частотой, но не будут совпадать по фазе:

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_c).$$

Ещё раз обратим ваше внимание на то, что ток в цепи проходит в одном направлении в течение полуоборота рамки, а затем меняет направление на противоположное, которое также остаётся неизменным в течение следующего полуоборота.

**Промежуток времени, в течение которого ЭДС совершает одно полное колебание, называется периодом переменного тока.**

**А число полных колебаний за одну секунду называется частотой тока.**

В электрических сетях большинства стран мира (в том числе и в России) стандартная частота переменного тока равна 50 Гц. Продолжительность периода такого тока составляет всего 0,02 с. Такая частота переменного тока была выбрана с участием известного немецкого электротехника польско-русского происхождения Михаила Осиповича Доливо-Добровольского.

Однако, например, в США, Канаде и некоторых других странах по рекомендации известного сербского учёного Николы Тесла, стандартная частота переменного тока равна 60 Гц.

Мы рассмотрели на схеме принцип работы генератора переменного тока. Однако такой тип генераторов (с неподвижной магнитной системой и вращающимся якорем) используется достаточно редко. Дело в том, что при помощи подвижных контактов практически невозможно отводить от генератора ток высокого напряжения из-за сильного искрения в контактах. Поэтому почти во всех индукционных генераторах переменного тока якорь, в котором индуцируется ЭДС, устанавливают неподвижно, а вращаться заставляют индуктор.

**Вращающаяся часть генератора называется ротором.** Он располагается внутри неподвижной стальной станины цилиндрической формы, называемой **статором**. Во внутренней части статора имеются специальные пазы, в которые укладывается медный провод в виде витков. При вращении ротора в этих витках и индуцируется переменный ток.



Ротор также имеет сложную форму и представляет собой стальной сердечник с навитой на него обмоткой. По обмотке пропускается постоянный ток, который подводится через щётки и кольца от постороннего источника постоянного тока. Создаваемое этим током магнитное поле вращается вместе с ротором. При этом силовые линии поля будут пересекать проводники, вложенные в пазы статора, и индуцировать в них ЭДС.

Современные мощные генераторы вырабатывают напряжение до 15-20 кВ, а их коэффициент полезного действия может достигать 97-98 %.

Теперь давайте рассмотрим некоторые новые закономерности, которые возникают в электрической цепи при её подключении к источнику переменного тока. Итак, пусть источник создаёт переменное напряжение, изменяющееся со временем по закону синуса:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

По закону Ома для участка цепи, содержащим только сопротивление, сила тока во всей цепи будет также изменяться по гармоническому закону:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$$

**Максимальные величины напряжения и силы тока называются амплитудными значениями напряжения и силы тока соответственно.**

**А значения напряжения и силы тока в любой момент времени называются мгновенными.**

Зная их, можно рассчитать мгновенную мощность переменного тока, которая, в отличие от цепей постоянного тока, изменяется с течением времени:

$$P_{\text{мгн}} = iu.$$

**Под средней за период мощностью переменного тока понимают отношение суммарной энергии, поступающей в цепь за период, к периоду.**

С учётом зависимости силы тока от времени перепишем выражение для мгновенной мощности на резисторе в цепи переменного тока:



$$P_{\text{мгн}} = iu = i^2 R = I_m^2 R \sin^2 \omega t.$$

Поскольку мгновенная мощность изменяется со временем, то использовать эту величину на практике в качестве характеристики длительно протекающих процессов очень неудобно. Давайте перепишем нашу формулу для мощности немного по-другому (воспользовавшись знаниями из математики):

$$P = IU = I_m U_m \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} I_m U_m (1 - \cos 2\omega t) = \frac{I_m U_m}{2} - \frac{I_m U_m}{2} \cos 2\omega t.$$

Как видим, в полученном уравнении первое слагаемое не зависит от времени. А второе слагаемое — это переменная составляющая, являющаяся функцией двойного угла. Её среднее значение за период (или время, кратное периоду) равно нулю, поскольку половину периода косинус принимает положительные значения, а вторую — отрицательные. Поэтому среднее значение мощности переменного тока за время, большее чем период колебаний, можно найти как половину произведения амплитудных значений силы тока и напряжения, или половину произведения квадрата амплитудного значения силы тока и сопротивления:

$$P_{\text{ср}} = \frac{I_m U_m}{2} = \frac{I_m^2 R}{2}.$$

Для закрепления материала, решим с вами одну небольшую задачу. Квадратная рамка площадью  $500 \text{ см}^2$  вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $10 \text{ мТл}$  вокруг оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной полю, совершая  $25$  оборотов в секунду. Определите действующее значение силы тока в рамке, если её сопротивление равно  $5 \text{ Ом}$ .

**ДАНО**

$$S = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$B = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$\nu = 25 \text{ Гц}$$

$$R = 5 \text{ Ом}$$

$$I = ?$$

**РЕШЕНИЕ**

$$\text{Действующее значение силы тока: } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi\nu BS}{R\sqrt{2}} = \frac{\pi\nu BS\sqrt{2}}{R}.$$

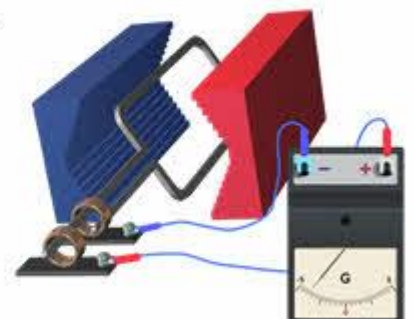
$$\text{Изменение магнитного потока: } \Phi = BS \cos 2\pi\nu t.$$

$$\text{Закон ЭМИ: } \xi = -\Phi' = 2\pi\nu BS \sin 2\pi\nu t.$$

$$\text{Амплитудное значение ЭДС ЭМИ: } \xi_m = 2\pi\nu BS.$$

$$\text{Закон Ома для полной цепи: } I_m = \frac{\xi_m}{R} = \frac{2\pi\nu BS}{R}.$$

$$I = \frac{3,14 \cdot 25 \text{ Гц} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \text{ Тл} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2}{5 \text{ Ом}} \cong 0,01 \text{ А}$$



**ОТВЕТ:** действующее значение силы тока в рамке примерно равно  $10 \text{ мА}$ .

## Лекция №29

Действующие значения силы тока и напряжения. Резонанс в электрической цепи.

План

1. Действующие значения силы тока и напряжения.
2. Сопротивления в цепи переменного тока.
3. Резонанс в электрической цепи.
4. Генерирование электрической энергии (самостоятельное изучение).

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Что называется действующим значением силы тока?
2. Как вычислить действующее значение силы тока и напряжения?
3. Какое сопротивление называют активным?
4. Почему его называют активным?
5. Как определяются индуктивное и емкостное сопротивления?
6. Какие сдвиги фаз между напряжением и силой тока в цепи с индуктивностью и емкостью?
7. Как определяется мгновенное значение мощности в цепи переменного тока?
8. Чему равно среднее значение мощности переменного тока за период?
9. Что такое коэффициент мощности в цепи переменного тока?
10. Чему равно полное сопротивление цепи переменного тока?
11. При каких условиях сила тока в цепи переменного тока максимальная?

## 1. Действующие значения силы тока и напряжения.

Расчеты показывают, что средняя мощность, выделяемая в резисторе при протекании переменного (гармонического) тока, вычисляется по формулам

$$P = I_{\max}^2 R/2 = U_{\max}^2/(2R).$$

Если ввести обозначения

$$I_{\text{д}} = I_{\max}/\sqrt{2}, \quad U_{\text{д}} = U_{\max}/\sqrt{2},$$

то формулы для мощности переменного тока примут такой же вид, как и для постоянного тока:

$$P = I_{\text{д}}^2 \cdot R = U_{\text{д}}^2/R.$$

Таким образом, выражение для средней мощности позволяет ввести действующие или эффективные значения силы тока и напряжения, которые используются в качестве основных характеристик переменного тока.

**Действующее значение силы переменного тока равно силе такого постоянного тока, который, проходя в электрической цепи по активному сопротивлению, выделяет за промежуток времени, кратный периоду колебаний, такое же количество теплоты, что и данный переменный ток.**

Оно численно равно квадратному корню из среднего за период значения квадрата силы переменного тока:

$$I = \sqrt{i^2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Аналогично можно ввести действующее значение для напряжения и ЭДС:

$$U = \sqrt{u^2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad \xi = \sqrt{\xi^2} = \frac{\xi_m}{\sqrt{2}}$$

Амперметры и вольтметры регистрируют именно действующие значения силы тока и напряжения.

## 2. Сопротивления в цепи переменного тока.

В цепь переменного тока можно включить электрическое сопротивление – резисторы, индуктивное и ёмкостное сопротивления – колебательный контур. Нагрузка в цепи переменного тока делится на активную и реактивную.

Давайте рассмотрим эти виды сопротивлений подробнее.



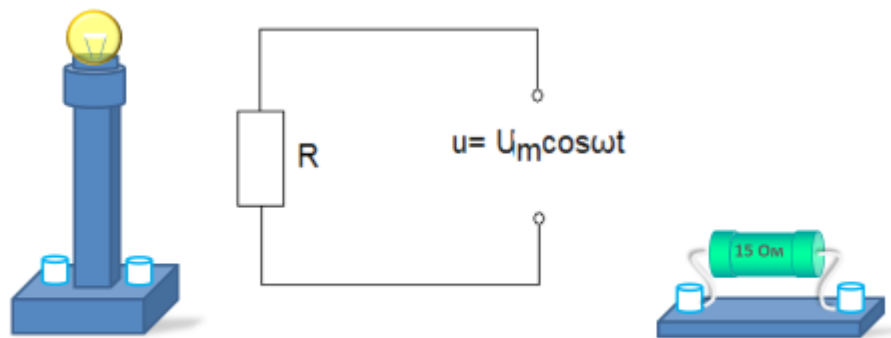
## Активное сопротивление.

Сопротивление, включенное в цепь переменного тока, в котором происходит превращение электрической энергии в полезную работу или в тепловую энергию, называется **активным сопротивлением**.

К активным сопротивлениям при промышленной частоте (50 гц) относятся, например, электрические лампы накаливания и электронагревательные устройства.

### АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

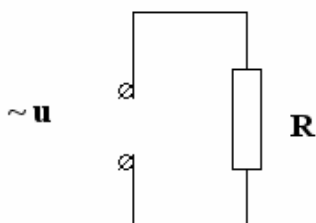
- Электрические устройства, преобразующие электрическую энергию во внутреннюю, называются активными сопротивлениями.



Рассмотрим активное сопротивление в цепи переменного тока.

По 3-му закону Ома:  $i = I_m \cos \omega t$  – для цепи с активным сопротивлением.

Рассмотрим цепь переменного тока, в которую включено активное сопротивление.



R – активное сопротивление, оно поглощает энергию идущую от генератора, превращая ее в тепловую.

$$u = U_{\max} \cos \omega t$$

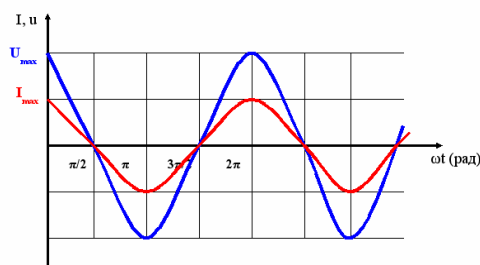
Закон Ома запишется:

$$I_{\max} = \frac{U}{R} = \frac{U_{\max} \cdot \cos \alpha}{R} = I_{\max} \cdot \cos \alpha$$

где  $I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}$  – амплитуда силы тока.

В такой цепи под действием переменного напряжения протекает переменный ток. Изменение тока в цепи, согласно закону Ома, зависит только от изменения напряжения, подключенного к ее зажимам. Когда напряжение равно нулю, ток в цепи также равен нулю. По мере увеличения напряжения ток в цепи возрастает и при максимальном значении напряжения ток становится наибольшим. При уменьшении напряжения ток убывает. Когда напряжение изменяет свое направление, ток также изменяет свое направление и т. д.

Из сказанного следует, что в цепи переменного тока с активным сопротивлением по мере изменения по величине и направлению напряжения одновременно пропорционально меняются величина и направление тока. Это значит, что ток и напряжение совпадают по фазе.



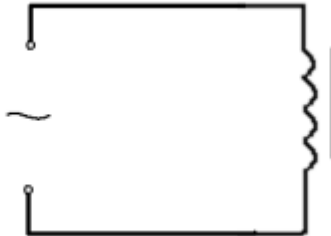
Таким образом, сопротивление играет двоякую роль в цепи переменного тока. **Во-первых, оно ограничивает силу тока. А во-вторых, на активном сопротивлении происходит безвозвратное превращение электроэнергии в другие виды (в частности, во внутреннюю).**

Отметим, что закон Ома для участка цепи переменного тока, содержащего только резистор, выполняется как для амплитудных и действующих, так и для мгновенных значений напряжения и силы тока вследствие того, что их колебания совпадают по фазе.

Таким образом, резисторы оказывают сопротивление как постоянному, так и переменному току, при этом в обоих случаях в них происходит превращение электрической энергии в энергию теплового движения частиц. Вследствие этого сопротивление резисторов получило название **активного или омического сопротивления.**

#### Индуктивное сопротивление.

Индуктивность в цепи переменного тока действует в отношении величины тока так же, как и активное сопротивление.



**Сопротивление, которым обладает цепь вследствие наличия в ней индуктивности, называется индуктивным сопротивлением. Узнаем от чего оно зависит. Итак, пусть в цепи, содержащей катушку индуктивности, протекает переменный ток, сила которого изменяется по гармоническому закону:**

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Тогда, ЭДС самоиндукции будет равна произведению индуктивности катушки и первой производной силы тока по времени, взятому с обратным знаком:

$$e_{si} = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t.$$

Если активное сопротивление катушки равно нулю, то и напряжённость электрического поля внутри проводника в любой момент времени должна быть равна нулю. В противном случае сила тока была бы бесконечно большой (это следует из закона Ома). Равенство нулю напряжённости поля оказывается возможным потому, что напряжённость, вихревого электрического поля, порождаемого переменным магнитным полем, в каждой точке равна по модулю и противоположна по направлению напряжённости кулоновского поля, создаваемого в проводнике зарядами, расположенными на зажимах источника и в проводах цепи.

**Следовательно, удельная работа вихревого поля (то есть ЭДС самоиндукции) равна по модулю и противоположна по знаку удельной работе кулоновского поля.**

Учитывая, что удельная работа кулоновского поля равна напряжению на концах катушки, то напряжение в цепи переменного тока, будет обратно по знаку ЭДС самоиндукции:

$$u = -e_{si} = L\omega I_m \cos \omega t.$$

Произведение величин, стоящих перед функцией косинуса, является амплитудой напряжения:

$$U_m = L\omega I_m.$$

Давайте перепишем уравнение для мгновенного напряжения, воспользовавшись введённым обозначением, а также заменим косинус на синус, воспользовавшись формулой приведения:

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Отсюда следует, что **колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока на  $\pi/2$ :**

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Давайте выразим из формулы для амплитуды напряжения амплитуду силы тока в катушке:

$$I_m = \frac{U_m}{L\omega}.$$

Величина, равная произведению циклической частоты и индуктивности катушки и есть индуктивное сопротивление:

$$X_L = \omega L.$$

Тогда можно записать, что **амплитудное значение силы тока в цепи переменного тока, содержащую только катушку индуктивности, прямо пропорционально амплитудному напряжению и обратно пропорционально индуктивному сопротивлению.**

### Ёмкостное сопротивление.

Рассмотрим цепь постоянного тока, содержащую последовательно соединённые конденсатор и лампочку. Замкнув цепь, мы обнаружим, что никакого тока в цепи нет. Это вполне понятно, так как пластины конденсатора отделены друг от друга изолятором. Поэтому через конденсатор постоянный ток течь не может.

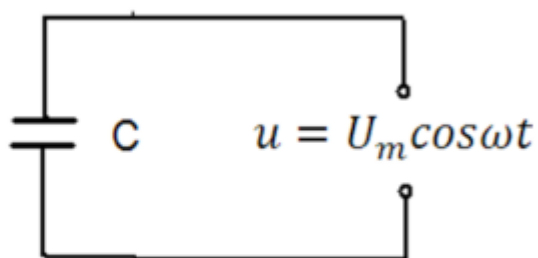


А теперь заменим источник постоянного тока на источник переменного напряжения. Лампочка горит. Объясняется это достаточно просто. В цепи

переменного тока электроны совершают колебательное движение. Это приводит к тому, что обкладки конденсаторов попеременно заряжаются то положительно, то отрицательно. Электроны же в проводах цепи движутся то в одном, то в другом направлении, нагревая спираль лампы. Если выключить конденсатор из цепи, то лампочка будет гореть ярче. Следовательно, наличие конденсатора в цепи переменного тока увеличивает сопротивление цепи.

**Сопротивление, которым обладает цепь вследствие наличия в ней ёмкости, называется ёмкостным сопротивлением.**

Выясним, от чего оно зависит. Для этого рассмотрим цепь, состоящую из генератора переменного напряжения, конденсатора и проводов, сопротивление которых пренебрежимо мало.



Пусть напряжение на конденсаторе изменяется синусоидально:

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Следовательно, и заряд конденсатора будет изменяться со временем по закону синуса:

$$q = Cu = CU_m \sin \omega t.$$

Найдём силу тока в цепи, как первую производную заряда по времени:

$$i = q' = -CU_m \omega \cos \omega t.$$

Произведение величин, стоящих перед функцией синуса, является амплитудой силы тока:

$$I_m = \omega CU_m.$$

Перепишем предыдущее уравнение с учётом введённых обозначений, и воспользуемся формулой приведения для перехода от функции косинуса к функции синус:

$$i = I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Отсюда следует, что **колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на конденсаторе на  $\pi/2$ :**

$$i = I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Теперь давайте перепишем уравнение для амплитуды силы тока так, как это показано на экране:

$$I_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}$$

Величина, обратная произведению ёмкости конденсатора и циклической частоты является ёмкостным сопротивлением:

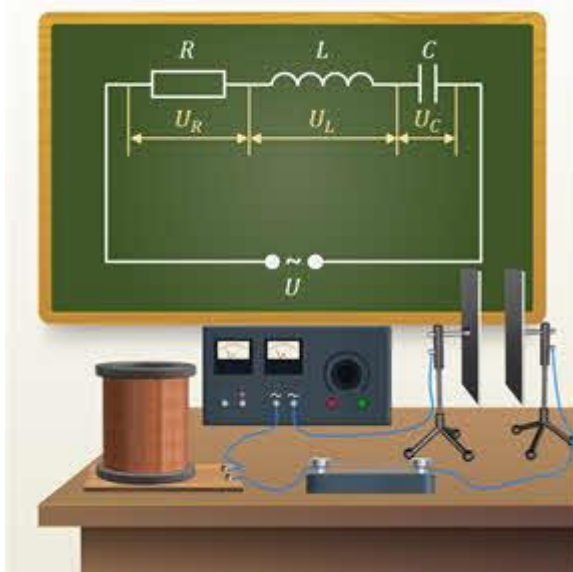
$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

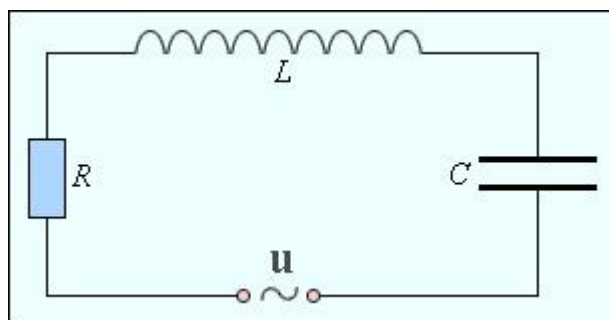
Подставив данное уравнение в предыдущее равенство, найдём, что **амплитудное значение силы тока в цепи переменного тока, содержащую только конденсатор, прямо пропорционально амплитудному напряжению и обратно пропорционально ёмкостному сопротивлению:**

$$I_m = \frac{U_m}{X_c}$$

Как и в предыдущем случае, при наличии в цепи только ёмкостного сопротивления частота изменения мощности вдвойне больше частоты изменения силы тока, а её среднее значение за период равно нулю. Следовательно, на ёмкостном сопротивлении электрическая энергия не превращается необратимо в другие виды. Поэтому ёмкостное и индуктивное сопротивления в отличие от активного называют **реактивными**.

Теперь рассмотрим цепь, содержащую все элементы: резистор, катушку индуктивности, конденсатор и источник переменного напряжения.





**Закон Ома для участка цепи переменного тока:**

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Величина, стоящая в знаменателе формулы, называется **полным сопротивлением цепи**:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Величина же, стоящая в скобках под знаком корня, называется **реактивным сопротивлением**.

### 3. Резонанс в электрической цепи.

Средняя мощность, выделяемая в цепи на активном сопротивлении, будет определяться выражением:

$$P = i^2 Z \cos \varphi_0 = IU \cos \varphi_0.$$

Здесь  $\cos \varphi_0$  – это **коэффициент мощности**. Являясь безразмерной физической величиной, он характеризует потребителя переменного электрического тока с точки зрения наличия в нагрузке реактивной составляющей, и показывает, насколько сдвигается по фазе переменный ток, протекающий через нагрузку, относительно приложенного к ней напряжения.

Если реактивное сопротивление цепи равно нулю, то уравнение для мощности примет привычный для нас вид:

$$P = IU.$$

В этом случае в цепи выделяется максимальная мощность — наступает явление резонанса.

**Резонансом в электрическом колебательном контуре называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний силы**

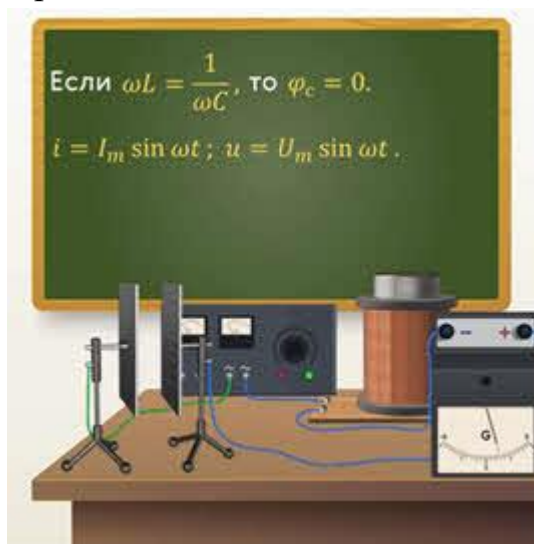


**тока или напряжения при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура:**

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Рассмотрим это явление более подробно. Для начала представим себе, что мы раскачиваем маятник, действуя на него периодически изменяющейся силой. В этом случае маятник будет совершать колебания не самостоятельно, не свободно, а под действием периодической внешней силы. Такие колебания маятника, как мы помним, называются **вынужденными колебаниями**.

В электрических колебательных контурах также могут происходить вынужденные электромагнитные колебания. Если в каком-либо колебательном контуре, состоящем из катушки индуктивности и конденсатора, всё время действует генератор переменного тока, то ЭДС генератора будет вызывать в этом контуре переменный электрический ток, частота которого будет равна частоте колебаний ЭДС генератора.



Частота этих вынужденных колебаний в общем случае не совпадает с частотой собственных колебаний контура:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Когда собственная частота колебательного контура далека от частоты ЭДС, действующей в контуре, общее сопротивление контура велико и ток в нём незначителен. Однако если в такой цепи подобрать ёмкость конденсатора и индуктивность катушки так, чтобы их сопротивления оказались равными, то разность фаз между колебаниями силы тока и напряжения станет равным нулю, то есть изменения тока и напряжения будут происходить синфазно:



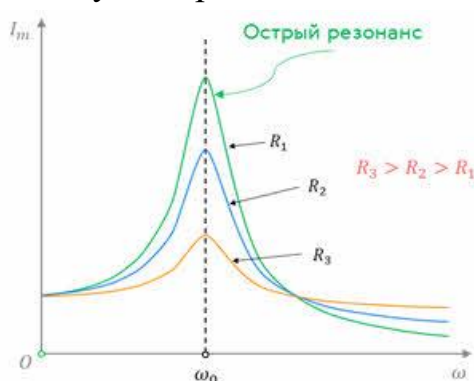
$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Таким образом, условием возникновения резонанса в колебательном контуре является равенство частоты внешнего подаваемого на контур напряжения частоте собственных колебаний контура:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Эту частоту называют **резонансной**.

Само явление называется **резонансом напряжений**. При этом, чем меньше активное сопротивление контура, тем сильнее ток в контуре и круче резонансная кривая. Такой случай принято называть **острым резонансом**.



Контур, обладающим острым резонансом, очень чувствителен к колебаниям резонансной частоты. Это широко используется в радио- и электротехнике для усиления колебаний напряжения какой-либо определённой частоты.

Так, например, радиоволны от различных передающих станций возбуждают в антенне радиоприёмника переменные токи различных частот, так как каждая передающая радиостанция работает на своей частоте. С антенной индуктивно связан колебательный контур, в катушке которого возникают вынужденные колебания силы тока и напряжения. Но только при резонансе из колебаний различных частот, возбуждаемых в антенне, контур выделяет только те, частота которых равна его собственной частоте. Настройка контура на нужную частоту обычно осуществляется путём изменения ёмкости конденсатора.

#### 4. Генерирование электрической энергии (самостоятельное изучение).

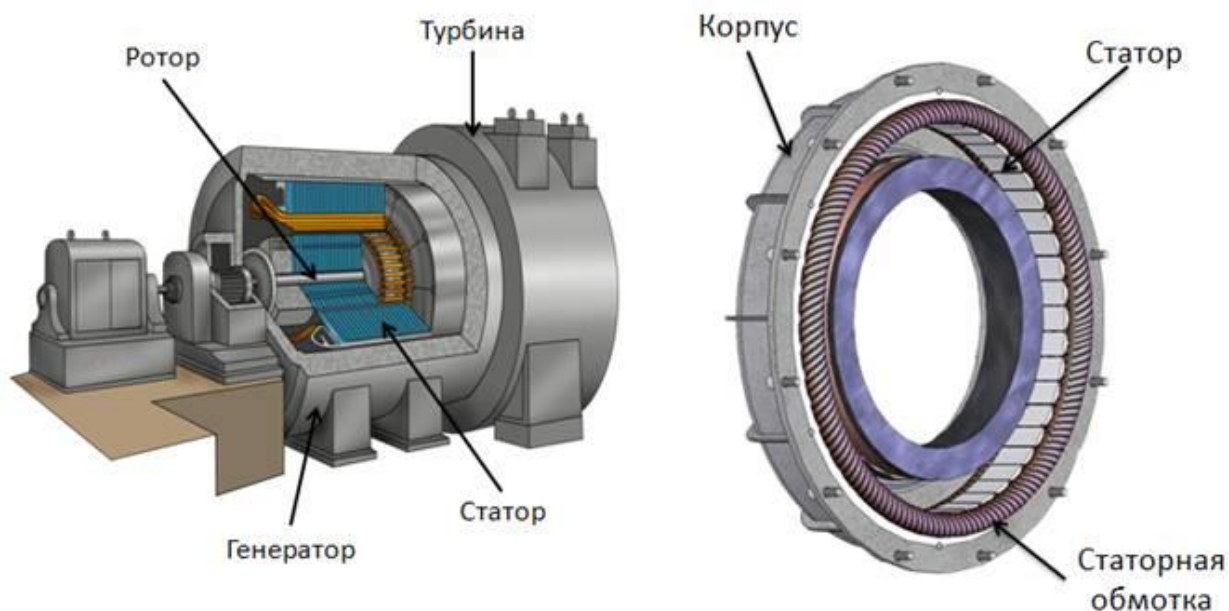
Ранее рассматривался пример получения индукционного тока в плоском контуре при вращении внутри него магнита. На этом принципе и работает электромеханической генератор переменного тока. Неподвижная часть генератора, аналогичная контуру, называется **статором**, а

вращающаяся, т.е. магнит, – **ротором**. В мощных промышленных генераторах вместо постоянного магнита используется электромагнит.

**Статор промышленного генератора** представляет собой стальную станину цилиндрической формы (**станина** – это основная несущая часть машины, на которой монтируются различные рабочие узлы, механизмы и прочее).

Во внутренней его части прорезаются пазы, в которые укладывается толстый медный провод. Именно в них и индуцируется переменный электрический ток при изменении пронизывающего их магнитного потока.

**Магнитное поле создается ротором. Он представляет собой электромагнит:** на стальной сердечник сложной формы надета обмотка, по которой протекает постоянный электрический ток. Ток к этой обмотке подводится через щетки и кольца от постороннего источника постоянного тока.



## Лекция №30

### Трансформатор. Производство, использование и передача электрической энергии.

#### План

1. Устройство и принцип действия трансформатора.
2. Производство, использование и передача электрической энергии.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называют трансформатором?
2. Можно ли трансформировать постоянный ток?
3. На каком принципе базируется работа трансформатора?
4. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
5. В чем заключается правило Ленца?
6. Из каких частей состоит трансформатор?
7. Какую обмотку называют первичной, вторичной?
8. Что называется магнитопроводом? Каково его строение?
9. Для чего сердечник трансформатора набирают из тонких стальных пластин, изолированных друг от друга?
10. Почему нагруженный трансформатор потребляет очень мало энергии?
11. В какой из обмоток понижающего трансформатора (первичной или вторичной) диаметр провода должен быть больше?
12. Как рассчитать коэффициент трансформации?
13. Какой режим работы трансформатора называется режимом холостого хода?
14. Какой режим работы трансформатора называется работой под нагрузкой?

## 1. Устройство и принцип действия трансформатора.

Основная часть электроэнергии в мире вырабатывается с помощью электромеханических индукционных генераторов переменного тока, создающими синусоидальное напряжение.

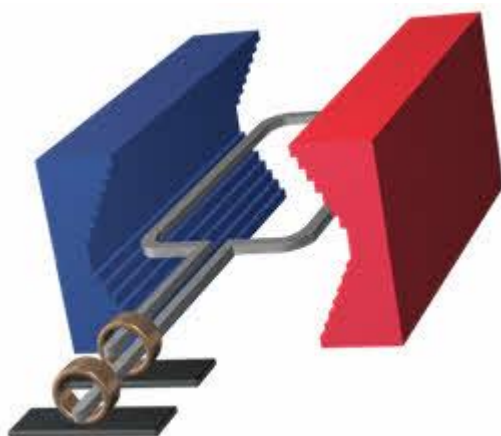
**Индукционным генератором переменного тока называется устройство, предназначенное для преобразования механической энергии в энергию переменного тока.**

Напомним, что основными частями индукционного генератора переменного тока являются:

индуктор – это постоянный магнит или электромагнит, который создаёт магнитное поле;

якорь – это обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС;

и коллѐктор – контактные кольца и скользящие по ним контактные пластины (щѐтки), с помощью которых ток снимается или подводится к вращающимся частям.



Вращающаяся часть индукционного генератора называется **ротором**, а неподвижная – **статором**.

Как вы знаете, электрический ток вырабатывается на различного рода электростанциях. А выработанная на них электроэнергия передаётся потребителю с помощью линий электропередач (сокращѐнно ЛЭП). Вроде бы всё просто, но тут есть несколько нюансов. Дело в том, что потребители электричества есть повсюду. А вот производится она в сравнительно немногих местах и, как правило, близко к источникам топливо- и гидроресурсов. Помимо этого электроэнергию невозможно законсервировать в огромных масштабах, поэтому она должна быть потреблена сразу же после получения. Поэтому существует необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния. Однако при передаче электроэнергии неизбежны потери энергии, так как ток, проходя по проводам линии, нагревает их.

Энергия тока, идущая на нагревание проводов линии передачи, является потерянной энергией.

Чтобы передача электрической энергии была экономически выгодной, необходимо потери на нагревание проводов сделать возможно малыми. Но как это осуществить? Закон Джоуля-Ленца указывает на два различных пути решения этой проблемы. Один путь – уменьшить сопротивление проводов линии передачи. Это можно сделать, взяв провода с большим сечением. Выясним на примере осуществимо ли это практически.

Пусть на электростанции установлен генератор постоянного тока мощностью 200 кВт, создающий напряжение 120 В. Требуется передать вырабатываемую генератором энергию на расстояние 10 км от станции. Какого сечения нужно взять медные провода, чтобы потери в линии передачи не превышали 10 % от передаваемой мощности?

ДАНО	РЕШЕНИЕ
$P = 2 \cdot 10^5 \text{ Вт}$	Ток, протекающий в ЛЭП: $I = \frac{P}{U} = \frac{2 \cdot 10^5 \text{ Вт}}{120 \text{ В}} \cong 1667 \text{ А}$ .
$U = 120 \text{ В}$	Потеря мощности в ЛЭП: $P_1 = \eta P = 0,1 \cdot 2 \cdot 10^5 \text{ Вт} = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт}$ .
$l = 1 \cdot 10^4 \text{ м}$	Сопротивление ЛЭП: $P_1 = I^2 R \Rightarrow R = \frac{P_1}{I^2} = \frac{2 \cdot 10^4 \text{ Вт}}{(1667 \text{ А})^2} \cong 0,0072 \text{ Ом}$ .
$\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Сопротивление ЛЭП: $R = \rho \frac{2l}{S} \Rightarrow S = \rho \frac{2l}{R} = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \cdot \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^4 \text{ м}}{0,0072 \text{ Ом}} \cong$
$d = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\cong 48\,611 \text{ мм}^2$ .
$\eta = 0,1$	Масса 1 м ЛЭП: $m = dLS = 8900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 1 \text{ м} \cdot 0,048611 \text{ м}^2 \cong 433 \text{ кг}$ .
$S = ?$	

**ОТВЕТ:** площадь провода ЛЭП примерно равна  $0,05 \text{ м}^2$ , а его масса — 8660 т.

Практически это значит, что такой способ передачи энергии невозможен.

Другой путь, ведущий к уменьшению потерь энергии в линии передачи, заключается в уменьшении тока в линии передачи. Но при данной мощности уменьшение тока возможно лишь при увеличении напряжения. Пусть теперь та же мощность в 200 кВт передаётся при напряжении 12 кВ. Тогда сила тока в линии электропередач составит примерно 16,67 А (то есть в сто раз меньше, чем в предыдущем случае). Так как величина тока уменьшилась в сто раз, то при тех же потерях мощности в ЛЭП сопротивление линии передачи увеличится в  $100^2$  раз, то есть в 10 000. А вот сечение проводов в 10 000 раз уменьшится и станет равным  $4,86 \text{ мм}^2$ . Значит и вес меди, идущей на изготовление провода, уменьшится в те же 10 000 раз. Следовательно, передача энергии станет практически возможной.

Таким образом, при передаче электроэнергии на большие расстояния необходимо пользоваться высоким напряжением. При этом, чем длиннее линия передачи, тем более высокое напряжение в ней используется.

Уменьшение потерь электроэнергии при ее передаче от электростанций к потребителям является важной народнохозяйственной задачей.

Из закона Джоуля-Ленца следует, что **уменьшить потери можно либо за счет уменьшения сопротивления проводов, либо уменьшения силы тока в них.**

**Сопротивление проводов будет тем меньше, чем больше площадь их поперечного сечения и чем меньше удельное сопротивление металла,** из которого они изготовлены. Провода делают из меди или алюминия, так как среди относительно недорогих металлов они обладают наименьшим удельным сопротивлением.

Увеличивать же толщину проводов экономически невыгодно, т.к. это ведет к перерасходу дорогостоящего цветного металла, а также возникновению трудностей при закреплении проводов на столбах. Поэтому такой способ снижения потерь практически невозможен.

Поэтому **существенного снижения потерь можно добиться только за счет уменьшения силы тока.**

Но приданной мощности уменьшение силы тока возможно лишь при увеличении напряжения.

Без такого преобразования силы тока и напряжения передача электроэнергии на большие расстояния становится невыгодной из-за существенных потерь.

Так, электроэнергия Волжской ГЭС передается в Москву при напряжении 500 кВ, от Саяно-Шушенской ГЭС – при напряжении 750 кВ. Хотя на самих электростанциях генераторы вырабатывают электрическую энергию при напряжениях, не превышающих 20 кВ.



Волжская ГЭС



Саяно-Шушенская ГЭС





Решение этой важнейшей технической задачи стало возможным только после изобретения трансформатора – устройства, служащего для преобразования силы и напряжения переменного тока при неизменной частоте.

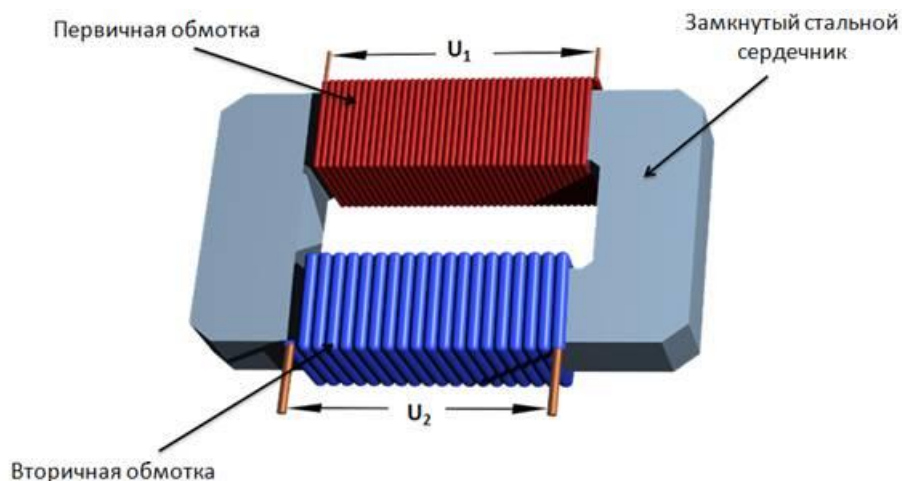
**Трансформатор – это устройство, служащее для преобразования силы и напряжения переменного тока при неизменной частоте.**

Днём рождения трансформатора переменного тока считается 30 ноября 1876 года – это дата получения патента Павлом Николаевичем Яблочковым на устройство, предназначенное для питания изобретённых им же электрических свечей – нового в то время источника света.



И так, первый трансформатор был изобретен в 1876 г. русским ученым Павлом Николаевичем Яблочковым. А первый технический трансформатор впервые создал Иван Филиппович Усагин в 1882 г.

В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Простейший трансформатор представляет собой две изолированные друг от друга катушки (их еще называют обмотками), намотанные на общий замкнутый сердечник. По одной из обмоток (первичной) пропускается преобразуемый переменный ток, а вторичная обмотка соединяется с потребителем.



Приложим к концам левой обмотки, которую мы будем называть **первичной**, переменное напряжение (от сети или генератора). По обмотке пойдёт переменный ток, который намагнитит сталь сердечника, создав в нём переменный магнитный поток. По мере нарастания тока будет расти и магнитный поток в сердечнике, изменение которого возбудит в витках катушки ЭДС самоиндукции, мгновенное значение которой равно первой производной магнитного потока через поверхность, ограниченную одним витком, по времени:

$$e = -\Phi'.$$

Переменный магнитный поток, возникающий в сердечнике трансформатора, пронизывает и витки вторичной обмотки, возбуждая в каждом из них такую же по величине ЭДС индукции, что и в каждом витке первичной обмотки.

Если первичная обмотка имеет  $N_1$  витков, а вторичная –  $N_2$  витков, то в обмотках индуцируются (без учёта потерь на рассеивание магнитного потока) соответственно электродвижущие силы «ЭДС один» и «ЭДС два»:

$$e_1 = N_1 e; e_2 = N_2 e.$$

Разделив почленно первое уравнение на второе, получим, что **возникающие в катушках ЭДС индукции (самоиндукции) пропорциональны числу витков в них:**

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Обычно активное сопротивление обмоток катушек очень мало и им часто пренебрегают. Поэтому приложенное к концам первичной обмотки напряжение можно считать примерно равным возникающей в ней ЭДС самоиндукции, взятой с обратным знаком:

$$|u_1| \approx |e_1|.$$

Если цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута (это так называемый **холостой ход трансформатора**), то тока в ней нет, и напряжение на зажимах вторичной обмотки, равно индуцированной в ней ЭДС взятой с обратным знаком:

$$|u_2| \approx |e_2|.$$

Мгновенные значения обеих ЭДС изменяются синфазно (то есть одновременно достигают максимумов и минимумов). Поэтому их значения можно заменить отношением действующих значений ЭДС или, учитывая предыдущие равенства, отношением действующих значений напряжений:



$$\frac{\xi_1}{\xi_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2} = K.$$

Величину  $K$ , равную отношению числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной обмотке, называют коэффициентом трансформации.

В том случае, когда нужно повысить напряжение, вторичная обмотка устраивается с большим числом витков (это **повышающий трансформатор**):

$$\frac{N_1}{N_2} = K < 1.$$

В случае же, когда надо понизить напряжение, вторичная обмотка трансформатора берётся с меньшим числом витков (это **понижающий трансформатор**):

$$\frac{N_1}{N_2} = K > 1.$$

Пока вторичная обмотка разомкнута, трансформатор работает холостую. При холостом ходе он потребляет небольшую энергию, так как ток, намагничивающий стальной сердечник вследствие большой индуктивности катушки, очень мал. Передача энергии из первичной цепи во вторичную при холостом ходе отсутствует.

Нагрузим наш трансформатор, замкнув через нагрузку цепь его вторичной обмотки (это так называемый **рабочий ход трансформатора**). В этом случае происходит непрерывная передача энергии из первичной обмотки трансформатора в его вторичную обмотку. При этом мощность, выделяемая в первичной цепи и выделяемая на нагрузке, будут определяться уравнениями:

$$P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1; P_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2.$$

Напомним, что здесь  $\cos \varphi$  определяет коэффициент мощности переменного тока. Зная мощности тока в первичной и вторичной цепи трансформатора, можно найти коэффициент полезного действия последнего:

$$\eta = \frac{I_2 U_2 \cos \varphi_2}{I_1 U_1 \cos \varphi_1}.$$

Согласно закону сохранения и превращения энергии, мощность тока во вторичной цепи должна бы быть равна мощности в первичной цепи:

$$I_1 U_1 \cos \varphi_1 = I_2 U_2 \cos \varphi_2.$$

В действительности же это равенство не соблюдается, так как при работе трансформатора имеются потери на нагревание обмоток

трансформатора, на вихревые токи в сердечнике и на перемагничивание сердечника; однако потери эти невелики и сдвиги фаз между колебаниями силы тока и напряжения близки к нулю.

Поэтому трансформатор принадлежит к числу наиболее совершенных преобразователей энергии. А их коэффициент полезного действия достигает девяноста девяти процентов (99 %).

Иногда потерями в трансформаторе можно пренебречь и считать его КПД равным 100 %. Тогда из равенства мощностей первичной и вторичной цепи следует, что **нагрузочные токи в первичной и вторичной обмотках трансформатора обратно пропорциональны приложенным к ним напряжениям:**

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Это означает, что, **повышая с помощью трансформатора напряжение в несколько раз, мы во столько же раз уменьшаем силу тока (и наоборот).**

Для закрепления материала, решим задачу.

Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 350 витков, включён в сеть с напряжением 220 В. Ко вторичной обмотке трансформатора, имеющей 155 витков, включён потребитель сопротивлением 80 Ом. Какова сила тока во вторичной цепи, если падение напряжения на потребителе равно 70 В? Чему равно сопротивление вторичной катушки?

ДАНО	РЕШЕНИЕ
$N_1 = 350$	Коэффициент трансформации: $K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{U_1 R}{U_2 R_2 + U_2 R} \Rightarrow R_2 = \frac{R(N_2 U_1 - N_1 U_2)}{N_1 U_2}$ .
$U_1 = 220 \text{ В}$	
$N_2 = 155$	Действующее значение ЭДС самоиндукции: $\xi_1 = U_1$ .
$R = 80 \text{ Ом}$	Закон Ома для полной цепи: $I_2 = \frac{\xi_2}{R_2 + R} \Rightarrow \xi_2 = I_2 R_2 + I_2 R = \frac{U_2}{R} R_2 + \frac{U_2}{R} R = \frac{U_2 R_2 + U_2 R}{R}$ .
$U_2 = 70 \text{ В}$	
$I_2 = ?$	Действующее значение силы тока во вторичной цепи: $I_2 = \frac{U_2}{R} = \frac{70 \text{ В}}{80 \text{ Ом}} \cong 0,9 \text{ А}$ .
$R_2 = ?$	
	$R_2 = \frac{80 \text{ Ом} \cdot (155 \cdot 220 \text{ В} - 350 \cdot 70 \text{ В})}{350 \cdot 70 \text{ В}} \cong 31,3 \text{ Ом}$

**ОТВЕТ:** сила тока примерно равна 0,9 А, а сопротивление вторичной катушки — 31,3 Ом.

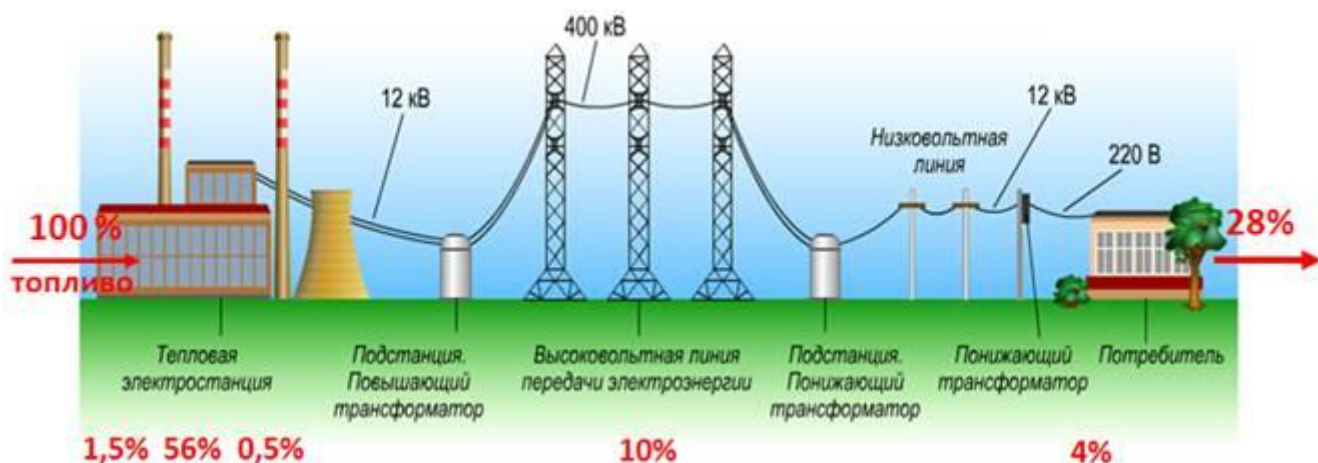
## 2. Производство, использование и передача электрической энергии.

Рассмотрим передачу электроэнергии от электростанции к месту ее потребления. Как говорилось ранее, напряжение, вырабатываемое генератором, обычно не превышает 25 киловольт. А для оптимальной

передачи электроэнергии на большие расстояния требуется напряжение порядка сотен киловольт. Поэтому ток с электростанции сначала подается на расположенную неподалеку повышающую трансформаторную подстанцию, где напряжение повышается до нескольких сотен киловольт, и под таким напряжением подается в линии электропередач. Поскольку такое высокое напряжение не может быть предложено потребителю, то в конце линии его подают поочередно на несколько трансформаторных подстанций, понижающих напряжение до 380 Вольт или 220 Вольт, а затем – на предприятия или в жилые дома.



Однако не вся энергия, вырабатываемая генератором, передается потребителю. Часть энергии тратится еще при ее производстве. Также, энергия теряется непосредственно в линии электропередач. При работе трансформатора так же имеются потери на нагревание обмоток трансформатора, на рассеивание магнитного потока в пространство, на вихревые токи Фуко в сердечнике и его перемагничивание.



Для уменьшения этих потерь принимаются следующие меры:

- 1) обмотка низкого напряжения делается большего сечения, так как по ней проходит ток большей силы;
- 2) сердечник делают замкнутым, что уменьшает рассеивание магнитного потока;
- 3) сердечник делают из изолированных пластин для уменьшения токов Фуко.

Благодаря этим мерам коэффициент полезного действия современных трансформаторов достигает 95-99%.

Следует добавить, что трансформаторы нашли широкое применение в быту. Например, при подзарядке сотового телефона имеющийся в зарядном устройстве трансформатор понижает напряжение, полученное из осветительной сети и равное 220 Вольт, до 5.5 Вольт, пригодного для телефона. В телевизоре имеется несколько трансформаторов (как понижающих, так и повышающих), поскольку для питания различных его узлов требуется напряжение от 1,5 В до 25 кВ.

## Лекция №31

### Механические волны. Характеристики волны.

#### План

1. Волновое движение. Поперечные и продольные волны.
2. Длина и скорость волны.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называют волной?
2. Какие волны называют упругими?
3. Опишите механизм образования волны.
4. Назовите основные особенности волнового движения.
5. Какие волны называют продольными? поперечными? В каких средах они распространяются?
6. Что называют периодом волны? частотой?
7. Что такое длина волны? От чего она зависит?
8. Какая формула связывает скорость распространения волны с длиной волны и частотой или периодом?

## 1. Волновое движение. Поперечные и продольные волны.

Механические колебания чрезвычайно распространены в природе и технике. Колеблется поршень в двигателе автомобиля, а вместе с ним колеблется (вибрирует) сам двигатель, колеблются земная кора во время землетрясения, воздух в духовых музыкальных инструментах, поверхность воды от брошенного в воду камня и т.д.

Каждый из нас наблюдал, как от камня, брошенного на спокойную поверхность пруда или озера, кругами разбегаются волны. Многие следили за морскими волнами, набегаящими на берег. Все читали рассказы о морских путешествиях, о чудовищной силе морских волн, легко раскачивающих большие корабли.

Волновые процессы чрезвычайно широко распространены в природе. По физической природе различают электромагнитные волны (например, радиоволны, свет) и механические волны.

Различны физические причины, вызывающие волновые движения. Но, подобно колебаниям, все виды волн описываются количественно одинаковыми или почти одинаковыми законами. Многие трудные для понимания вопросы становятся более ясными, если сравнивать различные волновые явления.

Если, возникнув в одном месте, колебания распространяются в соседние участки пространства, то говорят о волновом движении – волне. О том, что такое механическая волна и какие особенности имеет волновое движение, вы узнаете сегодня на занятии.

Отдельные частицы любого тела – твердого, жидкого или газообразного – взаимодействуют друг с другом. Поэтому если какая-либо частица тела начинает совершать колебательные движения, то в результате взаимодействия между частицами это движение начинает с некоторой скоростью распространяться во все стороны.

**Волна** – это колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени.

В воздухе, твердых телах и внутри жидкостей механические волны возникают благодаря действию сил упругости. Эти силы осуществляют связь между отдельными частями тела.

Образование волн на поверхности воды вызывают сила тяжести и сила поверхностного натяжения.

Наиболее отчетливо главные особенности волнового движения можно увидеть, если рассматривать волны на поверхности воды. Это могут быть, например, волны, которые представляют собой бегущие вперед округлые

валы. Расстояния между валами, или гребнями, примерно одинаковы. Однако если на поверхности воды, по которой бежит волна, находится легкий предмет, например лист с дерева, то он не будет увлекаться вперед волной, а начнет совершать колебания вверх и вниз, оставаясь почти на одном месте.

При возбуждении волны происходит процесс распространения колебаний, но не перенос вещества.

Возникшие в каком-то месте колебания воды, например от брошенного камня, передаются соседним участкам и постепенно распространяются во все стороны, вовлекая в колебательные движения все новые и новые частицы среды. Течение же воды не возникает, перемещаются лишь локальные формы ее поверхности.

Механические волны бывают двух видов: упругие волны (например, звуковые и сейсмические) и волны на поверхности жидкости. Мы остановимся на изучении только упругих механических волн.

Упругой механической волной называют распространение колебаний в упругой среде.

Среда называется упругой, если между её частицами существуют силы взаимодействия, препятствующие деформации этой среды.

Например, если взять длинный резиновый шнур, один конец которого закрепить, а другой привести в колебательное движение, то эти колебания постепенно передадутся другим частям шнура – по шнуру побежит волна (рис. 1).

Каждый участок шнура обладает массой и упругостью. При деформации шнура в любом его сечении появляются силы упругости. Эти силы стремятся вернуть шнур в исходное положение. За счет инертности участок колеблющегося шнура не останавливается в положении равновесия, а проходит его, продолжая двигаться до тех пор, пока силы упругости не остановят этот участок. Это будет в момент максимального отклонения от положения равновесия.

Рассмотрим процесс распространения такой волны на модели: представим резиновый шнур в виде системы одинаковых шариков (шарики моделируют частицы резины), соединенных упругими невесомыми пружинами (пружины моделируют упругое взаимодействие частиц). В этой модели инертные и упругие свойства разделены: масса сосредоточена в шарах, а упругость — в пружинках. Это разделение несущественно при рассмотрении волнового движения.

При отводе шарика 1 (конец шнура) от положения равновесия пружина растянется и на шарик 2 начнет действовать сила упругости, в результате чего шарик 2 тоже начнет движение. Поскольку шарик инертен, то его



движение начнется не сразу, а через определенный промежуток времени. Движение шарика 2 вызовет движение шарика 3.

Если привести шарик 1 в колебательное движение, то шарик 2 тоже начнет колебаться, но с некоторым опозданием; колебания шарика 2 повлекут колебания шарика 3, дальше шарика 4 и т. д.

В конце концов, все шарики начнут движение и будут колебаться с той же частотой, что и шарик 1, однако их колебания отличаться по фазе.

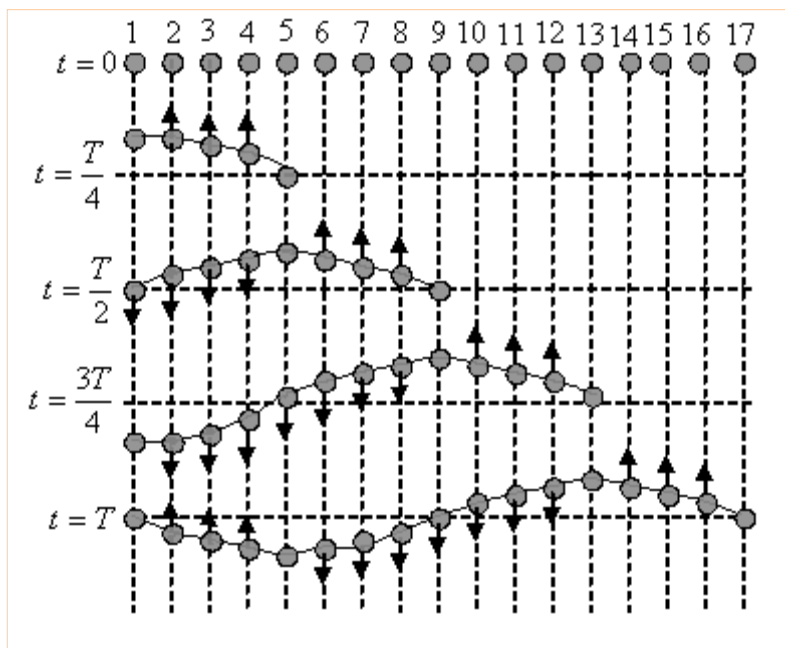


Рисунок 10 – Распространение колебаний в упругой среде

В общем виде механизм распространения упругой волны представляется следующим образом. Колеблющееся тело в упругой среде, источник волны, действует на прилегающие к нему частицы среды и вынуждает их совершать вынужденные колебания. При этом расстояния между частицами, которые колеблются, и соседними частицами то увеличиваются, то уменьшаются. В результате возникают силы упругости, которые сближают частицы среды, если они удаляются друг от друга, и наоборот – отталкивают эти частицы, если они сближаются.

Постепенно все частицы, одна за другой, приобщаются к колебательному движению – в среде распространяется волна.

Какие особенности имеет волновое движение?

Вернемся к модели упругого шнура (рис. 1) и выделим некоторые особенности волнового движения.

1. Любые волны берут свое начало от источника колебаний; колебания частиц в процессе распространения волны являются вынужденными, их частота равна частоте колебаний источника.



2. Волна распространяется в пространстве не мгновенно, а с определенной скоростью. После того как одна из частиц пришла в колебательное движение, другие частицы начинают колебаться не сразу, а через некоторое время.

3. Волновое движение не сопровождается переносом вещества – частицы среды только колеблются около некоторого положения равновесия. В любой механической волне одновременно существуют два вида движения: колебания частиц среды и распространение колебаний. Поскольку частицы среды могут совершать вынужденные колебания только тогда, когда им передается энергия, то при волновом движении происходит перенос энергии без переноса вещества. Эта энергия складывается из кинетической энергии движения частиц среды и потенциальной энергии их упругой деформации. Постепенное уменьшение амплитуды колебаний частиц при распространении волны связано с превращением части механической энергии во внутреннюю.

### **Поперечные и продольные волны.**

Обратите внимание на распространение волны в упругом шнуре: волна распространяется вдоль шнура, а отдельные частицы шнура колеблются перпендикулярно к распространению волны (рис. 2).

Скорость волны будет тем больше, чем сильнее натянут шнур. Волна добежит до точки закрепления шнура, отразится и побежит назад. В этом опыте при распространении волны происходят изменения формы шнура.

Волна, в которой частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны, называется **поперечной**.

В поперечной волне деформации представляют собой смещения одних слоев среды относительно других. Деформация сдвига вызывает появление сил упругости только в твердых телах, поэтому поперечные волны могут распространяться только в твердых телах.

Именно силы упругости и вызывают колебания частиц среды. Когда мы говорим о колебаниях частиц среды, то имеем в виду колебания малых объемов среды, а не колебания молекул.

Рассмотрим другой пример распространения волны. Возьмем длинную мягкую пружину и закрепим ее один конец. По второму концу пружины осуществим серию последовательных ударов и увидим, что колебания витков пружины будут передаваться вдоль шнура – по пружине начнет распространяться волна (рис. 2). Однако в этом случае отдельные витки пружины будут колебаться вдоль направления распространения волны, а не перпендикулярно к нему.

Волна, в которой частицы колеблются вдоль направления распространения волны, называется **продольной**.

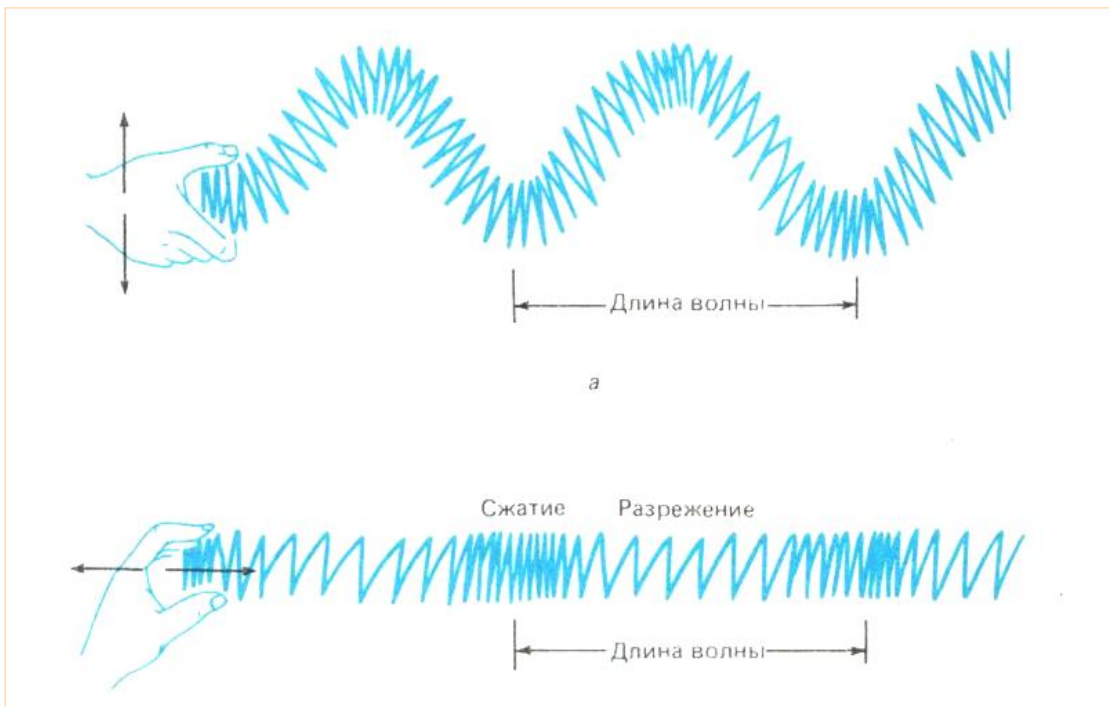


Рисунок 11 – Поперечные и продольные волны

В продольной волне деформации представляют собой сжатия или растяжения одних слоев среды относительно других. Но деформация сжатия всегда (в любой среде) сопровождается возникновением сил упругости. Поэтому продольные волны могут распространяться во всех средах (жидких, твердых, газообразных).

В твердых телах скорость продольных волн больше скорости поперечных.

Это учитывается при определении расстояния от очага землетрясения до сейсмической станции. Вначале на станции регистрируется продольная волна, так как ее скорость в земной коре больше, чем поперечной. Спустя некоторое время регистрируется поперечная волна, возбуждаемая при землетрясении одновременно с продольной. Зная скорости продольных и поперечных волн в земной коре и время запаздывания поперечной волны, можно определить расстояние до очага землетрясения.

## 2. Длина и скорость волны.

**Длина волны** – это расстояние между двумя ближайшими точками, которые колеблются в одинаковых фазах.

Длину волны обозначают символом  $\lambda$  и измеряют в метрах (м).

За время одного полного колебания (время, равное одному периоду колебаний) волна распространилась на расстояние, равное длине этой волны. Итак, можно дать еще одно определение длины волны:

**Длина волны** – это расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний.

Важнейшей характеристикой волны является скорость ее распространения. Волны любой природы не распространяются в пространстве мгновенно. Их скорость конечна. Можно себе, например, представить, что над морем летит чайка, причем так, что она все время оказывается над одним и тем же гребнем волны. Скорость волны в этом случае равна скорости чайки. Волны на поверхности воды удобны для наблюдения, так как скорость их распространения сравнительно невелика.

Поскольку скорость распространения волны для данной среды – величина постоянная, ее можно вычислить по формуле:  $v = \frac{S}{t}$ .

Если время равно периоду колебаний ( $t = T$ ), то расстояние, на которое распространится волна, равно длине волны ( $S = \lambda$ ), поэтому скорость распространения волны связана с длиной волны соотношением:  $v = \frac{\lambda}{T}$ .

Вспомним, что  $\frac{1}{T} = \nu$ , где  $\nu$  – частота колебаний частиц в волне, и запишем формулу волны:  $v = \lambda \cdot \nu$ .

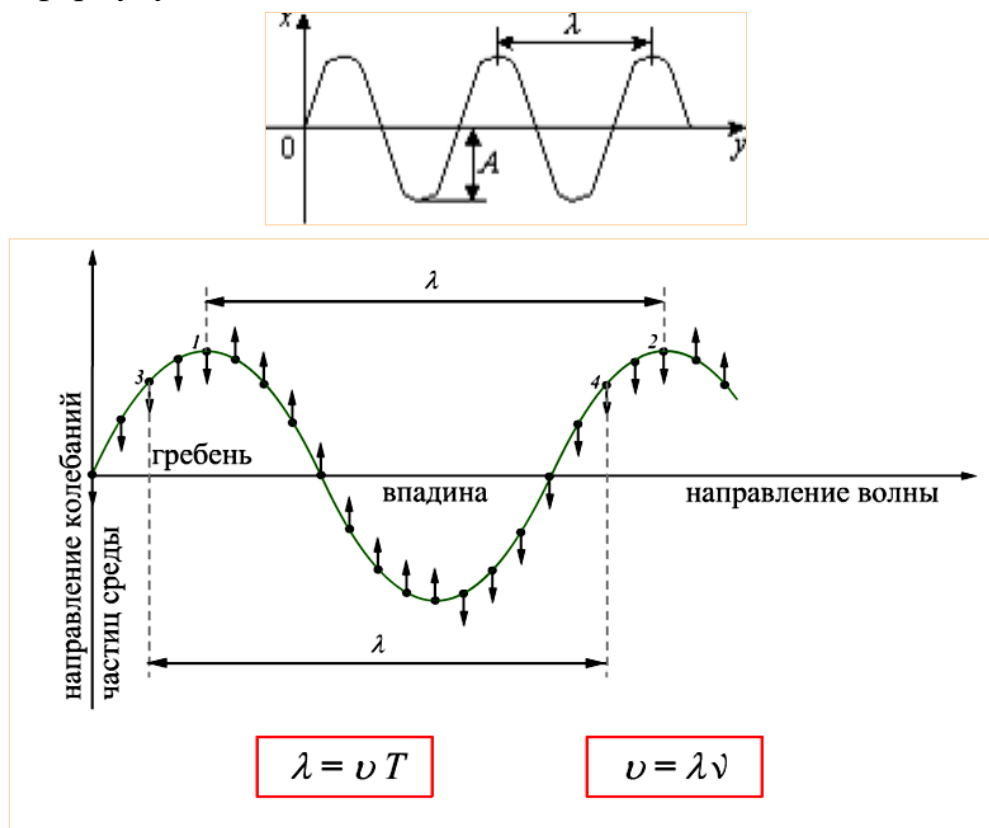


Рисунок 12 – Длина волны

Обратите внимание: скорость распространения волны в основном определяется упругими свойствами среды, в которой волна распространяется, поэтому, если волна (например, звуковая) переходит из одной среды в другую, то скорость ее распространения меняется. Частота колебаний частиц в волне определяется частотой колебаний источника волны, поэтому останется неизменной. Итак, согласно формуле волны в случае перехода волны из одной среды в другую длина волны меняется.

### **Задача**

Какая из величин и во сколько раз изменится при переходе звука из воздуха в воду: частота или длина волны? Скорость звука в воздухе 340 м/с, а в воде – 1400 м/с. (Длина волны увеличится в 4,1 раза.)

## Самостоятельное изучение. Распространение волн в упругих средах. Звуковые волны.

### План

1. Распространение волн в упругих средах. Уравнение гармонической бегущей волны.
2. Звуковые волны.

### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Какую волну называют плоской? сферической? как получить такие волны?
2. Что называют лучом? волновой поверхностью? фронтом волны?
3. Почему в газах и жидкостях не существует поперечных волн?
4. Какие колебания называют акустическими?
5. Что представляют собой звуковые волны?
6. Что является источником звука?
7. На какие виды делится звук?
8. Какова частота звуковой волны, воспринимаемая человеком?
9. От чего зависит скорость распространения звука?
10. Что называют музыкальным тоном?
11. Чем определяется громкость звука?
12. От чего зависит высота звука?
13. Что называют эхом?

## 1. Распространение волн в упругих средах.

На резиновом шнуре, по струне или в тонком стержне волны могут распространяться только по одному направлению – вдоль шнура, струны или стержня. Если же газ, жидкость или твердое тело сплошь заполняют некоторую область пространства (сплошная среда), то возникшие в одном месте колебания распространяются по всем направлениям.

Волна при распространении от какого-либо источника в сплошной среде постепенно захватывает все более обширные области пространства.

Энергия, которую несут с собой волны, с течением времени распределяется по все большей и большей поверхности. Поэтому энергия, переносимая через поверхность единичной площади за одну секунду, уменьшается по мере удаления от источника волн. Следовательно, уменьшается и амплитуда колебаний частиц среды по мере удаления от источника. Ведь энергия колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды его колебаний. Это справедливо для колебаний не только груза на пружине или какого-нибудь другого маятника, но и для любой частицы среды.

Таким образом, амплитуда волны в среде по мере удаления волны от источника обязательно уменьшается, даже если механическая энергия не превращается во внутреннюю за счет действия в среде сил трения.

### Уравнение гармонической бегущей волны

Выведем уравнение волны, которое позволит определить смещение каждой точки среды в любой момент времени при распространении гармонической волны. Сделаем это на примере волны, бегущей по длинному тонкому резиновому шнуру.

Ось  $Ox$  направим вдоль шнура, а начало отсчета свяжем с левым концом шнура. Смещение колеблющейся точки шнура от положения равновесия обозначим буквой  $s$ . Для описания волнового процесса нужно знать смещение каждой точки шнура в любой момент времени. Следовательно, надо знать вид функции

$$s = s(x, t).$$

Заставим конец шнура (точка с координатой  $x = 0$ ) совершать гармонические колебания с циклической частотой  $\omega$ . Колебания этой точки будут происходить по закону:

$$s = s_m \sin \omega t,$$

если начальную фазу колебаний считать равной нулю. Здесь  $s_m$  – амплитуда колебаний (рис. 1, а).

Колебания распространяются вдоль шнура (оси ОХ) со скоростью  $v$  и в произвольную точку шнура с координатой  $x$  придут спустя время.

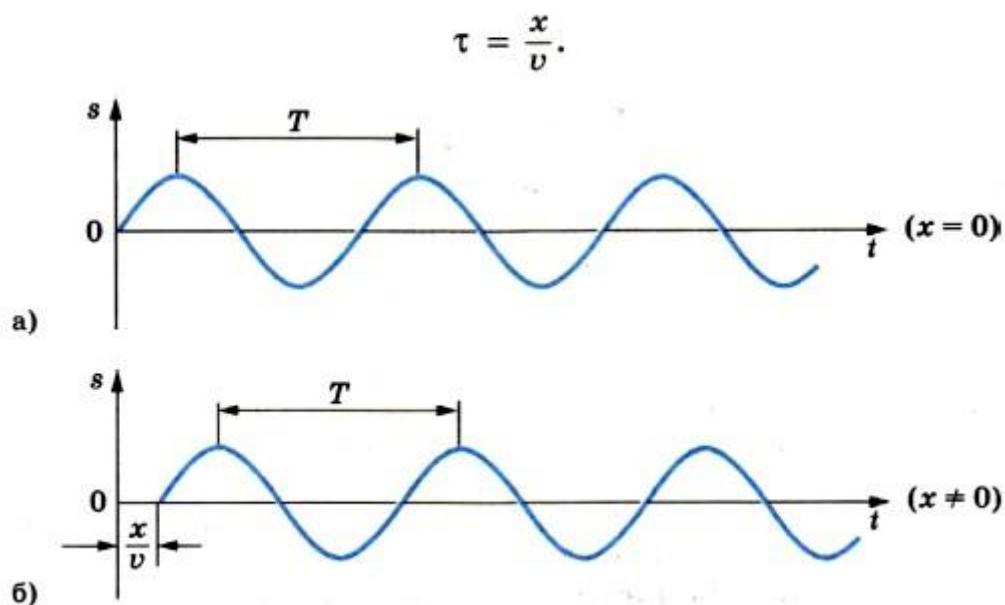


Рисунок 13

Эта точка также начнет совершать гармонические колебания с частотой  $\omega$ , но с запаздыванием на время  $\tau$  (рис. 1, б). Если пренебречь затуханием волны по мере ее распространения, то колебания в точке  $x$  будут происходить с той же амплитудой  $s_m$ , но с другой фазой:

$$s = s_m \sin(\omega(t - \tau)) = s_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right].$$

Это и есть **уравнение гармонической бегущей волны**, распространяющейся в положительном направлении оси ОХ.

**Плоская волна. Волновая поверхность и луч.** Исключение составляет так называемая плоская волна. Такую волну можно получить, если поместить в упругую среду большую пластину и заставить ее колебаться в направлении нормали к пластине. Все точки среды, примыкающие к пластине с одной стороны, будут совершать колебания с одинаковыми амплитудами и фазами. Эти колебания будут распространяться в виде волн в направлении нормали к пластине, причем все частицы среды, лежащие в плоскости, параллельной пластине, будут колебаться в одной фазе. Поверхность равной фазы называется **волновой поверхностью**. В случае плоской волны волновые поверхности представляют собой плоскости (рис. 2).

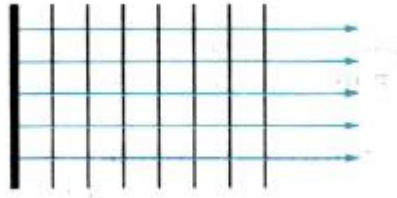


Рисунок 14 – Волновая поверхность плоской волны

Так как все точки, принадлежащие одной волновой поверхности, колеблются одинаково, то уравнение плоской бегущей волны будет иметь вид

$$s = s_m \sin \left[ \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \right],$$

где  $s$  – смещение всех точек волновой поверхности в данный момент времени, а ось  $X$  совпадает с направлением распространения волны и, соответственно, перпендикулярна волновой поверхности.

Волна может считаться плоской лишь приближенно (на краях волновые поверхности искривляются).

Линия, нормальная к волновой поверхности, называется **лучом**. Под направлением распространения волн понимают направление именно лучей. Лучи для плоских волн представляют собой параллельные прямые (см. рис. 2). Вдоль лучей происходит перенос энергии.

При распространении плоской волны размеры волновых поверхностей по мере удаления от пластины не меняются (или почти не меняются). Поэтому энергия волны не рассеивается в пространстве и амплитуда колебаний частиц среды уменьшается только за счет действия сил трения.

На поверхности воды легко получить **линейные волны**, которые дают наглядное представление о плоских волнах в пространстве. Для этого нужно стержень, слегка касающийся поверхности воды, заставить колебаться в направлении, перпендикулярном поверхности воды. Все частицы воды, находящиеся на прямой, параллельной стержню, будут колебаться в одинаковой фазе (рис. 3).



Рисунок 15 – Плоская волна

**Фронт волны** называется геометрическое место точек, до которых дошли возмущения в данный момент времени. Фронт волны отделяет часть пространства, в которой возникли колебания, от той части пространства, в



которой колебаний нет. Волновых поверхностей существует сколько угодно много, фронт волны один. Очевидно, что фронт волны – волновая поверхность, на которой фаза колебаний равна нулю.

**Сферическая волна.** Другой пример волны в сплошной среде – это **сферическая волна**. Она возникает, если поместить в среду пульсирующую сферу (рис. 4). В этом случае волновые поверхности являются сферами. Лучи направлены вдоль продолжений радиусов пульсирующей сферы.

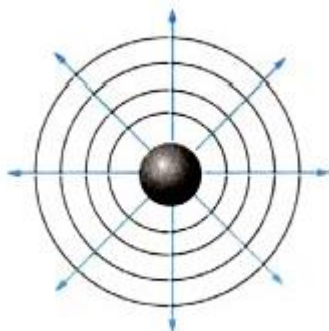
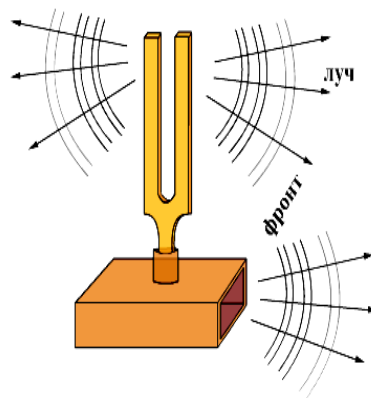
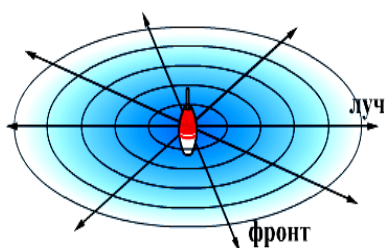


Рисунок 16 – Сферическая волна

Амплитуда колебаний частиц в сферической волне обязательно убывает по мере удаления от источника. Энергия, излучаемая источником, в этом случае равномерно распределяется по поверхности сферы, радиус которой непрерывно увеличивается по мере распространения волны.

Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковых фазах, называют волновой поверхностью. Переднюю волновую поверхность называют фронтом волны. Линию, вдоль которой происходит распространение фронта волны, называют лучом.



## 2. Звуковые волны.

Волны на поверхности воды или на резиновом шнуре можно непосредственно увидеть. В прозрачной среде – воздухе или жидкости – волны невидимы. Но при определенных условиях их зато можно слышать.

**Возбуждение звуковых волн.** Если длинную стальную линейку зажать в тисках или плотно прижать к краю стола, то, отклонив конец линейки от положения равновесия, мы возбудим ее колебания (рис. 5, а). Но эти колебания не будут восприниматься нашим ухом. Если, однако, укоротить выступающий конец линейки (рис. 5, б), то мы обнаружим, что линейка начнет звучать. Дело здесь вот в чем.

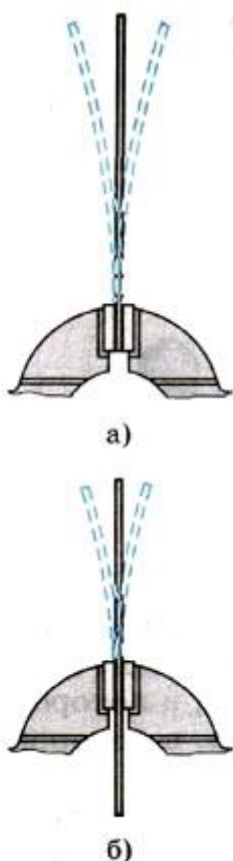


Рисунок 17

Пластина в ходе колебаний вдоль нормали к ней сжимает прилегающий к одной из ее сторон слой воздуха и одновременно создает разрежение с другой стороны. Эти сжатия и разрежения чередуются во времени и распространяются в обе стороны в виде упругих продольных волн. Одна из них достигает нашего уха и вызывает вблизи него периодические колебания давления, которые воздействуют на слуховой аппарат.

Ухо человека воспринимает в виде звука колебания, частота которых лежит в пределах от 17 до 20000 Гц. Такие колебания называются **акустическими**.

**Акустика** – это учение о звуке. Чем короче выступающий конец линейки, тем больше частота его колебаний. Поэтому мы и начинаем слышать звук, когда выступающий конец стальной линейки становится достаточно коротким.

Любое тело (твердое, жидкое или газообразное), колеблющееся со звуковой частотой, создает в окружающей среде звуковую волну.

### **Звуковые волны в различных средах.**

Чаще всего звуковые волны достигают наших ушей по воздуху. Довольно редко мы оказываемся погруженными целиком, вместе с ушами, в воду. Но, конечно, воздух не имеет каких-либо особых преимуществ по сравнению с другими средами в смысле возможности распространения в нем звуковых волн. Звук распространяется в воде и твердых телах. Нырнув с головой во время купания, вы можете услышать звук, например, от удара двух камней, производимого в воде на большом расстоянии (рис. 6).

Хорошо проводит звук земля. Русский историк Н. М. Карамзин сообщает, что Дмитрий Донской перед Куликовской битвой, приложив ухо к земле, услышал топот копыт конницы противника, когда она еще не была видна.

Если поднести вплотную к уху конец длинной деревянной линейки и слегка постучать по другому ее концу ручкой, то будет отчетливо слышен звук. Отодвинув же линейку немного от уха, вы обнаружите, что звук почти перестает быть слышимым.



Рисунок 18

В вакууме звуковые волны распространяться не могут. Для доказательства этого можно, например, электрический звонок поместить под колокол воздушного насоса. По мере того как давление воздуха под колоколом уменьшается, звук будет ослабевать до тех пор, пока не прекратится совсем.

Плохо проводят звук такие материалы, как войлок, пористые панели, прессованная пробка и т. д. Эти материалы используют для звукоизоляции, т. е. для защиты помещений от проникновения в них посторонних звуков.

**Значение звука.** Для того чтобы мы могли уверенно ориентироваться в мире, наш мозг должен получать информацию о том, что происходит вокруг нас. Зрение и слух играют в этом главную роль. Осязание, обоняние и вкусовые ощущения менее существенны.

Конечно, наибольшее количество информации мы получаем с помощью света. Испущенный источниками (солнцем, лампой и т. д.) свет отражается от окружающих предметов и, попадая в глаз, позволяет нам судить об их положении и движении. Многие предметы светятся сами.

Отраженные от предметов звуковые волны или волны, испускаемые звучащими предметами, также дают нам сведения об окружающем мире. Но главное – это речь. Мы создаем и воспринимаем звуковые волны и тем самым общаемся друг с другом.

Прослушивая с помощью специальных устройств, например медицинского фонендоскопа, звуки в организме, можно получать важные сведения о работе сердца и других внутренних органов.

**Скорость звука.** Звуковые волны, подобно всем другим волнам, распространяются с конечной скоростью. Обнаружить это можно так. Свет распространяется с огромной скоростью – 300 000 км/с. Поэтому вспышка от выстрела почти мгновенно достигает глаз. Звук же выстрела приходит с заметным запаздыванием. То же самое можно заметить, наблюдая с большого расстояния игру в футбол. Вы видите удар по мячу, а звук от удара приходит спустя некоторое время. Все, вероятно, замечали, что вспышка молнии предшествует раскату грома. Если гроза далеко, то время запаздывания грома достигает нескольких десятков секунд. Наконец, из-за конечной скорости звука появляется эхо. Эхо – это звуковая волна, отраженная от опушки леса, крутого берега, здания и т. д.

Скорость звука в воздухе при 0 °С равна 331 м/с. Это довольно большая скорость. Лишь совсем недавно самолеты начали летать со скоростями, превышающими скорость звука.

Скорость звука в воздухе не зависит от его плотности. Она примерно равна средней скорости теплового движения молекул и, подобно ей, пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры. Чем больше масса молекул газа, тем меньше скорость звука в нем. Так, при 0 °С скорость звука в водороде 1270 м/с, а в углекислом газе 258 м/с.

В жидкости скорость звука больше, чем в газе. Впервые скорость звука в воде была измерена в 1827 г. на Женевском озере в Швейцарии. На одной лодке поджигали порох и одновременно ударяли в подводный колокол (рис. 7, а). Другая лодка находилась на расстоянии 14 км от первой. Звук колокола улавливался с помощью рупора, опущенного в воду (рис. 7, б). По разности времени между вспышкой света и приходом звукового сигнала определили скорость звука. При температуре 8 °С скорость звука в воде равна 1435 м/с.



Рисунок 19

В твердых телах скорость звука еще больше, чем в жидкостях. Например, в стали скорость звука при 15 °С равна 4980 м/с. То, что скорость

звука в твердом теле больше, чем в воздухе, можно обнаружить так. Если ваш помощник ударит по одному концу рельса, а вы приложите ухо к другому концу, то будут слышны два удара. Сначала звук достигает уха по рельсам, а затем по воздуху.

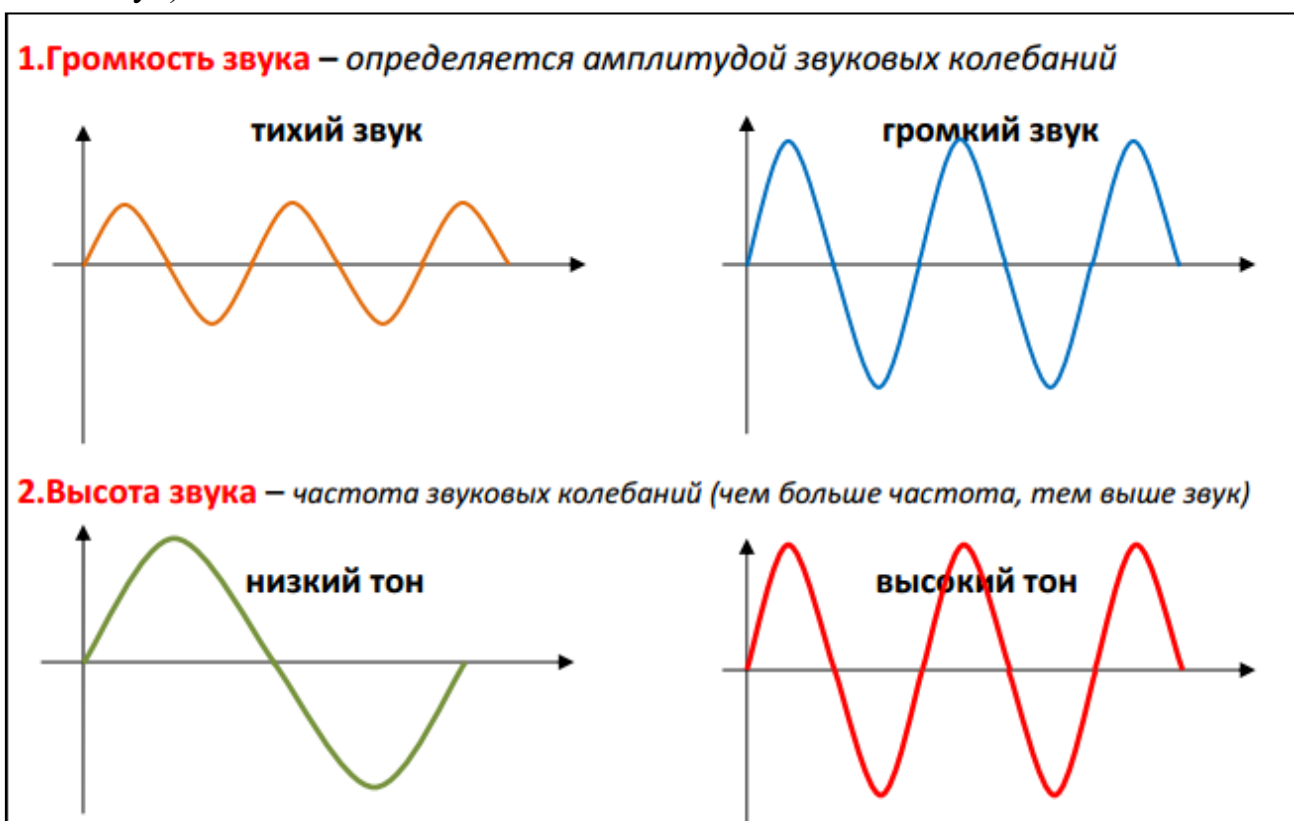
По известной частоте колебаний и скорости звука в воздухе можно вычислить длину звуковой волны. Самые длинные волны, воспринимаемые ухом человека, имеют длину волны  $\lambda \approx 19$  м, а самые короткие – длину волны  $\lambda \approx 17$  мм.

**Музыкальный тон** – звук, передаваемый гармонически колеблющимся телом. У каждого тона (до, ре, ми, фа, соль, ля, си) своя частота и длина волны

**Шум** – это хаотическая смесь тонов

**Громкость звука** – определяется амплитудой звуковых колебаний  
тихий звук громкий звук.

**Высота звука** – частота звуковых колебаний (чем больше частота, тем выше звук) низкий тон высокий тон.



**Эхо** – отражение звуковой волны от препятствий.

## Лекция №32

### Излучение электромагнитных волн. Опыты Герца.

#### План

1. Электромагнитные волны и скорость их распространения.
2. Образование электромагнитных волн.
3. Свойства электромагнитной волны. Энергия электромагнитной волны.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называется электромагнитной волной?
2. Почему закрытый колебательный контур плохо излучает электромагнитные волны?
3. Как должна двигаться частица, чтобы излучать электромагнитные волны?
4. Как ориентированы векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  относительно друг друга в электромагнитной волне?
5. Что необходимо сделать, чтобы колебательный контур хорошо излучал электромагнитные волны?
6. Какие факты свидетельствуют о переносе энергии электромагнитными волнами?
7. Какой физический смысл плотности потока излучения?
8. Каким образом построена шкала электромагнитных излучений? Существует ли в ней предел ее начала или конца?
9. На какие диапазоны разделяют шкалу электромагнитных волн?
10. Какие особые свойства имеет каждый из диапазонов электромагнитных волн?

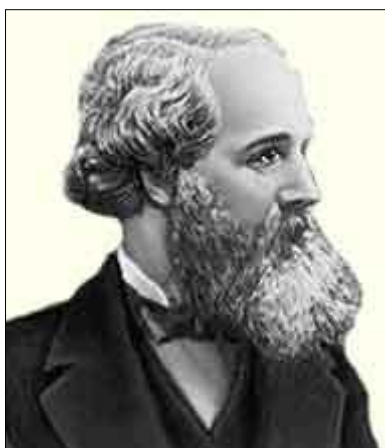


## 1. Электромагнитные волны и скорость их распространения.

Электрический заряд, движущийся в вакууме равномерно, не излучает энергии. Это следует из принципа относительности, который заключается в равноправии всех инерциальных систем отсчета. В системе, которая движется с зарядом, он неподвижен, а неподвижные заряды не излучают.

Другая картина возникает в случае, когда заряд под действием внешних сил движется с ускорением. Поле, имеет энергию, а значит и массу, образно говоря, отрывается от заряда и излучается в пространство со скоростью света. Излучение происходит, пока на заряд действует внешняя сила, что придает ему ускорение.

Только заряды, движущиеся с ускорением, могут передавать энергию с участием создаваемого ими электромагнитного поля.



Джеймс МАКСВЕЛЛ (1831-1879)  
Выдающийся английский ученый. Создал теорию электромагнитного поля и сделал вывод о его распространение в виде электромагнитных волн со скоростью света. Разработал электромагнитную теорию света. Ему принадлежат крупные открытия и в других областях физики, в частности в области молекулярно-кинетической теории газов.

Различные виды механических волн, как поперечные, так и продольные могут распространяться только в непрерывной среде, в твердых телах, жидкостях и газах. В вакууме механические волны распространяться не могут. Максвелл на основании изучения экспериментальных работ Фарадея по электричеству и магнетизму в 1864 г. выдвинул гипотезу о существовании в природе особых волн, способных распространяться в вакууме. Эти волны Максвелл назвал **электромагнитными волнами**.

Для выдвижения гипотезы о возможности возникновения электромагнитных волн Максвелл имел основания: открытие индукционного тока Фарадеем. Максвелл объяснил появление индукционного тока возникновением вихревого электрического поля при любом изменении магнитного поля. Затем он предположил, что электрическое поле обладает такими же свойствами: при любом изменении электрического поля в окружающем пространстве возникает вихревое магнитное поле.

Процесс взаимного порождения магнитного и электрического полей, который однажды начался, должен дальше непрерывно продолжаться и охватывать все новые и новые области в окружающем пространстве. Процесс

распространения переменных магнитного и электрического полей и есть электромагнитная волна (рис. 1).

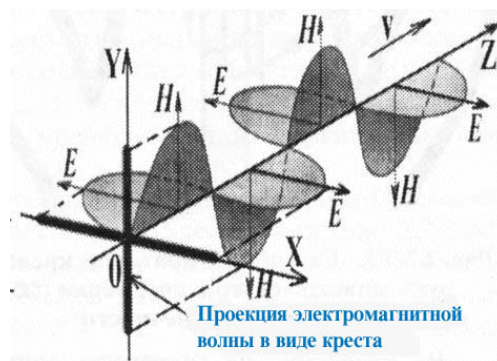
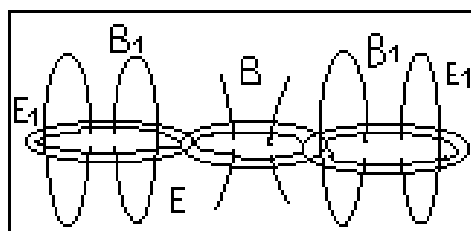
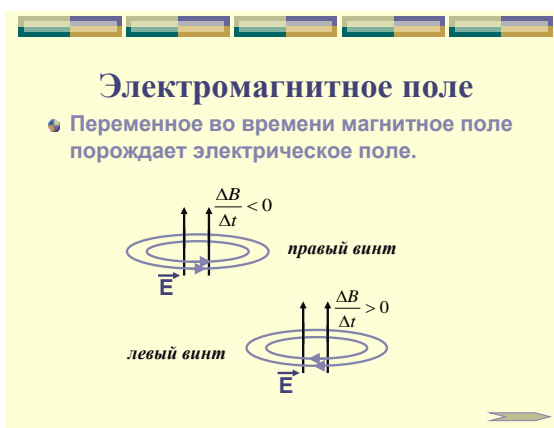


Рисунок 1. Процесс распространения переменных магнитного и электрического полей

При увеличении магнитной индукции вектор  $\vec{A}$  образует левый винт, при уменьшении напряженности электрического поля вектор  $\vec{A}$  образует правый винт. В случае возбуждения электрическим полем магнитного – правила применяются наоборот.



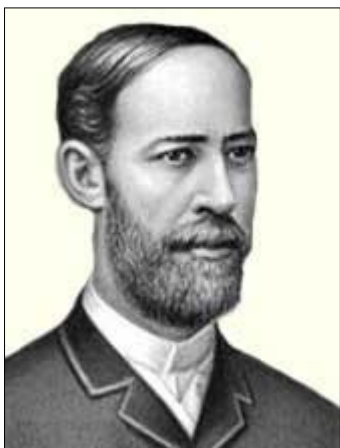
Утверждение, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, не имеет смысла, если не указать, по отношению к какой системе отсчета эти поля рассматриваются.

Электрические и магнитные поля – проявление единого электромагнитного поля.

Электромагнитные волны могут существовать и распространяться в вакууме.

**Условие возникновения электромагнитных волн.** Для образования интенсивных электромагнитных волн необходимо создать электромагнитные колебания достаточно высокой частоты. Изменения электромагнитного поля происходят при изменении силы тока в проводнике, а сила тока в проводнике изменяется при изменении скорости движения электрических зарядов в нем, то есть при движении зарядов с ускорением. Итак, электромагнитные волны должны возникать при ускоренном движении электромагнитных зарядов.





Генрих ГЕРЦ (1857-1894)

Выдающийся немецкий физик, который в 1886 г. экспериментально доказал существование электромагнитных волн и исследовал их свойства. Он установил тождественность основных свойств электромагнитных и световых волн. В 1886 г. ученый впервые наблюдал фотоэффект.

Электромагнитные волны были впервые экспериментально получены Герцем в 1887 г. В его опытах ускоренное движение электрических зарядов возбуждался в двух металлических стержнях с шарами на концах (вibrator Герца) (рис. 2).

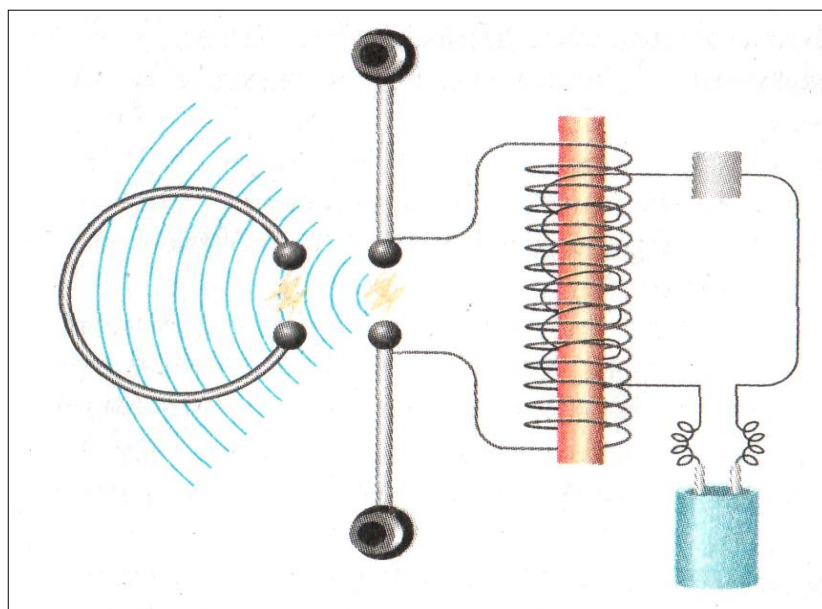
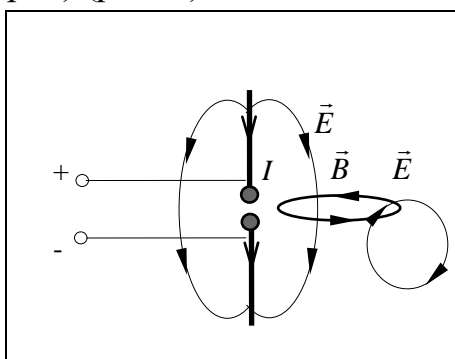


Рисунок 2. Вибратор Герца

**Электромагнитная волна** – это процесс распространения в пространстве со временем свободного электромагнитного поля.

Поскольку в электромагнитной волне  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  меняются во взаимно перпендикулярных плоскостях, перпендикулярных направлению

распространения (рис. 3), электромагнитная волна является поперечной волной.

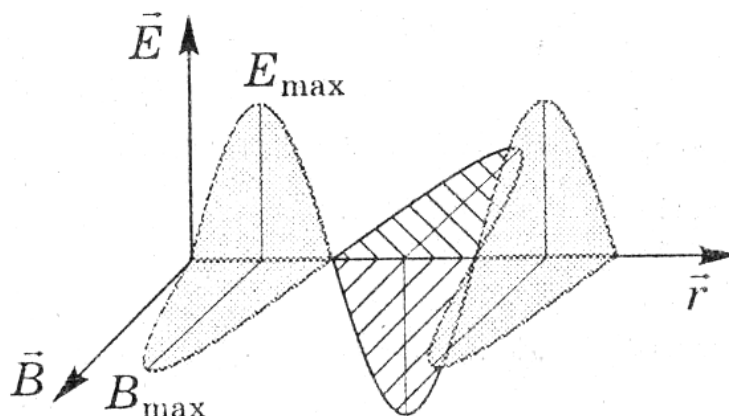


Рисунок 3. Поперечность электромагнитной волны

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме, определяется выражением:  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ ,  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с.

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/Н·м<sup>2</sup>)

$\mu_0$  – магнитная постоянная ( $1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м)

Колебания электрических зарядов в вибраторе создают электромагнитную волну. Только колебания в вибраторе создает не одна заряженная частица, а огромное число электронов, которые движутся согласованно. В электромагнитной волне векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны друг другу. Вектор  $\vec{E}$  лежит в плоскости, проходящей через вибратор, а вектор  $\vec{B}$  перпендикулярен этой плоскости. Излучение волн происходит с максимальной интенсивностью в направлении, перпендикулярном оси вибратора. Вдоль оси излучение не происходит.

В обычном колебательном контуре (его можно назвать закрытым), почти все магнитное поле сосредоточено внутри катушки, а электрическое внутри конденсатора. Вдали от контура электромагнитного поля практически нет. Такой контур очень слабо излучает электромагнитные волны.

Для получения электромагнитных волн Герц использовал простое устройство, называемое сейчас вибратором Герца. Это устройство представляет собой открытый колебательный контур. К открытому колебательному контуру можно перейти от закрытого, если постепенно раздвигать пластины конденсатора, уменьшая их площадь и одновременно уменьшая количество витков в катушке. В конце концов получится прямой провод. Это и есть открытый колебательный контур. Емкость и индуктивность вибратора Герца мала. Поэтому частота колебаний относительно велика. В опытах Герца длина волны составляла несколько

десятков сантиметров. Вычислив собственную частоту электромагнитных колебаний вибратора, Герц смог определить скорость электромагнитной волны по формуле:  $v = \lambda \nu$ .

Она оказалась примерно равна скорости света:  $c \approx 300000$  км/с. Опыт Герца блестяще подтвердили предсказания Максвелла.

## 2. Образование электромагнитных волн.

Любая цепь переменного тока излучает энергию. Однако обычный колебательный контур излучает крайне слабо. Это происходит по двум причинам:

- 1) недостаточно высокая частота (интенсивность излучения пропорциональна частоте в четвертой степени);
- 2) волны, излучаемые различными участками контура, находятся в противофазе и гасят друг друга.

Контур, который не излучает в пространство электрической энергии, называется, закрытым.

Чтобы сделать излучение более интенсивным, нужно существенно повысить частоту. Если делать выводы на основании формулы  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , для этого надо уменьшить  $L$  и  $C$ .

Чтобы колебательный контур хорошо излучал электромагнитные волны необходимо увеличить объем пространства, в котором происходит образование электромагнитного поля. Для этого контур необходимо развернуть (сделать открытым). Проще всего достичь раздвижением пластин конденсатора на максимально возможное расстояние (рис. 4).

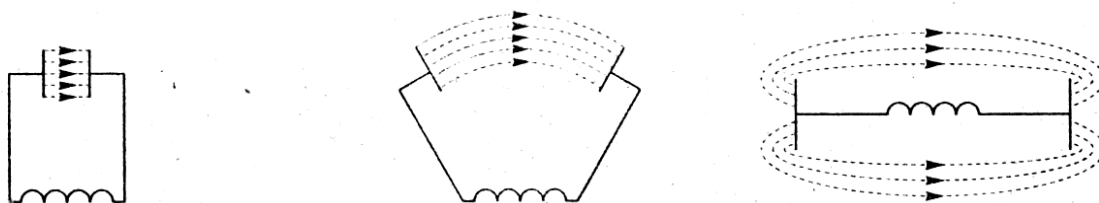


Рисунок 4. Последовательные фазы получения открытого колебательного контура

С помощью колебательного контура можно получить электромагнитное излучение необходимой мощности, не раздвигая обкладок конденсатора. С этой целью одну сторону контура следует заземлить, а ко второму подключить натянутый вертикально провод, оставив его верхний конец свободным (рис. 5). В результате переменные электрическое и магнитное поля охватывают пространство между вертикальным проводом и землей и мощность излучения такого контура сильно возрастает. Такое

устройство называют антенной, а колебательный контур, снабженный антенной, – открытым.

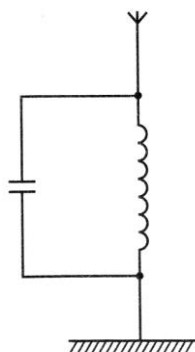


Рисунок 5. Открытый колебательный контур

Для непрерывного излучения в пространство электромагнитных волн вибратором или антенной необходимо создавать в них незатухающие электромагнитные колебания. Это можно сделать, осуществив индуктивную связь между вибратором и катушкой индуктивности высокочастотного генератора (рис. 6).

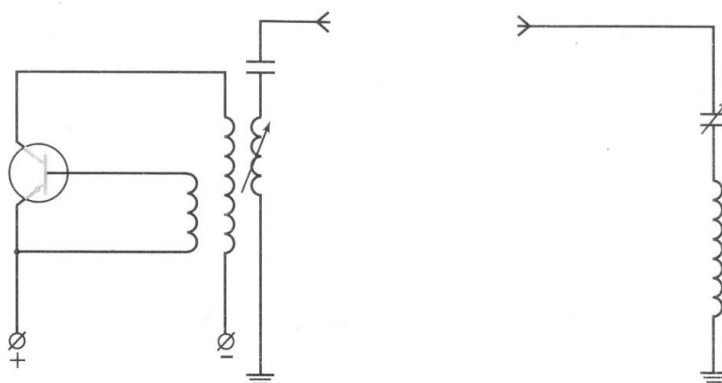


Рисунок 6. Индуктивная связь между вибратором и катушкой индуктивности высокочастотного генератора

В вибраторе индуцируется ток высокой частоты, которая совпадает с частотой колебаний тока в генераторе. Амплитуда колебаний в вибраторе будет наибольшей, если частота собственных колебаний будет совпадать с частотой генератора (резонанс). При этом будет максимальной и интенсивность излучаемых вибратором электромагнитных волн. Поэтому всегда добиваются, чтобы вибратор был настроен в резонанс с генератором электрических колебаний.

Следовательно, чтобы получить интенсивные электромагнитные волны, необходимо иметь генератор незатухающих колебаний и излучатель волн (вибратор или антенну). Излучатель должен быть каким-то образом

связан с генератором (например, индуктивно), чтобы электрические колебания от генератора передавались к нему.

Прием электромагнитных волн осуществляется с помощью таких же открытых колебательных контуров – вибраторов или антенн, подобных излучающему контуру (рис. 5). Под действием переменного электрического поля электромагнитной волны в приемном контуре возникают электромагнитные колебания. Для хорошего приема необходимо, чтобы приемный колебательный контур был настроен в резонанс с передающим контуром, то есть собственная частота колебаний контура приемной антенны была близка к частоте колебаний контура передающей антенны. Настройка приемного контура в резонанс осуществляется конденсатором переменной емкости или катушкой переменной индуктивности.

### 3. Свойства электромагнитной волны. Энергия электромагнитной волны.

Электромагнитные волны поглощаются, отражаются и преломляются подобно всем другим видам волн и имеют такие свойства:

1. поглощение;
2. отражение;
3. преломление;
4. поперечность.

Как известно, электромагнитная волна переносит энергию. Энергия электромагнитной волны состоит из энергий электрического  $W_y$  и магнитного  $W_m$  полей:  $W = W_y + W_m$ .

Энергия электрического поля заряженного конденсатора равна:

$$W_y = \frac{CU^2}{2}$$

Подставляя в эту формулу выражения для емкости плоского конденсатора ( $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$ ) и разности потенциалов между обкладками ( $U = Ed$ ) получаем:  $W_a = \frac{\epsilon\epsilon_0 SE^2}{2} d = \frac{1}{2} \epsilon\epsilon_0 E^2 V$ , где  $V = dS$  – объем конденсатора.

Энергия магнитного поля катушки:  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ . Индуктивность катушки равна,  $L = \mu\mu_0 \frac{n^2 S}{l}$  где  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества сердечника,  $n$  – количество витков,  $S$  – площадь поперечного сечения провода,  $l$  – его длина.

Если по катушке проходит ток силой  $I$ , то индукция магнитного поля внутри катушки  $B = \mu\mu_0 \frac{nI}{l}$ , откуда  $I = \frac{Bl}{\mu\mu_0}$ .

Таким образом, для энергии магнитного поля мы получаем выражение:  $W_i = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} lS = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V$ , где  $V = lS$  – объем катушки индуктивности.

Следовательно, энергия электромагнитной волны равна:

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 V + \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V.$$

**Плотность энергии электромагнитной волны.** Плотность энергии электромагнитной волны можно вычислить, разделив выражение для  $W_e$  и выражение для  $W_m$  на объем, занимаемый электрическим полем, и объем, занимаемый магнитным полем, соответственно:  $w = w_e + w_m = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu\mu_0} B^2$ .

Поскольку энергия и плотность энергии электромагнитной волны являются функцией напряженности электрического и магнитного полей, то скорость передачи энергии в пространстве равна скорости распространения поля.

Плотностью потока излучения называется произведение плотности энергии электромагнитной волны и скорости ее распространения:

$$J = wv = v \left( \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu\mu_0} B^2 \right).$$

Плотность потока излучения численно равна энергии, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярно к направлению распространения энергии.

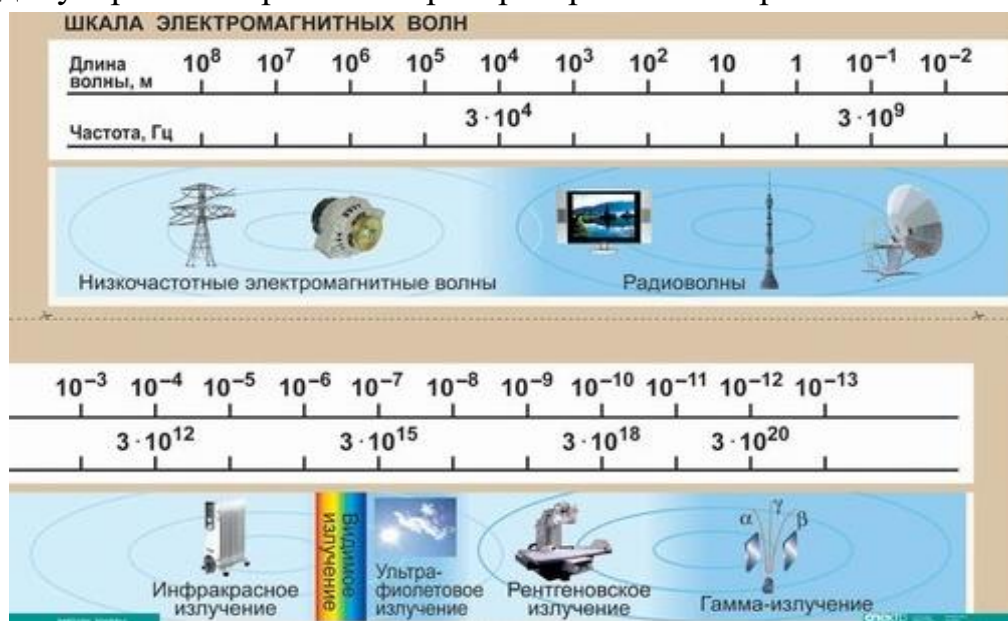


Рисунок 7. Шкала электромагнитных волн

## Тема 6. Оптика

### Лекция №33

#### Скорость света и методы её определения

##### План

1. Развитие взглядов на природу света.
2. Методы определения скорости света.

##### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

##### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называют волной?
2. Какие виды волн в зависимости от их физической природы вы знаете?
3. В чем существенное отличие электромагнитных волн от механических?
4. Чему равна скорость электромагнитной волны в вакууме?
5. Что называют лучом?
6. Как распространяется свет в однородной среде?
7. Какое явление служит доказательством прямолинейного распространения света?
8. Объясните, для чего строители при выборе досок смотрят вдоль ее края?
9. Что представляет собой свет?
10. В чем заключаются корпускулярные свойства света?
11. В чем заключается гипотеза о волновых свойствах света?
12. При каких условиях проявляются волновые, а при каких – корпускулярные свойства света?
13. Каков смысл понятия «корпускулярно-волновой дуализм»?
14. В чём состояла основная трудность при измерении скорости света?
15. Назовите известные вам методы определения скорости света, учёных, использовавших эти методы, и значения скорости света, полученные в опытах.
16. Какова роль определения скорости света в науке?

## 1. Развитие взглядов на природу света.

Из повседневной жизни нам известно, что свет нагревает тела, на которые он падает. Следовательно, он передаёт этим телам энергию. Основным источником света и тепла на нашей планете является Солнце.

Лучи Солнца поглощаются всеми предметами, на которые они падают, и нагревают их. Но ведь Солнце находится на огромном расстоянии от Земли, это 150 млн. км. Каким же образом энергия передается от одного тела к другому, находящемуся на некотором расстоянии от первого?

Действие одного тела на другое может осуществляться двумя способами: либо посредством переноса вещества от источника к приемнику, либо же посредством изменения среды между телами, т.е. посредством волны (без переноса вещества).

И при движении частиц происходит перенос энергии. Но и волна также переносит энергию. Таким образом, мы имеем два разных потока энергии: энергия, переносимая с потоком частиц, и энергия, переносимая волной. Каким же из этих способов энергия переносится от Солнца к предмету, находящемуся на поверхности Земли?

Рассмотрим историю развития взглядов на природу света.

Видеоролик «Свет – волна или частица?» (размещение на сайте <http://video.nur.kz/>).

Ещё в глубокой древности учёные интересовались природой света. Первые представления древних ученых о свете были весьма наивны. Древние ученые очень уж мистически его представляли себе. Считалось, что из глаз человека, животных и других существ выходят особые тонкие щупальца и при ощупывании ими предметов глаз их видит. Ну, до этого только ученые и могли додуматься! Во-первых, как быть с «ощупыванием» далеких и горячих предметов? Как этим щупальцам дотянуться, например, до Солнца? Да и сгорят они там, из чего бы ни были сделаны.

Более правдоподобную гипотезу о природе света выдвинул 2500 лет назад греческий математик Пифагор. Он считал, что каждый предмет постоянно испускает во все стороны потоки мелких частиц, которые, попадая в глаза, вызывают ощущения либо света, либо очертаний предметов. А вот Аристотель выдвинул теорию о том, что свет представляет собой возбуждение среды. Эти две основные идеи о природе света развивались и сосуществуют до настоящего времени.

Но по-настоящему научный спор возник в XVII в. между так называемой корпускулярной и волновой теориями природы света. Первая связана с именем Исаака Ньютона, а вторая – Христиана Гюйгенса.



Ньютон придерживался так называемой корпускулярной теории света, согласно которой свет – это поток частиц (или по латыни «корпускул»), идущих от источника во все стороны. Согласно же представлениям Гюйгенса свет – это поток волн, распределяющихся в неведомой, гипотетической среде – эфире. Обе эти теории или гипотезы существовали параллельно, и ни одна из них не могла одержать решающей победы. Ситуация, как говорят, была патовой. Известные в то время из опыта законы распространения света с большим или меньшим успехом объяснялись обеими теориями.

Но Ньютон, как самый большой авторитет в науке, сумел-таки склонить большинство ученых на свою сторону. Еще бы – открытый им закон инерции прекрасно объяснял прямолинейный полет «световых» частиц движением их по инерции. Отражение света от зеркал вполне соответствовало отскоку упругих шаров при их ударе о плоскость. Но Ньютон никак не мог объяснить, почему эти частицы не сталкиваются в пространстве, если световые пучки пересекаются. При такой плотности «стрельбы» частицами, они нет-нет да и столкнутся, отскочат в сторону, рассеются. Но этого не происходило.

Волновая же теория прекрасно объясняла этот факт. Волны, хотя бы на поверхности воды, свободно проходят друг сквозь друга, не оказывая взаимного влияния. Однако прямолинейное распространение света, дающее резкие, четко очерченные тени, трудно объяснить волновой теорией. А корпускулярная теория объясняла это прямолинейным полетом частиц по инерции.

И, как люди деликатные, Ньютон и Гюйгенс где-то уступали друг другу. Интерференцию света, которую сам же Ньютон получил в своих опытах с линзами, можно было объяснить только волновой теорией. Ньютон «допустил» существование и волновой теории, отдавая предпочтение все-таки корпускулярной. Ну а Гюйгенс «допустил», что волны в его теории излучаются не непрерывно, а импульсами, порциями. Вроде как частицы, но частицы все-таки волн. Вообще, эти ученые выражались очень осторожно, особенно Ньютон.

Такое неопределенное, двойственное положение в воззрениях на природу света длилось до XIX в., когда, казалось бы, неопровержимые данные по теории волновых процессов, заставили ученых того времени признать, что свет ведет себя как волна. Особенно постарался в этом шотландский ученый – сторонник Гюйгенса, великий физик Дж. К. Максвелл. Он неопровержимо доказал, что свет – это электромагнитные волны, которые, кстати, прекрасно распространяются и в пустоте, так что никакого «эфира» и не понадобится. К концу XIX в. у физиков не осталось

ни тени сомнения, что свет – это волновой процесс, и свой спор Ньютон проиграл Гюйгенсу.

Но... наука все время будет повторять и повторять это «но», не отдавая явного предпочтения ни одному «окончательному», «бесповоротному» мнению. И так, к самому концу XIX в., когда сторонники электромагнитной волновой теории света праздновали, казалось бы, окончательную победу, их торжество смутили некоторые, на первый взгляд, незначительные сомнения, «легкие облака» на горизонте волновой физики.

Сомнения эти были вызваны изобретением фотографии, или способности света расщеплять молекулы солей серебра, а также фотоэффекта – способности света «вырывать» из металла особые неведомые тогда частицы – электроны. А далее были сделаны и новые открытия, которые превратили «легкие облака» в грозовые тучи, смешавшие все, казалось бы, незыблемые представления о природе света.

Смертельный удар по электромагнитной волновой теории света нанесла в самом конце XIX в. так называемая «ультрафиолетовая катастрофа». Дело в том, что согласно этой теории любое тело должно постоянно излучать в пространство волновую энергию, а следовательно, терять ее и охлаждаться. Причем вплоть до абсолютного нуля. А так как излучаются все частоты, включая очень энергоемкие – ультрафиолетовые, то и катастрофа «глобального» охлаждения всех тел была названа «ультрафиолетовой».

Но если этого в природе не происходит, то, следовательно, волновая электромагнитная природа света бессмысленна. Выход из «ультрафиолетового» тупика был найден немецким физиком Максом Планком. Он предположил, что энергия электромагнитного излучения выделяется не непрерывно, а порциями, называемыми квантами (вспомним старого «хорошо забытого» Гюйгенса!). И оказалось, что при больших частотах (т.е. хотя бы для того же ультрафиолетового диапазона) эти кванты настолько велики, и на их создание затрачивается такая большая энергия, что на излучение ее уже и не хватает. Вывод Планка был таков – при больших частотах энергия излучения практически равна нулю, и никакая «ультрафиолетовая катастрофа» нам не угрожает.

Квантовая гипотеза прекрасно объясняла и явление фотоэффекта и химического действия света, в том числе и фотосинтез, которому мы обязаны жизнью на Земле, и многое другое. Но оказалось, что эта гипотеза не отбросила волновую гипотезу, а прекрасно с ней сжилась. Полученный «симбиоз» двух гипотез объяснял уже все свойства электромагнитного излучения, в том числе и света.

А практически получилось следующее:

- при распространении свет ведет себя скорее как волна, а при возникновении и поглощении – скорее как частица;
- при больших частотах главную роль играют квантовые («корпускулярные») свойства света, а при малых – волновые.

**Вывод: свет обладает своеобразным дуализмом (двойственностью) свойств – корпускулярно-волновой дуализм.**

Это, конечно, странно и непривычно, так как частица и волна – абсолютно разные физические объекты. Мы не имеем возможности представлять себе наглядно в полной мере процессы в микромире, так как они совершенно отличны от тех макроскопических явлений, которые люди наблюдали на протяжении миллионов лет и основные законы которых были сформулированы к концу XIX в.

## 2. Методы определения скорости света.

Когда мы поворачиваем выключатель, то вся комната сразу же озаряется светом. Кажется, что свету совсем не надо времени, чтобы достигнуть стен. Проблема измерения скорости света впервые была сформулирована Галилеем (16 век), который поставил вопрос о конечности скорости света. Но он не смог ответить на поставленный им вопрос.

Делались многочисленные попытки определить скорость света. Для этого пытались измерить по точным часам время распространения светового сигнала на большие расстояния (несколько километров). Но эти попытки не дали результатов. Начали думать, что распространение света совсем не требует времени, что свет любые расстояния преодолевает мгновенно. Однако оказалось, что скорость света не бесконечно велика, и эта скорость была, в конце концов, измерена.

### «Метод Рёмера»

Астрономический метод измерения скорости света датского ученого О. Рёмера.

Познакомимся с ученым, которому первым удалось измерить скорость света – Оле Рёмером.

Нужды расширяющейся торговли и возрастающего значения мореплавания побудили французскую Академию наук заняться уточнением географических карт, для чего, в частности требовался более надежный способ определения географической долготы. Оле Рёмер – молодой датский астроном был приглашен работать в новую парижскую обсерваторию.

Ученые предположили использовать для определения парижского времени и времени на борту корабля небесное явление, наблюдаемое ежедневно в одно и то же время. По этому явлению мореплаватель или географ мог бы выставить свои часы и узнать парижское время. Таким явлением, видимым с любого места на море или на суше, является затмение одного из четырех больших спутников Юпитера, обнаруженных Галилеем в 1609 г.

Скорость света впервые удалось измерить в 1676 г. Рёмер наблюдал затмения спутников Юпитера – самой большой планеты Солнечной системы. Юпитер имеет четырнадцать спутников. Ближайший его спутник – Ио – и стал предметом наблюдений Рёмера. Он видел, как спутник проходил перед планетой, погружался в ее тень и пропадал из поля зрения. Затем он опять появлялся, как мгновенно вспыхнувшая лампа. Промежуток времени между двумя вспышками оказался равным 42 ч 28 мин. Таким образом, эта «луна» представляла собой громадные небесные часы, посылавшие свои сигналы на Землю через равные промежутки времени.

В начале измерения проводились в то время, когда Земля при своем движении вокруг Солнца ближе всего подошла к Юпитеру. Такие же измерения, проведенные несколько месяцев спустя, когда Земля удалилась от Юпитера, неожиданно показали, что спутник опоздал появиться из тени на целых 22 мин по сравнению с моментом времени, который можно было рассчитать, зная период обращения Ио.

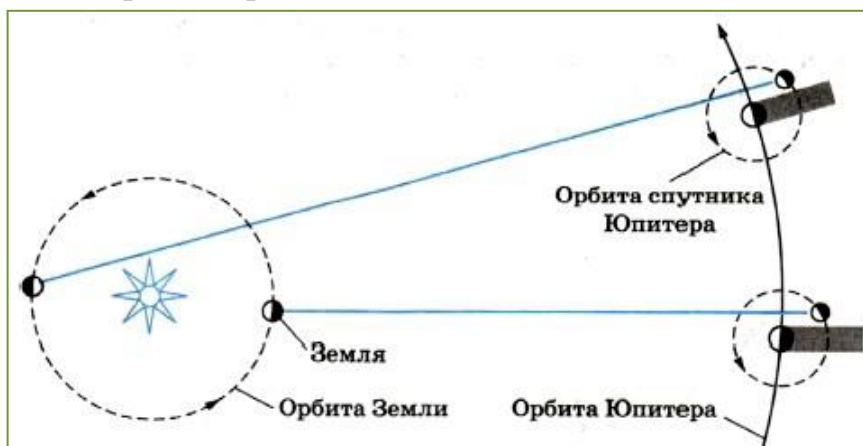


Рисунок 20. Метод Рёмера

Рёмер объяснял это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник всякий раз появлялся бы из тени в назначенное время; наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио на 22 мин раньше. Запаздывание в этом случае происходит оттого, что свет использует 22 мин на прохождение от места моего первого наблюдения до моего теперешнего положения».

Во времена Рёмера диаметр орбиты Земли считался равным примерно 182 000 000 миль (292 000 000 км). Разделив это расстояние на 1320 секунд, Рёмер получил, что скорость света равна 138 000 миль (222 000 км) в секунду.

На первый взгляд может показаться, что получить числовой результат с такой погрешностью (почти в 80 000 км в секунду) не велика заслуга. Но вдумайтесь, чего все-таки достиг Рёмер. Впервые за всю историю человечества было доказано, что движение, считавшееся бесконечно быстрым, доступно познанию и измерению. Потому-то крайне трудно определить время распространения света между двумя удаленными точками на Земле. Ведь за одну секунду свет проходит расстояние, большее длины земного экватора в 7,5 раза.

Мало того, с первой же попытки Рёмер получил величину правильного порядка. Если же принять во внимание, что ученые до сих пор занимаются уточнением диаметра орбиты Земли и сроков затмения спутников Юпитера, то ошибка Рёмера не вызывает удивления. Теперь мы знаем, что максимальное запаздывание затмения спутника равно не 22 минутам, как думал Рёмер, а примерно 16 минутам 36 секундам, а диаметр орбиты Земли приближенно равен не 292 000 000 км, а 300 000 000 км. Если внести эти поправки в расчет Рёмера, получается, что скорость света равна 300 000 км в секунду, а этот результат близок к самой точной цифре, полученной учеными нашего времени.

Основное требование, которое предъявляется к хорошей гипотезе, – это чтобы на ее основе можно было делать правильные предсказания. Исходя из вычисленной им скорости света, Рёмер смог за несколько месяцев вперед точно предсказать некоторые затмения. Например, в сентябре 1676 года он предсказал, что в ноябре спутник Юпитера появится примерно с десятиминутным опозданием. Крошечный спутник не подвел Рёмера и появился в предсказанное время с точностью до одной секунды. Но парижских философов не убедило даже это подтверждение теории Рёмера. Однако Исаак Ньютон и великий голландский астроном и физик Христиан Гюйгенс выступили в поддержку датчанина. А некоторое время спустя, в январе 1729 года, английский астроном Джеймс Брайдей несколько иным путем пришел к тому же выводу, что и Рёмер. Сомнениям не оставалось места. Рёмер навсегда положил конец бытовавшему среди ученых убеждению, что свет распространяется мгновенно независимо от расстояния.

## «Метод Физо и Фуко».

Лабораторный метод измерения скорости света французов Луи Физо и Леона Фуко.

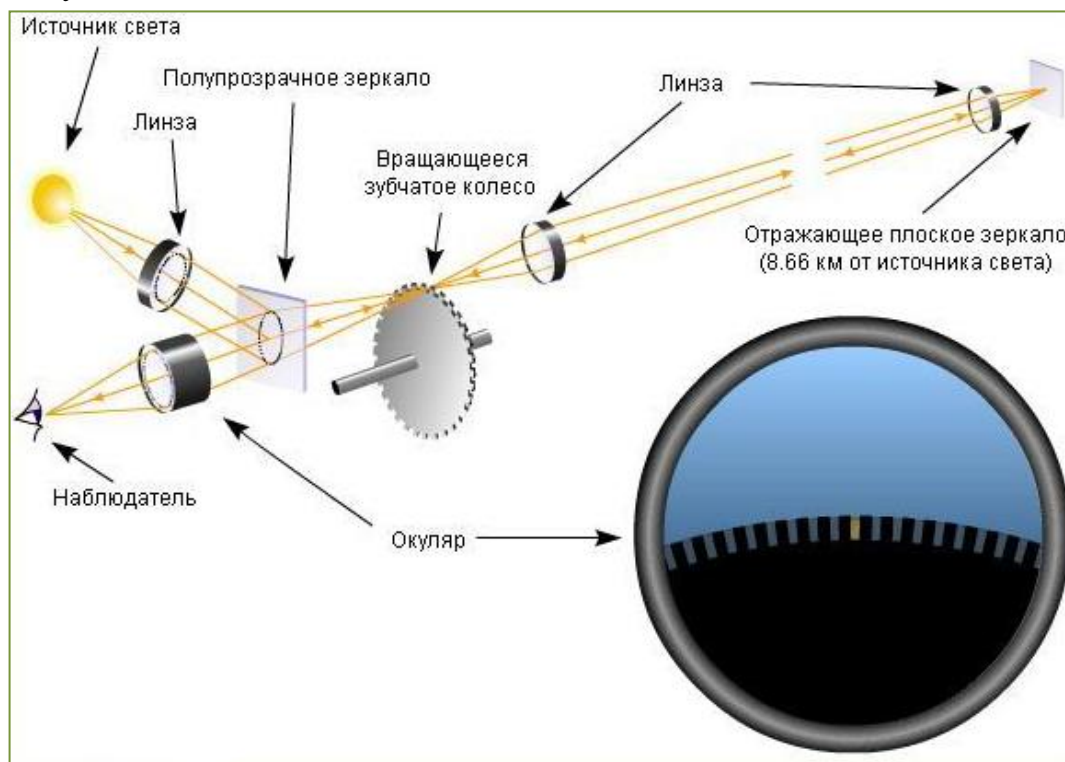


Рисунок 21. Метод Физо

В 1849 г. Л. Физо поставил лабораторный опыт по измерению скорости света. Параметры установки Физо таковы. Источник света и зеркало 1 располагались в доме отца Физо близ Парижа, а зеркало 2 – на Монмартре. Расстояние между зеркалами составляло  $L \sim 8,66$  км, колесо имело 720 зубцов. Оно вращалось под действием часового механизма, приводимого в движение опускающимся грузом.

Отразившись от зеркала, свет, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, должен был пройти опять между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отраженный от зеркала, был виден. При увеличении скорости вращения он постепенно исчезал. В чем же здесь дело? Пока свет, прошедший между двумя зубцами, шел до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези вставал зубец, и свет переставал быть видимым. Используя счетчик оборотов и хронометр, Физо обнаружил, что первое затемнение наблюдается при скорости вращения колеса  $\nu = 12,6$  об/с.

Допустим, что зубец и прорезь зубчатого колеса имеют одинаковую ширину и место прорези на колесе занял соседний зубец. Тогда свет перекроется зубцом и в окуляре станет темно.

Это наступит при условии, что время прохождения света туда и обратно  $t_1 = 2L/v$  окажется равным времени поворота зубчатого колеса на половину прорези  $t_2 = T/2N = 1/2Nv$ .

$L$  – расстояние от зубчатого колеса до зеркала;

$T$  – период вращения зубчатого колеса;

$N$  – число зубцов;

$v = 1/T$  – частота вращения.

Из равенства  $t_1 = t_2$  следует расчетная формула для определения скорости света данным методом:  $v = 4LNv$ .

Используя метод вращающегося затвора, Физо получил значение скорости света:  $v = 3,13 \cdot 10^5$  км/с.

Когда Физо объявил о результате своего измерения, ученые усомнились в достоверности этой колоссальной цифры, согласно которой свет доходит от Солнца до Земли за 8 минут и может облететь Землю за восьмую долю секунды. Казалось невероятным, чтобы человек смог измерить столь огромную скорость такими примитивными инструментами. Свет проходит восемь с лишним километров между зеркалами Физо за 1/36000 секунды? Невозможно, говорили многие. Однако цифра, полученная Физо, была весьма близка к результату Рёмера. Вряд ли это могло быть простым совпадением.

Тринадцать лет спустя, когда скептики все еще продолжали сомневаться и отпускать иронические замечания, Жан Бернар Леон Фуко, сын парижского издателя, одно время готовившийся стать врачом, определил скорость света несколько иным способом. Он несколько лет проработал вместе с Физо и много размышлял над тем, как усовершенствовать его опыт. Вместо зубчатого колеса Фуко применил вращающееся зеркало. Результат, полученный Фуко, был 298 000 км/с, т.е. примерно на 17 000 км меньше значения, полученного Физо.

В опытах Фуко расстояние от источника до зеркала было всего в несколько метров. Это позволило поместить на пути света трубку, заполненную водой. Фуко установил, что скорость распространения света в различных средах меньше, чем в воздухе. В воде, например, она составляет величину, равную  $\frac{3}{4}$  скорости света в воздухе. Скорость света в других средах была определена Фуко в 1862 г.

#### «Метод Майкельсона».

Лабораторный метод измерения скорости света американского ученого А. Майкельсоном.

Весной 1879 года газета «Нью-Йорк Таймс» сообщила: «На научном горизонте Америки появилась новая яркая звезда. Младший лейтенант морской службы, выпускник Морской академии в Аннаполисе Альберт Майкельсон, которому еще не исполнилось 27 лет, добился выдающегося успеха в области оптики: он измерил скорость света!». Примечателен тот факт, что на выпускных экзаменах в академии Альберту достался вопрос об измерении скорости света. Кто мог предположить, что через короткое время Майкельсон сам войдет в историю физики, как измеритель скорости света.

До А. Майкельсона на американском континенте никто даже не пытался поставить этот трудный эксперимент.

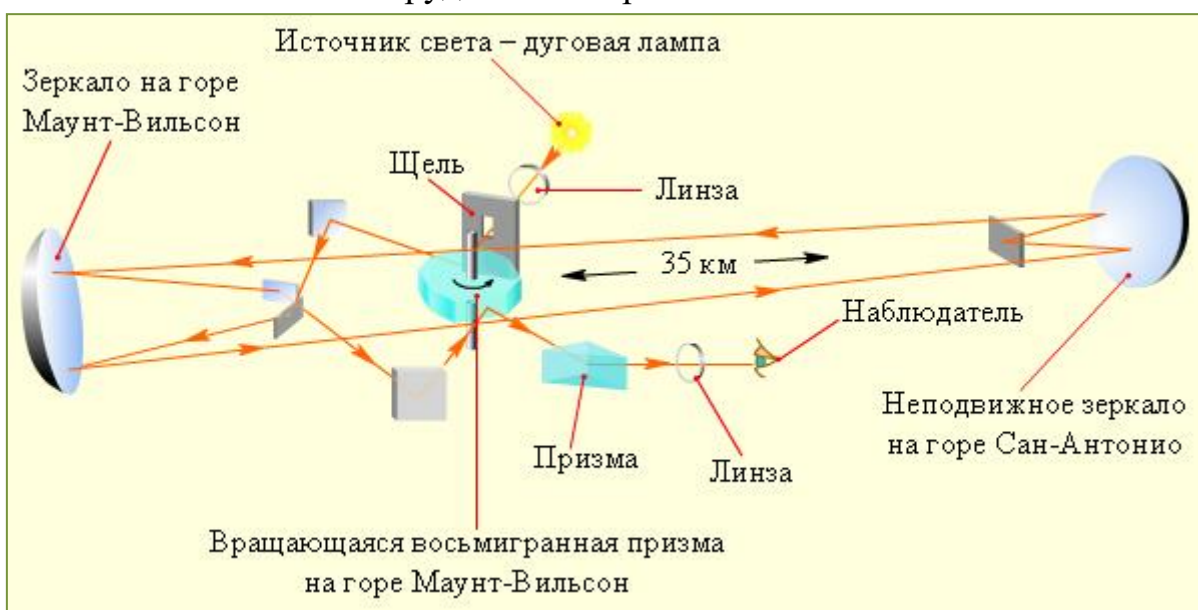


Рисунок 22. Метод Майкельсона

«Подготовка опыта велась с большой тщательностью. Было выбрано место для двух установок. Одна из них помещалась на уже знакомой ему вершине горы Маунт-Вильсон, а другая – на вершине горы Сан-Антонио, известной под прозвищем «Старая плешь», на высоте 5800 м над уровнем моря и на расстоянии 35 км от горы Маунт-Вильсон. Береговой и геодезической службе Соединенных Штатов было поручено точно измерить расстояние между двумя отражающими плоскостями – вращающимся призматическим зеркалом на Маунт-Вильсон и неподвижным зеркалом на Сан-Антонио. Возможная ошибка при измерении расстояния составляла одну семимиллионную долю сантиметра на 35 км. Вращающаяся призма из никелированной стали с восьмью зеркальными поверхностями, отполированными с точностью до одной миллионной, была изготовлена для опыта бруклинской компанией «Сперри джироскоп компани», президент которой, инженер-изобретатель Эльмер А. Сперри, был другом Майкельсона. Кроме того, было изготовлено еще несколько стеклянных и стальных призм.



Восьмиугольный высокоскоростной ротор делал до 528 оборотов в секунду. Он приводился в движение воздушной струей, и его скорость, как и в прошлых опытах, регулировалась при помощи электрического камертона.

После отражения от призмы луч света попадал на систему зеркал, возвращающих его назад.

Для того чтобы луч попадал в глаз наблюдателя, вращающаяся призма должна за время распространения света туда и обратно, успеть повернуться хотя бы на  $1/8$  оборота.

Начиная с 1924 года, и до начала 1927 года было проведено пять независимых серий наблюдений. Средний результат равнялся 299 798 км в секунду. Результаты же всех измерений Майкельсона можно записать как  $(299796 \pm 4)$  км/с.

Майкельсон писал: «То, что скорость света является категорией, недоступной человеческому воображению, и что, с другой стороны, ее возможно измерить с необыкновенной точностью, делает ее определение одной из самых увлекательных проблем, с которыми может столкнуться исследователь».

Наиболее точное измерение скорости света было получено в 1972 г. американским ученым К. Ивенсоном с сотрудниками. В результате независимых измерений частоты и длины волны лазерного измерения ими было получено значение  $(299\ 792\ 456,2 \pm 0,2)$  м/с.

Однако в 1983 г. на заседании Генеральной ассамблеи мер и весов было принято новое определение метра (это длина пути, проходимая светом в вакууме за  $1/299792458$  долю секунды), из которого следует, что скорость света в вакууме абсолютно точно равна 299 792 458 м/с

По современным данным, скорость света в вакууме равна 299 792 458 м/с (с точностью до  $\pm 1,2$  м/с).

С точки зрения волновой теории света свет – это электромагнитная волна. Приблизительно скорость света можно считать равной  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Это значение скорости света нужно обязательно запомнить!

Определение скорости света сыграло в науке очень важную роль. Была не только выяснена природа света, но и установлено, что никакое тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме.

Современная физика решительно утверждает, что история скорости света не закончена. Физики продолжают исследовать вопрос о постоянстве скорости света во времени. Исследования скорости света могут дать еще много нового для познания природы, неисчерпаемой в своем разнообразии. 300-летняя история фундаментальной постоянной  $c$  отчетливо демонстрируют ее связи с важнейшими проблемами физики.

## Лекция №34

### Закон отражения света. Закон преломления света. Полное внутреннее отражение.

#### План

1. Принцип Гюйгенса. Закон отражения света.
2. Закон преломления света.
3. Полное внутреннее отражение.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что такое оптика? Какие основные явления и закономерности изучаются в оптике?
2. В чем состоит закон прямолинейного распространения света? Приведите примеры, в которых проявляется этот закон, и примеры, где наблюдаются отступления от него?
3. Как образуются тень и полутень?
4. Сформулируйте законы отражения света. Чем отличается диффузное отражение света от зеркального?
5. Что называется углом падения, углом отражения?
6. Какое явление называется преломлением света? Что называется углом преломления?
7. Сформулируйте законы преломления света.
8. Каков физический смысл относительного, абсолютного показателей преломления? Какова связь между ними? Значения какого показателя преломления приводятся в справочных таблицах?
9. Почему, сидя у костра, мы видим предметы по другую сторону костра колеблющимися?
10. Может ли свет, проходя из одной прозрачной среды в другую, не преломляться?
11. По каким признакам определяют оптически более плотные среды, оптически менее плотные среды?
12. Что называется явлением полного внутреннего отражения? При каких условиях оно возникает? Что называется предельным углом полного отражения и как его найти?

## 1. Принцип Гюйгенса. Закон отражения света.

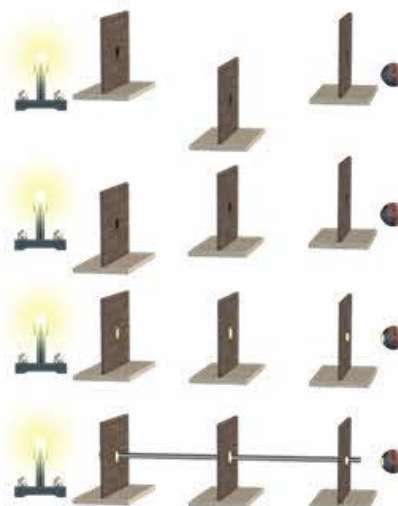
На прошлом занятии мы с вами начали изучение **оптики** – раздела физики, в котором изучают свойства света, закономерности его излучения, распространения и взаимодействия с веществом.

Мы выяснили, что свет обладает двойственной корпускулярно-волновой природой. Это означает, что в одних случаях свет ведёт себя как электромагнитная волна, а в других – как поток частиц.

Также мы с вами говорили о том, что электромагнитная теория света позволила объяснить многие наблюдаемые явления в оптике. Однако есть круг задач, на решение которых волновая природа света почти не сказывается. Это, например, вопросы, связанные с распространением света, а также построением изображений в оптических приборах. Они рассматриваются в разделе «Геометрическая оптика», основными понятиями которой являются световой луч и световой пучок.

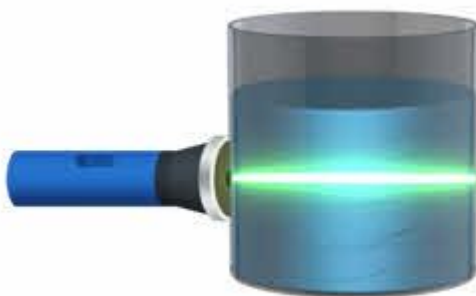


Световой пучок – это область пространства, в пределах которой распространяется свет. А световой луч – это линия, указывающая направление распространения света. Но вот вопрос, как же распространяется свет? Обратимся к небольшим опытам. Для начала поставим на столе три экрана с отверстиями.



Включив электрическую лампочку, попытаемся, перемещая экраны, увидеть свет через отверстия в них. Теперь возьмём тонкий стержень и попытаемся вставить его в отверстия. Как видим, нам это легко удалось. Следовательно, все три отверстия располагаются на одной прямой.

Изменим среду. Налъём в стеклянный сосуд воду и добавим в неё немного флуоресцентной жидкости. Небольшой фонарик, дающий параллельный пучок света, поднесём к стенке сосуда. В воде мы видим прямую светящуюся линию, которая образована светом, отражённым от частичек растворённой жидкости.



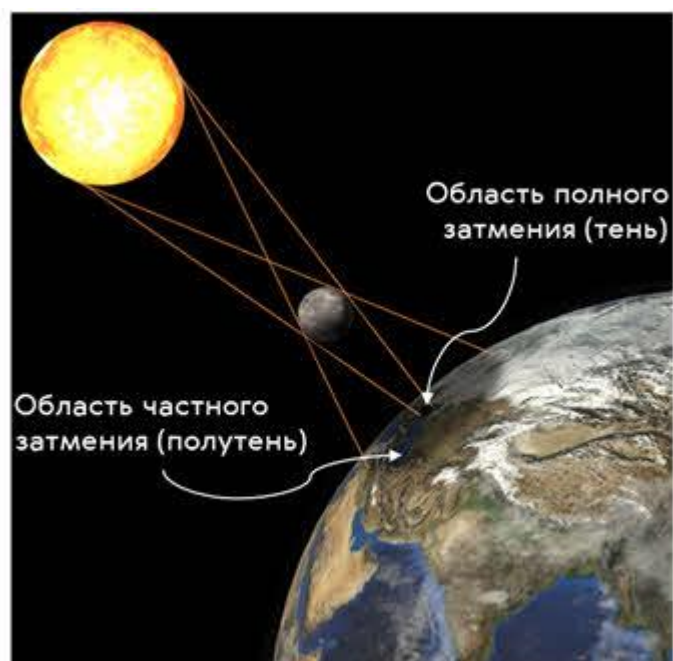
**И воздух, и вода имеют по всему своему объёму одинаковые физические свойства, поэтому являются однородными средами. Следовательно, в однородной среде свет распространяется прямолинейно. Это есть один из основных законов геометрической оптики – закон прямолинейного распространения света.**

Интересно, что открыт закон был в глубокой древности. О нём ещё за триста лет до нашей эры писал отец геометрии Евклид. А, например, древние египтяне использовали этот закон для установления колонн вдоль прямой линии. Прямолинейностью распространения света объясняются многие явления, например, образование тени и полутени.

**Тенью называют ту часть пространства за непроницаемым предметом, куда не проникает свет.**

**А полутень – это та область пространства, в которую попадает свет от части источника света.**

Образованием тени и полутени можно объяснить солнечные и лунные затмения.



Теперь давайте посмотрим, что происходит на границе раздела двух однородных сред. Итак, пусть световой пучок распространяется в воздухе и падает на поверхность воды. Многочисленные опыты показывают, что на границе раздела этих сред свет изменит своё направление. При этом часть светового пучка пройдёт в воду, а другая часть пучка отразится от границы раздела воздух-вода и будет распространяться в воздухе.

Отражение света подобно отражению мяча от стенки. Если бросить мяч перпендикулярно стенке, то он отразится и полетит обратно по той же прямой. А если мяч бросить под некоторым углом к стенке, то он отскочит тоже под некоторым углом.

Теперь проведём такой опыт. В центре оптического диска укрепим зеркало. Если направить из осветителя на зеркало пучок света, то, очевидно, он практически полностью отразится.



Опустим перпендикуляр к поверхности зеркала в точку падения луча.

**Угол, образованный падающим лучом и перпендикуляром, восставленным к отражающей поверхности в точке падения луча, называется углом падения.**

**Угол, образованный отражённым лучом и тем же перпендикуляром, называется углом отражения.**

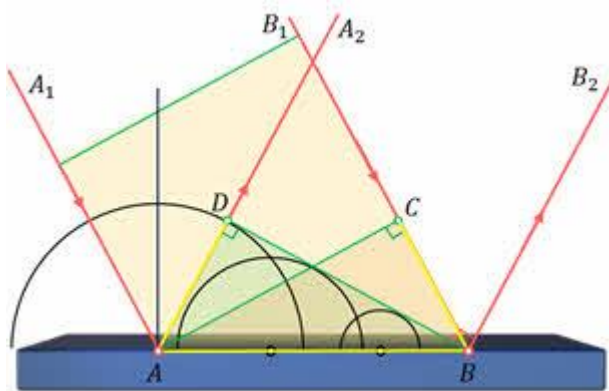
Из опыта видно, что углы отражения и падения равны. Увеличим угол падения – увеличивается и угол отражения света, но по-прежнему эти углы равны. А то, что мы на оптическом диске видим не только падающий луч, но и отражённый, говорит о том, что они оба лежат в одной плоскости — плоскости диска. На основании таких вот простых опытов мы можем сформулировать **закон отражения света**, открытый Евклидом в III веке до нашей эры.

**Итак, падающий луч, отражённый луч и нормаль к отражающей поверхности в точке падения луча лежат в одной плоскости. При этом угол отражения света равен углу падения.**

А теперь по направлению отражённого луча пустим луч света от осветителя. Он отразится от зеркала и пойдёт по направлению, по которому в предыдущем опыте шёл падающий луч. Лучи и углы как бы поменялись местами. Это свойство отражённого и падающего лучей называют **обратимостью (или взаимностью) световых лучей**.

Закон отражения света можно вывести и из одного общего принципа, описывающего поведение волн. Этот принцип впервые был сформулирован Христианом Гюйгенсом «Трактате да ла Люмьер» в 1690 году. Итак, **согласно принципу Гюйгенса каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн. Огибающая поверхность к фронтам волн от вторичных источников определяет положение нового фронта волны.**

Покажем справедливость закона отражения света с помощью принципа Гюйгенса. Для этого предположим, что на плоскую отражающую поверхность падает параллельный пучок света.



Выделим в нём два луча, например,  $A_1A$  и  $B_1B$ . Проведём фронт волны для момента времени, когда луч  $A_1A$  дошёл до отражающей поверхности. Тогда в точке  $B$  колебания начнут возбуждаться с запаздыванием по времени на величину  $CB$  к  $v$ , где  $v$  – это скорость волны в данной среде.

В момент времени, когда волна достигнет точки  $B$  и в этой точке начнётся возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке  $A$  уже будет представлять собой полусферу радиусом  $v\Delta t$ . Радиусы вторичных волн от источников, расположенных между точками  $A$  и  $B$ , меняются так, как показано на экране.

Огибающей вторичных волн является плоскость  $BD$  (касательная к сферическим поверхностям). Она представляет собой волновую поверхность отражённой волны. При этом отражённые лучи  $AA_2$  и  $BB_2$  перпендикулярны этой поверхности.

Теперь рассмотрим два треугольника  $ABD$  и  $ABC$ . По построению это два прямоугольных треугольника, у которых стороны  $AD = CB$ , а сторона  $AB$  у них общая. Следовательно, эти два треугольника равны (по четвёртому признаку равенства прямоугольных треугольников). Тогда и углы  $\angle DBA = \angle CAB$  равны между собой.

С другой стороны угол  $\angle CAB$  равен углу падения, как углы с перпендикулярными сторонами. Аналогично угол  $\angle DBA$  равен углу отражения. Отсюда следует вторая часть закона отражения света, что **угол отражения равен углу падения**.

В физике принято различать два вида отражений света: зеркальное и диффузное (или рассеянное).

**Зеркальным называется отражение, при котором падающий на плоскую зеркальную поверхность параллельный пучок лучей после отражения остаётся параллельным.**

**А диффузное отражение дают шероховатые поверхности, которые отражают падающий на них параллельный пучок света по всевозможным направлениям.**

Примером зеркальной поверхности служит плоское зеркало. Каждый день по несколько раз мы смотримся в зеркало и видим там своё отражение. Попробуем ответить на вопросы: где и на каком расстоянии от зеркала оно находится? Каковы его размеры и как оно образуется?

Для этого проведём простой опыт. Поставим на столе вертикальную стеклянную пластинку, выполняющую роль плоского зеркала, и горящую свечу. Как видим, в стекле хорошо видно изображение свечи, хотя за пластинкой, конечно же, никакой свечи нет.

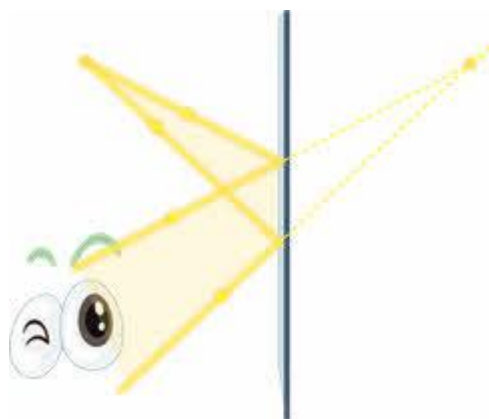


Теперь возьмём такую же по размерам, но незажжённую свечу и будем перемещать с другой стороны пластинки вдоль линейки до тех пор, пока она не совместится с изображением, то есть не будет казаться зажжённой. Используя линейку не трудно показать, что расстояния от пластинки до свечи и до её изображения равны между собой. А так как незажжённая свеча совместилась с изображением по высоте, то можно сделать вывод, что размеры изображения равны размерам предмета.

Таким образом, в плоском зеркале глаз видит изображение таких же размеров, что и предмет, и на таком же расстоянии за зеркалом.

Теперь давайте посмотрим, как строятся изображения различных предметов в плоском зеркале. Итак, пусть перед зеркалом находится точечный источник света. Из множества лучей, посылаемых им, выделим два, падающих на зеркало и, пользуясь законом отражения света, построим отражённые лучи.

Не трудно заметить, что пучок света, ограниченный отражёнными лучами, будет расходящимся. Он то и попадает в глаз наблюдателя. А вот продолжения отражённых лучей пересекаются в точке, находящейся за зеркалом. Глаз воспринимает отражённые лучи так, как будто они исходят из этой точки, которая является изображением нашего источника. Такое изображение называют **мнимым**. Следовательно, **плоское зеркало даёт мнимое изображение**.

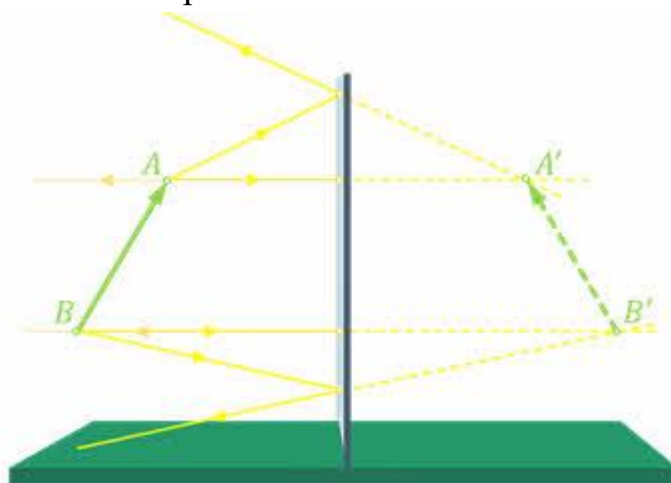


Теперь построим изображение протяжённого предмета, например стрёлки. Для этого нам необходимо построить изображение двух её крайних



точек. Итак, пусть первый луч из точки «А» на зеркало перпендикулярно его плоскости. Значит, угол падения равен нулю. Следовательно, отражённый луч пойдёт вдоль падающего, но в обратном направлении, так как, согласно закону отражения света, угол падения и угол отражения равны.

Второй луч направим к зеркалу под некоторым углом. От зеркала он отразится под таким же углом. Как видим, отражённые лучи не пересекаются. Но пересекаются их продолжения за зеркалом. Следовательно, эта точка и есть мнимое изображение точки «А».



Аналогично можно построить изображение любой точки предмета, в том числе и второй крайней точки

Здесь важно запомнить, что **предмет и его изображение в плоском зеркале представляют собой не тождественные, а симметричные фигуры.**

## 2. Закон преломления света.

С помощью простых опытов мы показали, что в однородной среде свет распространяется прямолинейно. Если же пучок света падает на границу раздела двух однородных прозрачных сред, то часть его отражается и возвращается в первоначальную среду. При этом **падающий луч, отражённый луч и нормаль к отражающей поверхности в точке падения луча лежат в одной плоскости. А угол отражения равен углу падения.**

Также мы с вами смогли доказать закон отражения света с помощью принципа Гюйгенса, согласно которому, **каждая точка волнового фронта является источником вторичных сферических волн. Огибающая поверхностей к фронтам волн от вторичных источников определяет положение нового фронта волны.**

Однако, свет, падая на границу раздела двух сред, не только отражается от неё, но и частично проходит во вторую среду и распространяется в ней.

**Явление изменения направления распространения света при его переходе из одной среды в другую называется преломлением света.**

Интересно, что первые упоминания о преломлении света в воде и стекле встречаются в труде Клавдия Птолемея «Оптика», вышедшем в свет во II в. н. э.

Давайте вспомним некоторые понятия и законы, связанные с данным явлением. Для этого обратимся к простому опыту: укрепим в центре оптического диска тонкую стеклянную пластинку и направим на неё узкий пучок света. Как видим, небольшая часть света отразилась от пластинки, а часть света прошла сквозь неё, изменив при этом своё направление распространения.

Проведём перпендикуляр к границе раздела двух сред в точке падения луча и вспомним, что **луч света, идущий к границе раздела двух сред, называется падающим лучом**. А **угол между падающим лучом и перпендикуляром, восстановленным в точке падения луча, называется углом падения**.



**Луч же света, проходящий во вторую среду, называется преломлённым лучом**. Следовательно, **угол между перпендикуляром, восстановленным к границе раздела двух сред в точке падения луча, и преломлённым лучом называется углом преломления**.

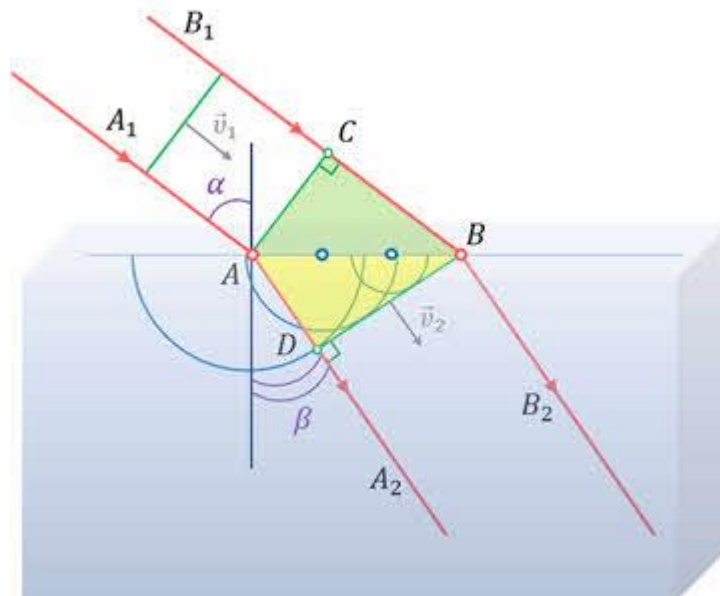
Здесь же отметим, что если свет падает перпендикулярно на границу раздела двух сред, то он не испытывает преломления. Разумеется, не будет преломления и на границе, разделяющей две среды с одинаковыми физическими свойствами.

Сравним углы падения и преломления. Как видно, угол преломления меньше угла падения. Увеличим угол падения – угол преломления тоже

увеличивается, но по-прежнему он меньше угла падения. А то, что мы на оптическом диске видим не только падающий луч, но и преломлённый, говорит о том, что они оба лежат в одной плоскости – плоскости диска. На основании вышесказанного мы можем с вами сформулировать **первую часть закона преломления света. Итак, падающий луч, преломлённый луч и нормаль к границе раздела двух сред в точке падения луча лежат в одной плоскости.**

Чтобы сформулировать вторую часть закона преломления рассмотрим падение плоской световой волны на плоскую поверхность раздела однородных изотропных и прозрачных сред при условии, что размеры поверхности раздела намного больше длины волны падающего излучения. Если угол падения отличен от нуля, то различные точки фронта волны достигнут границы раздела двух сред не одновременно.

Пусть фронт волны перемещается в первой среде со скоростью, модуль которой мы обозначим через  $v_1$ . Тогда в точке  $B$  колебания начнут возбуждаться с запаздыванием по времени на величину  $CB/v_1$ .



В момент времени, когда волна достигнет точки  $B$  и в этой точке начнётся возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке  $A$  уже будет представлять собой полусферу радиусом  $v_2\Delta t$ , где  $v_2$  – это скорость распространения света во второй по ходу луча среде. Радиусы вторичных волн от источников, расположенных между точками  $A$  и  $B$ , меняются так, как показано на экране.

Огибающей вторичных волн является плоскость  $BD$  – касательная к сферическим поверхностям. Она представляет собой волновую поверхность преломлённой волны. При этом преломлённые лучи  $AA_2$  и  $BB_2$  перпендикулярны этой поверхности.

Давайте посмотрим на  $\triangle ABC$  – он у нас прямоугольный по построению. Следовательно, угол  $\sphericalangle CAB$  равен углу падения луча  $AA_1$ , как углы со взаимно перпендикулярными сторонами. Тогда длину стороны  $BC$  можно найти:

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha.$$

Теперь рассмотрим  $\triangle ABD$  – он тоже прямоугольный по построению. При этом угол  $\sphericalangle ABD$  равен углу преломления, как углы между двумя взаимно перпендикулярными сторонами. Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta.$$

Разделим почленно последние два уравнения друг на друга и упростим полученное равенство:

$$\frac{v_1 \Delta t}{v_2 \Delta t} = \frac{AB \sin \alpha}{AB \sin \beta} \Rightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Отношение  $\frac{v_1}{v_2}$  называют **относительным показателем преломления**.

Он показывает, во сколько раз скорость света в первой походу луча среде отличается от скорости распространения света во второй среде:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Чем он больше, тем сильнее преломляется свет на границе раздела двух сред.

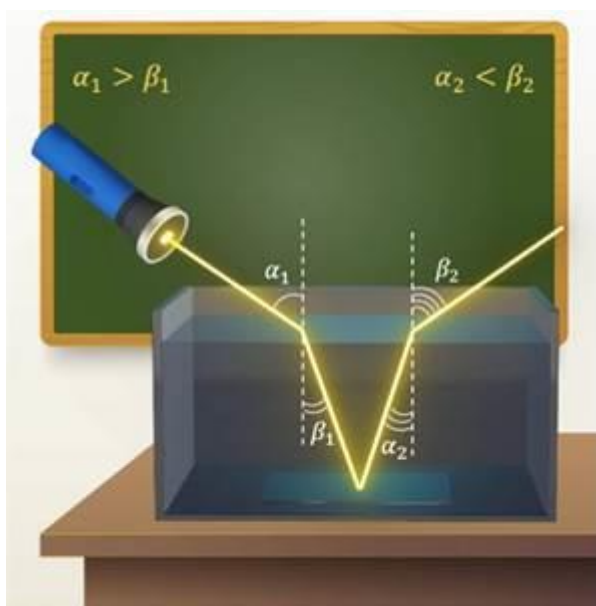
Вещество	Скорость света
Вакуум	299 792 км/с
Воздух (жёлтый цвет)	299 704 км/с
Лёд	228 782 км/с
Вода (при 20 °С)	225 341 км/с
Стекло	199 803 км/с
Кварц	194 174 км/с
Рубин	170 386 км/с
Алмаз	123 845 км/с

Таким образом, отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред, равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2} = n_{21}.$$

Это есть вторая часть закона преломления света, экспериментально установленная в 1620 году голландским учёным Виллебродом Снеллом. Однако эти результаты им опубликованы не были. Лишь в 1637 году (уже после смерти учёного) они были обнаружены в архивах математиком Рене Декартом, который использовал их при написании своих «Рассуждений о методе ...» в приложении «Диоптрика» (хотя некоторые историки склоняются к тому, что Декарт самостоятельно переоткрыл закон преломления света).

Из закона преломления света видно, что различие углов падения и преломления обусловлено тем, что скорость распространения света в различных средах различна. Следовательно, будет различна и длина световой волны. Однако, что очень важно, что при преломлении **частота света остаётся неизменной**.



Принято считать, что чем больше скорость распространения света в среде, тем меньше её оптическая плотность и наоборот. При этом если пучок света переходит из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную, то угол преломления меньше угла падения (преломлённый луч как бы прижимается к перпендикуляру). А если свет переходит из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, то угол преломления больше угла падения (преломлённый луч как бы прижимается к границе раздела сред). Кстати, этот вывод логически следует из свойства обратимости, которое характерно не только для падающего и отражённого, но и для падающего и преломлённого лучей.

Если свет падает из вакуума в вещество, то вводится величина, называемая **абсолютным показателем преломления**. Он показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в данной среде.

С помощью закона преломления света можно рассчитать ход лучей в различных оптических устройствах, например в треугольной призме, изготовленной из какого-либо прозрачного материала. На экране вы видите сечение треугольной стеклянной призмы плоскостью, перпендикулярной её боковым рёбрам. Пусть монохроматический свет (то есть свет строго определённой частоты) падает на грань призмы, находящейся в воздухе. Так как свет переходит из среды оптически менее плотной в оптически более плотную, то угол преломления меньше угла падения. Пройдя через призму, свет падает на её вторую грань. Здесь он снова преломляется, но теперь угол падения меньше угла преломления.

Грани, на которых происходит преломление света, называются **преломляющими гранями**.

Угол между преломляющими гранями называется **преломляющим углом призмы**.

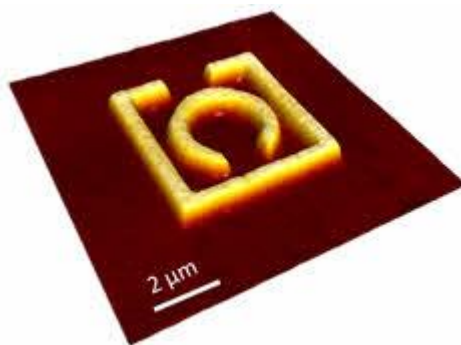
Угол, образованный направлением луча, входящего в призму, и направлением луча, выходящего из неё, называют **углом отклонения**.

А грань, лежащая против преломляющего угла, называется **основанием призмы**.



В заключении отметим, что в настоящее время существуют материалы с отрицательным показателем преломления. Их называют **метаматериалами**. В большинстве случаев их история начинается с упоминания работы советского физика Виктора Григорьевича Веселаго, опубликованной в журнале «Успехи физических наук» в 1967 году.





Существование подобных материалов было доказано в 2000 году англичанином Джоном Пендри и американцем Дэвидом Смитом. Одно из возможных свойств метаматериалов – это отрицательный (или левосторонний) показатель преломления, который проявляется при одновременной отрицательности диэлектрической и магнитной проницаемостей среды.

### 3. Полное внутреннее отражение.

Мы с вами показали, что если пучок света переходит из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную, то угол преломления меньше угла падения. А если наоборот свет переходит из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, то угол преломления больше угла падения. При этом может наблюдаться один очень интересный эффект, о котором ещё писал древнеримский писатель Плиний Старший в своей «Естественной истории», составленной примерно в 77 г. н.э. В одной из книг он рассказывает о ловцах жемчуга, которые перед погружением в воду набирали в рот оливковое масло, а непосредственно уже под водой выпускали его. Растекавшаяся по поверхности моря масляная плёнка, показатель преломления которой больше, чем у воды, резко уменьшала яркость бликов и улучшала условия видимости.

Почему так происходит? Попробуем ответить на этот вопрос с помощью простого опыта. Укрепим в центре оптического диска стеклянный полуцилиндр с матовой задней поверхностью.



Направим узкий пучок света от осветителя так, чтобы он проходил через выпуклую поверхность (на ней свет не преломляется) и попадал в центр плоской грани прозрачного полуцилиндра. Мы видим, что луч света достигнув внутренней поверхности плоской грани, частично отражается от неё и частично преломляется. При этом отражение и преломление происходят в полном соответствии с законами отражения и преломления.

Будем раз за разом увеличивать угол падения светового луча. Мы видим, что по мере увеличения угла падения, угол преломления также увеличивается, оставаясь все время больше угла падения. При этом обратите внимание на то, что яркость (и, следовательно, энергия) отражённого пучка усиливается, в то время как яркость преломлённого пучка падает. Проще говоря, всё большая доля энергии падающего луча достаётся отражённому лучу и всё меньшая – преломлённому. Преломлённый луч становится всё тусклее и в какой-то момент исчезает совсем. Это исчезновение происходит при достижении угла падения, которому отвечает угол преломления в  $90^\circ$ . В данной ситуации преломлённый луч должен был бы пойти параллельно плоской грани, то есть границе раздела двух сред. Но идти уже нечему – вся энергия падающего луча целиком досталась лучу отражённому.

Попробуем выяснить, куда направится преломлённый луч света, если угол падения увеличить ещё больше? Как видим, преломлённый пучок света исчез и весь свет отражается от границы раздела, то есть мы наблюдаем явление **полного внутреннего отражения света**.

**Отражение света, падающего из оптически более плотной среды на границу с оптически менее плотной средой под углом падения, большим некоторого критического угла, называется полным внутренним отражением.**

**Угол, при котором возникает полное отражение, называется предельным углом полного отражения.**

Он определяется из закона преломления при условии, что угол преломления светового луча равен  $90^\circ$ :

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_2 < n_1).$$

Предельные углы полного отражения на границе с воздухом

Вещество	Показатель преломления	Предельный угол
Алмаз	2,42	24°
Бензин	1,41	45°
Вода	1,3	49°
Глицерин	1,47	43°
Кварц	2,45	40°
Спирт	1,33	47°
Стекло	1,5—1,9	30°—42°

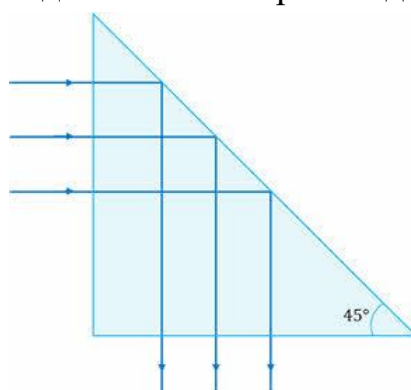


Примерами полного внутреннего отражения в природе являются эффекты миража, например иллюзия мокрой дороги при летней жаре или зеркальная гладь воды в пустыне. Они возникают из-за полного отражения между слоями воздуха с разной температурой.

Яркий блеск многих природных кристаллов, а в особенности – огранённых драгоценных и полудрагоценных камней также объясняется полным внутренним отражением.

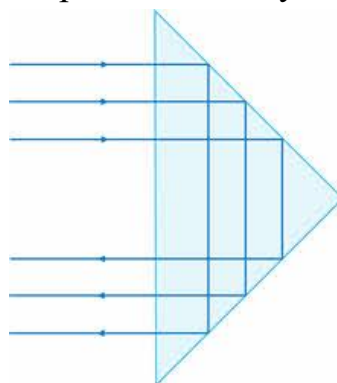
Полное внутреннее отражение можно наблюдать и если смотреть из-под воды на поверхность: при определённых углах на границе раздела наблюдается не внешняя часть (то, что в воздухе), а видно зеркальное отражение объектов, которые находятся в воде.

Полное отражение можно наблюдать и в равнобедренной прямоугольной стеклянной призме, которая широко используется в перископах, биноклях и так далее. Рассмотрим ход лучей в такой призме.



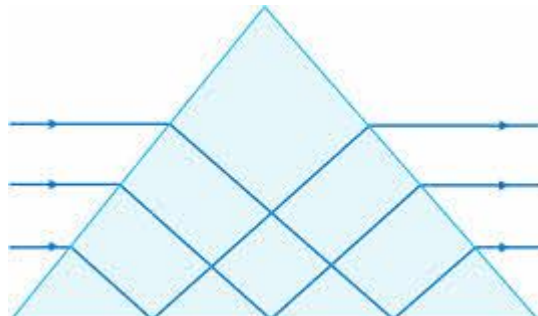
Итак, пусть параллельный пучок света падает перпендикулярно боковой грани призмы катетов. Лучи, не испытывая преломления, попадают на основание призмы под углом  $45^\circ$ . Но для стекла предельный угол равен  $42^\circ$ . Поэтому на этой грани свет испытывает полное внутреннее отражение и выходит из призмы перпендикулярно нижней грани. Такая призма называется **поворотной**, так как она поворачивает пучок света на  $90^\circ$ .

Теперь установим призму на одну из её вершин так, как это показано на экране, и направим на неё параллельный пучок света.



Внутри призмы свет испытывает уже двукратное полное отражение и пучок света после прохождения призмы поворачивается на  $180^\circ$ . Поэтому это тоже **поворотная призма**.

Перевернём ещё раз призму и повторим операцию. Не трудно заметить, что при выходе из призмы лучи параллельны падающим.



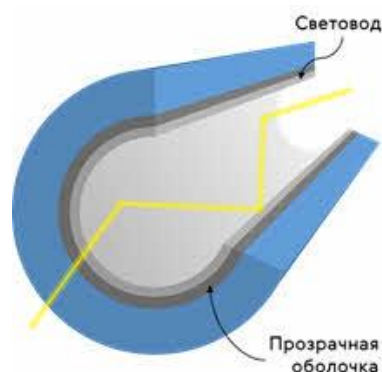
Но теперь верхний падающий луч выходит из призмы ниже, а нижний – выше. В этом случае призма называется **оборóтной**.

Несложное явление полного внутреннего отражения, впервые описанное Иоганном Кеплером в начале XVII века и, казалось бы, прекрасно изученное, сегодня стало объектом пристального внимания. Вначале полное отражение представляло лишь любопытное явление. Но со временем оно привело к революции в области передачи данных. В 1966 году открытие китайского учёного Чарльза Као, проложило дорогу оптическим волокнам, которые используются сегодня в области телевидения и интернет-связи.

Као удалось разработать метод производства сверхчистого оптического волокна, благодаря чему световые сигналы стало возможным передавать без искажений на расстояние до 100 км, по сравнению всего лишь с десятками метров, что было пределом на тот момент.

За «новаторские достижения в области передачи света по волокнам для оптической связи» в 2009 году учёный был удостоен Нобелевской премии по физике.

Оптическое волокно представляет собой стеклянное волокно – световод – цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.



Если в торец световода направить пучок света, то после многократного полного внутреннего отражения пучок выйдет с противоположной стороны практически без потерь энергии. Это произойдёт независимо от того, прямая это трубка или изогнутая. Волокна собираются в жгуты. При этом по каждому из волокон передаётся какой-нибудь элемент изображения.

Несущая частота при передаче сигнала световой волной в миллион раз превышает частоту радиосигнала, это значит, что количество информации, которое мы можем передать при помощи световой волны, в миллионы раз больше количества информации, передающейся радиоволнами. Волоконная оптика незаменима для быстрой и качественной передачи компьютерного сигнала, содержащего большой объём передаваемой информации. А в основе всего этого лежит такое простое и обычное явление, как преломление света.

Для закрепления материала решим с вами задачу. Определите предельный угол полного отражения на границе вещества со стеклом, показатель преломления которого равен 1,5, если известно, что на границе этого вещества с воздухом предельный угол полного отражения равен  $35^\circ$ .

**ДАНО**

$$n_{\text{ст}} = 1,5$$

$$n_{\text{возд}} = 1$$

$$\alpha_{01} = 35^\circ$$

$$\alpha_{02} = ?$$

**РЕШЕНИЕ**

Предельный угол полного отражения на границе «вещество — воздух»:

$$\sin \alpha_{01} = \frac{n_{\text{возд}}}{n_{\text{в}}} \Rightarrow n_{\text{в}} = \frac{n_{\text{возд}}}{\sin \alpha_{01}}$$

Предельный угол полного отражения на границе «вещество — стекло»:

$$\sin \alpha_{02} = \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{в}}} = \frac{n_{\text{ст}}}{\frac{n_{\text{возд}}}{\sin \alpha_{01}}} = \frac{n_{\text{ст}} \sin \alpha_{01}}{n_{\text{возд}}} \Rightarrow \alpha_{02} = \arcsin \frac{n_{\text{ст}} \sin \alpha_{01}}{n_{\text{возд}}}$$

$$\alpha_{02} = \arcsin \frac{1,5 \cdot \sin 35^\circ}{1} \cong \arcsin 0,86036 \cong 59,4^\circ$$

**ОТВЕТ:** предельный угол полного отражения на границе вещества со стеклом равен  $59,4^\circ$ .

## Лекция №35

Линза. Построение изображения в линзе. Формула тонкой линзы.

План

1. Линзы. Оптическая сила линзы.
2. Построение изображений в линзе.
3. Формула тонкой линзы. Увеличение линзы.

Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

Вопросы для самоконтроля:

1. Что называют линзой?
2. Какое определение вы дадите а) выпуклой линзе, б) вогнутой?
3. Какие виды линз существуют?
4. Что называется а) фокусом линзы, б) фокусным расстоянием?
5. Определите основные элементы, характеризующие тонкую линзу: фокусы (передний, задний, главный, побочный, действительный, мнимый), фокальные плоскости, оптические оси.
6. В каком случае фокус линзы действительный, в каком – мнимый?
7. Что такое оптическая сила линзы?
8. Какова единица измерения оптической силы линзы?
9. В каком случае оптическая сила линзы а) положительная, б) отрицательная?
10. Что называется тонкой линзой?
11. Назовите формулу тонкой линзы для случаев, когда изображение предмета действительное, мнимое. По какой формуле определяется фокусное расстояние линзы?
12. Назовите формулы линейного увеличения тонкой линзы.
13. Как с помощью линейки в солнечный день можно определить оптические силы собирающей и рассеивающей линз?

## 1. Линзы. Оптическая сила линзы.

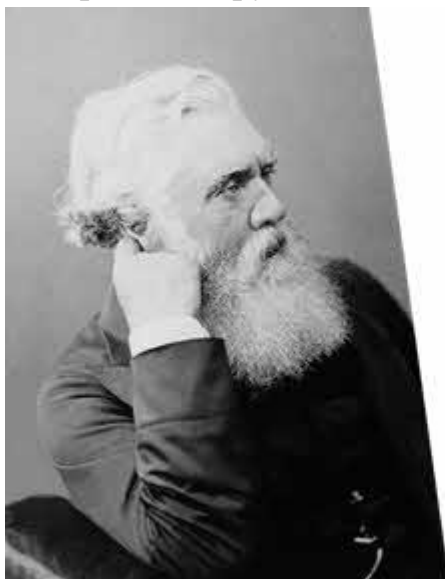
**Линза – это прозрачное тело, ограниченное криволинейными (чаще всего сферическими) или криволинейной и плоской поверхностями.**

Слово линза с латинского переводится, как «чечевица». Чечевица – это растение, плоды которого выглядят как короткие, приплюснутые с обеих сторон бобы.

Первое упоминание о линзах можно найти в древнегреческой пьесе Аристофана «Облака», датированной 424 годом до нашей эры, где с помощью выпуклого стекла и солнечного света добывали огонь.

Из произведений Плиния Старшего следует, что такой способ разжигания огня был известен и в Римской империи. Там также описан, возможно, первый случай применения линз для коррекции зрения. Известно, что римский император Нерон смотрел гладиаторские бои через вогнутый изумруд для исправления близорукости.

Но самой древней считается линза Нимруда (или линза Лэйарда), созданная примерно в 750-710 годах до нашей эры и найденная при раскопках в городе Нимруд – одной из древних столиц Ассирии.



Остин Лэйард  
1817—1894

В зависимости от форм различают **собирающие** (положительные) и **рассеивающие** (отрицательные) линзы. К группе собирающих линз обычно относят линзы, у которых середина толще краёв (их ещё называют **выпуклыми линзами**), а к группе рассеивающих – линзы, края которых толще середины (**вогнутые линзы**).

Собирающие  
(положительные)

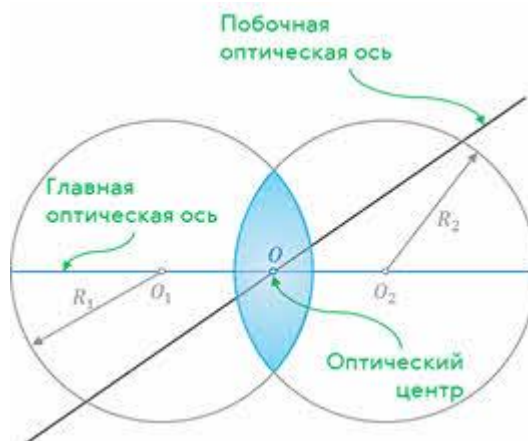


Рассеивающие  
(отрицательные)



Физической моделью реальной линзы служит **тонкая линза**. Так мы будем называть линзу, если её толщина мала по сравнению с радиусами сферических поверхностей линзы и расстоянием предмета от линзы.

Отметим сразу, что в дальнейшем, говоря о линзе, мы всегда будем иметь ввиду именно тонкую линзу.



Для такой линзы вершины сферических поверхностей практически совпадают, и эту точку называют **оптическим центром линзы**.

**Прямая, проходящая через центры сферических поверхностей, называется главной оптической осью линзы.** Любая другая прямая, проходящая через оптический центр линзы, называют **побочной оптической осью**.

Теперь посмотрим, как с помощью линзы можно изменить направление падающих на неё лучей. Для этого поместим в центр оптической шайбы двояковыпуклую линзу и направим на неё луч света вдоль главной оптической оси.



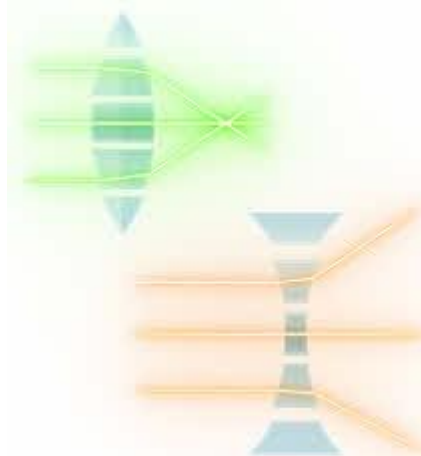
Как видим, луч прошёл через линзу без преломления. Если направить луч света через оптический центр под некоторым углом к главной оптической оси, то он также не изменит своего первоначального направления. Следовательно, **луч света проходит через оптический центр линзы без преломления.**

Теперь направим на линзу пучок света, лучи которого параллельны главной оптической оси. Как видим, они пересеклись в одной точке, лежащей на главной оптической оси. Значит, двояковыпуклая линза собирает преломлённые лучи. Поэтому такая линза и называется **собирающей.**



Заменяем линзу на двояковогнутую и повторим эксперимент. Не трудно заметить, что все лучи, кроме центрального, расходятся. Значит, двояковогнутая линза рассеивает параллельный пучок падающих на неё лучей. Поэтому такую линзу и принято называть **рассеивающей.**

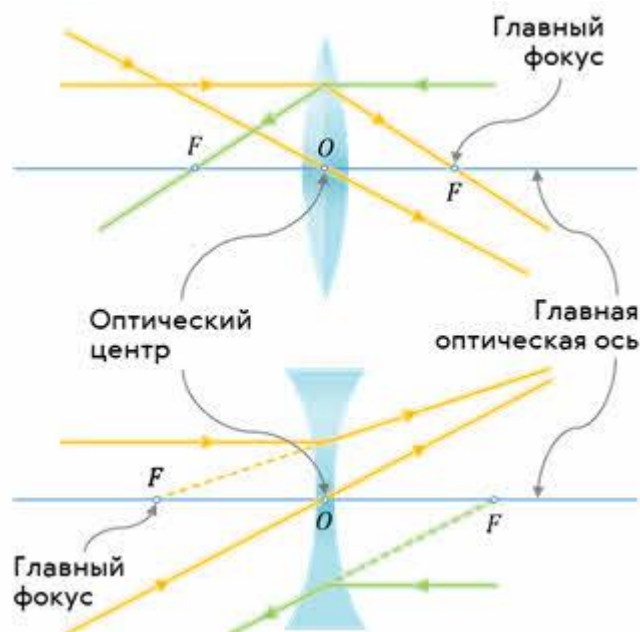
Выпуклую линзу можно представить в виде совокупности плоскопараллельной пластинки (в середине) и усечённых призм, расширяющихся к середине призмы, а вогнутую – как совокупность плоскопараллельной пластинки и усечённых призм, расширяющихся к краям.





Напомним, что если призма сделана из оптически более плотного материала, чем окружающая среда, то она отклоняет луч к основанию. Именно поэтому параллельный пучок после преломления в выпуклой линзе станет сходящимся, а в вогнутой – расходящимся.

**Точка, в которой пересекаются преломлённые линзой лучи, падающие параллельно главной оптической оси, или их продолжения, называется главным фокусом линзы.** Обозначается он большой латинской буквой  $F$ .



Главных фокусов у линзы два – передний и задний. Это обусловлено тем, что лучи света можно пустить как с одной, так и с другой стороны линзы. Оба фокуса лежат на главной оптической оси симметрично относительно оптического центра

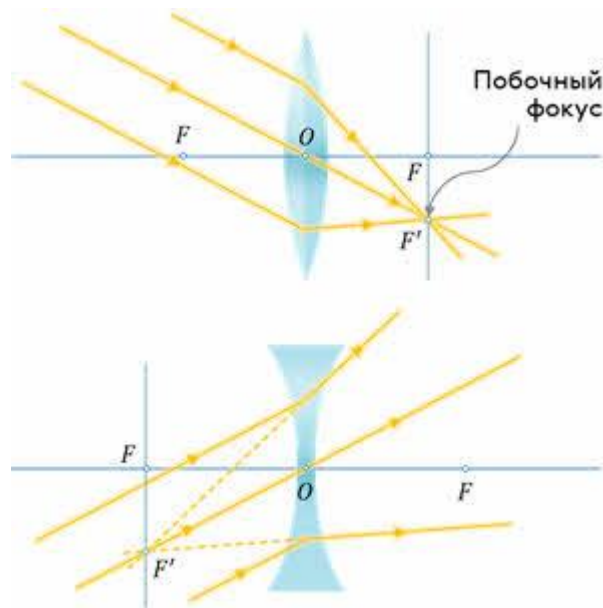
Обратите внимание, что у собирающей линзы в фокусе пересекаются сами преломлённые лучи, а у рассеивающей линзы – их продолжения. Поэтому условились считать **фокус собирающей линзы действительным**, а **рассеивающей – мнимым**.

Расстояние от оптического центра линзы до её главного фокуса, называется **фокусным расстоянием**. Его тоже принято обозначать латинской буквой  $F$ , а единицей его измерения в СИ является метр:

$$[F] = [\text{м}].$$

Видоизменим наш опыт так, чтобы свет, идущий от источников, падал под некоторым углом к главной оптической оси. Как видим, пересечение лучей произошло не в главном фокусе, а в другой точке.





Причём эта точка находится в плоскости, проходящей через главный фокус перпендикулярно главной оптической оси. Она называется **фокальной плоскостью**, а точка, в отличие от главного фокуса, называется **побочным фокусом** или просто – **фокусом**.

Аналогично определяется фокальная плоскость и побочный фокус для рассеивающей линзы

Очевидно, что различные линзы будут по-разному преломлять лучи света. Например, более выпуклая линза преломляет лучи сильнее, чем более вытянутая, так как у последней больше фокусное расстояние. Чтобы количественно оценить преломляющую способность линзы, вводят величину, называемую **оптической силой линзы**, которая обратно пропорциональна фокусному расстоянию:

$$D = \pm \frac{1}{F}.$$

В записанной формуле знак «+» берётся для собирающей линзы, а «-» – для рассеивающей, так как её фокус мнимый.

Единицей измерения оптической силы в СИ служит  $\text{м}^{-1}$ . внесистемной же единицей измерения является диоптрия, которая, например в Российской Федерации, допускается к применению без ограничения срока наравне с единицами СИ с областью применения «оптика».

Очевидно, что оптическая сила равна одному диоптрию, если фокусное расстояние линзы равно одному метру:

$$1 \text{ дптр} = \frac{1}{1 \text{ м}}.$$

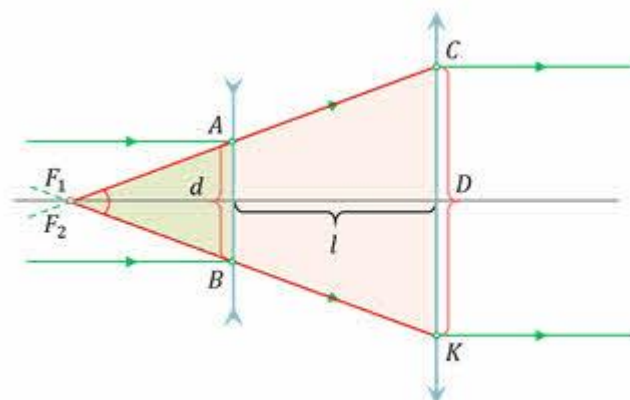
Опыт показывает, что **общая оптическая сила двух или более линз, сложенных вместе, равна алгебраической сумме оптических сил этих линз:**

$$D = D_1 + D_2 + \dots$$

Основные свойства тонкой линзы главным образом определяются расположением её фокусов. Это означает, что, зная расстояние от источника света до линзы и её фокусное расстояние, можно без проблем найти расстояние до изображения, не рассматривая ход лучей внутри линзы. Следовательно, нет необходимости изображать на чертеже точный вид сферических поверхностей линзы. Поэтому собирающую и рассеивающую линзы обозначают символами, представленными на экране.

Для закрепления нового материала, решим с вами такую задачу. Главные оптические оси собирающей (фокусное расстояние 48 см) и рассеивающей линз совпадают. Цилиндрический пучок лучей, параллельный главным оптическим осям, падает на рассеивающую линзу. Пройдя через обе линзы пучок света остался параллельным. Если на выходе его диаметр увеличился в полтора раза, то на каком расстоянии друг от друга расположены линзы?

ДАНО	РЕШЕНИЕ
$F_2 = 0,48 \text{ м}$	Расстояние между линзами:
$\frac{D}{d} = 1,5$	$l = F_2 -  F_1 .$
$l = ?$	Так как $\Delta F_1AB \sim \Delta F_1CK$ , то
	$\frac{D}{d} = \frac{F_2}{ F_1 } \Rightarrow  F_1  = \frac{F_2 d}{D}.$
	$ F_1  = \frac{0,48 \text{ м}}{1,5} = 0,32 \text{ м}$
	$l = 0,48 - 0,32 = 0,16 \text{ м}$



**ОТВЕТ:** линзы расположены на расстоянии 16 см друг от друга.

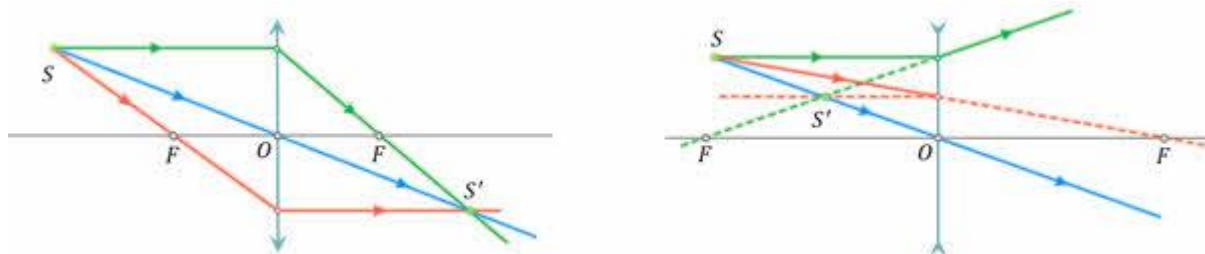
## 2. Построение изображений в линзе.

Давайте посмотрим, как же строятся изображения различных предметов в линзах. Для начала посмотрим, как получить изображения точечного источника света в собирающей и рассеивающей линзах. Для этого мы с вами в основном будем пользоваться тремя «удобными лучами», ход которых после прохождения через линзу нам заранее известен.

Во-первых, это лучи, идущие параллельно главной оптической оси, так как после преломления в линзе, они проходят через её главный фокус (или проходят их продолжения).

Из закона обратимости световых лучей следует, что лучи, которые идут к линзе через её фокус, после преломления будут направлены параллельно главной оптической оси – это второй набор лучей.

И третий набор лучей выбираем исходя из того, что лучи, проходящие через оптический центр линзы, не меняют своего направления.



Точка пересечения преломлённых лучей в собирающей линзе или их продолжений в рассеивающей, и даёт нам положение изображения точечного источника света.

Усложним задачу. Пусть точечный источник света располагается на главной оптической оси линзы. Чтобы найти, где образуется изображение, проведём от источника света два луча. Первый луч пустим вдоль главной оптической оси линзы, который, проходя через оптический центр, не испытывает преломления.

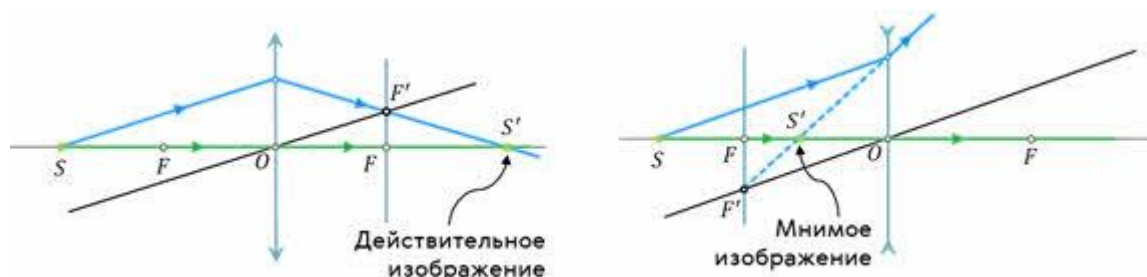
Второй луч направим под некоторым углом к линзе.

Теперь проведём побочную оптическую ось, проходящую через оптический центр линзы параллельно падающему лучу.

Далее проведём заднюю фокальную плоскость для собирающей линзы, или переднюю для рассеивающей.

Побочная оптическая ось пересечёт фокальную плоскость в побочном фокусе. Через этот побочный фокус и пойдут все параллельные данной оптической оси лучи после преломления в собирающей линзе, или продолжения преломлённых лучей в рассеивающей линзе.

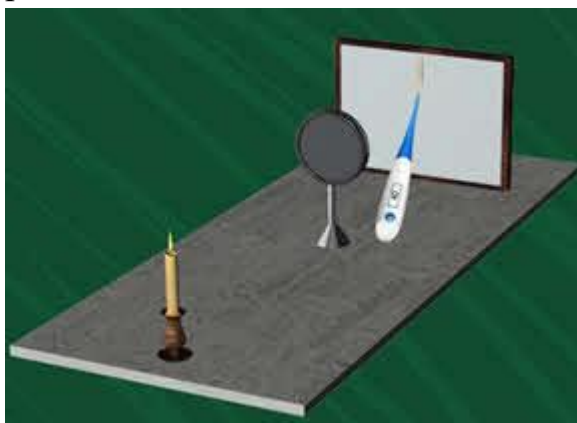
Преломлённый луч (или его продолжение) пересечёт главную оптическую ось в точке, которая и будет являться изображением точечного источника света.



При этом изображение в собирающей линзе будет являться действительным, так как оно получилось на пересечении самих

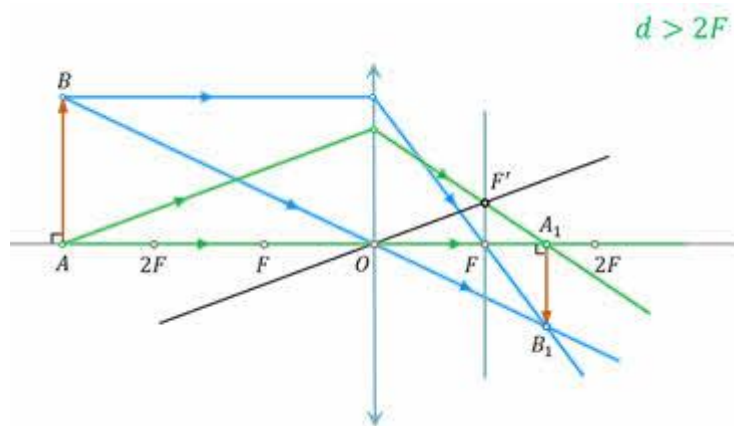
преломлённых лучей, а в рассеивающей – мнимым, так как оно получено на пересечении продолжений преломлённых лучей.

Теперь проведём небольшой опыт. На столе расположим экран, собирающую линзу и зажжённую свечу, удалённую от линзы на расстояние, большее, чем удвоенное фокусное. Будем передвигать экран в направлении к линзе до тех пор, пока на экране не увидим чёткое изображение пламени свечи. Чем отличается оно от изображения, которое мы увидим в зеркале, поместив перед ним эту же свечу? Во-первых, оно **уменьшенное**, во-вторых, **перевёрнутое**. Но самое главное в том, что это изображение, в отличие от мнимого изображения в зеркале, **реально существует**. На экране концентрируется энергия света.



Чувствительный термометр, помещённый в изображение пламени свечи, покажет повышение температуры.

Подтвердим сказанное построением (для наглядности вместо свечи используем стрелку). Итак, для получения изображения точки  $A$  воспользуемся двумя лучами. Первый луч пустим вдоль главной оптической оси линзы. Так как он проходит через оптический центр линзы, то он не испытывает преломления, поэтому мы его просто продолжаем его за линзу.



Второй луч направим под любым углом к линзе. Проводим побочную оптическую ось, проходящую через центр линзы параллельно падающему лучу. И указываем положение задней фокальной плоскости. Точка

пересечения побочной оптической оси и фокальной плоскости даёт нам положение побочного фокуса, через который пойдут все параллельные данной оптической оси лучи после преломления в линзе. Преломлённый луч пересечёт главную оптическую ось в точке, которая и будет являться изображением точки  $A$  предмета.

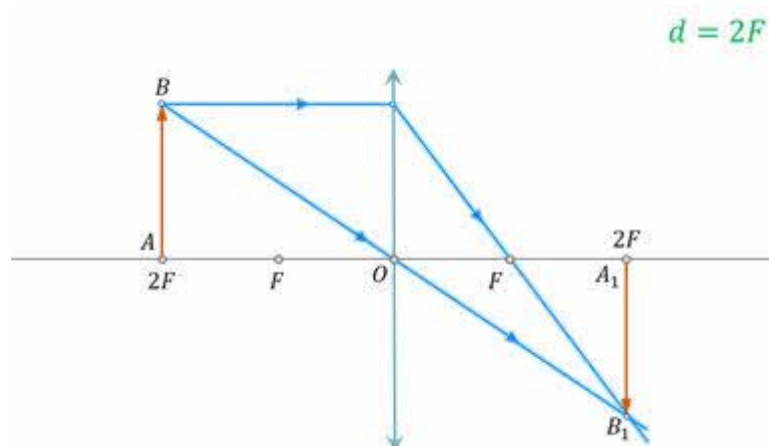
Чтобы построить изображение точки  $B$ , направим луч света параллельно главной оптической оси линзы. После преломления, этот луч, как мы уже знаем, пойдёт через главный фокус линзы. Вторым лучом можно направить через оптический центр линзы. В точке пересечения этих двух лучей и будет находиться изображение нашей точки  $B$ . Соединяя точки  $A_1$  и  $B_1$  получим изображение предмета в линзе.

Теперь давайте охарактеризуем полученное нами изображение. Во-первых, оно действительное, так как получилось на пересечении преломлённых лучей. Во-вторых, оно перевёрнутое. Ну и, в-третьих, как можно видеть из построения, оно уменьшенное.

Обратите внимание, что если предмет расположен перпендикулярно главной оптической оси, то и его изображение также будет перпендикулярно ей. Зная это, мы сможем построить изображение точки  $B$  просто опустив перпендикуляр из точки  $A_1$  на главную оптическую ось, что мы и будем делать в дальнейшем.

Продолжим опыт. Поставим свечу на расстоянии, равном двойному фокусному.

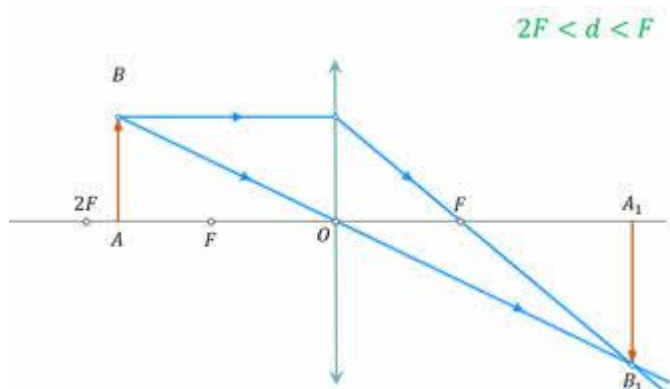
Перемещая экран, мы увидим на нём **действительное, перевёрнутое изображение** пламени свечи, но **размер его будет равен размеру пламени** самой свечи. Сделайте сами построение изображения для этого случая.



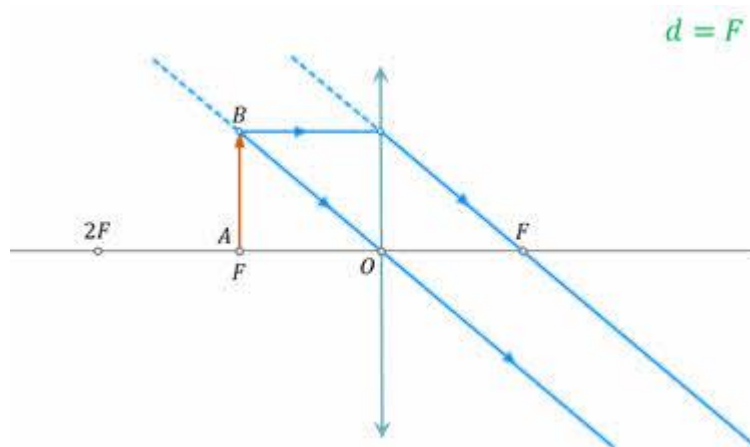
Как видим, и вправду оно у нас получилось действительным, перевёрнутым и равным по высоте предмету.

Передвинем свечу так, чтобы она находилась между первым и вторым фокусом линзы ( $F < d < 2F$ ). На экране мы увидим **действительное,**

**перевернутое, увеличенное изображение** пламени свечи. Докажем и этот случай построением.

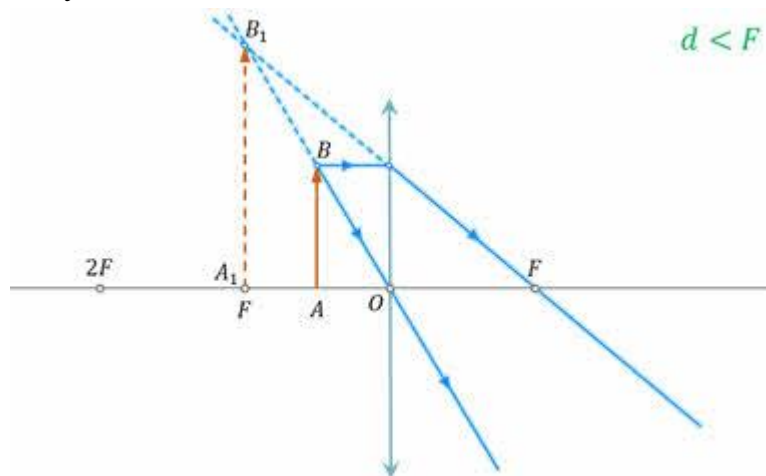


Теперь передвинем нашу свечу так, чтобы она находилась в главном фокусе линзы – изображения нет. Проверим это построением.



Как видим, преломлённые линзой лучи не пересекаются, как и не пересекаются их продолжения. Следовательно, изображения в этом случае действительно отсутствует.

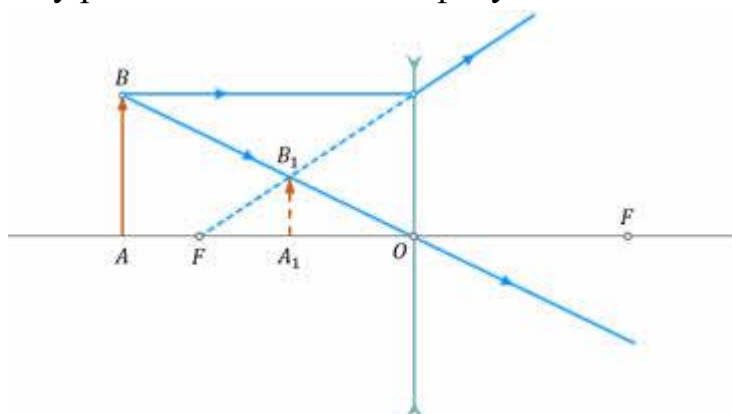
И, наконец, поставим свечу между главным фокусом и линзой. Изображения свечи и в этом случае не видно. Давайте построим ход лучей в линзе для этого случая.





Как видим, преломлённые лучи расходятся. Но вот их продолжения пересекаются. Поэтому изображение предмета будет мнимым, увеличенным, прямым и находится со стороны изображаемого предмета. Именно так и работает увеличительное стекло, используемое людьми для рассмотрения мелких объектов.

При построении изображения предметов в рассеивающей линзе поступают точно так же, как и в случае с собирающей. Единственное отличие состоит в том, что у рассеивающей линзы фокус мнимый.



Поэтому изображение, даваемое рассеивающей линзой, всегда **мнимое, прямое, уменьшенное и находится между линзой и её фокусом со стороны изображаемого предмета.**

### 3. Формула тонкой линзы. Увеличение линзы.

Теперь давайте выведем формулу, которая свяжет три величины – расстояние от предмета до линзы, расстояние от линзы до изображения и фокус линзы. Все размышления, которые мы будем проводить для собирающей линзы, справедливы и для линзы рассеивающей.

$$\triangle ABO \sim \triangle A_1B_1O \Rightarrow \frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AO}{A_1O}$$

$$\triangle OCF \sim \triangle A_1B_1F \Rightarrow \frac{OC}{A_1B_1} = \frac{OF}{A_1F}$$

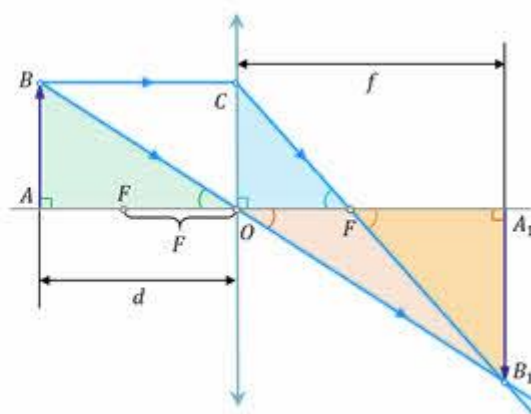
Из построений следует, что

$$AB = OC, A_1F = A_1O - OF.$$

$$\frac{OF}{A_1O - OF} = \frac{AO}{A_1O} \Rightarrow \frac{F}{f - F} = \frac{d}{f} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Ff = df - dF \quad | : Ffd$$

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{F} - \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$



В общем же виде формула тонкой линзы записывается следующим образом: сумма величин, обратных расстояниям от предмета до линзы и от линзы до изображения, равна величине, обратной фокусному расстоянию:





## Лекция №36

### Дисперсия света. Интерференция света. Дифракция света.

#### План

1. Дисперсия света.
2. Интерференция света.
3. Дифракция света. Дифракционная решетка.

#### Литература:

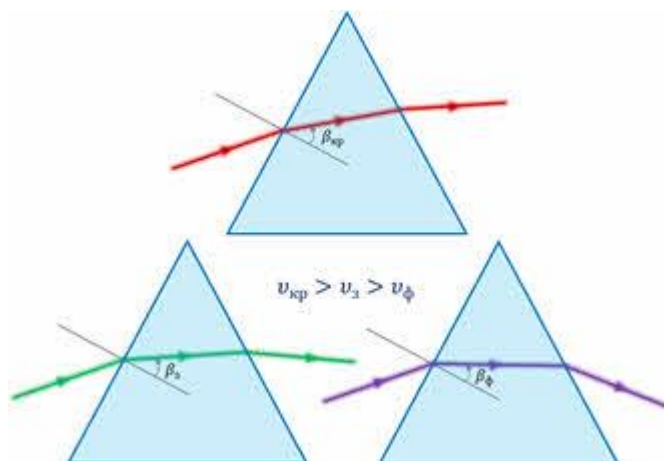
1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называется дисперсией света?
2. Почему при прохождении белого света через призму он разлагается в спектр?
3. Каков физический смысл абсолютного показателя преломления среды?
4. В чем отличие нормальной дисперсии от аномальной?
5. В каких оптических приборах применяется явление дисперсии? С какими целями?
6. В чем различие дисперсионного и дифракционного спектров?
7. В чем заключается явление интерференции?
8. Какие волны называются когерентными?
9. При какой разности фаз интерферирующих волн наблюдается максимум интерференции? Минимум интерференции?
10. Как записываются условия максимума и минимума интерференции, выраженные через оптическую разность хода?
11. Как записываются условия максимума и минимума интерференции в тонкой пленке?
12. Какое явление называется дифракцией?
13. В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля?
14. Как записываются условия максимума и минимума при дифракции на одной щели?
15. Как записывается условие главных максимумов для дифракционной решетки?
16. Что такое период дифракционной решетки?
17. Что такое разрешающая способность дифракционной решетки? От чего она зависит?

## 1. Дисперсия света.

Возьмём три одинаковые трёхгранные призмы и пропустим через них пучки монохроматического света различных цветов, например, красного, зелёного и фиолетового.



Как видим, лучи фиолетового цвета испытывают большее преломление по сравнению с зелёными.

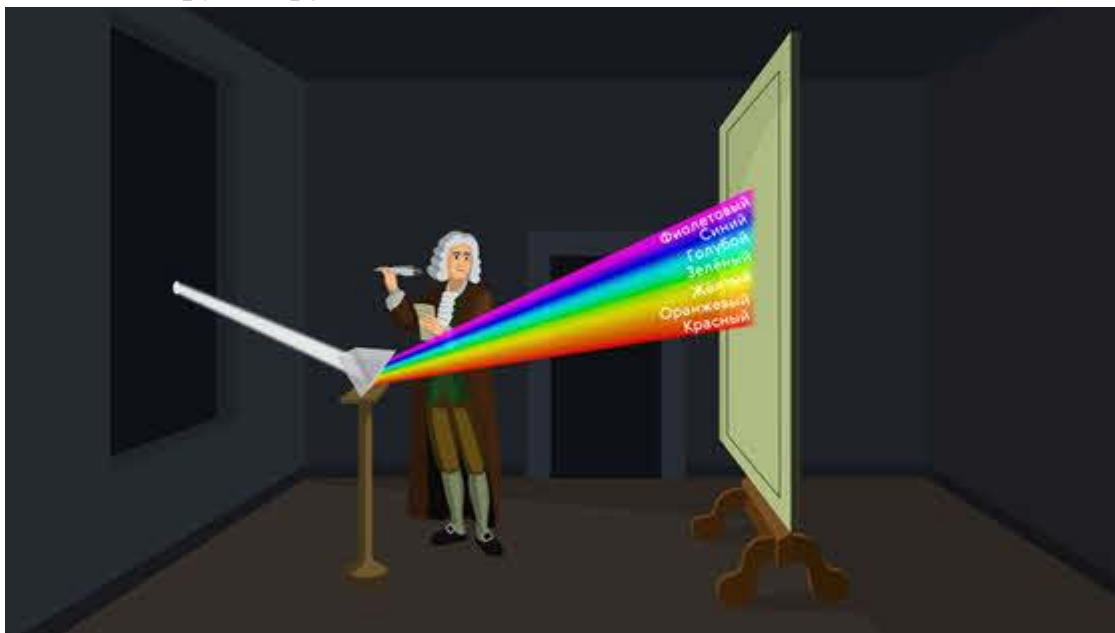
А лучи красного цвета преломляются меньше всего. Это говорит нам о том, что угол преломления красных лучей больше, чем для лучей зелёного и фиолетового цветов. Тогда, из закона преломления света следует, что красный свет в среде распространяется быстрее. Но поскольку цвет, воспринимаемый человеческим глазом, определяется только частотой световой волны, **то цвет при переходе из вакуума в вещество или из одного вещества в другое не изменяется.**

Зависимость скорости распространения световых волн в среде (или зависимость показателя преломления среды) от частоты (или длины волны) света называют **дисперсией света.**

Впервые подробно исследовал дисперсию света сэр Исаак Ньютон. До Ньютона считалось, что цвет тела – это свойство самого тела. Например, Аристотель объяснял наличие различных цветов смешением белого света с определённым количеством темноты: немного темноты, добавленной к свету, даёт красный свет; большее количество темноты – и вот мы уже видим фиолетовый свет. И эта теория господствовала вплоть до середины XVII века.

В 1666 году Исаак Ньютон, занимаясь усовершенствованием телескопов, обратил внимание на интересный факт: изображение, получаемое с помощью объектива телескопа, по краям было окрашено. Предполагая, что это может быть как-то связано с явлением преломления света, он поставил небольшой эксперимент, который детально описал в

трактате «Оптика»: «Я поместил в очень темной комнате у круглого отверстия около трети дюйма шириной в ставне окна стеклянную призму, благодаря чему пучок солнечного света, входившего в это отверстие, мог преломляться вверх к противоположной стене комнаты и образовывал там цветное изображение Солнца состоящее из ряда цветных полос плавно переходящих друг в друга».



Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зелёный, жёлтый, оранжевый и красный. Саму же радужную полоску Ньютон назвал **спектром**.

Казалось бы, простейший опыт Ньютона показал, что **белый свет является сложным: пройдя через призму, он разлагается на пучки различных цветов.**

Однако не все приняли результаты опыта – слишком уж необычным казалось это предположение. Основные вопросы сводились к следующему: почему белый свет, входящий в призму, выходит из неё в виде цветной полосы, содержащей именно семь цветов; почему круглый в сечении пучок после преломления в призме оказался существенно растянутым в длину; и, может это вещество, из которого изготовлена призма, окрашивает белый свет?

Для решения всех этих вопросов Ньютон провёл ещё несколько простых, но в то же время гениальных экспериментов. В начале он на пути пучка, прошедшего через призму, поместил собирающую линзу. Пройдя через неё пучок разноцветных лучей в точке схождения вновь становился белым. Такой же результат давала и вторая призма, повёрнутая на

180° относительно первой. Таким образом было доказано, что свет действительно имеет сложную структуру.



Следующие опыты Ньютона были посвящены изучению влияния вещества призмы на характер окрашивания светового пучка. Закрыв отверстие красным стеклом, Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрыв синим стеклом – синее пятно и так далее. Это означало, что не призма окрашивает белый свет, так как она не может влиять на цвет светового пучка.

Отдельные цветные лучи, которые после прохождения призмы не разлагались на составляющие, были названы **простыми** или **монохроматическими**.

Опытным путём Ньютон нашёл ответ и на ещё один важный вопрос: почему пучки разных цветов по-разному отклоняются призмой? В своём фундаментальном трактате «Оптика» Ньютон так сформулировал полученный им вывод: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости. В наибольшей степени преломляются фиолетовые пучки, в наименьшей – красные».



Однако и эти опыты не смогли убедить некоторых сторонников Аристотеля. Например, выдающийся немецкий поэт и видный естествоиспытатель Иоганн Гёте писал: «Утверждение Ньютона – это чудовищное предположение. Не может быть, что самый прозрачный, самый чистый цвет – белый – оказался смесью цветных лучей». Поэт считал, что исследованный Ньютоном свет – это свет, «замученный всякого рода орудиями пытки – щелями, призмами и линзами».

Друзья, избегайте тёмной комнаты,  
Где вам искажают свет  
И самым жалким образом  
Склоняются перед искажёнными образами.

Ранее мы с вами показали, что показатель преломления среды зависит от скорости света в веществе. Следовательно, пучок фиолетового цвета преломляется в большей степени потому, что фиолетовый цвет имеет в веществе наименьшую скорость. Красные же лучи преломляются меньше других потому, что их скорость в веществе наибольшая. Это означает, что **показатель преломления вещества, из которого сделана призма, зависит не только от свойств самого вещества, но и от частоты проходящего через него света.**

Скорость распространения  
монохроматических лучей в  
исландском шпате

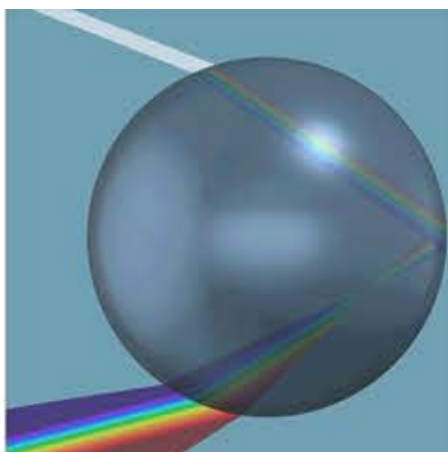
Цвет	Показатель преломления	Скорость, м/с
Фиолетовый	1,55716	192 658 429
Синий	1,55103	193 419 856
Голубой	1,54823	193 769 659
Зелёный	1,54425	194 269 062
Жёлтый	1,54282	194 449 125
Оранжевый	1,54190	194 565 147
Красный	1,53907	194 922 908

С помощью дисперсии света объясняются многие явления природы, например, радуга. Она является одним из самых красивых явлений природы и поэтому поэтизировалась многими народами:

*Как неожиданно и ярко,  
На влажной неба синеве,*

*Воздушная воздвиглась арка  
В своём минутном торжестве!  
Один конец в леса вонзила,  
Другим за облака ушла – Она полнеба обхватила  
И в высоте изнемогла.*  
Фёдор Тютчев

Радуга возникает из-за того, что солнечный свет преломляется и отражается капельками воды, парящими в атмосфере. Эти капельки по-разному отклоняют свет разных цветов, в результате чего белый свет разлагается в спектр.

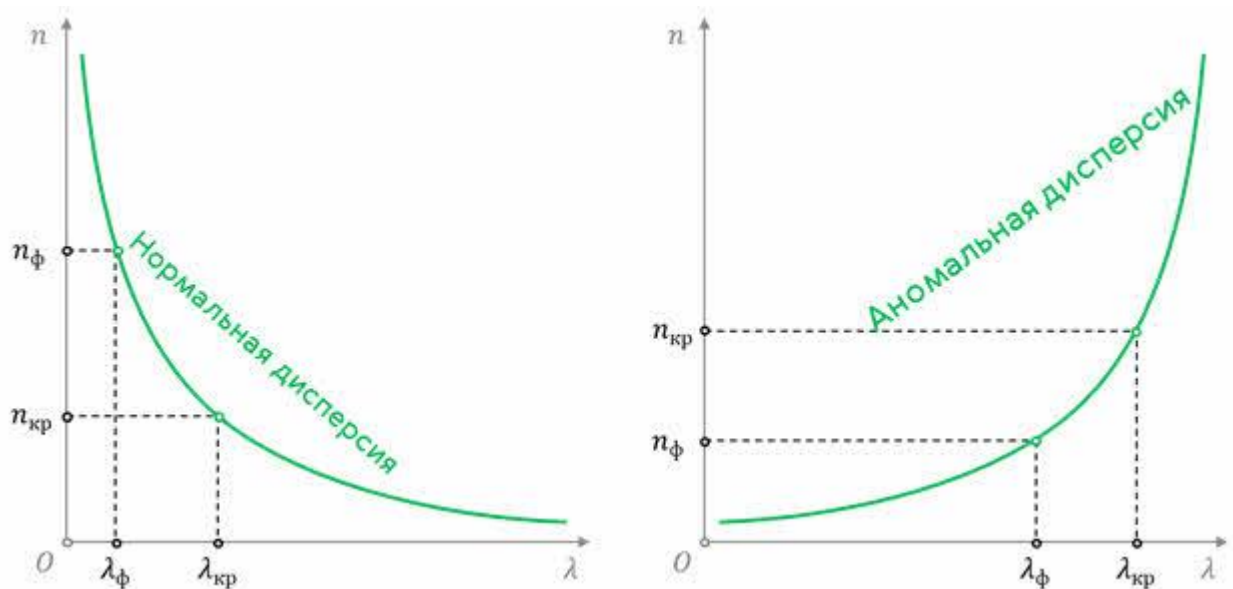


Наблюдатель, который стоит спиной к источнику света, видит разноцветное свечение, которое исходит из пространства по концентрическим окружностям (дугам). При этом радуга появляется только в том случае, если угловая высота Солнца над горизонтом не превышает  $42^\circ$ .

Дисперсией света объясняется возникновение и такого явления, как гало. Его можно наблюдать зимой в виде кругов, столбов или крестов вокруг Солнца и Луны. Здесь дисперсия происходит в ледяных кристалликах на высоте около 10 км в верхних слоях тропосферы.

Дисперсия присуща всем средам, кроме вакуума. Её можно представить в виде зависимости показателя преломления вещества от частоты падающего света. Как показали различные опыты, для большинства веществ показатель преломления уменьшается с уменьшением частоты. Причём зависимость эта нелинейная. Дисперсию такого рода называют **нормальной**.

Однако в парах йода и в некоторых жидкостях учёные наблюдали и **аномальную дисперсию**. При такой дисперсии показатель преломления увеличивается с увеличением длины волны. Проще говоря, в них скорость распространения красных лучей меньше, чем фиолетовых.



В настоящее время, для получения хороших и ярких дисперсионных спектров используются специальные оптические приборы – спектрометры и спектрографы. Первый спектрометр был изобретён в 1815 году немецким физиком Йозефом Фраунгофером. Он состоял из окуляра, зрительной трубы, двух объективов, коллиматора и дифракционной щели.



В оригинальном дизайне спектрометра свет, прошедший через щель, расположенную в фокальной плоскости коллиматорной линзы, преобразовывался в тонкий световой пучок и попадал на призму. Из призмы выходят уже параллельные пучки разного направления, которые, преломившись в линзе зрительной трубы, образуют в её фокальной плоскости изображение щели. Если исследуется белый свет, то изображения щели сливаются в одну цветную полосу всех основных цветов. Если же исследуемый свет является монохроматическим, то спектр получается в виде узких линий, разделённых широкими тёмными промежутками.



Таким образом, с помощью призмы, как и с помощью дифракционной решётки, можно получить спектр некоторого излучения. Однако в дисперсионном и дифракционном спектрах имеются различия:

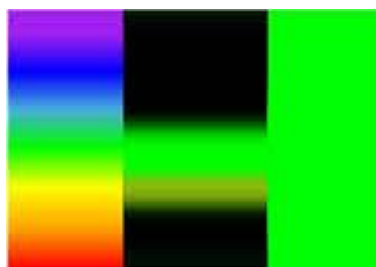
1) для дифракционного спектра можно создать равномерную шкалу по  $\lambda$ . Для дисперсионного спектра этого сделать нельзя, так как зависимость показателя преломления от длины волны является нелинейной функцией.

2) в дисперсионном спектре большее отклонение от первоначального направления испытывают фиолетовые лучи, в дифракционном же – красные.

3) в дифракционном спектре наблюдается несколько порядков спектра, в дисперсионном – один.

Итак, мы уже выяснили, что окружающий нас мир является красочным именно потому, что солнечный свет является сложным. Но всё же пока не ясно, почему же окружающий нас мир пестрит различными красками. И почему различные предметы, освещённые одним и тем же солнечным светом, имеют разный цвет?

Чтобы разобраться в этом, получим на экране спектр белого света. Теперь возьмём цветную бумажную полоску (например, зелёного цвета) и закроем ей часть спектра. Обратите внимание на то, что цвет полоски остался зелёным только в той области спектра, где на неё падают зелёные лучи. В жёлтой области спектра наша бумажка изменила оттенок. А в остальных частях спектра она выглядит тёмной.



Это говорит нам о том, что тела, имеющие зелёную окраску, способны отражать в основном лучи зелёного цвета, а остальные поглощают. Аналогично тела, имеющие красную окраску, в основном отражают красные лучи. Белые тела, которые освещаются дневным светом, в равной степени отражают лучи всех цветов, поэтому мы их и видим белыми. Чёрные же тела, наоборот, поглощают практически все падающие на них лучи. Что касается прозрачных тел, то их цвет обусловлен составом того цвета, который прошёл через них.

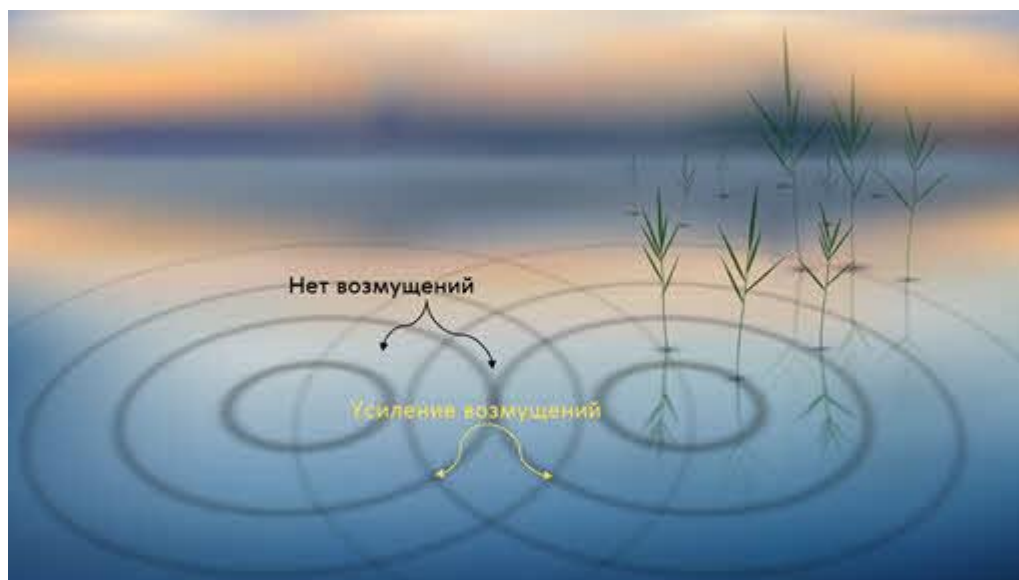


## 2. Интерференция света.

Напомним, что одни учёные полагали, что свет – это поток частиц (корпускул) идущих от источника по всем направлениям. Другие же, напротив, считали, что свет представляет собой упругую волну, распространяющуюся в мировом (светоносном) эфире, заполняющем всё пространство как внутри материальных тел, так и между ними. Но тогда возникает закономерный вопрос: если свет – это поток волн, то должно наблюдаться явление интерференции света.

Давайте с вами вспомним, что **интерференцией называется сложение в пространстве волн, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний частиц среды.**

Наблюдать интерференционную картину с механическими волнами было легко на поверхности воды, например от двух брошенных в воду камней.



При этом мы видели, что если гребень одной волны встречался с гребнем другой волны, то возмущение поверхности воды усиливалось. Если же, напротив, гребень одной волны встречался с впадиной другой, то поверхность воды оставалась невозмущённой.

Однако со светом дела обстоят несколько иначе. Рассмотрим простой опыт с двумя независимыми источниками света, например, электрическими лампочками. Поставим недалеко от светящейся лампочки экран. Что произойдёт, если мы включим вблизи экрана вторую лампочку.



Правильно, это приведёт к увеличению освещённости поверхности экрана, но не создаст на нём чередование максимумов и минимумов освещённости.

Почему так происходит? Давайте вспомним, что при изучении интерференции механических волн мы говорили о том, что волны, идущие от двух источников, должны быть **когерентными, то есть при одинаковой длине они должны выходить из центров колебания в одинаковых фазах.**

Точного равенства длин волн от двух источников добиться нетрудно. Для этого, например, можно использовать хорошие светофильтры, пропускающие свет в очень узком интервале длин волн. Но вот осуществить постоянство разности фаз от двух независимых источников невозможно. Дело в том, что атомы источников излучают свет независимо друг от друга и в течение очень короткого промежутка времени (около 10 нс). За такое время атом успевает испустить лишь ограниченный цуг волн (обрывок синусоиды некоторой длины). И вот такие цуги волн от обоих источников налагаются друг на друга. Но так как моменты излучения атомов согласовать невозможно, то и амплитуда колебаний в любой точке пространства хаотично меняется со временем в зависимости от того, как в данный момент времени цуги волн от различных источников сдвинуты относительно друг друга по фазе. Поэтому **волны от различных источников света некогерентны** (их разность фаз не остаётся постоянной, за исключением квантовых источников света).

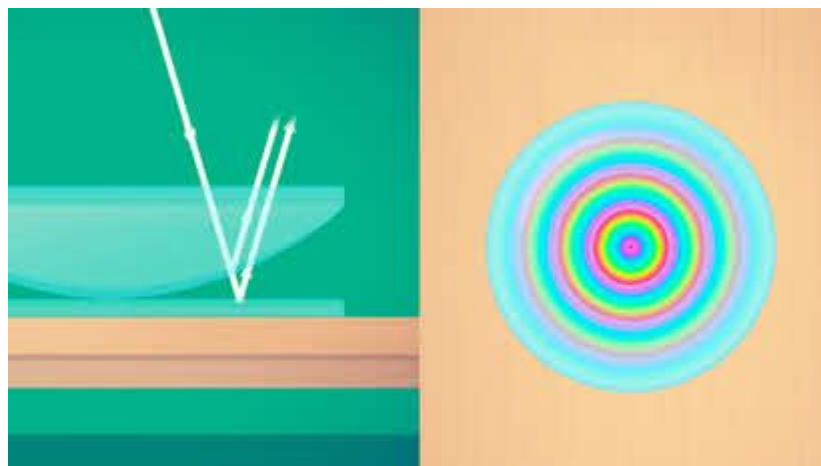
Один из первых опытов по обнаружению интерференции света был проведён в середине XVII века итальянским учёным Франческо Мария Гримальди. Закрывшись в тёмной комнате, он проделал в ставнях два небольших отверстия, тем самым получив два конуса световых лучей.



Поместив экран в том месте, где пересекались конусы света, он неожиданно обнаружил, что в некоторых местах освещённость экрана меньше, чем если бы его освещал только один конус света. Тогда Гримальди заключил, что «прибавление света к свету не всегда увеличивает освещённость».

Однако есть и более простые способы наблюдения интерференции света, с которыми знаком практически каждый из вас. Посмотрим на мыльный пузырь – на свету он играет радужными красками. Или вот, тонкая плёнка бензина на поверхности воды – она также переливается всеми цветами радуги. При этом, как было обнаружено ещё Робертом Гуком, изменение толщины мыльной плёнки приводит к изменению её цвета. По мнению учёного это объяснялось тем, что **свет является неким колебательным движением (по-простому, волной), распространяющимся в светоносном (или мировом) эфире**. Следовательно, световая волна, попадая на мыльную плёнку, отражается от её верхней и нижней поверхностей и, попадая в глаза, производит ощущение различных цветов (это вскоре и было доказано Томасом Юнгом). Однако, из-за того, что Гук не связывал цвет с частотой света или с длиной волны, он не смог разработать точную теорию наблюдаемого явления.

Интерференцию света наблюдал и знаменитый сэр Исаак Ньютон в 1675 году. На плоскую стеклянную пластину учёный поместил плоско-выпуклую линзу от объектива телескопа, выпуклой стороной вниз.



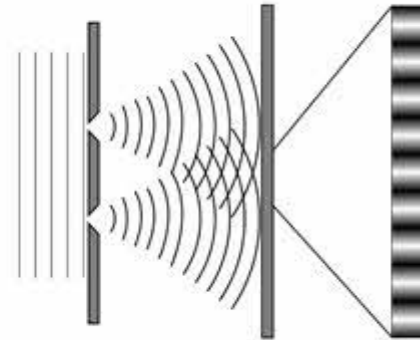
При этом, между нижней – плоской и верхней – выпуклой поверхностями образуется очень тонкий клин воздуха. Если на такую систему в направлении, перпендикулярном плоской поверхности, падает пучок белого света, то световые волны, отражённые от каждой из упомянутых поверхностей, интерферируют между собой. Сформированная таким образом интерференционная картина представляла собой систему радужных колец с тёмным центральным пятном. Если же установку освещать монохроматическим светом, то в центре картины обнаруживалось тёмное пятно, окружённое чередующимися светлыми и тёмными концентрическими кольцами. При этом радиусы колец одного и того же порядкового номера зависели от цвета светового луча.

Напомним, что Ньютон был сторонником корпускулярной теории света, поэтому появление колец он пытался объяснить именно с позиции представления света как о потоке частиц, что, скажем честно, ему совсем не удалось. Оно и понятно, ведь явление интерференции можно объяснить только на основе волновых свойств света, что и показал в 1802 году Томас Юнг. Кстати, именно Юнг и ввёл в обиход термин «интерференция» в 1803 году.

Итак, согласно теории Юнга, кольца Ньютона возникают в отражённом свете в результате того, что лучи света, отражённые от верхней и нижней поверхности воздушной прослойки, интерферируют друг с другом. При этом когерентность волн обеспечена тем, что отражённые от двух поверхностей лучи являются частями одного и того же светового пучка. Юнг понял также, что различие в цвете связано с различием в длине волны (или частоте световых волн).

В настоящее время для получения интерференционной картины пользуются классической интерференционной схемой – схемой Юнга, где пучок света от небольшого отверстия в ширме разделяется на два когерентных пучка с помощью двух небольших отверстий в следующей

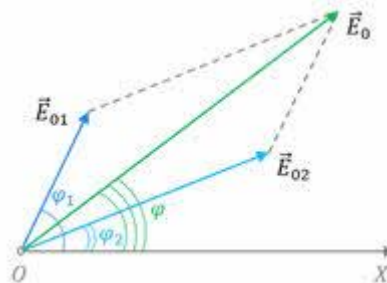
ширме. Поскольку эти пучки созданы одним и тем же источником, они являются когерентными. Поэтому на экране в области перекрытия пучков наблюдается интерференционная картина чередования максимумов и минимумов интенсивности световой волны.



Томас Юнг  
1773—1829

Объясняется это следующим. При наложении двух когерентных световых волн в пространстве происходит перераспределение энергии по волновому фронту:

$$E_1 = E_{01} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right); E_2 = E_{02} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)$$



Однако среднее значение энергии во всех точках равно сумме энергий, приносимых обеими волнами:

$$E^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos \Delta\varphi.$$

Как видно из формулы, амплитуда результирующего колебания световой волны зависит от разности фаз, которая, в свою очередь, зависит от геометрической разности хода:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda}$$

Так вот, если эта разность хода будет равна целому числу длин волн, то колебания, возбуждаемые в некоторой точке обеими волнами, будут находиться в одинаковых фазах и, как следствие, усиливать друг друга:

$$\Delta r = \pm k\lambda.$$

Если же разность хода равна будет равна нечётному числу длин полуволин, то колебания, возбуждаемые в некоторой точке обеими волнами, будут находиться в противофазе и, как следствие, друг друга ослаблять:

$$\Delta r = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Теперь, для закрепления нового материала, решим задачу. Два когерентных источника монохроматического света с длиной волны 0,5 мкм находятся на расстоянии 2 мм друг от друга. Параллельно линии, соединяющей источники, расположен экран на расстоянии 2 м от них. Максимум или минимум освещённости будет наблюдаться в точке А экрана?

**ДАНО**

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$l = 2 \text{ м}$$

$$\frac{\Delta r}{\lambda/2} = ?$$

**РЕШЕНИЕ**

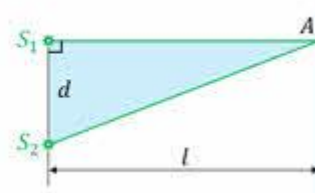
$$\text{Условие максимума интерференции: } \Delta r = \pm 2k \frac{\lambda}{2}.$$

$$\text{Условие минимума интерференции: } \Delta r = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

$$\text{Разность хода: } \Delta r = |S_2A| - |S_1A| = \sqrt{l^2 + d^2} - l =$$

$$= l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2} - l \cong l \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{l}\right)^2\right) - l = l + \frac{ld^2}{2l^2} - l = \frac{d^2}{2l} = \frac{(2 \cdot 10^{-3} \text{ м})^2}{2 \cdot 2 \text{ м}} = 10^{-6} \text{ м}.$$

$$\frac{\Delta r}{\lambda/2} = \frac{10^{-6} \text{ м}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \cdot 2 = 4$$



**ОТВЕТ:** в точке А наблюдается максимум освещённости.

В заключение отметим, что открытие явления интерференции света не только показало, что свету присущи волновые свойства, но и позволило определить длины волн светового излучения, что и проделал Томас Юнг. Оказалось, что самая большая длина волны у красного света (760 нм), а самая маленькая – у фиолетового (480 нм).

Отсюда вытекает один интересный факт: оказывается в природе нет никаких красок. Есть лишь электромагнитные волны разных длин волн, которые по-разному отражаются и поглощаются различными телами. Однако об этом мы с вами поговорим в ближайшее время.

### Методы наблюдения интерференции света. Применение интерференции.

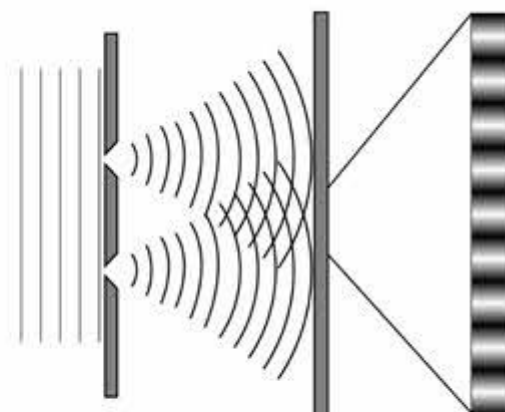
До появления лазеров во всех приборах для наблюдения интерференции света когерентные волны получали разделением и последующим сведением световых волн, представляющих части одной и той же волны, идущие от единственного источника и достигающие точки наблюдения разными путями.

Один из таких методов (мы с ним познакомились на прошлом уроке) был предложен Томасом Юнгом. Напомним, что в установке источником света служила ярко освещённая щель, от которой фронт волны падал на две



узкие равноудалённые щели, параллельные первой. Таким образом, эти две щели играли роль когерентных источников.

Интерференционная картина наблюдалась на экране, расположенном параллельно щелям в области перекрытия волн. В центре картины была расположена светлая полоса, а по краям радужные полосы в случае белого света, или чередование тёмных и светлых полос в случае света монохроматического.



Томас Юнг  
1773—1829

Второй способ наблюдения интерференции был предложен современником Юнга Огюстеном Френелем. В его установке свет от источника расходящимся пучком попадает на два плоских зеркала, расположенных друг от друга под углом, близким к  $180^\circ$ . Световые пучки, отразившиеся от обоих зеркал, можно считать выходящими от источников, являющихся мнимыми изображениями источника света в зеркалах.



Мнимые источники когерентны, и исходящие из них световые лучи, встречаясь друг с другом, интерферируют в области взаимного перекрытия.

Интерференционная картина наблюдается на экране, защищённом от прямого попадания света источника непрозрачным экраном.

На основе явления интерференции основан принцип действия специальных измерительных приборов – интерферометров.

Один из первых интерферометров, позволившим измерить длину волны света, был сконструирован американским физиком Альбертом Майкельсоном. Рассмотрим принцип его действия на упрощённой схеме. Итак, монохроматический луч света от источника, пройдя через узкую щель непрозрачного экрана, попадает на полупрозрачное зеркало, наклонённое под углом  $45^\circ$ , где разделяется на два луча.

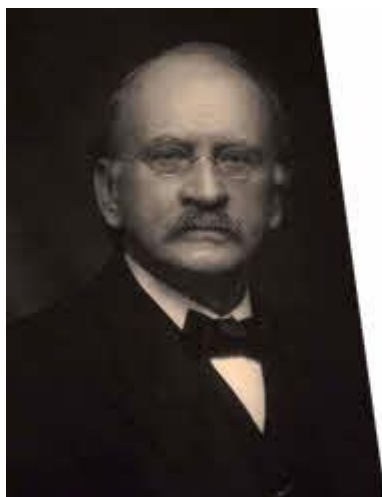


На одинаковом расстоянии от зеркала установлены два плоских зеркала. Лучи света, отражаясь от этих зеркал, снова падают на полупрозрачное зеркало, частично отражаются, частично проникают сквозь него и попадают на экран (или в зрительную трубу). Так как первый луч проходит полупрозрачную пластинку дважды, то для компенсации возникшей разности хода на пути второго луча ставится ещё одна точная такая же пластинка, но только полностью прозрачная).

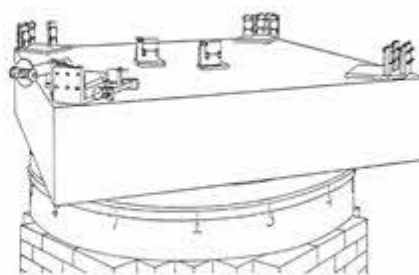
Лучи когерентны, следовательно, будет наблюдаться интерференция, результат которой зависит от оптической разности хода луча 1 от точки  $O$  до зеркала  $M_1$  и луча 1 от точки  $O$  до зеркала  $M_2$ . Следовательно, по незначительному смещению интерференционной картины можно судить о малом перемещении одного из зеркал и использовать интерферометр для достаточно точных измерений длин волн и прочего.

Так, например, Майкельсон совместно с другим физиком Эдвардом Морли использовал свой интерферометр для того, чтобы «раз и навсегда доказать скептикам, что светоносный эфир реально существует, наполняет Вселенную и служит средой, в которой распространяются свет и прочие электромагнитные волны».



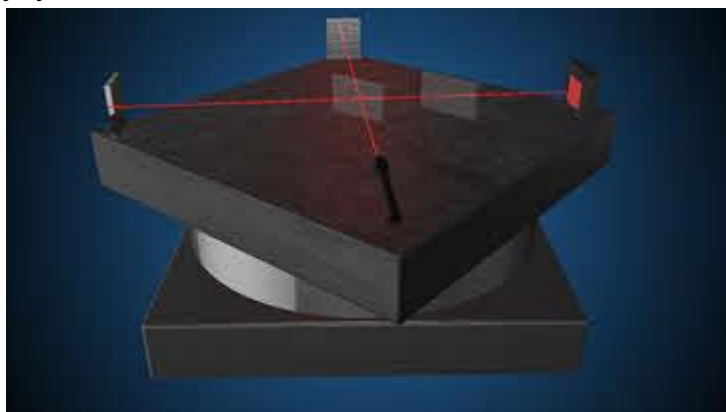


Экспериментальная установка Майкельсона — Морли (1887 г.)



Эдвард Морли  
1838—1923

Суть опыта достаточно проста. Так как мировой эфир действительно существует, то двигаясь по орбите вокруг Солнца, Земля совершает движение относительно него полгода в одном направлении, а следующие полгода в другом. Следовательно, полгода «эфирный ветер» должен обдувать Землю и, как следствие, смещать показания интерферометра в одну сторону, а полгода – в другую.



Однако наблюдая в течение года за своей установкой, Майкельсон и Морли не обнаружили никаких смещений в интерференционной картине: «полный эфирный штиль!» А это говорило о том, что эфирного ветра и, как следствие, мирового эфира вообще, не существует. А электромагнитные волны действительно могут распространяться в вакууме.

Явление интерференции света также широко используется для оценки качества обработки поверхностей изделий с точностью до  $10^{-6}$  см. Для этого между поверхностью образца и очень гладкой эталонной пластинкой создаётся тонкая клиновидная прослойка воздуха. Неровности исследуемой поверхности вызывают заметные искривления интерференционных полос, образующихся при отражении света.

Но самый важный и наиболее частый способ применения интерференции (помимо измерения длин волн) – это просветление оптики.

**Просветление оптики – это результат интерференции света, отражаемого от передних и задних границ просветляющих плёнок, в результате чего происходит взаимное «гашение» отражённых световых волн и, следовательно, усиление интенсивности проходящего света.**

Зачем это нужно? Вот представьте себе стопку оконных стёкол или объектив фотоаппарата и ответьте себе на два простых вопроса:

- Много ли видно сквозь пять–семь сложенных стёкол?
- И какого цвета поверхность объектива?

Дело в том, что даже хорошо отполированная поверхность стекла отражает около 4 % перпендикулярно падающего на неё света. На это отражение от каждой поверхности тратится значительная часть энергии, что делает непрозрачными и стопку стёкол, и сложные оптические системы, так как сквозь прибор часто проходит лишь около 10-20 % падающего на него света.

Для уменьшения световых потерь на поверхность оптического стекла и наносят тонкую плёнку с абсолютным показателем преломления меньшим, чем абсолютный показатель преломления стекла. Для простоты понимания, рассмотрим ход луча, падающего на поверхность раздела под небольшим углом (близким к нулю). При отражении света от границ раздела «воздух – плёнка» и «плёнка – стекло» возникает интерференция когерентных волн. Толщину плёнки и её показатель преломления подбирают таким образом, чтобы интерферирующие волны **гасили друг друга**.

Запишем условие интерференционного минимума, считая, что свет падает практически нормально ( $\alpha = 90^\circ$ ) и учитывая, что потеря полуволны происходит на обеих поверхностях (т. к.  $n_c > n_{пл} > n_{возд}$ ):

$$2n_{пл}h = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Выразим из записанной формулы толщину плёнки учитывая, что мы рассматриваем центральный минимум:

$$2n_{пл}h = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow h = \frac{\lambda}{4n_{пл}}.$$

В результате такого гашения отражённых волн происходит усиление волны, которая проходит в стекло.

Из-за того, что на поверхность стекла в основном падает белый свет, то гашение отражённых волн всех частот невозможно. Поэтому толщину плёнки подбирают так, чтобы полное гашение имело место для волн средней части спектра (а это примерно зелёный цвет). Гашение же красных и фиолетовых частей спектра происходит незначительно. В результате чего,

например объектив с просветлённой оптикой в отражённом свете имеет сиреневатый оттенок.

На явлении интерференции основано и изготовление так называемых холодных и тёплых зеркал. Для этого используются диэлектрические плёнки с разными показателями преломления. Так на поверхность холодных зеркал наносят такую плёнку (или систему плёнок), чтобы от зеркала отражалось как можно больше световой энергии, а волны инфракрасного диапазона проходили сквозь него. Соответственно для тёплых зеркал всё наоборот.

Для закрепления нового материала давайте с вами решим задачу. Итак, на поверхность линзы из оптического стекла с показателем преломления 1,7 нанесена тонкая плёнка с показателем преломления 1,5. На линзу нормально к поверхности падает пучок монохроматического света с длиной волны 600 нм. Определите наименьшую толщину плёнки, при нанесении которой отражённый свет будет максимально ослаблен.

**ДАНО**

$$n_{ст} = 1,7$$

$$n_{пл} = 1,5$$

$$\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$h_{min} = ?$$

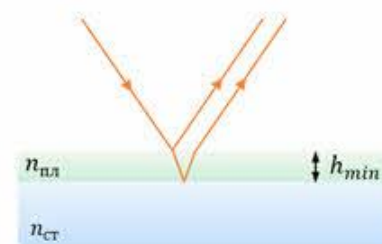
**РЕШЕНИЕ**

$$\text{Условие минимума интерференции: } \Delta r = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \Rightarrow 2n_{пл}h_{min} = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow h_{min} = \frac{\lambda}{4n_{пл}}$$

$$\text{Оптическая разность хода: } \Delta r = 2n_{пл}h.$$

Толщина плёнки будет наименьшей, если в интерференционной полосе нулевого порядка будет минимум.

$$h_{min} = \frac{6 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{4 \cdot 1,5} = 10^{-7} \text{ м}$$



**ОТВЕТ:** наименьшая толщина плёнки, при нанесении которой отражённый свет будет максимально ослаблен, равна 0,1 мкм.

В заключение обратим ваше внимание на то, что отсутствие света в областях интерференционных минимумов не означает превращение световой энергии в другие формы. Как и при интерференции механических волн, отсутствие света в данной области пространства означает, что происходит перераспределение энергии, отражённых волн нет и весь свет проходит сквозь объектив.

### 3. Дифракция света. Дифракционная решетка.

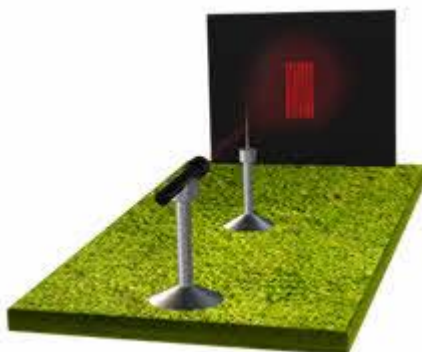
На прошлых занятиях мы с вами познакомились с геометрической оптикой – разделом физики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах и законы его отражения от зеркальных поверхностей.

Как мы говорили с вами ранее, основным положением геометрической оптики является прямолинейность распространения света. Оно является основополагающим при построении изображений в оптических системах, объяснении образования тени и полутени, солнечного и лунного затмений.

Доказано, что если на пути пучка света поместить непрозрачный предмет, то на экране за ним образуется чёткая тень; если пучок света проходит сквозь отверстие, то на экране наблюдается чёткое светлое пятно, то есть прямолинейность распространения света подтверждена многочисленными экспериментами и нашим собственным жизненным опытом.



Однако от закона прямолинейного распространения света наблюдаются отклонения при его распространении в средах с резко выраженными неоднородностями. Причём отклонения существенно зависят от соотношения между длиной волны и размерами препятствий.



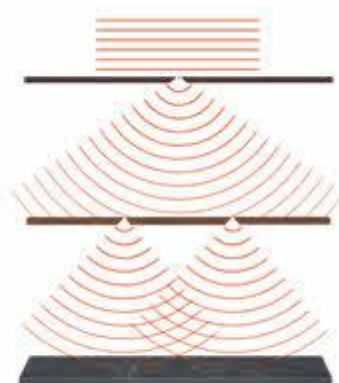
И действительно, стоя за углом дома, мы хорошо слышим, что едет автомобиль, хотя не видим его, поскольку находимся в области «тени». Получается, что звуковые волны как бы «заворачивают за угол», в то время как световым волнам этого сделать не удаётся.

Явление огибания волнами препятствий, которое проявляется в отклонении направления распространения волн от прямолинейного, называется **дифракцией**.

При изучении дифракции механических волн мы с вами говорили, что для проявления дифракции размеры препятствий (или отверстий) должны быть меньше или сравнимы с длиной волны. Вот почему в рассмотренном нами примере звук мотора автомобиля смог «завернуть за угол», а свет, отражённый от автомобиля, – нет.

Первые упоминания о явлении дифракции света можно встретить в работах великого итальянца Леонардо да Винчи. Франческо Гримальди подробно описал его в 1665 году. Но лишь в самом начале XIX века учёные нашли объяснение этому явлению.

Итак, в 1802 году Томас Юнг ставит свой знаменитый опыт по наблюдению за интерференцией и дифракцией света. Напомним, что установке источником света служила ярко освещённая щель, от которой фронт волны падал на две узкие равноудалённые щели, параллельные первой. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия «А» возбуждала в отверстиях В и С когерентные колебания. Вследствие дифракции от этих отверстий выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. Интерференционная картина наблюдалась на экране, расположенном параллельно щелям в области перекрытия волн. При этом в центре картины была расположена светлая полоса, а по краям радужные полосы в случае белого света, или чередование тёмных и светлых полос в случае света монохроматического. При этом Юнг обнаружил, что если закрыть одно из отверстий, то интерференционная картина исчезала.



Огюстен Френель  
1788—1827

Окончательное исследование дифракции света было завершено современником Юнга французским физиком Огюстеном Френелем при написании им конкурсной работы для Академии наук Франции. В начале Френель пытался объяснить явление дифракции с помощью принципа Гюйгенса, согласно которому, как мы помним, **каждая точка, до которой доходит волна, является центром вторичных сферических когерентных волн. Огибающая же этих волн даёт положение нового фронта волны в следующий момент времени.**

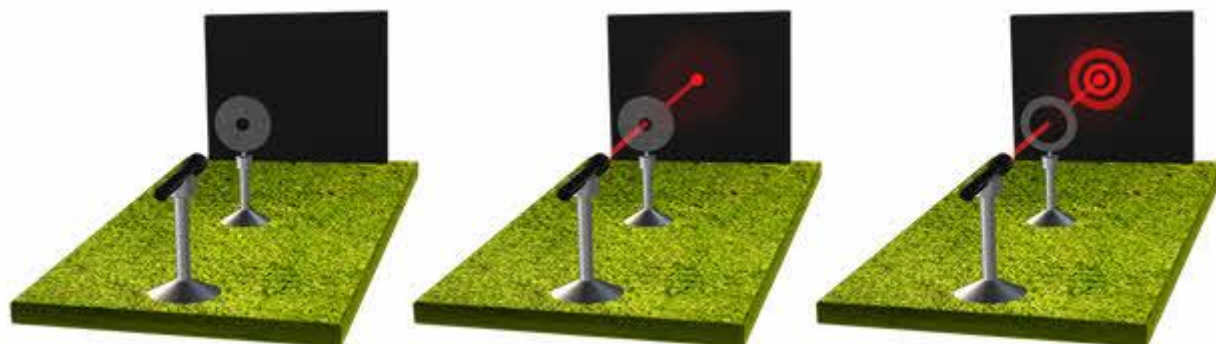
Однако, как оказалось, с помощью данного принципа можно решить задачу о направлении распространения волнового фронта, но нельзя выяснить, от чего же зависит амплитуда, и, как следствие, интенсивность



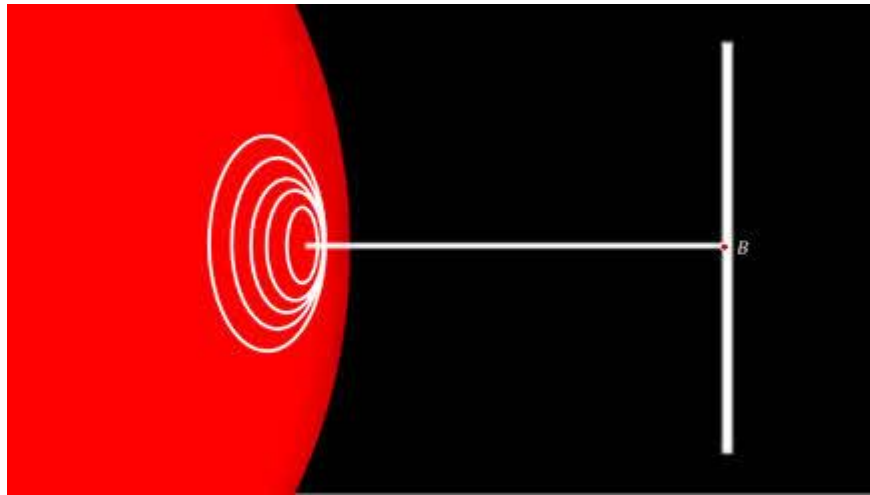
волн, распространяющихся по разным направлениям. Поэтому Френелю пришлось развить этот принцип дальше, дополнив его идеей об интерференции вторичных волн. Таким образом, принцип Гюйгенса трансформировался в принцип Гюйгенса-Френеля, согласно которому, каждая точка фронта волны является источником вторичных сферических когерентных волн. Новый фронт волны образуется в результате интерференции вторичных волн.

Таким образом, согласно Френелю, дифракция света объясняется интерференцией вторичных волн от различных участков начального положения волнового фронта. А учёт амплитуд и фаз вторичных волн позволяет в каждом конкретном случае найти амплитуду, а, следовательно, и интенсивность результирующей волны в любой точке пространства.

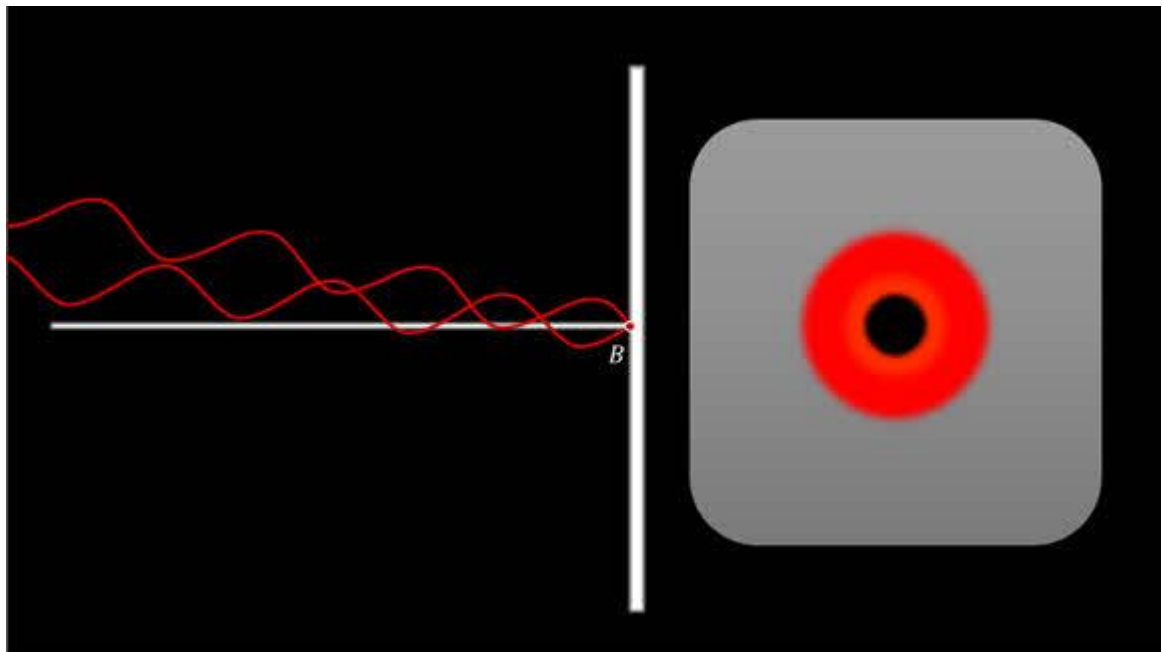
Теперь давайте проведём такой опыт. Возьмём точечный источник монохроматического света, круглую диафрагму, диаметр которой можно изменять, и экран. Включив источник света при очень малом диаметре диафрагмы, мы наблюдаем на экране светлое пятно. Что же произойдёт, если увеличить диаметр отверстия. Как это не парадоксально, но в центре экрана мы увидим тёмное пятно – минимум интерференции. Ещё увеличим диаметр отверстия – дифракционная картина изменилась, а в её центре мы вновь наблюдаем максимум.



Для объяснения полученной дифракционной картины от круглого отверстия, Френель предложил разбить волновую поверхность на отдельные кольцевые зоны – зоны Френеля, – так, чтобы расстояние от соседних зон до точки наблюдения отличались ровно на половину длины волны. Диафрагма служит для того, что бы можно было ограничивать число действующих зон.



Если открыты только первые две зоны Френеля, то разность хода от них равна половине длины волны. Поэтому волны от этих зон приходят к экрану в противофазе и, как следствие, ослабляют друг друга. Поэтому в центре дифракционной картины мы наблюдаем тёмное пятно. Если же мы увеличим отверстие так, чтобы на освещённость экрана влияла ещё и третья зона, то в центре появляется светлое пятно. Таким образом, дифракционная картина от круглого отверстия вблизи точки  $B$  будет иметь вид чередующихся темных и светлых колец с центрами в точке  $B$  (если  $i$  – чётное, то в центре тёмное кольцо, если  $i$  нечётное – то светлое).



Волновая оптика показала, что все законы геометрической оптики выполняются достаточно точно лишь в том случае, если размеры препятствий на пути распространения света **много больше длины световой волны**. Но совершенно точно они не выполняются никогда.

Например, согласно законам геометрической оптики с помощью оптических микроскопов можно рассмотреть сколь угодно малые объекты

(вплоть до атомов). А с помощью телескопов мы можем заглянуть в самые удалённые уголки Вселенной и установить существование не только звёзд, но и планетарных систем вокруг них. Однако в действительности это не так. И лишь волновая теория позволила разобраться в причинах предела разрешающей способности оптических приборов.

**Разрешающей способностью прибора называется способность оптического прибора различать детали рассматриваемого объекта.**

Волновая природа света налагает предел на возможность различать детали предмета или очень мелкие предметы при их наблюдении с помощью микроскопа. Дифракция не позволяет получить отчётливые изображения мелких предметов, так как свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Минимальное линейное расстояние между точками предмета или двумя предметами, которые можно различить с помощью микроскопа, определяется формулой, представленной на экране:

$$l = \frac{\lambda}{2(n-1)}.$$

Если учесть, что показатель преломления стекла в среднем равен полутора, то получаем, что **невозможно разрешить две детали объекта, размеры которых меньше длины световой волны:**

$$l \sim \lambda.$$

Применение ультрафиолетового излучения позволяет повысить разрешающую способность линз. Использование же электронного микроскопа даёт возможность получать разрешение, во много раз превышающее разрешение оптического микроскопа.

Дифракция также налагает предел на разрешающую способность и 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 может различить, имеются ли две светящиеся точки или одна. Предел разрешения оптического телескопа между светящимися точками, при котором их можно различать, определяется отношением длины волны к диаметру объектива:

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D}.$$

Отсюда следует, что для уменьшения углового расстояния, которое разрешается телескопом, необходимо использовать объективы как можно большего диаметра.



Эти простые примеры показывают, что с дифракцией нужно считаться всегда, при любых препятствиях, и даже в случаях препятствий, размеры которых значительно больше, чем длина волны.

### Дифракционная решетка

Для получения отчётливой дифракционной картины лучше использовать очень маленькие препятствия (например, тонкую проволоку, круглое отверстие или круглый экран), либо не располагать экран далеко от препятствий.

Однако чаще всего для получения дифракционной картины и измерения длины волны пользуются специальным прибором, который называется **дифракционной решёткой**.



Она представляет собой совокупность большого числа параллельных штрихов одинаковой формы, нанесённых на плоскую или вогнутую полированную поверхность на одинаковом расстоянии друг от друга.

Первая дифракционная решётка, сконструированная американским учёным Риттенхаузом, состояла из параллельного ряда волосков диаметром около 0,1 мм и длиной 10 мм, натянутых на расстоянии порядка 0,2 мм один от другого.



Дэвид Риттенхауз  
1732—1796

Лишь позже немецкий физик Йозеф Фраунгофер вместо волосков предложил использовать штрихи, наносимые на стекло алмазным острием. В его первой решётке число штрихов на 1 мм достигало 300.

В настоящее время принято различать отражательные дифракционные решётки и прозрачные.

В прозрачных дифракционных решётках штрихи нанесены на прозрачную поверхность (или вырезаются в виде щелей на непрозрачном экране). Наблюдение ведётся в проходящем свете.

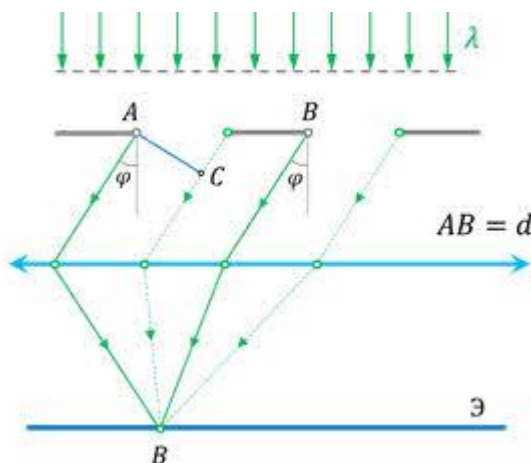
В отражательных решётках штрихи нанесены на зеркальную (металлическую) поверхность, и наблюдение дифракции ведётся в отражённом свете.



Если ширина прозрачных щелей (или отражающих свет полос) равна  $a$  и ширина непрозрачных промежутков (или рассеивающих свет полос) равна  $b$ , то величина, равная  $d = a + b$  называется периодом (или постоянной) решётки. Он показывает, сколько штрихов приходится на один миллиметр длины решётки:

$$d = a + b = \frac{1}{N}$$

Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решётки. Пусть на решётку, постоянная которой равна  $d$ , падает плоская монохроматическая волна, длина которой  $\lambda$ . Из принципа Гюйгенса следует, что волны, дифрагировавшие на щелях, распространяются за решёткой по всем направлениям.



Для наблюдения дифракционной картины на экране между ним и решёткой размещают собирающую линзу таким образом, чтобы экран находился в фокальной плоскости линзы. Собирающая линза фокусирует на экране падающие на неё параллельные лучи (вторичные волны).

Допустим, что свет дифрагирует на щелях под углом  $\varphi$ . Так как щели находятся друг от друга на одинаковых расстояниях, то разности хода лучей, идущих от двух соседних щелей, для данного направления будут одинаковыми в пределах всей дифракционной решётки:

$$\Delta = AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi.$$

В зависимости от разности хода между вторичными волнами, испущенными разными щелями, они интерферируют друг с другом, усиливая или ослабляя друг друга. В тех направлениях, для которых разность хода равна чётному числу полуволен, наблюдается интерференционный максимум. В тех же направлениях, где разность хода равна нечётному числу полуволен, наблюдается интерференционный минимум. В итоге на экране мы наблюдаем дифракционную картину светлых и тёмных полос.

Таким образом, в направлениях, для которых углы удовлетворяют условию

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda$$

наблюдаются главные максимумы дифракционной картины.

Эту формулу часто называют **формулой дифракционной решётки**. В ней  $k$  называется порядком главного максимума и может принимать значения ноль, один, два и так далее.

Из условия возникновения главных дифракционных максимумов следует, что при  $k = 0$  для любых длин волн угол  $\varphi = 0$ . Следовательно, прямо по центру решётки образуется нулевой максимум, который называется также **центральным максимумом**. Остальные дифракционные максимумы образуют спектры первого, второго и так далее порядков.



Естественно, что количество максимумов в дифракционной картине ограничено, поскольку синус не может принимать значения, больше единицы.

При падении на решётку белого света центральный максимум представляет собой изображение источника, так как в этом направлении собирается излучение всех длин волн. Все остальные максимумы оказываются окрашенными. Это объясняется тем, что, различным длинам волн соответствуют различные углы, на которых наблюдаются интерференционные максимумы:

$$\sin \varphi = \pm \frac{k\lambda}{d}.$$

**Радужная полоска, содержащая в общем случае семь цветов – от фиолетового до красного (считается от центрального максимума), называется дифракционным спектром.**

Ширина спектра зависит от постоянной решётки и увеличивается при её уменьшении. А максимальный порядок спектра определяется из условия, что «синус угла Фи» меньше либо равен единице:

$$\sin \varphi \leq 1 \Rightarrow k_{max} = \frac{d}{\lambda} = \frac{1}{N\lambda}.$$

Мы можем наблюдать дифракционную картину достаточно просто. Так, если прищуриться, смотря на яркий источник света, то можно обнаружить радужные цвета. Наши ресницы вместе с промежутками между ними представляют собой грубую дифракционную решётку. А лазерный диск с бороздками, проходящими близко друг от друга, подобен отражательной дифракционной решётке.



Для закрепления нового материала давайте с вами определим постоянную дифракционной решётки, если красная линия ( $\lambda = 7 \cdot 10^{-7}$  м) в спектре второго порядка получается на расстоянии 25 см от центральной

светлой полосы на экране. Расстояние от экрана до дифракционной решётки равно сорока трём целым трём десятым сантиметра (43,3 см).

Для удобства решения задачи будем считать, что дифракция наблюдается при нормальном падении на решётку параллельных лучей белого света.

**ДАНО**

$$\lambda = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$k = 2$$

$$x = 0,25 \text{ м}$$

$$l = 0,433 \text{ м}$$

$$d = ?$$

**РЕШЕНИЕ**

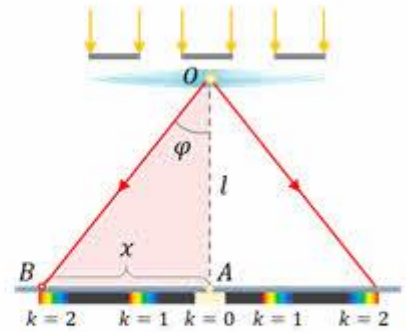
Постоянная решётки:  $d \sin \varphi = k\lambda \Rightarrow d = \frac{k\lambda}{\sin \varphi}$ .

Так как  $\triangle AOB$  прямоугольный, то  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{l}$ .

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{0,25 \text{ м}}{0,433 \text{ м}} \cong 0,577 \Rightarrow \varphi \cong 30^\circ$$

$$d = \frac{2 \cdot 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{\sin 30^\circ} \cong 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

Число штрихов на 1 мм:  $N = \frac{1}{d} = \frac{1}{2,8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}} \cong 357 \text{ мм}^{-1}$ .



**ОТВЕТ:** постоянная решётки примерно равна  $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

## Лекция №37

### Виды излучений. Источники света.

#### План

1. Виды излучений. Источники света.
2. Спектры и спектральный анализ.
3. Шкала электромагнитных волн.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Какие источники света вы знаете?
2. Что такое равновесное излучение?
3. При каких температурах тела имеет место тепловое излучение?
4. Какова природа фото- и электролюминесценции?
5. Какие виды излучений действовали на вас в прошедшие сутки?
6. В каком случае спектр испускания тела сплошной; линейчатый?
7. В чём состоит отличие линейчатых спектров от сплошных?
8. Чем различаются линейчатые спектры испускания и поглощения?
9. Для чего используется метод спектрального анализа? Какие открытия были сделаны с помощью этого метода?
10. Назовите диапазоны электромагнитных волн.
11. Каковы свойства инфракрасных волн?
12. Каковы свойства ультрафиолетового излучения?
13. Каковы свойства рентгеновского излучения?
14. Каковы свойства  $\gamma$ -излучения?

## 1. Виды излучений. Источники света.

На прошлых занятиях мы с вами знакомились с двумя теориями, объясняющими природу света: корпускулярной и волновой. Давайте вспомним, что согласно теории сэра Исаака Ньютона, лучи света являются «очень маленькими телами, испускаемыми светящимися телами по всем направлениям». С помощью корпускулярной теории легко можно было объяснить прямолинейное распространение света и образование резкой тени за предметами.

Однако английский учёный Роберт Гук и голландский учёный Христиан Гюйгенс выступали против корпускулярной теории света и выдвинули гипотезу о волновой природе света. Согласно представлениям Гука, «...свет – это колебательное или дрожательное движение в среде... происходящее из подобного же движения в светящемся теле, подобно звуку...» А Гюйгенс в своём «Трактате о свете» писал: «Несомненно, что свет доходит от светящегося тела до нас каким-нибудь движением, сообщённым веществу, находящемуся между ними и нами... Движение, сообщённое веществу, постепенно распространяется так же, как и при звуке, сферическими поверхностями и волнами...».

Волновая теория Гука и Гюйгенса подтвердилась после того, как Франческо Мария Гримальди наблюдал интерференцию и дифракцию света, а Томас Юнг и Огюстен Френель смогли количественно описать эти явления.



В тысяча восемьсот шестьдесят четвёртом (1864) году Джеймс Максвелл опубликовал теорию электромагнетизма, в которой указывает на то, что свет является частным случаем электромагнитной волны. Когда же



Герц обнаружил эти самые волны, ни у кого не осталось никаких сомнений в том, что свет имеет электромагнитную (а значит и волновую) природу.

По мере развития классической электродинамики стало ясно, что электромагнитные волны возбуждаются в пространстве ускоренно движущимися частицами. При чём, эти заряженные частицы должны входить в состав атомов, из которых состоит вещество. Однако, не зная, как всё-таки устроен атом, нельзя было точно объяснить механизм излучения. На то время ясно было лишь одно – внутри атома нет света, как нет звука внутри камертона. Подобно камертону, который начинает звучать только при касании его молоточком, атомы могут рождать свет только после возбуждения. Иными словами, для того, чтобы атом начал излучать свет, ему необходимо передать определенное количество энергии.

**Устройство или физическое тело, которое превращает некоторый вид энергии в энергию электромагнитных волн принято называть источником излучения.**

По способу генерации все источники излучения можно разделить на три типа.

К первому типу относятся **тепловые (или температурные) источники**, излучение которых происходит за счёт запасов внутренней энергии. Согласно квантовой теорией при возбуждении атома, например вследствие столкновений при тепловом движении, электроны переходят с более низкого на более высокий энергетический уровень. В возбуждённом состоянии они не могут находиться долго и, излучая квант энергии, возвращаются назад в основное состояние.



В состоянии теплового равновесия процессы поглощения и выделения энергии идут непрерывно и характеризуются **динамическим равновесием, при которой за любой малый промежуток времени суммарное**



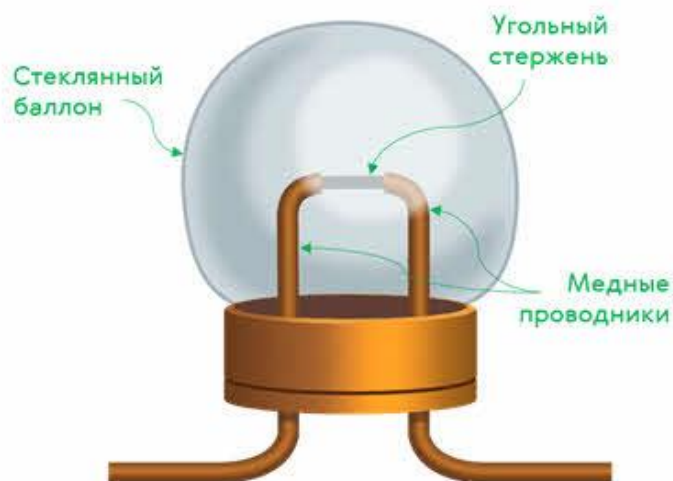
**количество поглощённой энергии равно количеству энергии теплового излучения.** Поэтому тепловое излучение часто называют **равновесным**.

Как показывает опыт, **любое тело, температура которого выше абсолютного нуля, является источником теплового излучения.** Самый важный для нас тепловой источник света – Солнце. Температура его раскалённой добела поверхности достигает почти 6000 градусов. Подобными Солнцу тепловыми источниками света являются звёзды. Но не все «небесные светила» – это источники света: например, Луна не светит, а только отражает свет Солнца. Отражают солнечный свет и планеты, которые некоторые ошибочно принимают за особенно яркие звёзды на ночном небе.

Первым «приручённым» человеком тепловым источником света было пламя костра.

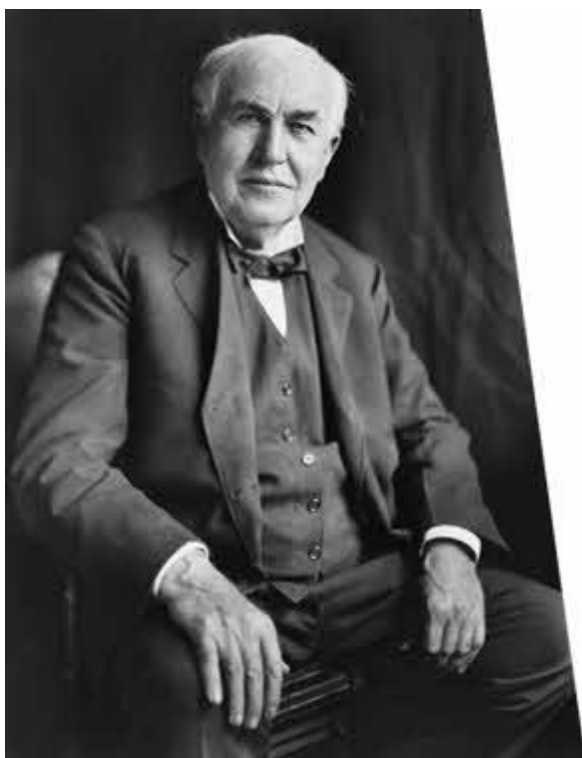


Затем ему на смену пришло пламя свечи. Однако по мере развития электродинамики наиболее широкое применение нашли тепловые источники, которые нагреваются при прохождении через них электрического тока. Это, например, всем известные лампы накаливания. Они были изобретены в 70-х годах XIX века русским электротехником Александром Николаевичем Лодыгиным. Первые лампы представляли собой два медных проводника, между которыми был закреплён угольный стержень.



Александр Лодыгин  
1847—1923

Эта конструкция помещалась внутрь стеклянного баллона, из которого был откачан воздух. При прохождении электрического тока по стержню он раскалялся и начинал светиться. Современный вид лампе накаливания, включая вольфрамовую нить и патрон, придумал американский изобретатель Томас Альва Эдисон.



Томас Эдисон  
1847—1931

Однако необходимо отметить, что лампа накаливания имеет очень низкий коэффициент полезного действия. Даже в лучших лампах не более 5%) потребляемой электроэнергии превращается в энергию светового

излучения, а вся остальная энергия идёт на создание невидимого глазу теплового излучения.

Вторым способом генерации излучения в оптическом диапазоне спектра является **люминесценция** (или холодное свечение). Оно представляет собой вторичное оптическое свечение, которое возбуждается за счёт энергии любого вида, кроме теплового. Продолжительность его излучения намного превышает период световых волн.



**Вещества, в которых возбуждается люминесценция, называются люминофорами.**

Если люминесценция прекращается практически сразу же после окончания действия источника дополнительной энергии, то её называют **флуоресценцией**. Это свойство веществ используют, например, при изготовлении дорожных знаков. В краску, которой покрываются знаки, добавляют специальное вещество – люминофор, которое светится при облучении светом фар. Как правило, время затухания флуоресцентного свечения составляет 1 нс – 10 мкс.

В случае, когда люминесценция сохраняется длительное время после прекращения действия источника (вплоть до трёх часов), то её называют **фосфоресценцией**. Это явление широко применяется для декорирования помещений и росписи ёлочных игрушек.

Принято различать четыре вида люминесценции:



**Электролюминесценцией** называется свечение, сопровождающее разряд в газе (например, в газоразрядных лампах). Ток, проходящий через смесь газов, возбуждает в них электрическое поле, которое сообщает электронам большую кинетическую энергию. Быстрые электроны испытывают неупругие соударения с атомами газов, при этом часть кинетической энергии электронов идёт на их возбуждение. Возбуждённые атомы отдают энергию в виде световых волн – происходит разряд.

Примерами электролюминесценции могут служить северные и южные сияния, возникающие в приполярных областях Земли. Здесь быстрые частицы солнечного ветра захватываются магнитным полем Земли, возбуждая атомы верхних слоёв атмосферы, из-за чего эти слои начинают светиться. Также явление электролюминесценции широко применяется в трубках для рекламных надписей.

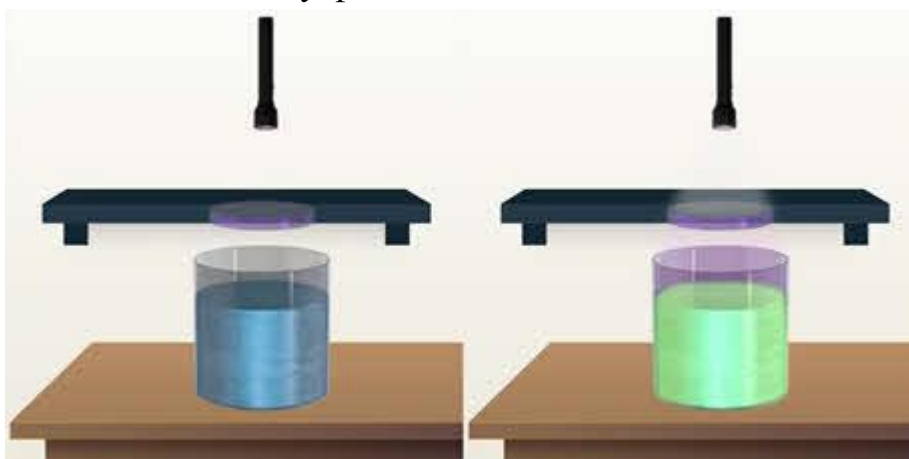
**Если свечение вещества возникает за счёт его облучения быстрыми электронами, то такое явление называют катодолюминесценцией.** Благодаря этому явлению светятся, например, экраны электронно-лучевых трубок, которые до последнего времени были основной деталью осциллографов, телевизоров и мониторов.

**Фотолюминесценцией** называется свечение некоторых веществ под действием падающего на них света. Примерами фотолюминесценции могут служить свечение красок, которыми покрываются ёлочные игрушки, создание световых эффектов в театрах, рекламах и так далее).

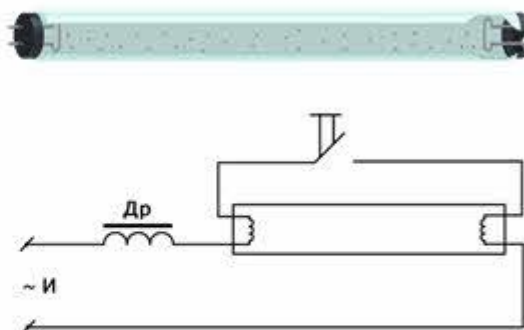
Излучаемый при фотолюминесценции свет имеет, как правило, большую длину волны, нежели свет, возбуждающий свечение. Это можно наблюдать экспериментально. Если направить на сосуд с флюоресцеином световой пучок, пропущенный через фиолетовый светофильтр, то эта



жидкость начинает светиться зелёно-жёлтым светом, то есть светом с большей длиной волны, чем у фиолетового света.



Явление фотолюминесценции широко используется в лампах дневного света. В настоящее время её изобретателем считается немецкий учёный Эдмунд Гермер, который предложил покрывать колбы лампы флуоресцентным порошком. Этот порошок преобразовывает ультрафиолетовый свет, испускаемый возбуждённой плазмой, в более однородный бело-цветной свет. Разработкой люминесцентных ламп в России занимался выдающийся советский физик Сергей Иванович Вавилов.



Сергей Вавилов  
1891—1951

Несмотря на то, что фотолюминесценция очень похожа на флуоресценцию, это, всё-таки два разных физических процесса, отличающиеся излучательными переходами.

**Если свечение веществ происходит под действием химических реакций, идущих с выделением энергии, то мы наблюдаем хемилюминесценцию.**

Данный тип люминесценции широко применяется в автономных химических источниках света и в качестве маркера для поплавка.

Светящиеся браслеты для дискотек тоже работают на явлении хемилюминесценции. Применяется она и для оценки состава сложных газовых смесей, в частности, наличия примесей в атмосфере.



Хемилюминесценция также широко встречается в живой и не живой природе. Так, например, кусочки гниющего дерева – гнилушки, обладают свойством светиться в темноте. Ещё одним достаточно распространённым природным явлением являются светящиеся грибы. На сегодняшний день известно более 70 видов грибов, испускающих лучистый свет в темноте. Они встречаются в лесах Бразилии и Белизе, Пуэрто-Рико и Ямайке.

Встречаются светящиеся грибы и на территории России. Например, сине-зелёный свет часто излучают грибы-перестарки, у которых светятся нижние поверхности старых шляпок. А гнилые опёнки, весенние сморчки и грибы-трутовики часто называют лесными синоптиками, так как они светятся в темноте перед сырой погодой и грозой.

Фото светящихся грибов пользуются огромной популярностью и напоминают сказочные пейзажи, потрясающие своим величием.



Светятся и многие живые организмы в природе. Их свечение называется **биолоуминесценцией**. Она так же основывается на химических

процессах, при которых освобождающаяся энергия выделяется в форме света. Таким образом, биолюминесценция является особой формой хемилюминесценции.

Свечение живых организмов отмечалось ещё античными авторами. Ещё Плиний Старший в своей «Естественной истории» упоминал о свечении морских организмов. Светятся в темноте многие бактерии, насекомые и микроорганизмы.

На протяжении веков моряки рассказывали о виденном ими свечении океанических или морских вод. Это явление описывал Жюль Верн в романе «20 000 льё под водой». Очень романтично описание Чарльза Дарвина свечения моря около устья Ла-Платы, описание свечения Чёрного моря у Паустовского. Однако изучение данного явления началось лишь в середине XX века. Сейчас уже достоверно известно, что **свечение моря (или океана) – это естественное явление биологического происхождения, возникающее, когда поверхностные слои моря или океана наполнены микроорганизмами, способными к биолюминесценции, в результате чего в ночное время суток складывается впечатление, что водоём светится изнутри.**



Свечение моря наблюдается повсеместно, иногда охватывает огромные пространства водной глади до сотен и тысяч квадратных километров.

Ну а к третьему типу генерации излучения относится **способ, в котором сочетаются механизмы излучения первых двух типов.** Типичный пример таких источников – электрическая дуга. В ней излучение анода является тепловым, а межэлектродное свечение – люминесцентным.

## 2. Спектры и спектральный анализ.

Как показали опыты Ньютона, белый свет является сложным: пройдя через призму он разлагается на пучки различных цветов, которые образуют на экране разноцветную полоску, называемую **спектром**.

Отдельные цветные лучи, которые после прохождения призмы не разлагались на составляющие, были названы простыми или **монохроматическими**. Однако, как показали опыты не только по дисперсии, но и по дифракции света, даже современные лазеры не дают чистого монохроматического света, то есть света строго определённой, одной длины волны. Та энергия, которую несёт с собой свет от источника теплового излучения, неравномерно распределена по всем частотам волн, входящих в состав светового пучка. Ранее мы с вами показали, что энергия, приходящаяся на все частоты электромагнитной волны (а свет, не забываем, имеет электромагнитную природу) определяется плотностью потока или интенсивностью:

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}$$

А для характеристики распределения излучения по частотам вводят новую величину, называемую **спектральной плотностью потока излучения**. Она определяется интенсивностью излучения, приходящегося на единичный интервал частот.

$$I(\nu) = \frac{I}{\Delta \nu}$$

Спектральную плотность потока излучения на разных частотах можно найти экспериментально. Для этого с помощью призмы получают спектр излучения, например флуоресцентной лампы, и измеряют плотность потока излучения, приходящегося на небольшие спектральные интервалы шириной  $\Delta \nu$ .





По результатам таких опытов строят кривую зависимости спектральной плотности интенсивности излучения от частоты, которая даёт наглядное представление о распределении энергии в видимой части спектра исследуемого источника.

Для получения хороших и ярких спектров без перекрывания их отдельных участков, используются специальные оптические приборы, называемые **спектральными аппаратами**. Их основной частью является призма или дифракционная решётка.

Первый спектральный аппарат – спектроскоп, был изобретён в тысяча восемьсот пятнадцатом (1815) году немецким физиком Йозефом Фраунгофером.



В оригинальном дизайне спектроскопа свет, прошедший через щель, расположенную в фокальной плоскости коллиматорной линзы, преобразовывался в тонкий световой пучок и попадал на призму. Из призмы же выходили параллельные пучки разного направления, которые, преломившись в линзе зрительной трубы, образовывали в её фокальной плоскости изображение щели. Наблюдение велось через трубку со шкалой, накладываемой на спектральное изображение, позволяя таким образом проводить измерения.

С изобретением фотографической плёнки был создан более точный прибор: **спектрограф**. Работая по такому же принципу, он имел фотокамеру вместо наблюдательной трубки. В середине XX века камера сменилась трубкой электронного фотоумножителя, что позволило значительно увеличить точность и проводить анализ в реальном времени.

Как вы смогли убедиться, при исследовании света, излучаемого нагретыми телами (Солнца, пламени свечи или лампы накаливания), изображения щели сливаются в одну цветную полосу всех основных цветов. Поскольку в таких спектрах нет пустых промежутков, то их принято называть **непрерывными или сплошными спектрами**.

Помимо раскалённых твёрдых тел и жидкостей, сплошной спектр дают также пары и газы, находящиеся под очень большим давлением.

Распределение энергии в сплошном спектре по частотам для разных тел различно. Например, абсолютно чёрное тело излучает электромагнитные волны всех частот, но кривая зависимости спектральной плотности интенсивности излучения от частоты имеет максимум при определённой частоте. При повышении температуры тела максимум спектральной плотности излучения смещается в сторону коротких волн.

В 1853-1854 годах немецкий химик-экспериментатор Роберт Вильгельм Бунзен совместно с Питером Десагой изобрели специальную газовую горелку, которую сейчас принято называть бунзеновской. Это изобретение стало трамплином в изучении спектров различных веществ.



### Бунзеновская горелка

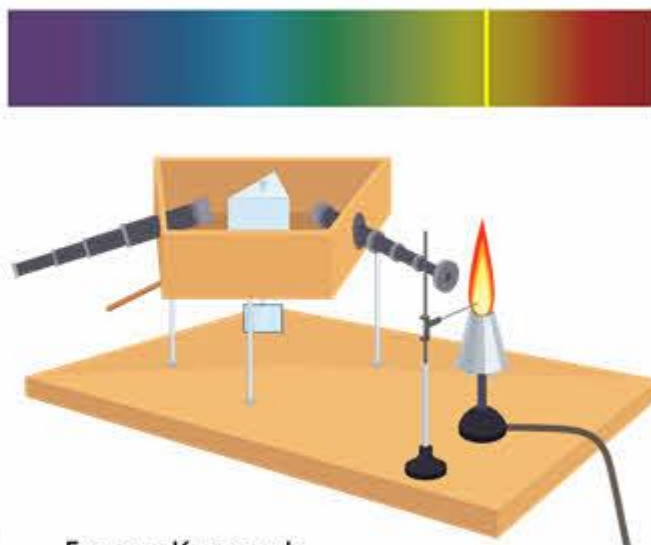


Роберт Бунзен  
1811—1899

Оказалось, что вещества, внесённые в пламя этой горелки, превращались в пар и окрашивали пламя в различные цвета. Например, медь окрашивала пламя в зелёный цвет, поваренная соль – в жёлтый, а литий – в малиново-красный.

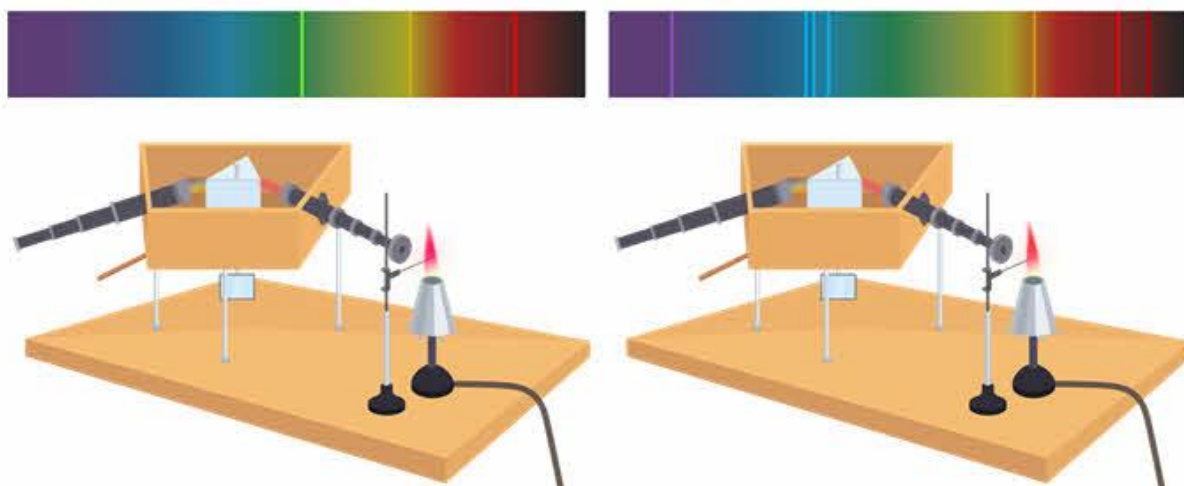
В 1854 году большой друг Бунзена немецкий физик Густав Роберт Кирхгоф предложил пропускать свет такого пламени через призму. Оказалось, что если в пламя горелки внести кусочек асбеста, смоченный, например, раствором обычной поваренной соли, то на бледном фоне

сплошного спектра горелки возникнет яркая жёлтая линия, которую дают пары натрия.



Густав Кирхгоф  
Роберт Бунзен

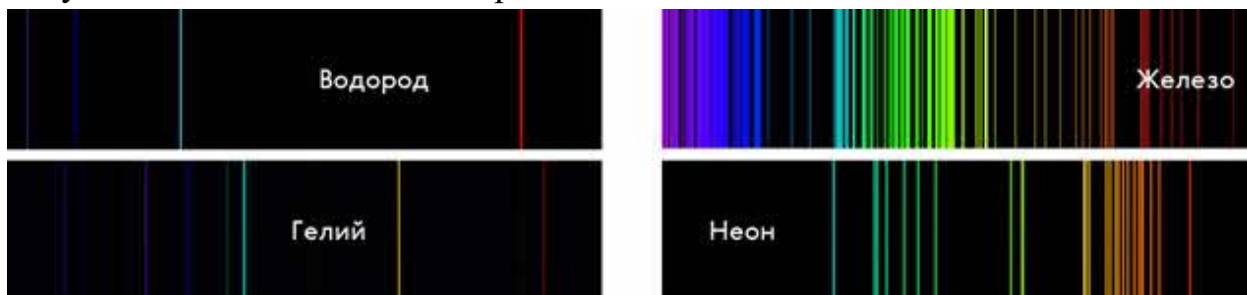
Если же в пламя горелки внести литий или стронций, то пламя окрасится в малиново-красный цвет. Однако если изучить спектр такого пламени, то окажется, что он существенно различается для паров лития и стронция. Так, после прохождения через призму свет литиевого пламени даёт яркие зелёную, малиновую и слабую оранжевую линии. А вот стронций – слабую фиолетовую, три голубых линии, две красных и слабую оранжевую.



Характерный спектр, также состоящий из набора отдельных цветных линий, даёт свечение газового разряда в трубке, содержащей исследуемый газ. Например, спектр испускания атомарного водорода представляет собой четыре яркие цветные линии. А при исследовании атомарного гелия мы можем рассмотреть до 12 цветных линий в его видимой части спектра.

**Спектры, представляющие собой цветные линии различной яркости, разделённые широкими тёмными полосами, называют линейчатыми спектрами.**

Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только в определённых очень узких спектральных интервалах. На экране вы увидите примерное распределение спектральной плотности интенсивности излучения в линейчатом спектре.

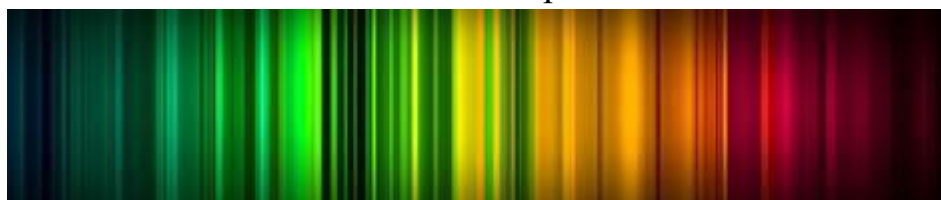


Линейчатый спектр часто называют фундаментальным, так как излучения атомов каждого химического элемента имеет уникальный набор спектральных линий: **не существует двух химических элементов, атомы которых излучали бы одинаковый спектр.** Поэтому для каждого химического элемента составлена специальная таблица, в которой указаны характерные для него линии и их яркость.

Обратим внимание на то, что **линейчатые спектры дают все вещества, находящиеся в атомарном (но не молекулярном) состоянии.**

Если же газ находится в молекулярном состоянии, то спектр его излучения будет представлять собой **отдельные полосы, разделённые тёмными промежутками.** Такой спектр называют **полосатым.**

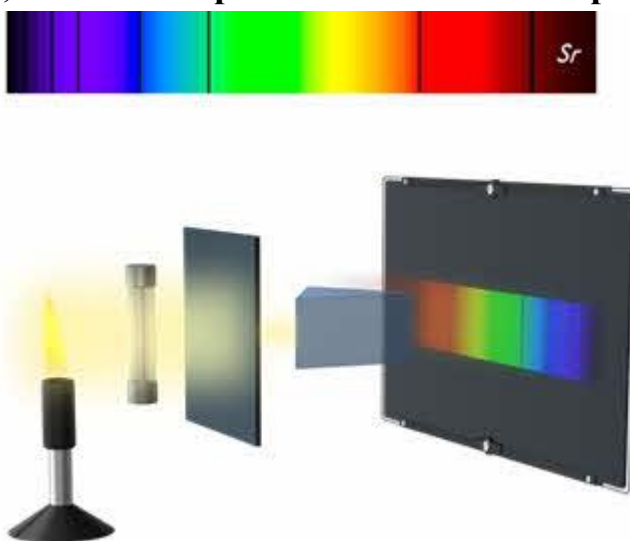
С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно обнаружить, что каждая полоса такого спектра представляет собой совокупность большого числа очень тесно расположенных линий.



Описанные нами выше спектры получались при разложении излучаемого света самосветящимися телами. Такие спектры называют **спектрами испускания или эмиссионными спектрами.** Но кроме них существуют ещё и **спектры поглощения.**

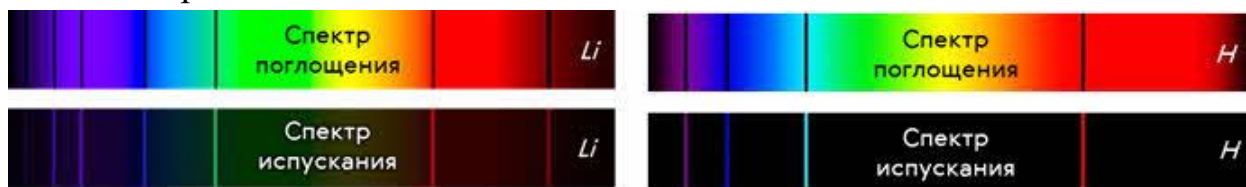
Для их наблюдения перед не нагретыми парами изучаемого вещества (у нас это стронций) располагают источник света, дающий непрерывный спектр. На экране, установленном за призмой, можно увидеть сплошной

спектр, перерезанный 7 тёмными линиями. Эти линии получили название **линий поглощения**, а сам спектр – **линейчатого спектра поглощения**.



В тысяча восемьсот пятьдесят девятом году Роберт Бунзен и Густав Кирхгоф установили, что линии поглощения находятся в тех же участках спектра, где должны быть расположены яркие линии в линейчатом спектре испускания, присущие данному веществу. На основе этих наблюдений Кирхгоф сформулировал **закон обратимости спектральных линий: атомы менее нагретых тел поглощают из сплошного спектра только те частоты, которые в других условиях они испускают**.

И действительно, мы знаем, что поглощение света веществом зависит от длины волны. Например, зелёный светофильтр пропускает лишь волны, соответствующие зелёному свету, а все остальные поглощает. То же самое происходит и с газом. Если пропускать белый свет сквозь холодный, не излучающий газ, то на фоне непрерывного спектра источника появляются тёмные линии, соответствующие длинам волн, которые газ испускает в сильно нагретом состоянии.



Таким образом, анализ линейчатых спектров излучения и поглощения позволяет расшифровать состав излучающего вещества. **Метод определения химического состава вещества по его спектру называют спектральным анализом**. Основоположниками данного метода, как вы уже, наверное, догадались, являются Роберт Бунзен и Густав Кирхгоф. Открытие спектрального анализа ознаменовало появление нового раздела физики – **спектроскопии, изучающей спектры электромагнитного излучения**.



Спектральный анализ базируется на двух основных положениях:

- каждый химический элемент или химическое соединение характеризуется определённым спектром;
- интенсивность линий и полос в спектре зависит от концентрации того или иного элемента в веществе.

Спектральный анализ при всей своей простоте, обладает рекордной чувствительностью: с его помощью можно обнаружить примесь нужного элемента в составе сложного вещества даже в том случае, когда его масса не превышает и тысячной доли микрограмма. Так, например, основатели спектрального анализа, исследуя спектры паров щелочных металлов лития, натрия и калия, обнаружили новые элементы – рубидий и цезий, названные так по цвету наиболее ярких линий в их спектрах: рубидий даёт темно-красные, рубиновые линии, а слово «цезий» означает «небесно-голубой».

При выполнении спектрального анализа вещества с неизвестным химическим составом его сначала приводят в атомарное состояние, сообщая атомам большую энергию. Чаще всего для этих целей используются высокотемпературные источники света), в которые помещается исследуемое вещество в виде порошка или аэрозоля. Затем при помощи спектрографа получают фотографию спектров. Сравнивая полученный линейчатый спектр с известными спектрами химических элементов, можно определить, какие элементы присутствуют в составе исследуемого вещества.

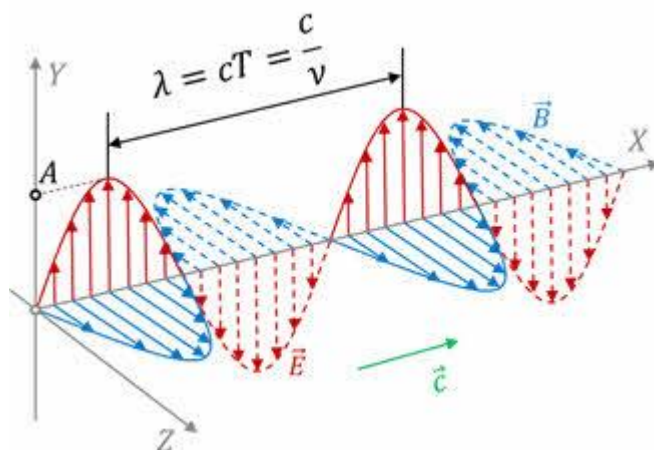
Благодаря относительной простоте и достаточной универсальности спектральный анализ является основным методом для контроля состава вещества в машиностроении и металлургии, атомной промышленности. С его помощью определяется химический состав руд и минералов, определяется возраст археологических находок.

Спектральный анализ можно проводить не только со спектрами испускания, но и со спектрами поглощения. Именно линии поглощения в спектрах не только Солнца, но и других звёзд позволяют исследовать химический состав этих небесных тел. Так, например, при изучении спектра солнечной атмосферы 18 августа 1868 года был открыт ранее неизвестный химический элемент, названный гелием (от греческого слова «гелиос» – Солнце). А на Земле этот газ был обнаружен лишь в 1881 году итальянцем Луиджи Пальмьери в вулканических газах фумарол. Однако учёные круги встретили это сообщение с недоверием, так как свой опыт Пальмьери описал неявно. Поэтому считается, что гелий на Земле был открыт лишь спустя 27 лет после своего первоначального открытия шотландским химиком Уильямом Рамзаем.

Спектральный анализ в астрофизике даёт возможность определять не только химический состав звёзд и газопылевых облаков, но и некоторые другие физические характеристики, например, температуру, давление, скорость движения небесного тела и индукцию его магнитного поля. Именно благодаря спектральному анализу было открыто смещение спектральных линий в спектрах галактик в красную (длинноволновую) область спектра, что свидетельствовало о расширении нашей Вселенной. Таким образом, во многих случаях, когда другие методы исследования невозможны, спектральный анализ позволяет получать очень ценные и важные результаты.

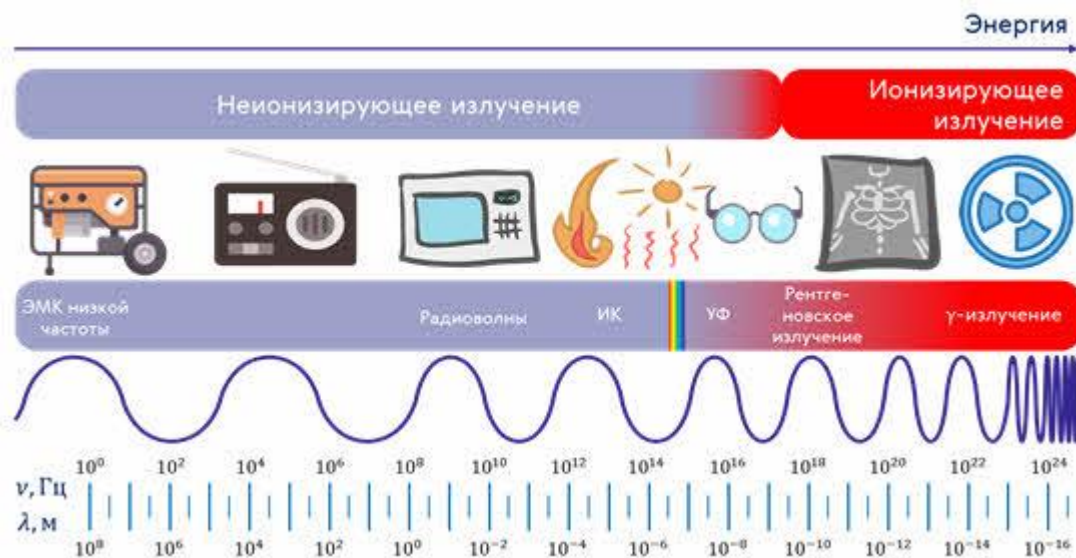
### 3. Шкала электромагнитных волн.

Мы уже с вами знаем, что в 1864 году английский физик Джеймс Клерк Максвелл впервые высказал гипотезу о существовании электромагнитных волн, распространяющихся в вакууме с предельно возможной скоростью – скоростью света. Этот факт дал возможность Максвеллу предположить, что свет имеет электромагнитную природу. Благодаря этому произошло объединение в одно учение оптики и электромагнетизма.



После экспериментального обнаружения электромагнитных волн Герцем и их последующего изучения было установлено, что свойства волн сильно зависят от их частоты. А так как все электромагнитные волны имеют одну и ту же природу, то было решено свести их в единую шкалу электромагнитных волн. Вдоль шкалы слева направо непрерывно возрастает одна величина – частота (или уменьшается длина волны). Ввиду огромного различия длин волн эта шкала построена в логарифмическом масштабе: метки на шкале соответствуют длинам, каждая из которых отличается в 10 раз от соседней. На шкале указаны участки длин волн (или частоты), занимаемые различными типами электромагнитных волн. А распределение электромагнитных волн по типам сделано в соответствии со способами их

генерации и их взаимодействия с веществом. Несмотря на то, что границы между отдельными областями шкалы излучений весьма условны, всё же принято выделять семь (иногда восемь) типов электромагнитных волн.



Итак, первый участок шкалы содержит волны, которые возбуждаются **низкочастотными электромагнитными колебаниями**. Их генерируют устройства, обладающие большой индуктивностью и ёмкостью, например, генераторы переменного тока. Такие волны очень быстро затухают и практически не излучаются в пространство.

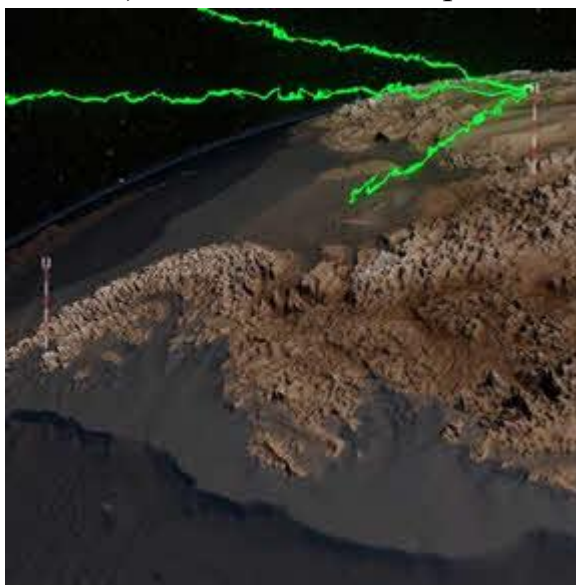
Далее следуют **радиоволны**. Их, в свою очередь, принято делить на две части. К первой части относятся волны, которые излучаются открытыми колебательными контурами. По длине волны их делят на **длинные (или километровые)** ( $3 \cdot 10^3 \text{ м} < \lambda \leq 3 \cdot 10^4 \text{ м}$ ), **средние (или гектометровые)** ( $2 \cdot 10^2 \text{ м} < \lambda \leq 3 \cdot 10^3 \text{ м}$ ) и **короткие (декаметровые) волны** ( $10 \text{ м} < \lambda \leq 2 \cdot 10^2 \text{ м}$ ).

Длинные волны распространяются на расстояния 1-2 тысяч километров за счёт дифракции на сферической поверхности Земли (то есть они могут огибать земную поверхность). Средние волны способны распространяться на сотни и тысячи километров благодаря огибанию земной поверхности, а также (преимущественно в ночное время) отражаясь от ионосферы Земли. А короткие волны распространяются, поочерёдно отражаясь от ионосферы и поверхности Земли с малыми потерями мощности.





Ко второй части данного участка шкалы относят **ультракороткие волны** – это диапазон радиоволн, объединяющий метровые, дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны. Ультракороткие волны излучаются специальными электромагнитными вибраторами и регистрируются радиотехническими устройствами. Такие волны распространяются прямолинейно. Они способны проходить через ионосферу Земли и уходить в космос. Поэтому их используют для космической связи. А на Земле (в условиях прямой видимости) – в телевидении и радиолокации.

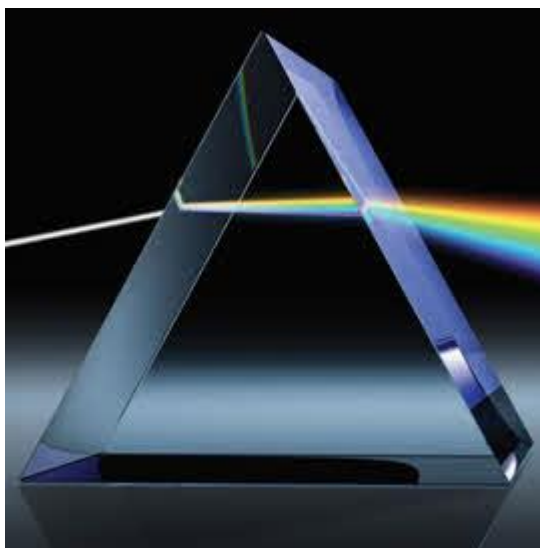


С третьего участка шкалы электромагнитных волн начинаются волны, которые излучаются атомами и молекулами вещества. Участки три, четыре и пять шкалы относятся к оптическому излучению.

Четвёртый участок – это видимое излучение, то есть электромагнитные волны, воспринимаемые человеческим глазом. Ранее мы с вами показали, что чувствительность человеческого глаза к электромагнитному излучению зависит от длины волны излучения, при этом максимум чувствительности приходится на зелёную часть спектра.

Видимое излучение также попадает в «оптическое окно» – область спектра электромагнитного излучения, практически не поглощаемого земной атмосферой. Чистый воздух рассеивает синий свет существенно сильнее, чем свет с большими длинами волн, поэтому полуденное небо выглядит голубым.

Изучая опыты Ньютона по дисперсии света, мы с вами показали, что белый свет является сложным цветом, так как он состоит из простых монохроматических цветов. Как мы помним, Ньютон выделил из белого света семь основных цветов. Число семь он выбрал из убеждения, что существует связь между цветами, музыкальными нотами, объектами Солнечной системы и днями недели.



Дальнейшие исследования спектра видимого излучения показали, что кроме видимых лучей, он содержит ещё и невидимые лучи. Так в 1800 году английский астроном Уильям Гершель параллельно с изучением и исследованием Солнца искал способы уменьшения нагревания инструментов для наблюдения. Для этого учёный изучал температуру различных участков солнечного спектра, помещая в них края чувствительных термометров. Какого же было удивление учёного, когда он обнаружил, что «максимум тепла» лежит за насыщенным красным цветом и, возможно, «за видимым преломлением».



Из-за повышенной способности этих невидимых лучей нагревать тела, они были названы тепловыми, а затем (уже учитывая их расположение в спектре) – **инфракрасными**.

В настоящее время к **инфракрасному излучению относят электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого света и микроволновым радиоизлучением.**

Исследования инфракрасного излучения показали, что оно испускается любыми телами, температура которых выше абсолютного нуля. При этом чем выше температура излучающего тела, тем больше интенсивность инфракрасного излучения и тем больше его частота.

На регистрации инфракрасных лучей основана тепловизионная техника, позволяющая вести наблюдение в полной темноте: это тепловизоры, приборы ночного видения, оптические прицелы ночного видения и так далее. Общее у всех этих приборов то, что все они преобразуют инфракрасное излучение в видимый нами свет.



Свойства инфракрасного излучения позволяют широко применять его в бытовой технике. Наиболее известный пример применения такого излучения – пульт дистанционного управления электронным устройством. Световой сигнал, исходящий от такого пульта, невидим для человека, что делает его применение удобным.

После того, как было обнаружено инфракрасное излучение, немецкий физик Иоганн Вильгельм Риттер начал поиски излучения с противоположного конца видимого спектра. И уже в 1801 году он обнаружил, что хлорид серебра белого цвета в течение нескольких минут темнеет на свету. Однако разные участки спектра по-разному влияют на скорость потемнения. А быстрее всего это происходит перед фиолетовой областью спектра. Обнаруженный вид излучения был назван **ультрафиолетовым** (от латинских слов «сверх, за пределами» и «фиолетовый»).

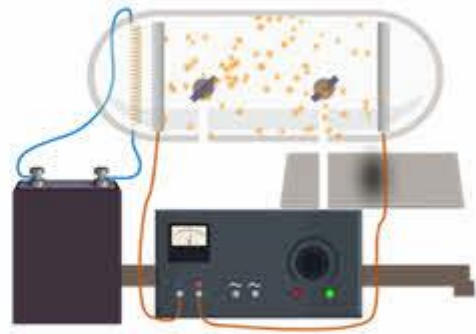
В настоящее время под **ультрафиолетовым излучением** понимают электромагнитное излучение с длиной волны **10-380 нм**.

Ультрафиолетовое излучение химически и биологически активно. Оно вызывает явление фотоэффекта, флуоресценцию и фосфоресценцию ряда веществ. Однако сами по себе ультрафиолетовые лучи не вызывают зрительных образов, так как они невидимы. Но их действие на биологические объекты очень велико и разрушительно. Например, ультрафиолетовое излучение Солнца недостаточно поглощается верхними слоями атмосферы. Вот почему высоко в горах нельзя оставаться длительное время без одежды и тёмных очков, так как это может привести не только к ожогам, но и к развитию рака кожи. По этой же причине не рекомендуется загорать на пляже под полуденным Солнцем, когда ультрафиолетовое излучение наиболее интенсивно. А для защиты глаз следует применять стеклянные очки, прозрачные только для видимого спектра, так как стекло сильно поглощает ультрафиолетовые лучи. Достаточно широко ультрафиолетовое излучение применяется для обеззараживания воды, воздуха и различных поверхностей. Используют его и для защиты денежных купюр и банковских карт.



Шестой участок шкалы электромагнитных волн образует **рентгеновское излучение**. Открыто оно было в конце XIX века совершенно случайно. В то время многие учёные изучали газовый разряд, происходящий при очень малом давлении. В этих условиях в газоразрядной трубке создавались потоки очень быстрых электронов. Но так как об электроне, как о частице, тогда ничего не знали, то их потоки называли катодными лучами, так как они рождались на катоде трубки. Так вот, изучая катодные лучи немецкий физик Вильгельм Конрад Рёнтген скоро заметил, что фотопластинка, помещённая вблизи разрядной трубки, оказывалась засвеченной даже в том случае, когда она была завернута в чёрную бумагу.



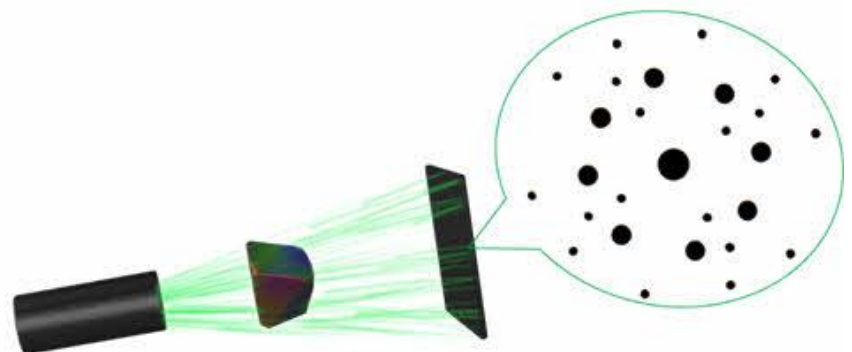


Вильгельм Рёнтген  
1845—1923

Это натолкнуло учёного на мысль о том, что при работе разрядной трубки возникает какое-то неизвестное ранее сильно проникающее излучение. Он назвал его X-лучами. Впоследствии за этим излучением прочно укрепился термин «рентгеновские лучи». А сам Вильгельм Рёнтген в 1901 году стал первым в истории физики лауреатом Нобелевской премии.

Что интересно, открытые Рёнтгеном лучи вызывали ионизацию воздуха, не отражались от веществ и не испытывали преломления. Поэтому было высказано предположение, что **рентгеновские лучи, возникающие при резком торможении быстрых электронов атомами твёрдых тел, являются электромагнитными волнами с очень малой длиной волны.**

Что бы доказать (или опровергнуть) это предположение в тысяча девятьсот двенадцатом (1912) году немецкий физик Макс фон Лауэ совместно с двумя студентами (они-то и проводили опыт) направили узкий пучок рентгеновских лучей на кристалл, за которым расположили фотопластинку.

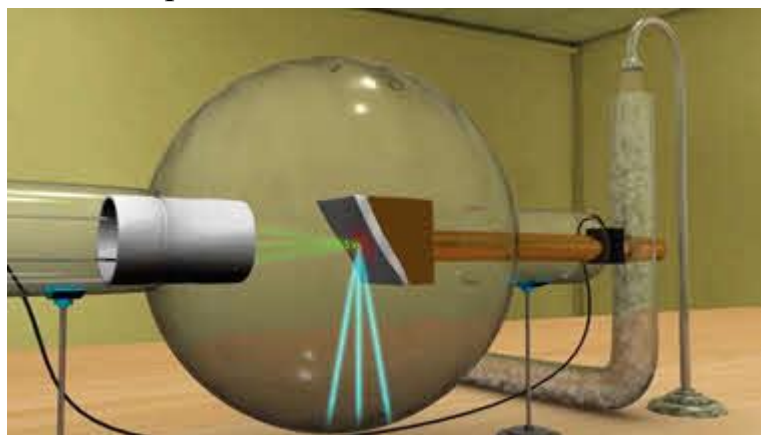


Макс фон Лауэ  
1879—1960

После проявления пластинки оказалось, что вокруг большого центрального пятна, которые давали лучи, распространяющиеся по прямой, были обнаружены регулярно расположенные небольшие пятнышки. Их появление можно было объяснить только дифракцией рентгеновских лучей на упорядоченной структуре кристалла. Дальнейшее исследование дифракционной картины позволило определить длину волны рентгеновских лучей. Она оказалась меньше длины волны ультрафиолетового излучения, и по порядку величины была равна размерам атома.

Таким образом было доказано, что **рентгеновские лучи – это электромагнитные волны с очень малой длиной волны.**

Для генерации рентгеновского излучения разработаны электровакуумные приборы, называемые **рентгеновскими трубками.** Их основными конструктивными элементами являются металлические катод, в виде вольфрамовой спирали, и анод. Катод при нагревании испускает электроны (происходит термоэлектронная эмиссия). Далее из-за большой разности потенциалов между катодом и анодом (десятки – сотни киловольт) поток электронов ускоряется и приобретает большую энергию. Полученный ускоренный пучок электронов попадает на положительно заряженный анод, где электроны испытывают резкое торможение, моментально теряя большую часть приобретённой энергии.



Большая её часть (около 99%) превращается в тепло, вызывая нагревание анода. И лишь около 1% энергии превращается в тормозное излучение рентгеновского диапазона.

При изучении рентгеновских лучей было также установлено, что их **поглощение веществом пропорционально плотности вещества:** они легко могут пройти через алюминиевую пластинку толщиной до десяти сантиметров, но легко задерживаются сантиметровым слоем свинца.

Свойство рентгеновских лучей проходить через вещество используется на практике уже со времени их открытия. В частности, в медицине просвечивание человеческого тела рентгеновскими лучами даёт возможность

получать фотографии скелета и внутренних органов человека. По дифракционной картине, даваемой рентгеновскими лучами при их прохождении сквозь кристаллы, удаётся установить порядок расположения атомов в пространстве – то есть структуру кристаллов. А с помощью рентгеноструктурного анализа можно расшифровать строение сложнейших органических соединений, в том числе и белков.



В медицине



В кристаллографии



В химии и биохимии

Седьмой (и последний) участок шкалы электромагнитных волн занимают гамма-лучи, которые возникают в результате процессов, происходящих в атомных ядрах, и сопровождают ядерные реакции. Гамма-излучение характеризуется чрезвычайно малой длиной волны (менее 0,2 нм). Вследствие этого оно обладает громадной проникающей способностью. Например, в воздухе длина свободного пробега гамма-лучей достигает нескольких сот метров, и около 5 см в свинце.

Облучение гамма-квантами в зависимости от дозы и продолжительности может вызвать хроническую и острую лучевую болезнь. В то же время гамма-облучение подавляет рост раковых (при локальном воздействии на них) и других быстро делящихся клеток.

## Тема 7. Квантовая физика

### Лекция №38

#### Постулаты теории относительности. Релятивистская динамика.

##### План

1. Постулаты теории относительности.
2. Основные следствия из постулатов теории относительности.
3. Элементы релятивистской динамики.

##### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

##### Вопрос для самоконтроля:

1. В чем заключается принцип относительности Г. Галилея?
2. В чем заключается первый постулат А. Эйнштейна в СТО?
3. В чем заключается второй постулат А. Эйнштейна в СТО?
4. Какие события называются одновременными?
5. Какие следствия из постулатов СТО вы знаете?
6. В чем принципиальное отличие скорости света от скоростей движения тел?
7. Назовите формулы релятивистской массы, длины, времени, импульса, энергии.
8. Назовите релятивистский закон сложения скоростей. Когда он применим? В чем его особенность?
9. Что такое энергия покоя? Как найти энергию покоя? Насколько велика энергия покоя?
10. В чем заключается соответствие СТО и классической механики?



## 1. Постулаты теории относительности.

За два столетия, которые отделяли физику эпохи Галилея и Ньютона от физики эпохи Максвелла и Герца, в ней накопилось огромное количество новых научных фактов. Особенно бурно в это время развивались электромагнетизм и оптика. В то же время представление о мироздании базировалось на механической картине мира, трактовавшей все явления с позиций классической механики XVII века и носившей, казалось бы, универсальный характер.

Так, согласно классическим представлениям, считавшимся на протяжении веков незыблемыми, пространство и время – абсолютные величины. То есть их свойства постоянны и не зависят от движения материальных тел и не связаны друг с другом.

Основным принципом классической механики является принцип относительности Галилея, согласно которому **все инерциальные системы отсчёта равноправны по отношению к механическим явлениям**. Благодаря этому равноправию формулировки законов механики во всех инерциальных системах отсчёта одинаковы.

Однако, после того как во второй половине XIX века Джеймс Максвелл сформулировал основные законы электродинамики, возник вопрос: распространяется ли принцип относительности Галилея, справедливый для механических явлений, и на явления электромагнитные?

Как известно, в классической механике такие понятия, как координата, скорость, траектория тела, являются относительными – они изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой. В то же время, некоторые понятия и величины в классической физике считались абсолютными. Например, как само собой разумеющееся принималось положение об абсолютности времени (ход времени везде одинаков). Очевидным следствием этих представлений является классический закон сложения скоростей, из которого следовало, что не существует максимально возможной (предельной) скорости. И такие представления согласовывались как с повседневным опытом, так и с экспериментами в механике, акустике, гидродинамике и так далее.

Но электромагнитные процессы происходят со скоростями, сравнимыми со скоростью света, то есть гораздо большими, чем скорости движения тел, с которыми имеет дело механика. В связи с этим возник вопрос: меняются ли основные законы электродинамики при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой, или же, подобно законам

Ньютона, они остаются неизменными. Только в последнем случае можно рассматривать принцип относительности, как общий закон природы.

Рассматривая проблему распространения электромагнитных волн (и, в частности, света), полезно обратиться к хорошо изученным закономерностям поведения звуковых волн. Как показали опыты Роберта Бойля, звуковые волны могут распространяться только в упругой среде. Именно упругие свойства среды делают возможной передачу колебаний от одной точки среды к другой.

Проводя аналогию между звуковыми и электромагнитными волнами, учёные пришли к выводу о том, что для распространения света также необходима упругая среда, которую назвали **мировым эфиром**.

Таким образом, по мере развития электродинамики основным стал вопрос о влиянии эфира на движение света. Если считать, что Земля при своём обращении вокруг Солнца движется сквозь неподвижный эфир, то в лаборатории, находящейся на Земле, следует ожидать появления так называемого «эфирного ветра» (подобно тому, как возникает встречный поток воздуха при езде на мотоцикле в безветренную погоду).

Ответы на возникшие вопросы мог дать только эксперимент, который и был проведён в 1887 году американцами Альбертом Майкельсоном и Эдвардом Морли. Они решили раз и навсегда доказать скептикам, что «светоносный эфир реально существует, наполняет Вселенную и служит средой, в которой распространяются свет и прочие электромагнитные волны».

Разберём принципиальную схему их экспериментальной установки, названной позднее интерферометром Майкельсона. Он состоял из оптического устройства, расположенного на массивной каменной платформе, плавающей в бассейне со ртутью.



Альберт Майкельсон  
1852—1931

Такая конструкция практически исключала влияние механических колебаний платформы на оптические процессы. Свет от источника с помощью полупрозрачной пластины расщепляется и два когерентных луча, которые расходятся под прямым углом друг к другу. Лучи отражались от зеркал, а затем сводились вместе с помощью той же полупрозрачной пластинки и попадали на детектор. В результате сложения этих лучей получалась интерференционная картина. Ожидалось, что она будет существенно зависеть от ориентации интерферометра по отношению к его скорости относительно «неподвижного» эфира.

Действительно, двигаясь по орбите вокруг Солнца, Земля совершает движение относительно гипотетического эфира полгода в одном направлении, а следующие полгода в другом. Следовательно, полгода «эфирный ветер» должен обдувать Землю и, как следствие, смещать показания интерферометра в одну сторону, полгода — в другую, то есть появится дополнительная «разность хода» интерферирующих световых волн.

При повороте платформы на  $90^\circ$  лучи «менялись местами» и соответственно должна была измениться разность хода. Как показывали расчёты, это привело бы к смещению интерференционной картины на 0,4 ширины интерференционной полосы. Однако ожидаемое смещение обнаружено не было, хотя интерферометр Майкельсона позволял наблюдать сдвиг картины даже на одну сотую полосы. Это было настолько же невероятно, как если при езде на мотоцикле вы не почувствовали бы встречного воздушного потока.

Данный факт был одной из величайших загадок физики конца XIX — начала XX века. Обнаружилось явное противоречие между экспериментом и классическими представлениями. Так, при переходе от одной ИСО к другой, согласно классическому закону сложения скоростей, к скорости света должна векторно прибавляться скорость движения этих ИСО друг относительно друга. Однако эксперимент упрямо утверждал, что скорость света в вакууме постоянна и во всех ИСО одинакова. Это был вызов механической картине мира, которая складывалась веками.

Возникшее противоречие между электродинамикой и классической механикой можно устранить, если принять одну из трёх гипотез:

- считать, что принцип относительности неприменим к электромагнитным явлениям (эту точку зрения разделял великий голландец Хендрик Лоренц);
- считать, что неверны уравнения Максвелла и их нужно соответствующим образом изменить, чтобы они удовлетворяли преобразованиям Галилея (такую попытку предпринимал Генрих Герц);

– и, наконец, считать, что неверны преобразования Галилея и их следует заменить другими.

Третья гипотеза была самой революционной, так как она предполагала пересмотр всех основных законов классической механики Ньютона. Решающий шаг был сделан в 1905 году, когда в научном журнале «Анналы физики» были опубликованы три выдающиеся статьи 25-летнего учёного Альберта Эйнштейна. В одной из статей – «К электродинамике движущихся тел» – Эйнштейн показал, что преобразования Галилея верны лишь в том случае, когда скорости движения тел и систем отсчёта много меньше скорости света в вакууме. Если же эти скорости близки к скорости света, то законы классической механики должны быть заменены более общими законами, учитывающими особенности такого движения.

Пересмотр классических представлений позволил Эйнштейну создать новое учение о пространстве, времени и движении – **специальную теорию относительности** (сокращённо СТО). В основу данной теории учёный положил два постулата, являющихся обобщением экспериментальных фактов.

**Первый постулат (постулат относительности):** во всех инерциальных системах отсчёта все физические явления при одинаковых начальных условиях происходят одинаковым образом.

Данный постулат представляет собой обобщение механического принципа относительности на все физические явления. Он говорит о том, что никакими экспериментами, проведёнными внутри ИСО, невозможно установить, покоится она или движется.

Для примера, представим, что мы находимся в вагоне поезда, который движется равномерно и прямолинейно без толчков и покачиваний. Как с помощью экспериментов (механических, электромагнитных и любых других), проводимых внутри него узнать, движется вагон или нет? Весь накопленный в физике опыт показывает, что это сделать невозможно в полном соответствии с первым постулатом.

Второй постулат называют **принципом постоянства (или принципом инвариантности) скорости света**. Он может быть сформулирован так: **скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источников и приёмников света и во всех инерциальных системах отсчёта одинакова**.

Как мы уже упоминали ранее, этот постулат полностью соответствует результатам множества экспериментов, но противоречит классическому закону сложения скоростей.

Эйнштейн разрешил это противоречие, проведя глубокий анализ представлений о времени и пространстве. В основе этого анализа лежит

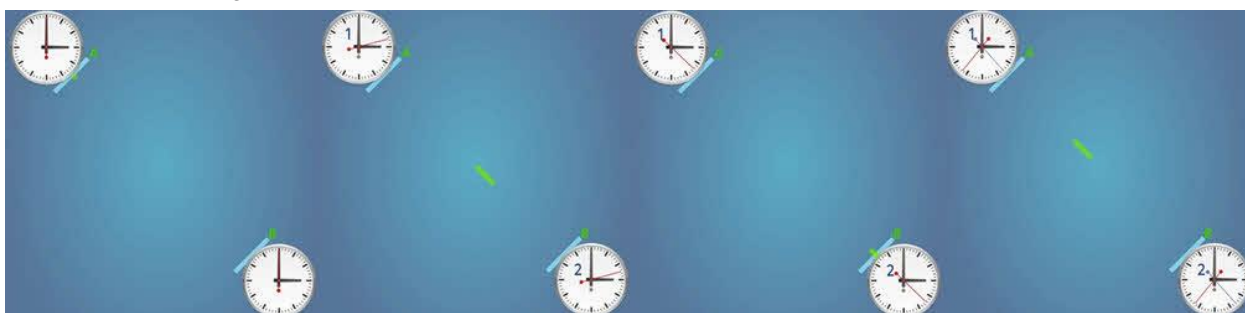
понятие **событие**. Под событием понимают **некоторое явление, происходящее в определенной точке пространства в определенный момент времени**.

Примером события может служить вспышка света, выстрел орудия, соударение двух частиц и так далее. **События, произошедшие в один и тот же момент времени, называются одновременными**. В классической физике принималось положение об абсолютности одновременности: если два события произошли одновременно в некоторой ИСО, то они одновременны и в любой другой ИСО.

Но Эйнштейн обратил внимание на то, что это вовсе не очевидно. Для решения вопроса об одновременности (или неодновременности) двух событий, происходящих в разных местах некоторой инерциальной системы отсчёта, необходимо в каждом месте иметь часы, покоящиеся относительно этой ИСО, синхронизованные между собой следующим способом.

Итак, пусть в некоторой точке  $A$  инерциальной системы отсчёта находятся часы 1, а в точке  $B$  – часы 2. Световой сигнал посылают из точки  $A$  в точку  $B$ . Там он мгновенно отражается и возвращается обратно в точку  $A$ . Поскольку скорость света постоянна, то часы следует считать идущими синхронно, если разность показания часов два в момент прихода сигнала в точку  $B$  и показания часов один в момент старта сигнала из точки  $A$  равна разности показания часов один в момент возвращения сигнала в точку  $A$  и показания часов два в момент прихода сигнала в точку  $B$ :

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2.$$



Таким образом можно провести синхронизацию для любой пары часов, покоящихся в некоторой ИСО. Ход такой совокупности синхронизированных часов и есть **ход времени в данной инерциальной системе отсчёта**.

Теперь можно приступить к проверке абсолютности (или относительности) одновременности. Представим себе вагон, в центре которого находится источник света, и двоих наблюдателей. Пусть один наблюдатель стоит на платформе, а второй находится в вагоне. На правой и левой стенке вагона (по отношению к нам) укрепим фотоэлементы, позволяющие определять момент прихода светового сигнала. Понятно, что

если световая вспышка произойдёт в середине неподвижного вагона, то световой сигнал будет зарегистрирован фотоэлементами одновременно как по часам, находящимся в вагоне, так и по часам системы отсчёта, связанной с платформой.

Что произойдёт, если вагон начнёт двигаться вправо равномерно и прямолинейно? С точки зрения наблюдателя, находящегося внутри вагона, ничего не изменится, так как для него вагон по-прежнему покоится. Поэтому световые сигналы от вспышки вновь достигнут фотоэлементов одновременно.



Однако абсолютно иную картину видит наблюдатель на платформе. Относительно него вагон движется. В результате этого правая стенка вагона удаляется от того места, где произошла вспышка, а левая – приближается к нему. Значит, относительно платформы свету придётся пройти от места вспышки до левого фотоэлемента меньший путь, чем до правого. При этом согласно второму постулату скорость света относительно платформы равна  $c$  и для сигнала, движущегося вправо, и для сигнала, движущегося влево. В итоге свет сначала достигнет левого фотоэлемента и только потом – правого. Для наблюдателя на платформе эти события неодновременны.



Кто же прав? Оба, так как **события, одновременные в одной ИСО, могут оказаться не одновременными в другой ИСО, движущейся относительно первой.**

Поэтому мы вынуждены заключить, что **одновременность пространственно разделённых событий относительна.**

Представить себе это наглядно, «почувствовать» мы не в состоянии из-за того, что скорость света много больше тех скоростей, с которыми привыкли двигаться мы. Отметим, однако, что **одновременные события, произошедшие в одном месте, одновременны в любой инерциальной системе отсчёта. Их одновременность абсолютна.**

**Основные выводы:**

– **Специальная теория относительности Эйнштейна базируется на двух постулатах.**

– **Первый постулат (постулат относительности) звучит так: в любых инерциальных системах отсчета все физические явления при одинаковых начальных условиях протекают одинаково.**

– **Согласно второму постулату (постулату постоянства скорости света):**

**во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме одинакова и не зависит от скорости движения источника.**

## 2. Основные следствия из постулатов теории относительности.

Мы познакомились с двумя постулатами теории относительности, сформулированных Эйнштейном:

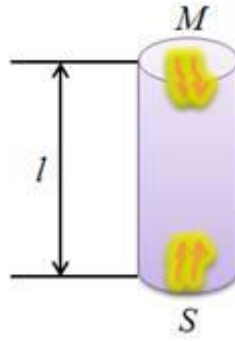
**Первый постулат (или постулат относительности) звучит следующим образом: в любых инерциальных системах отсчета все физические явления при одинаковых начальных условиях протекают одинаково.**

**Согласно второму постулату (или постулату постоянства скорости света): во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме одинакова и не зависит от скорости движения источника.**

Как оказалось в дальнейшем, из данных постулатов вытекает ряд важнейших следствий. Поговорим о них, особо не останавливаясь на обосновании этих следствий.

Для начала рассмотрим воображаемые световые часы – это лампа и зеркало, закрепленные на противоположных концах стержня. Свет от вспышки лампы отражается от зеркала и попадает на фотоэлемент, расположенный рядом с лампой, который вновь ее включает.



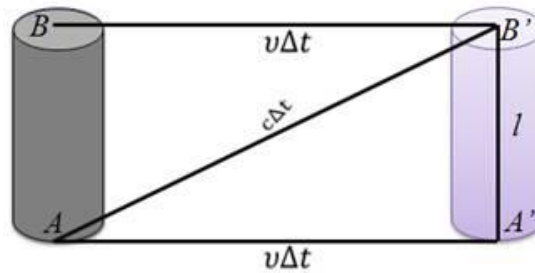


Для наблюдателя, покоящегося относительно стержня, промежуток времени между вспышками легко определить, разделив удвоенную длину стержня на значение скорости света.

$$\tau_0 = \frac{2l}{c}$$

Таким образом, по числу вспышек можно измерять промежутки времени, необходимые для распространения сигнала.

А что будет происходить, если стержень будет двигаться с некоторой скоростью вправо перпендикулярно стержню.



Если сигнал достигает зеркала за промежуток времени  $\Delta t$  при измерении по неподвижным часам, то зеркало за этот промежуток времени сместится из точки  $B$  в точку  $B'$  на расстояние  $v\Delta t$ . Расстояние от места вспышки до места отражения равно  $c\Delta t$ . Тогда из прямоугольного треугольника  $AB'A'$  следует, что

$$(c\Delta t)^2 = (v\Delta t)^2 + l^2$$

$$\Delta t = \frac{l}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Учитывая то, что такой же промежуток времени займет возвращение сигнала к лампе, окончательно получим:

$$\tau = \Delta t$$

$$\tau = \frac{l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{\frac{2l}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Промежуток времени  $\tau_0$ , измеренный по часам наблюдателя, покоящегося в данной ИСО, называют **собственным временем** наблюдателя. При этом собственное время одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

А вот часы, движущиеся равномерно относительно данной системы отсчета, идут медленнее неподвижных часов и показывают тем больший промежуток времени, чем больше скорость их движения. Этот эффект называют **релятивистским замедлением времени**.

Теперь давайте рассмотрим следующую ситуацию. Пусть имеется стержень, который движется вдоль своей оси с некоторой скоростью. Если неподвижный наблюдатель включит секундомер при совмещении с ним переднего конца стержня, а выключит при совмещении с ним заднего конца стержня, то длину стержня можно будет легко определить из формулы, которая знакома из курса физики 7 класса.

$$l = v\tau_0$$

В системе отсчета, связанной со стержнем, также можно определить его длину, измеряя время секундомером, однако в этом случае сам секундомер уже будет двигаться относительно стержня.

$$l = v\tau$$

Учитывая релятивистский эффект замедления времени, получим формулу, выражающую **релятивистское сокращение размеров**.

$$l = v\tau_0 = \frac{v\tau}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{l_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = l_0 \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

Где  $l_0$  – **собственная длина стержня**, т.е. это длина стержня в системе отсчета, относительно которой он покоится.

Таким образом, с точки зрения наблюдателя, **движущееся тело сокращается в направлении своего движения. При этом поперечные размеры тела при таком движении не изменяются.**

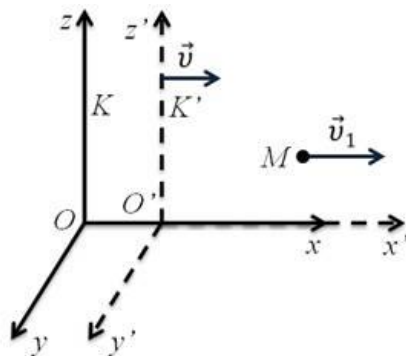
Есть еще одно следствие из теории относительности. Оно носит название **относительность одновременности** и звучит следующим образом: **одновременность пространственно-разделенных событий относительна.**

Если говорить более простым языком, то относительность одновременности говорит о том, что те события, которые были одновременными в одной инерциальной системе отсчета, **перестают быть таковыми** в другой системе отсчета, движущейся относительно первой с некоторой постоянной скоростью.

Помимо всего прочего, **результаты теории относительности привели и к изменению закона сложения скоростей. Классический закон сложения скоростей не может быть справедливым, так как он противоречит постоянству скорости света в вакууме.**

Так, например, если автомобиль движется со скоростью  $v$  и в некоторый момент времени включит фары, то скорость распространения света от фар относительно Земли должна быть равна опять-таки скорости света, а не  $v + c$ . Новый закон сложения скоростей и должен приводить к требуемому результату.

Для простоты рассмотрим частный случай. Пусть тело  $M$  движется вдоль оси  $x'$  системы отсчета  $K'$ , которая, в свою очередь, движется со скоростью  $v$  относительно системы отсчета  $K$ . Причем, в процессе движения координатные оси  $x$  и  $x'$  все время совпадают, а координатные оси  $y$  и  $y'$ ,  $z$  и  $z'$  остаются параллельными.



Обозначим модуль скорости тела относительно подвижной системы отсчета через  $v_1$ , а модуль скорости этого же тела относительно неподвижной системы отсчета через  $v_2$ .

Тогда, зная модуль скорости тела в одной инерциальной системе отсчета, можно найти модуль его скорости в другой инерциальной системе отсчета.

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}$$

Полученная взаимосвязь и выражает **релятивистский закон сложения скоростей.**

Стоит отметить то факт, что полученная формула применима только в том случае, если все три вектора скорости направлены вдоль одной прямой.

Эффект замедления времени:

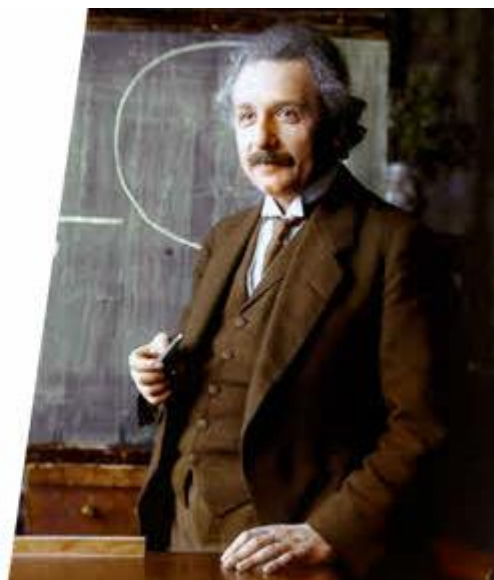
$$\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow \tau \cong \Delta t \text{ (при } v \ll c \text{)}.$$

Эффект сокращения длины:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow l \cong l_0 \text{ (при } v \ll c \text{)}.$$

Если  $v \ll c$ , то  $\frac{v^2}{c^2} \approx 0$ .

Альберт Эйнштейн  
1879—1955



### 3. Элементы релятивистской динамики.

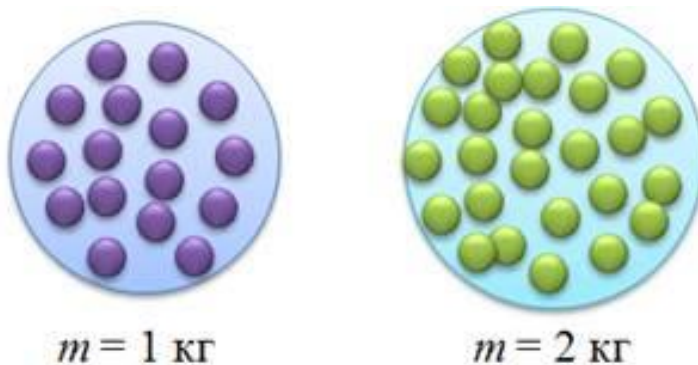
Сформулированные Эйнштейном постулаты, положенные в основу СТО, заставили физиков пересмотреть взгляды на классическую (ньютоновскую) механику. Классические выражения для импульса и энергии нужно было изменить для новой, уточненной формы записи законов сохранения импульса и энергии. Таким образом, **теория относительности потребовала пересмотра и уточнения законов механики.**

**Уравнения динамики следует изменить так, чтобы они оставались неизменными при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую согласно принципу относительности.** В случае малых скоростей, т.е. скоростей намного меньших скорости света, уравнения релятивистской динамики должны переходить в классические, ибо в этой области их справедливость подтверждается на опыте.

В классической механике важной динамической величиной является масса тела. Из второго закона Ньютона следует, что **масса тела является мерой его инертных свойств.** В формулах, связывающих импульс тела и его скорость, а также кинетическую энергию и скорость тела, масса также выступает как мера инертности.

В тоже время, **масса, входящая в закон всемирного тяготения, является мерой гравитационного взаимодействия.** Инертность и способность к гравитационным взаимодействиям представляют собой совершенно различные проявления свойств материи. Однако то, что меры этих различных проявлений обозначаются одним и тем же словом совсем не случайно, а обусловлено тем, что оба свойства всегда существуют совместно и всегда друг другу пропорциональны. А многочисленные опыты и

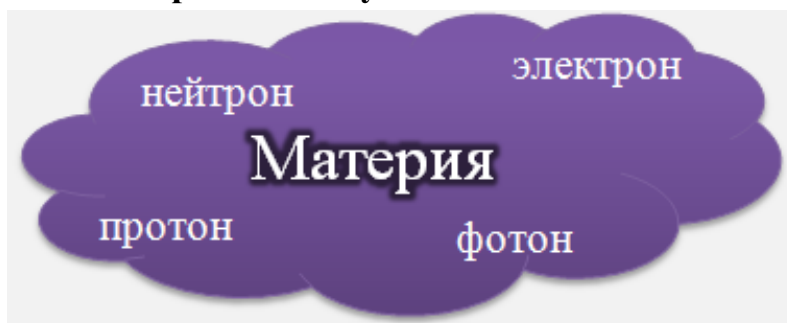
экспериментальные факты доказывают, что инертная и гравитационная массы равны.



Известно что, в классической механике масса рассматривается и как мера количества вещества. Вспомните: чем больше отдельных частиц содержит физическая система, тем больше ее масса.

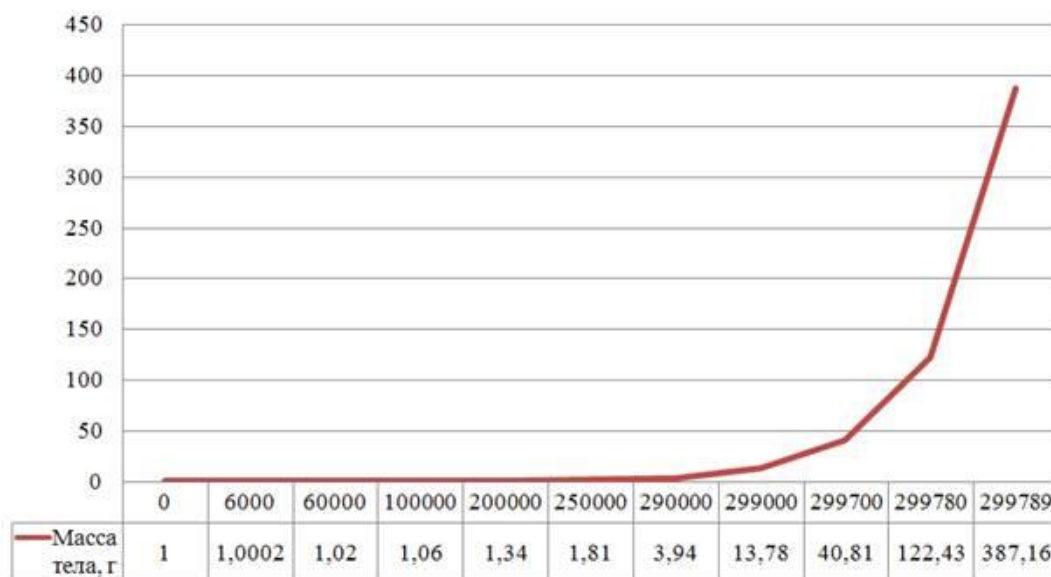
Однако в теории относительности масса тела уже не является мерой количества вещества. Это объясняется тем, что в релятивистской теории в понятие материи включается не только вещество (протоны, электроны, нейтроны), но и излучения (фотоны). Поэтому масса будет определяться не столько числом частиц, сколько их энергиями.

Также в теории относительности масса движущегося тела не является мерой его взаимодействия с гравитационным полем, так как это поле зависит от энергии и импульса тела.



Масса тела, движущегося со скоростью, близкой к скорости света, не является мерой его инертности.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Рассмотрим формулу и график. На них хорошо видно, что с ростом скорости тела будет увеличиваться и его масса. В качестве примера, можно рассмотреть тело массой 1 грамм. При земных скоростях его масса изменяться не будет, а если и будет, то очень незначительно. Однако, с приближением скорости, к скорости света это различие будет уже более существенное. И, наконец, если тело массой 1 грамм заставить двигаться со скоростью света, его масса станет равной 387,16 грамма.

В теории относительности эффективно применяется соотношение, связывающее полную энергию и импульс свободной частицы, движущейся с некоторой скоростью.

$$E^2 - p^2 c^2 = (mc^2)^2$$

При чем, в этой формуле масса та же величина, что и в классической механике.

Выражение для импульса в классической механике не удовлетворяет принципам теории относительности, законам сохранения энергии и импульса, а также записанной формуле. Поэтому в СТО релятивистский импульс определяется новым выражением

$$\vec{p} = \vec{v} \frac{E}{c^2}$$

Особенно важно отметить, что полученные нами формулы описывают движение частиц во всем интервале возможных скоростей. При движении со скоростью света модуль импульса и энергия связаны следующим соотношением:

$$p = \frac{E}{c}$$

Если полученное выражение подставим в первую формулу и проведем элементарные математические преобразования, то увидим, что масса

частицы, движущейся со скоростью света, равна нулю. Такие частицы, решено было назвать **безмассовыми**. Они не могут быть ни замедленны, ни ускорены. В эксперименте такие частицы были обнаружены — это **фотоны** и **нейтрино**.

Для частиц с ненулевой массой выразим энергию и импульс через массу и скорость. Для энергии получим:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

А для импульса

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Тогда **основное уравнение релятивистской динамики** будет иметь вид:

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}$$

Важнейшим отличием теории относительности от классической механики является то, что энергия тела не обращается в ноль, даже когда оно покоится. В этом случае **энергия покоя** тела пропорциональна его массе.

$$E_0 = mc^2$$

Энергия покоя имеет огромные значения. Например, тело массой 1 грамм обладает энергией покоя

$$\begin{aligned} E &\equiv 1 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \equiv \\ &\equiv 9 \cdot 10^{13} \text{ Дж} \equiv \\ &\equiv 25 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{час} \end{aligned}$$

Такая энергия эквивалентна энергии, выделяющейся при сгорании двух тысяч тонн нефти.

Таким образом, увеличение энергии тела связано с увеличением его массы, причем:

$$\Delta m = \frac{E_0}{c^2}$$

Данное соотношение выражает **закон взаимосвязи массы и энергии покоя**. В теории относительности, масса тела является **мерой энергии покоя**. А это свойства массы было не известно в классической механике.

Кинетическую энергию в СТО определяют как разность полной энергии и энергии покоя.



$$E_k = E - E_0$$

$$E_k = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2$$

Из этой формулы видно, что если скорость частицы будет стремиться к скорости света, то ее кинетическая энергия будет стремиться к бесконечности. А это означает, что **частицу, обладающей некоторой массой, невозможно разогнать до скорости света**. Но не стоит думать, что релятивистская динамика противоречит законам классической физики.

Существует, так называемый, **принцип соответствия**, согласно которому любая новая теория, претендующая на более глубокое описание физических явлений и, соответственно, на более широкую область применимости, должна включать в себя предшествующие теории как предельные случаи. Таким образом, новая теория должна включать в себя предшествующую ей теорию и указывает пределы применимости ее идей и методов расчета.

И теория относительности Эйнштейна не является исключением из правил. На практике все формулы специальной теории относительности переходят в формулы классической механики при скоростях, намного меньших скорости света.

**При малых скоростях ( $v \ll c$ )**

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1$$



$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \tau_0 \quad \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m\vec{v} \quad l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = l_0$$

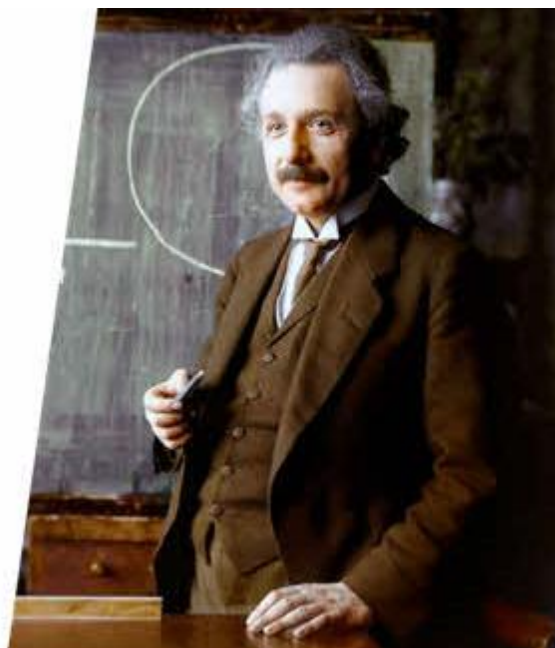
Релятивистский импульс:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow p \cong mv \text{ (при } v \ll c\text{)}.$$

Кинетическая энергия тела:

$$E_k = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \Rightarrow E_k \cong \frac{mv^2}{2} \text{ (при } v \ll c\text{)}.$$

Альберт Эйнштейн  
1879—1955



### Основные выводы:

– Понятие одновременности событий, расстояния и промежутка времени являются не абсолютными, а относительными и зависят от выбора системы отсчета.

– Из теории относительности вытекает, что **скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью** передачи взаимодействия в природе.

– Основной же закон релятивистской динамики можно записать в той же форме, что и второй закон Ньютона, но учитывая релятивистское значение импульса тела.

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

Помимо этого, важнейшим для ядерной физики и физики элементарных частиц следствием теории относительности является вывод о взаимосвязи между массой и энергией. При этом частица обладает энергией даже при нулевой скорости.

Если движение тела происходит со скоростью многим меньше скорости света, то справедливы классические представления о пространстве и времени и законы механики Ньютона. Это есть **проявление общего принципа соответствия физических теорий**.

## Лекция №39

### Фотоэффект. Теория фотоэффекта.

#### План

1. Гипотеза Планка. Фотоэффект. Законы внешнего фотоэффекта.
2. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
3. Фотоны. Корпускулярно-волновой дуализм.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. В чем заключается гипотеза Планка?
2. Чему равна постоянная Планка?
3. В чем заключается явление фотоэффекта?
4. Кто открыл явление фотоэффекта?
5. Объясните графически опыт А. Г. Столетова.
6. В чем состоят основные законы фотоэффекта?
7. Объясните особенности вольт-амперной характеристики фотоэффекта.
8. Объясните законы фотоэффекта с точки зрения квантовой теории света.
9. Объясните физическую суть формулы Эйнштейна для фотоэффекта.
10. Какое условие возникновения фотоэффекта?
11. Что называют красной границей фотоэффекта? Формула для красной границы фотоэффекта.
12. Почему энергия фотоэлектронов определяется только частотой света?
13. В чем суть явления внешнего фотоэффекта?
14. Что называют внутренним фотоэффектом?
15. Как определить энергию, массу и импульс фотона?
16. Что понимается под корпускулярно-волновым дуализмом?
17. В чем заключается гипотеза Луи де Бройля?

## 1. Гипотеза Планка. Фотоэффект. Законы внешнего фотоэффекта.

В конце 19 века многие ученые считали, что развитие физики завершилось. Законы механики и теория всемирного тяготения были известны уже более 200 лет. Максвеллом была завершена теория электромагнетизма. Установлены законы сохранения энергии, импульса и электрического заряда.

Однако к началу 20 века возникли некоторые проблемы, которые касались физической природы излучения и вещества и их взаимодействия друг с другом. В рамках классической физики возникали существенные противоречия при объяснении экспериментальных данных для процессов поглощения и испускания света атомами, закономерностей испускания электромагнитного излучения нагретыми телами и многое другое.

Анализ данных противоречий привел к революции в физике. И в течение последующих 30 лет были заложены основы новой – **квантовой физики**, которая пришла на смену классическим представлениям при рассмотрении явлений, происходящих на атомном и субатомном уровнях.

Известно, что все нагретые тела испускают тепловое электромагнитное излучение, **интенсивность которого зависит от температуры тела**. При этом излучение, испускаемое телами, содержит волны различных частот. А эксперименты показали, что **спектр теплового излучения является непрерывным**.

Согласно **волновой теории света**, испускание и поглощение электромагнитных волн рассматривается как **непрерывный процесс**, в результате которого **энергия источника или приемника волн также меняется непрерывно**. Но тогда, нагретое тело, непрерывно излучающее электромагнитные волны, должно терять энергию и, как следствие, охлаждаться до абсолютного нуля. Следовательно, не возможно тепловое равновесие между веществом и излучением. А это противоречит экспериментам.

Для того, чтобы убрать возникшие противоречия, немецкий учёный Макс Планк выдвинул гипотезу, согласно которой **атомы испускают электромагнитную энергию не непрерывно, а отдельными порциями – квантами**. При этом энергия каждой порции прямо пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu.$$

Фундаментальная постоянная, входящая в это уравнение, была названа постоянной Планка, хотя сам Планк называл её «таинственным посланцем из реального мира»:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с.}$$

Развивая идеи Макса Планка, Альберт Эйнштейн в 1905 году для объяснения экспериментальных законов внешнего фотоэффекта выдвинул гипотезу о дискретности самого электромагнитного излучения: **свет излучается, поглощается и распространяется в виде отдельных порций (квантов).**

Представление о квантах световой энергии объяснило многие экспериментальные факты, которые ранее не возможно было объяснить на основании классических представлений о свете. В развитии представления о природе света важный шаг был сделан при изучении одного замечательного явления, которое в свое время открыл Генрих Рудольф Герц.



Генрих Рудольф Герц



Рисунок 1 – Г. Герц

В 1887 году, изучая искровой разряд, он обнаружил, что пробой воздушного промежутка между электродами искрового разрядника происходит при меньшем напряжении, если освещать отрицательно заряженный электрод ультрафиолетовым излучением. Дальнейшие эксперименты показали, что отрицательно заряженная цинковая пластина при облучении ультрафиолетовым светом разряжается. Оба эти явления можно объяснить, только предполагая, что **под действием падающего излучения из металла вылетают электроны** – отрицательно заряженные частицы. Это явление получило название **фотоэффект**.

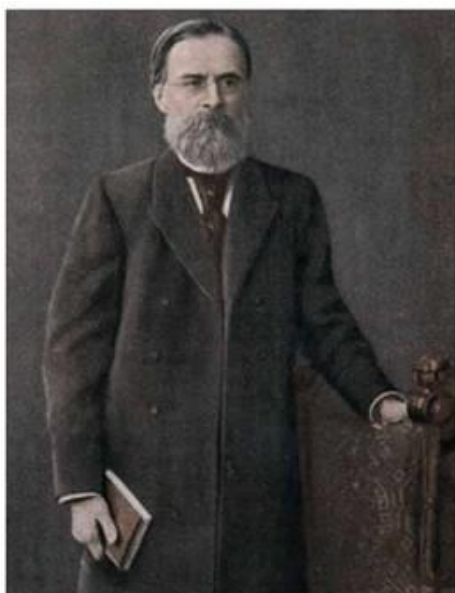
В настоящее время под **фотоэффектом** (или **фотоэлектрическим эффектом**) понимается явление взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия излучения полностью передается электронам вещества.

**Фотоэффектом** называют явление вырывания электронов из вещества под действием света.

Если фотоэффект сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества, то его называют **внешним фотоэффектом**, а вылетающие электроны – **фотоэлектронами**.

Если же фотоэффект сопровождается увеличением концентрации носителей заряда в веществе, а, следовательно, и увеличение электропроводности вещества, то его называют **внутренним фотоэффектом**.

Систематическое изучение явления фотоэффекта было проведено в 1888 – 1889 годах выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым.



Александр Григорьевич Столетов

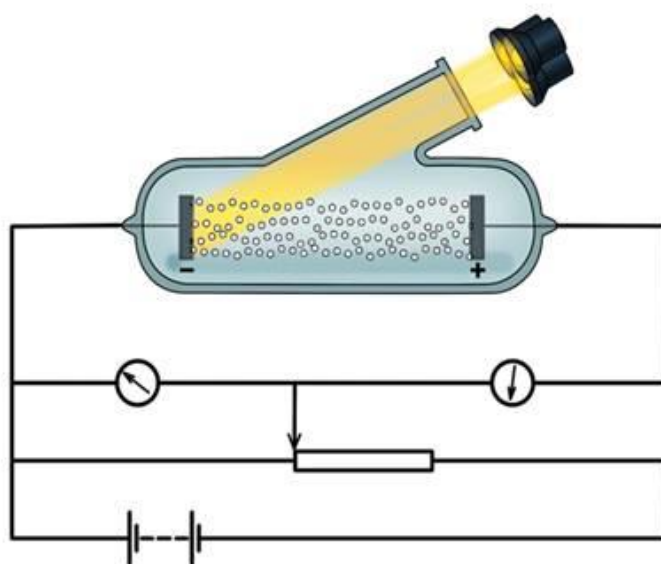


Рисунок 2

26 февраля 1888 года заслуженно считается одним из замечательных дней в истории науки и техники и, в частности, телевидения. В этот день великий русский ученый Александр Григорьевич Столетов (1839-1896) блестяще осуществил опыт, который наглядно продемонстрировал внешний фотоэффект и показал истинную природу и характер влияния света на электричество.

Количественные закономерности внешнего фотоэффекта А.Г. Столетов установил, используя вакуумный стеклянный баллон с двумя электродами.

Установка для изучения внешнего фотоэффекта представляет собой стеклянный баллон, из которого откачен воздух. Внутри баллона располагается два впаянных электрода. Один из них изготовлен из медной сетки, к которой подводился положительный заряд, а второй электрод представляет собой отрицательно заряженную цинковую пластинку. Внутри баллона через кварцевое окошко, прозрачное для ультрафиолетового излучения, попадает свет на катод. Под действием падающего света катод испускает электроны, которые замыкают цепь. Находящийся в цепи амперметр фиксирует наличие тока (рис. 3).

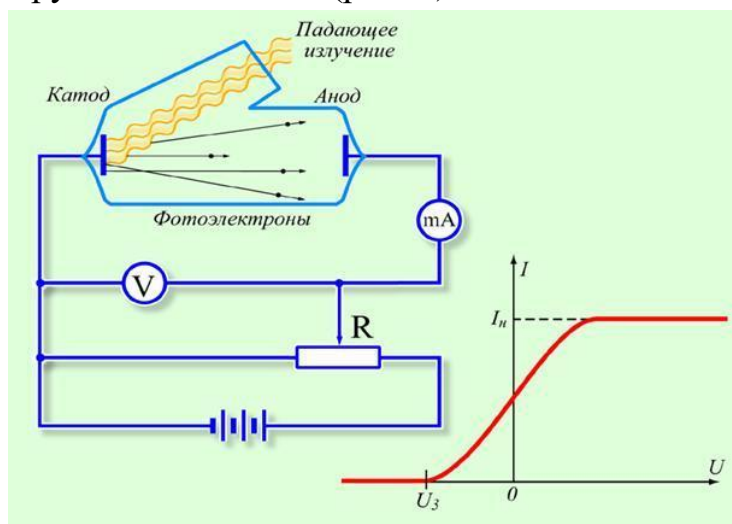
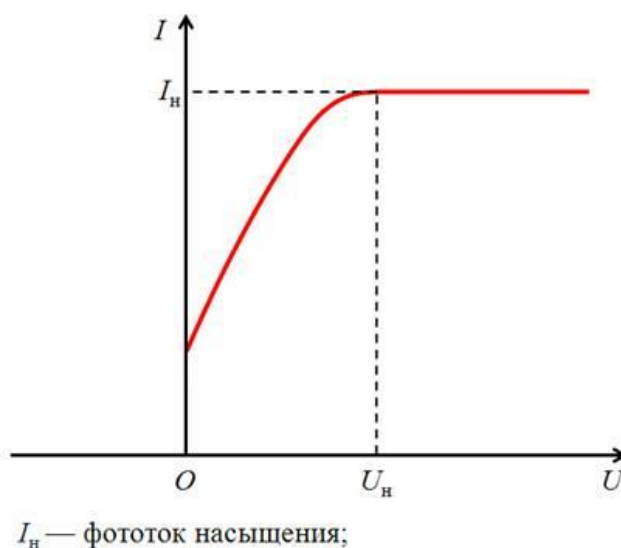


Рисунок 3 – Установка для изучения внешнего фотоэффекта

Наблюдения Столетова показали, что даже при отсутствии напряжения между электродами под действием падающего ультрафиолетового излучения в цепи возникает электрический ток, получивший название **фототок**.

Изменяя напряжение между электродами с помощью реостата, Столетов получил зависимость силы фототока от напряжения (иными словами – **вольт-амперную характеристику фотоэффекта**).





На этой установке получены вольт-амперные характеристики фотоэффекта при различных значениях светового потока (рис. 4).

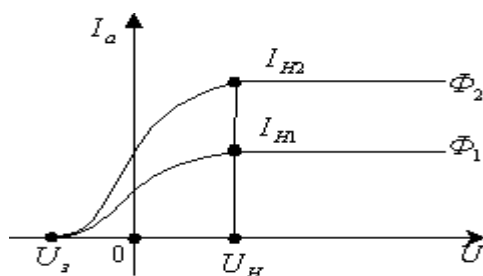
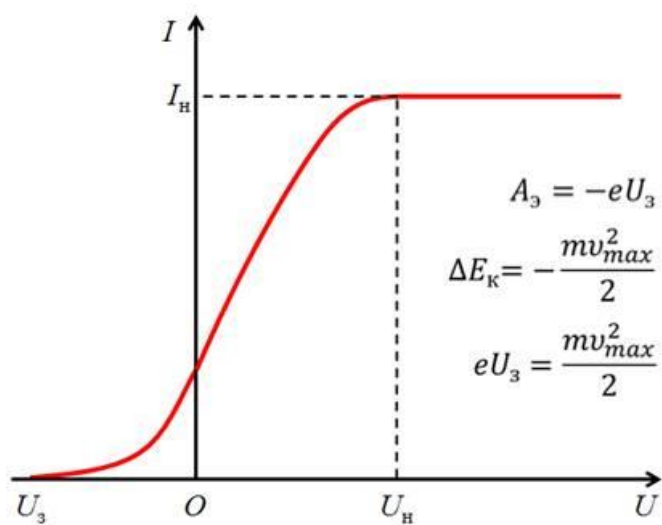


Рисунок 4 – Вольт-амперные характеристики фотоэффекта

**Ток, обусловленный явлением внешнего фотоэффекта, называется фототоком.**

Если изменить полярность напряжения, то в электростатическом поле между электродами фотоэлектроны будут тормозиться, и, как следствие, будет уменьшаться сила фототока. При некотором значении отрицательного напряжения, которое называют **задерживающим напряжением**, фототок полностью прекращается.



$I_H$  — фототок насыщения;

$U_з$  — задерживающее напряжение.

Из вольт-амперных характеристик видно, что:

а) если нет напряжения между электродами, значение фототока отличное от нуля. Это означает, что фотоэлектроны имеют при вылете кинетическую энергию.

б) в случае достижения между электродами некоторой ускоряющего напряжения  $U_H$  фототок перестает зависеть от напряжения, то есть его значение достигает насыщения  $I_{H1}, I_{H2}$ ;

в) при некотором задерживающем напряжении (на анод подан минус от источника тока) фототок прекращается

г) значение задерживающего напряжения не зависит от светового потока  $\Phi$ .

Измерив задерживающее напряжение, можно найти максимальное значение кинетической энергии электронов, вырываемых светом из катода

$$\frac{mU_{\max}^2}{2} = eU_z$$

Максимальная кинетическая энергия электронов равна выполненной ими работе против сил электрического поля. Электроны не могут преодолеть тормозящее действие электрического поля и долететь до анода.

На основе этих опытов сформулированы **законы внешнего фотоэффекта**:

1) Фототок насыщения прямо пропорционален падающему на катод световому потоку.

Количество электронов, вырванных светом с поверхности металла за 1 с при фиксированной частоте, прямо пропорционально поглощенной энергии световой волны; чем больше фотонов, тем больше вырванных электронов.

2) Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов определяется только частотой света  $\nu$  и не зависит от его интенсивности.

Кинетическая энергия электронов пропорциональна частоте света.

3) Для каждого вещества существует **красная граница фотоэффекта** (порог фотоэффекта) – такая минимальная частота  $\nu_{\min}$  (или максимальная длина световой волны  $\lambda_{\max}$ ), при которой еще возможен фотоэффект (если  $\nu \leq \nu_{\min}$  или  $\lambda \geq \lambda_{\max}$ , то фотоэффект не существует).

Величина  $\nu_{\min}$  зависит от химической природы тела и состояния его поверхности.

4) Фотоэффект является безынерционным  $t=10^{-9}$  с и вылет фотоэлектронов начинается с момента освещения катода.

## 2. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

Только первый закон внешнего фотоэффекта можно было объяснить на основе классической электромагнитной волновой теории. Электромагнитная волна, достигнув поверхности металла, вызывает вынужденные колебания электронов, отрывая их от металла. При этом нарушается безынерционность явления и то, что кинетическая энергия электронов не зависит от амплитуды

(а значит и от напряженности электрического поля) в электромагнитной волне.

Полное объяснение фотоэффекта в 1905 году дал А. Эйнштейн, развивая дальше идеи Планка о прерывистости излучения света. В экспериментальных законах фотоэффекта Эйнштейн увидел доказательство того, что свет имеет прерывистую структуру и поглощается отдельными порциями. Он высказал предположение, что фотоэффект происходит вследствие поглощения электроном одного кванта, а другие кванты не могут участвовать в этом процессе.

Кинетическую энергию фотоэлектрона можно найти, используя закон сохранения энергии. Энергия порции света  $h\nu$  расходуется на выполнение работы выхода  $A_{\text{вых}}$ , то есть работы, которую надо выполнить для вырывания электрона с поверхности металла, и на передачу электрону кинетической энергии:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$$

Это выражение называют уравнением Эйнштейна для фотоэффекта. Оно объясняет основные закономерности фотоэффекта. Энергия кванта должна быть больше чем  $A_{\text{вых}}$ . Минимальная частота (красная граница), при которой начинается фотоэффект:

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$$

Например, для цинка красная граница соответствует длине волны  $\lambda_{\text{max}} = 3,7 \cdot 10^{-7}$  м ультрафиолетового света. Открытие явления фотоэффекта имело большое значение для большего понимания природы света. Но ценность науки заключается не только в том, что она выясняет сложное и многогранное строение окружающей среды, но и в том, что наука дает нам в руки средства, с помощью которых можно усовершенствовать производство, улучшать условия материальной и культурной жизни. Важнейшее значение фотоэффекта заключается в том, что его открытие и исследование стали экспериментальной основой квантовой теории. Именно за объяснение законов фотоэффекта на основе квантовой теории А. Эйнштейну была присуждена Нобелевская премия.

В заключение отметим, что явление фотоэффекта нашло широкое применение не только в технике, но и в нашей с вами повседневной жизни. Приборы, принцип действия которых основан на явлении фотоэффекта, называют фотоэлементами.

Фотоэлементами оборудуются многие автоматические станки на производстве, для прерывания их работы в чрезвычайных ситуациях

(например, при попадании руки человека в рабочую зону прессы). Фотоэлементы применяются для выдвигания преграды в турникете метро, автоматического включения освещения на улицах, включения воды в кране и сушилки для рук. Их используют и в военном деле в самонаводящихся снарядах, для сигнализации и локации невидимыми лучами. С помощью фотоэлементов осуществляется воспроизведение звука, записанного на киноплёнке. Фотоэлементы нашли применение и в сортировке массовых изделий по размерам и окраске. Их широко применяют при производстве солнечных батарей, устанавливаемых на космических спутниках.



Как видим, явление фотоэффекта, открытое более 120 лет назад Генрихом Герцем, широко вошло в нашу повседневную жизнь и подарило множество замечательных приборов и открытий.

### **Основные выводы:**

Явление **фотоэффекта** заключается в том, что при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом энергия излучения полностью передается электронам вещества.

Если фотоэффект сопровождается вылетом электронов с поверхности вещества, то его называют **внешним фотоэффектом**, а вылетающие электроны – **фотоэлектронами**.

Если же фотоэффект сопровождается увеличением концентрации носителей заряда в веществе, а, следовательно, и увеличением электропроводности вещества, то его называют **внутренним фотоэффектом**.

Рассмотрели законы внешнего фотоэффекта.

**Первый закон:** сила фототока насыщения, определяемая максимальным числом фотоэлектронов, вырываемых из катода за единицу времени, прямо пропорциональна интенсивности падающего излучения.

**Второй закон фотоэффекта:** максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения и линейно возрастает с увеличением его частоты.

**Третий закон фотоэффекта:** для каждого вещества существует граничная частота, такая, что излучение меньшей частоты не может вырвать электроны с его поверхности.

**Четвертый закон:** фотоэффект практически безинерционен, так как с момента облучения металла светом, до вылета электрона проходит время порядка  $10^{-9}$  в минус девятой степени секунды.

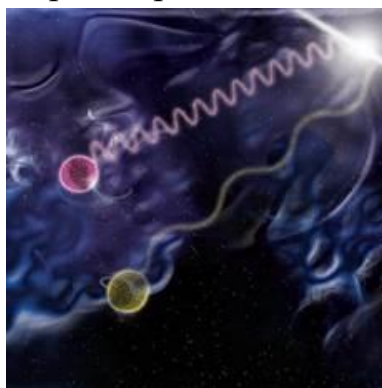
Минимальная частота (или максимальная длина волны) падающего света, при которой еще возможен фотоэффект, называется **красной границей фотоэффекта**.

Познакомимся с уравнением Эйнштейна для фотоэффекта.

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

### 3. Фотон. Корпускулярно-волновой дуализм.

По гипотезе Эйнштейна, монохроматическое электромагнитное излучение частотой  $\nu$  обладает не только волновыми свойствами, но и свойствами, характерными для потока частиц. Каждая такая частица движется со скоростью света и несёт квант энергии. В 1928 году американский физик Артур Комптон предложил называть эти частицы **фотонами**, что в переводе с древнегреческого означало «свет».



*Какими величинами характеризуются фотоны?* В первую очередь – это **энергия фотона**. В соответствии с теорией относительности, масса связана с энергией.

$$E = h\nu$$
$$E = mc^2$$

Исходя из двух выражений для энергии, можно найти массу движущегося фотона. Конечно, у фотона нет массы покоя, поскольку, фотоны при рождении сразу двигаются со скоростью света.

$$mc^2 = h\nu$$
$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

Еще одна величина, характеризующая фотон – это импульс фотона. Импульс можно найти, воспользовавшись известной формулой: произведение массы и скорости.

$$p = mc$$
$$p = \frac{h\nu}{c}$$

Очевидно, что направление импульса совпадает с направлением светового луча. В полученном выражении видно отношение частоты волны к скорости света. В данном случае, это есть не что иное, как величина, обратная длине волны.

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Согласно известной формуле, чем больше частота волны, тем больше энергия фотона. Однако, энергия фотонов спектра видимого излучения очень мала: например, фотоны с длиной волны, соответствующей зеленому свету, обладают энергией, примерно равной  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж. Тем не менее, человеческий глаз способен реагировать и на меньшие изменения энергии. Это было установлено Сергеем Вавиловым во время проведения его опытов. Он писал, что человеческий глаз – это «тончайший из приборов» и что он способен уловить различие освещенности, которое измеряется в единичных квантах.



Сергей Вавилов

Законы фотоэффекта можно объяснить, только интерпретируя свет, как поток фотонов. Именно такой теории и придерживался Ньютон, отстаивая корпускулярную природу света. Гюйгенс же разработал другую теорию света, согласно которой, свет являлся электромагнитной волной. Также, опыты Юнга и Френеля, связанные с изучением интерференции и дифракции света, говорили о том, что свет имеет волновую природу.

Получается вот такая картина: такие явления, как тепловое излучение или фотоэффект можно объяснить только корпускулярной природой света, а такие явления, как интерференция и дифракция, можно объяснить только волновой природой света. Сегодня считается, что свет проявляет свойства волны при распространении, а при взаимодействии с веществом – проявляет корпускулярные свойства. Эта двойственность свойств получила название **корпускулярно-волнового дуализма** (такое название предложил Эйнштейн). То есть, корпускулярно-волновой дуализм – это проявление свойств волны и свойств частицы или, говоря более обобщенно, – это общее свойство материи, проявляющееся на микроскопическом уровне.



Если задуматься, то можно предположить следующее: *а что, если корпускулярно-волновой дуализм присущ не только фотонам?* Именно такую гипотезу высказал Луи де Бройль в 1923 году. Возникал вопрос, а что, если и другие частицы, такие, как электрон, например, обладают волновыми свойствами? **Де Бройль предположил, что с движением частиц связано распространение и других волн.** Найдя длины этих волн, он установил, что связь длины волны и импульса частицы описывается той же формулой, что и для фотонов. Справедливость формулы де Бройля была доказана экспериментально. Впервые это было сделано Клинтон Дэйвиссоном и Лестером Джермером в 1927 году.



Клинтон Дэвиссон



Лестер Джермер



### Основные выводы:

Свет обладает не только волновыми, но и корпускулярными свойствами, а, значит, представляет собой поток частиц. Эти частицы были названы фотонами (иногда их называют квантами электромагнитного излучения).

Фотон обладает энергией, которая определяется только частотой световой волны.

$$E = h\nu$$

–Исходя из взаимосвязи энергии и массы, можно определить массу движущегося фотона (т.к. фотоны не могут существовать в состоянии покоя).

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

Используя выражение для массы, можно найти импульс фотона.

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Корпускулярно-волновой дуализм – это общее свойство материи, проявляющееся на микроскопическом уровне.

Соотношение де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

### Примеры решения задач

Итак, для того, чтобы успешно решать задачи на фотоэффект, необходимо:

1) помнить взаимосвязь между квантовыми и волновыми характеристиками частиц.

2) Знать, что фотоны ведут себя как частицы при взаимодействии с веществом, а потому выполняются законы сохранения энергии и импульса. Например, уравнение Эйнштейна для фотоэффекта – это следствие закона сохранения энергии.

**Задача 1.** Какую скорость получают вырванные из калия электроны в результате облучения его фиолетовым светом с длиной волны 0,42 мкм, если работа выхода электронов из калия  $A_{\text{вых}} = 2$  эВ?

<p>Дано:</p> $\lambda = 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ м,}$ $A_{\text{вых}} = 2 \text{ эВ} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$	<p>Решение:</p> <p>Записываем уравнения Эйнштейна для фотоэффекта:</p> $h\nu = A_{\text{з}} + \frac{m_e v^2}{2} \quad (1)$
$\nu - ?$	

где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка;  $\nu$  – частота падающего света;  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  – масса электрона.

Определим частоту по формуле:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Здесь  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света.

Из уравнения (1) получаем выражение для скорости:

$$v = \sqrt{\frac{2 \left( \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}} \right)}{m_e}}$$

Рассчитываем  $\nu$ :

$$v = \sqrt{\frac{2 \left( \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,42 \cdot 10^{-6}} - 3,2 \cdot 10^{-19} \right)}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 5,57 \cdot 10^5 \text{ м/с.}$$

Ответ:  $\nu = 5,57 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ .

**Задача 2.** «Красная» граница фотоэффекта для некоторого металла равна 0,5 мкм. При какой частоте света электроны, оторвавшиеся с его поверхности, полностью задерживаются обратным потенциалом в 3 В?

<p>Дано:</p> $\lambda_0 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ $U_3 = 3 \text{ В}$ $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$	<p>Решение:</p> <p>Чтобы задержать вылетевший электрон, нужно приложить задерживающее электрическое поле. Вылет электронов закончится тогда, когда потенциальная энергия электрона в задерживающем поле, <math>W_{\text{п}} = eU_3</math> станет равна его кинетической энергии. Тогда:</p> $W_{\text{п}} = \frac{m_e v^2}{2}$
$\nu - ?$	

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU_3 \quad (1)$$

Кинетическая энергия есть в уравнении Эйнштейна для фотоэффекта. Подставляя в него выражение (1) имеем:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v^2}{2} = A_{\text{вых}} + eU_3 \quad (2)$$

Величину работы выхода определяем через частоту, соответствующую «красной границе» фотоэффекта, которая связана с соответствующей длиной волны соотношением.

$$A_{\text{вых}} = h\nu_0 = h \frac{c}{\lambda_0} \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в уравнение (2), получаем выражение для частоты.

$$\nu = \frac{c}{\lambda_0} + \frac{eU_3}{h}$$

Выполняем расчет.

$$\nu = \frac{3,0 \cdot 10^{18}}{5,0 \cdot 10^{-7}} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,0}{6,6 \cdot 10^{-34}} = 1,3 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

Ответ:  $\nu = 1,3 \cdot 10^{15}$  Гц.

**Задача 3.** Определите задерживающее напряжение между электродами фотоэлемента при освещении его светом с длиной волны 200 нм, если работа выхода электронов из металла равна 4 эВ.

**ДАНО**

$$\lambda = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$A_{\text{вых}} = 6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$U_3 = ?$$

**РЕШЕНИЕ**

$$\text{Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта: } \frac{hc}{\lambda} = E_{k_{\text{max}}} + A_{\text{вых}} \Rightarrow \frac{hc}{\lambda} = eU_3 + A_{\text{вых}}$$

$$\text{Работа поля: } A = eU_3.$$

$$\text{Кинетическая энергия фотоэлектрона: } E_{k_{\text{max}}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}.$$

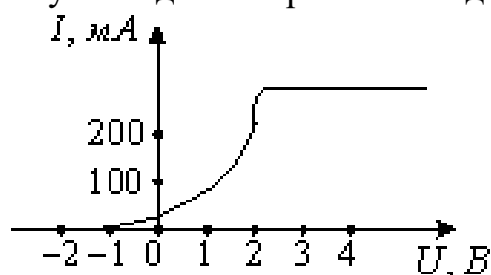
$$\text{Теорема о кинетической энергии: } E_{k_{\text{max}}} = A = eU_3.$$

$$\text{Задерживающее напряжение: } eU_3 = \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}} \Rightarrow U_3 = \frac{hc - \lambda A_{\text{вых}}}{\lambda e}.$$

$$U_3 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} - 2 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{2 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} \cong 2,2 \text{ В}$$

**ОТВЕТ:** задерживающее напряжение между электродами фотоэлемента примерно равно 2,2 В.

**Задача 4.** На рис. показана вольт-амперная характеристика некоторого вакуумного фотоэлемента. Катод освещается светом, длина волны которого  $\lambda = 3,3 \cdot 10^{-7}$  м. Найти работу выхода электрона с катода.



Дано: $\lambda = 3,3 \cdot 10^{-7}$ м	Решение: Из приведенной вольтамперной характеристики следует, что ток прекращается при задерживающей разности потенциалов $U_3 = 2$ В, то есть:
$A - ?$	

$$\frac{m_e v_M^2}{2} = eU_3 \quad (1)$$

Процесс фотоэффекта описывается уравнением Эйнштейна:

$$h \frac{c}{\lambda} = A + \frac{m_e v_M^2}{2} \quad (2)$$

Из этих уравнений получаем:

$$A = \frac{hc}{\lambda} - eU_3$$

$$A = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{3,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}} - 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 2 \text{ В} = 2,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Ответ:  $A = 2,8 \cdot 10^{-19}$  Дж.

## Лекция №40

### Строение атома. Квантовые постулаты Бора.

#### План

1. Строение атома. Опыты Резерфорда.
2. Квантовые постулаты Бора.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. В чем заключается сущность модели Томсона?
2. Объясните схему опыта Резерфорда по рассеиванию  $\alpha$ -частиц.
3. Объясните причину рассеивания  $\alpha$ -частиц атомами вещества.
4. В чем суть планетарной модели атома?
5. Почему планетарная модель атома не согласуется с законами классической физики?
6. Какие затруднения вызвала планетарная модель Резерфорда для объяснения процессов излучения энергии атомами? Как Н. Бор преодолел их?
7. Сформулируйте первый постулат Бора – постулат стационарных состояний.
8. Сформулируйте правило частот – второй постулат Бора.
9. Сформулируйте правило квантования круговых орбит – третий постулат Бора.

## 1. Строение атома. Опыты Резерфорда.

Открытие сложного строения атома – важнейший этап становления современной физики, который сказался на ее последующем развитии. В процессе создания теории строения атома, которая объяснила атомные спектры, открыты новые законы движения микрочастиц – законы квантовой механики.

Все тела окружающей живой и неживой природы состоят из мелких частиц – атомов. Первыми, кто высказал предположение об этом, считаются древнегреческие философы Левкипп и Демокрит. Именно они назвали атомом мелкую неделимую частицу, образующую вещество. Они считали, что вещества образуются в результате столкновения атомов и появления связей между ними. Ни природу, ни механизм образования этих связей они не уточняли, зато сделали предположение о форме атомов. Они считали, что атомы имеют форму правильных многогранников.

Более двадцати веков понадобилось ученым для того, чтобы экспериментально подтвердить атомистическую теорию строения вещества. Окончательно эта идея утвердилась в науке во второй половине девятнадцатого века.

До конца XIX века атомы считали простейшими неделимыми частицами вещества. Однако в последнее десятилетие XIX века произошло ряд крупнейших открытий в физике. В частности, французским физиком Антуаном Анри Беккерелем было открыто явление естественной радиоактивности некоторых веществ. А в 1896 году английским физиком Джозефом Джоном Томсоном был открыт электрон.

К началу двадцатого века физики уже имели достаточно информации о массе и размерах атома. К тому времени стало ясно, что атомы не являются самыми маленькими частицами в составе вещества. Они имеют определенную внутреннюю структуру, разгадка которой позволила бы объяснить периодичность свойств химических элементов. Однако только эксперименты английского физика Эрнеста Резерфорда стали основой для создания современной протонно-нейтронной модели атома.

Изучение атомного ядра неотделимо от изучения элементарных частиц. Дело в том, что в ядрах атомов частиц так мало, что свойства каждой из них не усредняются, а играют важную роль в формировании свойств ядра. После открытия электрона в науке возникло множество теорий о строении атома.

В 1897 году Дж. Томсон в результате экспериментов по изучению электрического разряда в разреженных газах явления фотоэффекта открыл

электрон. Он измерил важную характеристику этой частицы – удельный заряд  $q/m=1,76 \cdot 10^{-11}$  Кл/кг.

Американский физик Милликен в 1909 году очень точно измерил заряд электрона. Он равен  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Масса электрона примерно в 2000 раз меньше массы одного из самых легких атомов – атома водорода – и равна  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. Исходя из этих данных, английский физик Джозеф Джон Томсон предложил модель атома в виде положительно заряженной по всему объему сферы диаметром  $10^{-10}$  м, внутри которой, будто изюм в пудинг, вкраплены электроны (рис. 1).

По Томсону, атом состоит из электронов, помещённых в положительно заряженный «суп», компенсирующий электрически отрицательные заряды электронов, образно – подобно отрицательно заряженным «изюминкам» в положительно заряженном «пудинге». Именно поэтому модель атома Томсона была названа «Пудинговой».

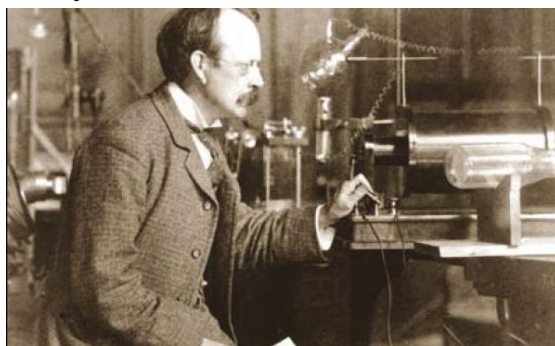


Рис. 1 – Модель атома Томсона

В модели Томсона электроны могли свободно вращаться по кольцевым орбитам, которые стабилизировались взаимодействиями между электронами, а линейчатые спектры объясняли разницей энергий при движении по разным кольцевым орбитам.



Используя модель атома Томсона, можно было объяснить ряд известных к тому времени физических явлений, таких как электризация, электрическая проводимость твёрдых тел, жидкостей и газов. Но в то же время она имела ряд существенных недостатков. Во-первых, она не могла объяснить наличие большого числа линий в спектрах атомов. Во-вторых, модель не позволяла объяснить спектральные закономерности в спектре атома водорода. Но самый главный фактор, заставившим отказаться от модели Томсона, состоял в том, что «Пудинговая модель» оказалась в полном противоречии с опытами Ганса Гейгера и Эрнеста Марсдена под руководством Эрнеста Резерфорда, проведёнными в 1909 году.

Модель атома Томсона оказалась полностью отличной от модели, которую предложил Резерфорд в результате своих исследований. Резерфорд в 1906 году предложил модель, согласно которой строение атома очень похоже на строение солнечной системы. Чтобы проверить правильность своей теории, он провел ряд опытов, которые называют опытами Резерфорда (рис. 2).

Суть опыта была достаточно проста. Резерфорд с помощниками брал свинцовый сосуд, внутри которого находился радиоактивный элемент, испускающий через узкое отверстие в сосуде альфа-частицы (ионизированные атомы гелия, масса которых примерно в 8000 раз больше массы электрона).

Скорость вылетающей альфа-частицы была очень велика – порядка  $1/15$  скорости света. Для регистрации этих самых частиц учёный использовал сцинтилляционный экран с микроскопом. Чтобы устранить рассеяние альфа-частиц на молекулах воздуха, Резерфорд поместил всю установку в сосуд, из которого был откачан воздух. Если на пути частиц нет никаких препятствий, то они попадают на экран узким пучком, а возникающие вспышки сливаются в одно небольшое световое пятно.

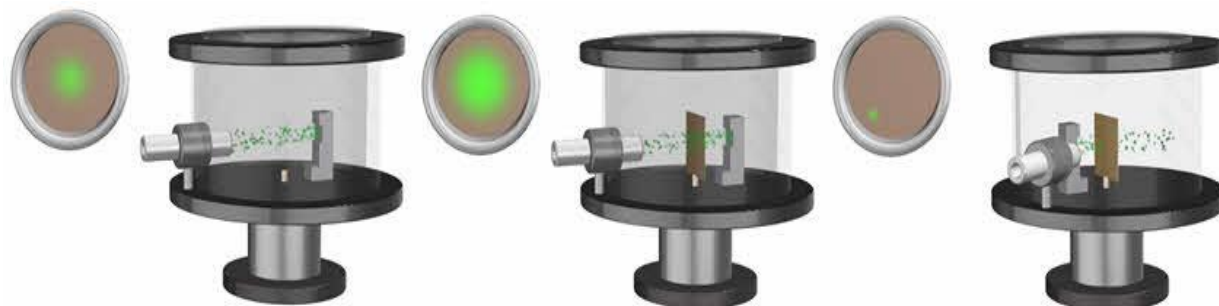


Рисунок 2 – Схема опыта Резерфорда

Однако если на пути альфа-частиц поместить тонкую золотую фольгу, то при взаимодействии с ней, площадь пятна увеличивалась. Это свидетельствовало о рассеянии альфа-частиц на атомах золота.

Но самое удивительное произошло, когда экран был поставлен с обратной стороны (говорят в результате ошибки лаборанта). Но и тогда на экране наблюдались вспышки, то есть альфа-частицы рассеивались на углы больше  $90^\circ$ . Такой результат предвидеть было очень сложно, поскольку расчёты говорили о том, что электрическое поле положительного заряда, распределённого по всему атому, не может быть достаточно сильным, чтобы отбросить альфа-частицу назад. А поскольку масса электрона почти в восемь тысяч раз меньше массы альфа-частицы, то и они не могли существенно поменять траекторию альфа-частиц. При этом резкие отклонения наблюдались весьма редко (примерно одна из 20 000 альфа-частиц испытывала отклонение на угол больше  $90^\circ$ ; одна из 40 000 – на угол больше  $120^\circ$ , а одна из 70 000 – на угол больше  $150^\circ$ ).

Легенда гласит, что Резерфорд выбежал из лаборатории с криком: «Теперь я знаю, как устроен атом!»

Резерфорд сумел определить размер атомного ядра. И оказалось, что атомное ядро в десятки тысяч раз меньше атом: размер ядра – около  $10^{-14}$  –  $10^{-15}$  м. Основываясь на своих опытах и расчетах, Резерфорд предложил планетарную модель атома (рис. 3):

- в центре атома расположено положительно заряженное ядро, диаметром около  $10^{-15}$  м, в котором сосредоточена основная масса атома. Заряд ядра равен произведению порядкового номера элемента в таблице Менделеева и модулю заряда электрона:  $q = +Ze$ .
- в состав ядра входят положительно заряженные элементарные частицы – протоны (позже было установлено, что и нейтральные нейтроны)
- вокруг ядра вращаются электроны, образуя так называемую электронную оболочку.

Обобщив результаты опытов, Резерфорд сделал выводы:

- в целом атом пустой. Почти вся его масса сконцентрирована в ядре диаметром  $d \sim 10^{-15}$  м.
- Ядро несет в себе заряд  $+q$ , величина которого по модулю равна заряду электрона, умноженному на порядковый номер этого элемента в таблице Менделеева.
- Т.к. атом электрически нейтрален, то положительный заряд ядра компенсирует заряд электронов, которые имеют двигаться вокруг ядра, подобно планетам вокруг Солнца. Количество электронов равно порядковому номеру элемента в таблице Менделеева.

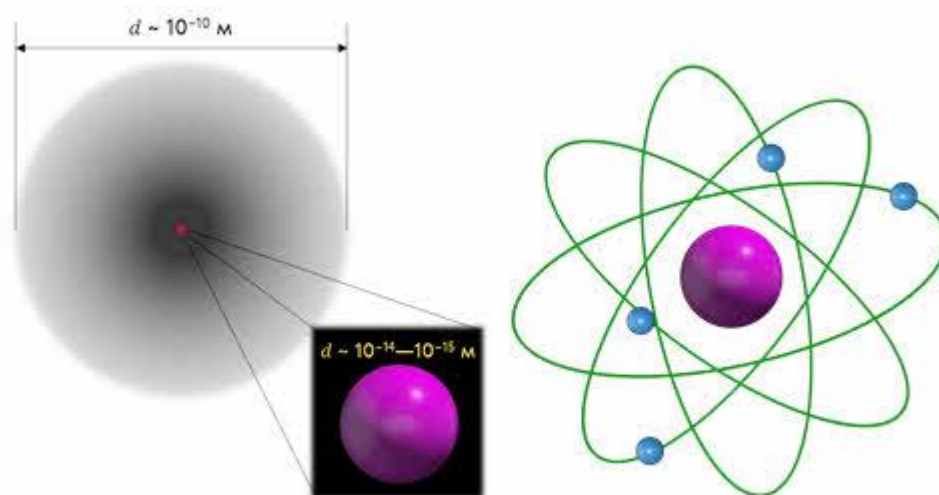


Рисунок 3 – Планетарная модель атома

При всей своей убедительности планетарная модель атома оказалась внутренне противоречивой. По законам электродинамики движущийся ускоренно заряд излучает электромагнитные волны. Следовательно, атом должен непрерывно излучать электромагнитные волны. Излучение же связано с уменьшением энергии электрона в поле ядра. Следствием этого должно явиться уменьшение скорости движения и частоты вращения электронов вокруг ядра. Если частота непрерывно изменяется, то спектр излучения атома должен быть сплошным. Уменьшение скорости электрона должно привести к тому, что электрон будет двигаться по спирали к ядру и в течение короткого времени упадёт на него. То есть в этой модели атом должен быть неустойчивым.

Это находится в полном противоречии с экспериментальными фактами, которые свидетельствуют о том, что:

- атом является достаточно устойчивой системой;
- атом излучает электромагнитные волны лишь при определенных условиях, а не непрерывно;
- а спектры излучения атомов являются линейчатыми.

Эти противоречия возникли потому, что к электронам в атомах применяли законы классической физики, а, как мы уже с вами знаем, в микромире действуют свои законы, отличные от законов макромира.

Первым признал невозможность применения законов классической физики к атомам датский учёный Нильс Бор. Он ввёл элементы квантовой теории в модель атома Резерфорда и в 1913 году создал неклассическую теорию атома. В основе этой теории лежала идея связать в единое целое три результата, полученные в физике к тому времени.

## 2. Квантовые постулаты Бора.

Выход из ситуации в 1913 году предложил датский физик Нильс Бор (рис 4). Нильс Бор предложил основные положения квантовой теории в виде постулатов-утверждений, принятых за исходные положения. Причем и законы классической физики им полностью не отвергались. Новые постулаты скорее налагали лишь определенные ограничения на движения, которые допускает классическая механика.



Рисунок 4 – Нильс Бор

И все же успех теории Бора был впечатляющим. Всем ученым стало ясно, что Бор нашел правильный путь развития теории, который привел впоследствии к созданию стройной теории движения микрочастиц – квантовой механики.

Нильс Бор дополнил планетарную модель атома положениями, которые сумели устранить недостатки этой модели. После нескольких месяцев работы Бор в 1913 г. опубликовал свою квантовую теорию атома. Основу этой теории составляют постулаты Бора.

Бор создал теорию атома на основе таких постулатов:

1. Атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . В стационарном состоянии атом энергию не излучает.

2. Переход атома из одного стационарного состояния в другое сопровождается излучением или поглощением фотонов, энергию которых  $h\nu$  определяют по формуле:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n$$

где  $k$  и  $n$  – целые числа (номера стационарных состояний), если  $E_k > E_n$  фотон с частотой  $\nu_{kn}$  излучается, если  $E_k < E_n$  – поглощается.

Из второго постулата Бора следует, что атом может излучать и поглощать свет только с определенными значениями частот, которые определяются формулой:

$$\nu = \frac{E_2}{h} - \frac{E_1}{h}$$

3. Радиусы  $r_n$  стационарных состояний удовлетворяют условию:

$$m v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar,$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots, m$  – масса электрона,  $\hbar$  – приведенная постоянная Планка.

Поглощая свет, атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией (рис. 5). Все стационарные состояния, кроме одного, являются условно стационарными.

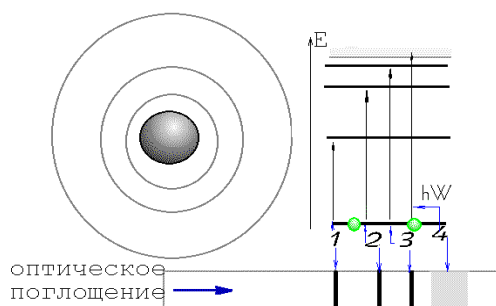


Рисунок 5 – Поглощение энергии атомом

Первый постулат называется постулатом стационарных состояний. Этот постулат противоречит классической механике и электродинамике Максвелла.

Второй постулат называется правилом частот. Если электрон перескакивает на другую орбиту, где его энергия меньше, то куда девается излишек энергии? Ведь исчезнуть, превратиться в ничто энергия не может. «Ищите ее за атомом» – заявляет Бор. Она выделяется из атома в виде кванта световой энергии, а электрон, излучив, движется по орбите, теперь уже другой, и снова не излучает.

Третий постулат называется правилом квантования орбит. Оказалось, что можно получить ряд дискретных разделенных стационарных состояний только предположив, что момент импульса электрона квантуется. Отсюда получаем выражение для радиусов  $r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e e^2}$  орбит: где  $m_e$  и  $e$  – масса и заряд электрона.

Физики к появлению теории Бора не могли расшифровать сложные спектры. Когда Бор доказал, что «спектр – это биография атомов, точнее

атомных электронов», ученые смогли, комбинируя различные орбиты электронов в атоме, определить все линии, наблюдаемые в спектре. Таким образом, источником света является возбужденный атом; свет генерируется при переходе атома из одного возбужденного состояния в другое; частота света, генерируемого пропорциональна  $\Delta E$ ; свет излучается и поглощается в виде квантов.

Бесконечно долго каждый атом может находиться только в стационарном состоянии с минимальным запасом энергии. Это состояние атома называется основным, все остальные – возбужденными. Постулаты Бора позволяют определить частоты излучения атомов водорода при переходе между различными состояниями. Все частоты излучений атома водорода составляют ряд серий, каждая из которых образуется при переходе атома из одного энергетического состояния в другое.

В начале XX века среди ряда нерешенных проблем физики атома одной из наиболее острых было объяснение оптических спектров атома. Теория атома должна определить положение каждой спектральной линии в спектрах всех элементов.

В 1885 году швейцарский физик И. Бальмер доказал, что все частоты видимой части спектра излучения атома водорода могут быть вычислены по очень простой формуле (серия Бальмера):  $\nu = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right)$ , где  $R$  – величина постоянная, а  $m = 3, 4, 5, \dots, \infty$ .

Серия Бальмера соответствует переходам электронов на вторую орбиту с третьей, четвертой и т.д. (рис. 6).

Позже, в 1906 году, английским физиком Лайманом была открыта серия линий в ультрафиолетовой части спектра водорода (серия Лаймана):

$$\nu = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Серия Лаймана соответствует переходу электрона на первую орбиту со второй, третьей и т. д.

В 1908 году немецким физиком Пашеном была открыта серия линий в инфракрасной части спектра водорода (серия Пашена):  $\nu = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2}\right)$ .

Серия Пашена соответствует переходам электронов на третью орбиту или на третий уровень с четвертой, пятой и т. д.

Таким образом, частоту какой-либо линии в спектре атома водорода можно представить в виде:

$$\nu = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

Из этой формулы видно, что в спектральных закономерностях особенно важную роль играют целые числа  $m$  и  $n$ , так называемые главные квантовые числа.

Все приведенные выше формулы являются чисто эмпирическими. Объяснить линейчатый спектр излучения атомов водорода удалось лишь после создания Н. Бором квантовой теории строения атома водорода.

Поглощение света – процесс обратный излучению. Атом, поглощая свет переходит из низших энергетических состояний в высшие. При этом он поглощает излучение с такой же частотой, что и излучает.

На основе постулатов Бора можно определить частоты  $\nu_{kn}$  и  $\nu_{nk}$  атомов электромагнитных волн, которые излучаются:

$$\nu_{kn} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

$$\nu_{nk} = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

где  $R = 3,27 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$  – постоянная Ридберга.

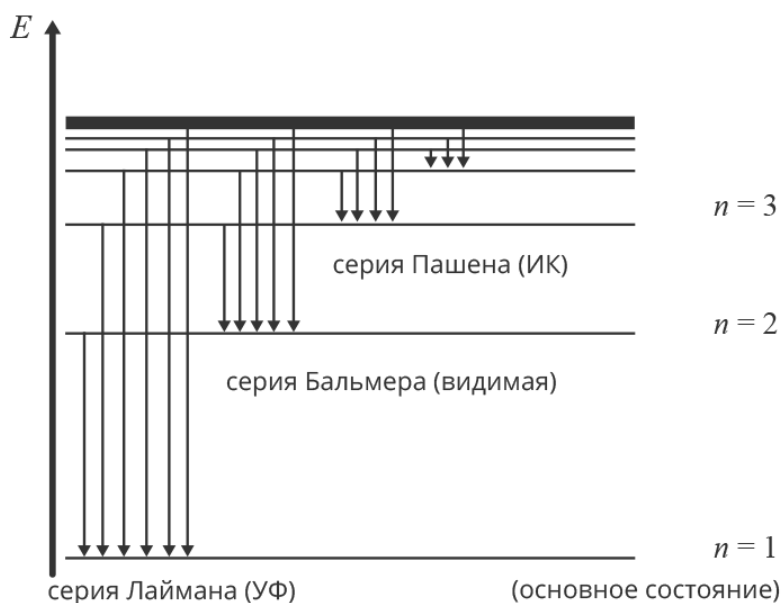


Рисунок 6.

Наибольшего успеха теория Бора достигла в применении к атому водорода, для которого удалось построить количественную теорию спектра. Однако построить количественную теорию уже для следующего за водородом атома гелия с помощью постулатов Бора не удалось. Эта теория была искусственным сочетанием классических законов физики и квантовых представлений. Но модель атома Бора явилась переходным этапом на пути к созданию современной теории атомных и ядерных явлений – квантовой механики.



## Лекция №41

### Строение атомного ядра

#### План

1. Строение атомного ядра. Ядерные силы.
2. Энергия связи атомных ядер.

#### Литература:

1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. В чем сущность модели атомного ядра? Какой физический смысл зарядового числа, равно порядковому номеру химического элемента в таблице Менделеева?
2. Какой физический смысл массового числа в модели атомного ядра?
3. Как в ядерной физике записывается любой химический элемент с учетом зарядового и массового чисел?
4. Чему равны заряд и масса протона?
5. Что называют изотопами химического элемента?
6. Как называют и обозначают изотопы водорода?
7. Все ли химические элементы имеют изотопы?
8. Какие силы действуют между нуклонами в атомных ядрах?
9. Каковы главные особенности ядерных сил?
10. Что называют энергией связи атомного ядра?
11. Что называют дефектом массы? Объясните причину появления дефекта массы в случае образования ядра из отдельных нуклонов.
12. Назовите формулу дефекта массы.
13. По какой формуле определяют энергию связи атомного ядра?
14. Что называют удельной энергией связи?

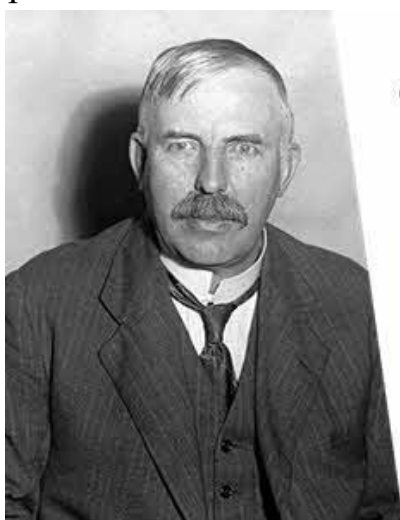
## 1. Строение атомного ядра. Ядерные силы.

На предыдущем занятии мы с вами рассмотрели опыты Резерфорда по рассеиванию альфа-частиц, на основании которых им была предложена ядерная модель атома. Согласно ей, в центре атома находится положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена практически вся масса атома, а вокруг ядра по замкнутым траекториям вращаются электроны. Однако ещё долгое время для учёных оставался загадкой состав атомного ядра, хотя к 20-годам XX века физики уже не сомневались в том, что ядра атомов, как и сами атомы, имеют сложную структуру.

В настоящее время твёрдо установлено, что атомные ядра различных элементов состоят из частиц двух видов – протонов и нейтронов. Но обо всём по порядку.

Итак, первым, кто выдвинул теорию о том, что в состав ядер атомов всех химических элементов входит ядро атома водорода, был Эрнест Резерфорд. Он также дал название этой частице – протон, что в переводе с греческого означало первый, основной. Основанием для такого предположения стало то, что массы атомов химических элементов превышают массу атома водорода в целое число раз. Чтобы подтвердить своё предположение Резерфорд в 1919 году поставил опыт по исследованию взаимодействия ядра атома азота с альфа-частицей.

Прибор Резерфорда состоял из вакуумированной камеры, в которой был расположен контейнер с источником альфа-частиц. Окно камеры было закрыто металлической фольгой, толщина которой подбиралась так, чтобы альфа-частицы не могли через неё проникнуть. За окном располагался экран, покрытый сернистым цинком. С помощью микроскопа можно было наблюдать сцинтилляции (световые вспышки) в точках попадания на экран тяжёлых заряженных частиц.



Опыт Резерфорда по обнаружению протона (1919 г.)



Эрнест Резерфорд  
1871–1937

При заполнении камеры азотом низкого давления на экране возникали световые вспышки, указывающие на появление потока каких-то частиц, проникающих через фольгу, практически полностью задерживающую альфа-частицы.

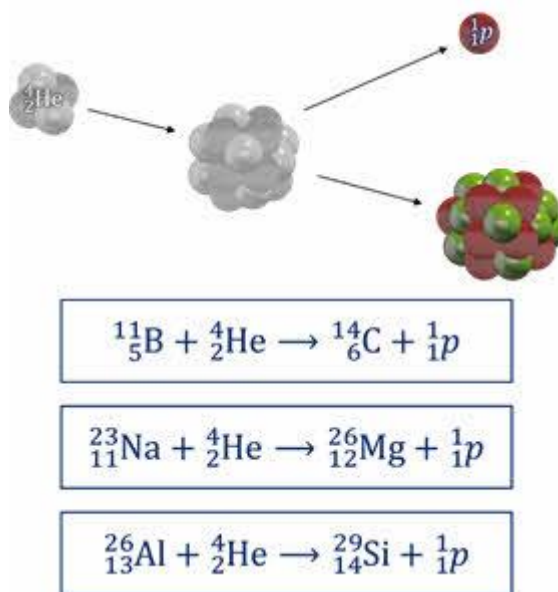
Исследования действия на частицы, выбиваемые из ядер азота, электрических и магнитных полей показали, что они обладают положительным элементарным зарядом и их масса равна массе ядра атома водорода:

$$q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Такое совпадение зарядов двух не похожих друг на друга частиц – протона и электрона, вызывает удивление и остаётся одной из фундаментальных загадок современной физики.

Впоследствии опыт был выполнен с целым рядом других газообразных веществ. Во всех случаях было обнаружено, что из их ядер альфа-частицы выбивают протоны. Таким образом, показано, что протоны входят в состав ядер атомов.



А так, как атом в целом электрически нейтрален, то число протонов в ядре равно числу электронов в атомной оболочке, которое определяется порядковым номером элемента в периодической системе элементов Менделеева. Его мы с вами будем называть **зарядовым числом** и обозначать большой латинской буквой **Z**. Ставится зарядовое число внизу перед буквенным обозначением элемента.

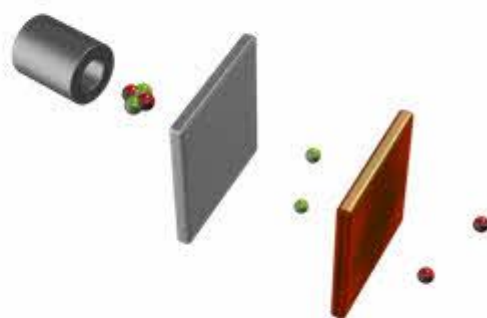
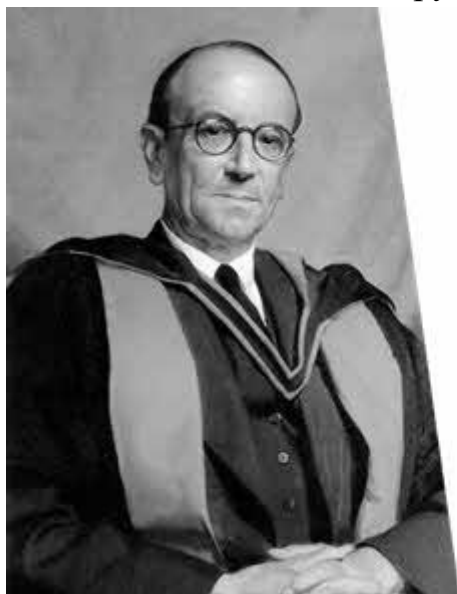
После открытия протона было высказано предположение, что ядра атомов состоят только из них. Однако оно оказалось несостоятельным, так

как отношение заряда ядра к его массе не остаётся постоянным для разных ядер, как это было бы, если бы в состав ядер входили одни протоны.

Более того, при переходе к тяжёлым ядрам масса ядра растёт быстрее, чем его заряд. В связи с этим в 1920 году Эрнест Резерфорд высказал гипотезу о существовании в составе ядер жёстко связанной компактной протон-электронной пары, представляющей собой электрически нейтральное образование — частицу с массой, приблизительно равной массе протона. Он даже придумал название этой гипотетической частице – нейтрон. Это была очень красивая, но, как выяснилось впоследствии, ошибочная идея, так как было доказано, что электрон не может входить в состав атомного ядра.

Однако идея о существовании тяжёлой нейтральной частицы казалась Резерфорду настолько привлекательной, что он незамедлительно предложил группе своих учеников во главе с Джеймсом Чедвиком заняться её поиском. Лишь через 12 лет, в 1932 году, Чедвику удалось найти эту частицу.

Оказалось, что при облучении бериллия альфа-частицами возникает сильное проникающее излучение, способное преодолеть слой свинца толщиной до 20 см и не ионизирующее газ в счётчике Гейгера.



Джеймс Чедвик  
1891—1974

Так был открыт нейтрон – тяжёлая элементарная частица, не имеющая электрического заряда, с массой, практически равной массе протона:

$$q = 0;$$

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Дальнейшие изучения свойств нейтронов показали, что они устойчивы только в ядре. В свободном же состоянии, то есть вне ядра, в течение примерно четырнадцати минут и сорока двух секунд нейтрон распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино – нейтральную частицу.

Практически сразу же после открытия нейтрона советским физиком Дмитрием Иваненко и немецким учёным Вернером Гейзенбергом была предложена **протонно-нейтронная модель строения атомного ядра**, которая полностью подтвердилась последующими исследованиями.

Согласно этой модели, **ядра всех химических элементов (за исключением водорода) состоят из двух видов частиц: протонов и нейтронов.**



В соответствии с современными физическими представлениями протон и нейтрон являются двумя разными зарядовыми состояниями одной и той же частицы – **нуклона** (от латинского «нуклеус» – ядро). В состоянии без электрического заряда нуклон является нейтроном, а в состоянии с положительным электрическим зарядом – протоном. Ядра же атомов стали называть **нуклидами**.

**Общее число нуклонов в ядре называют массовым числом** и обозначают латинской буквой  $A$ . Оно ставится вверху перед буквенным обозначением химического элемента.

Из-за малости масс частиц в ядерной физике массовое число принято выражать не в килограммах, а в атомных единицах массы (сокращённо, а. е. м.) и округлять до целых чисел. Одна атомная единица массы (1 а. е. м.) равна 1/12 части массы атома углерода, что составляет порядка  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг.

**Число нейтронов в ядре** обозначают большой латинской буквой  $N$ . Нетрудно догадаться, что оно **равно разнице между массовым и зарядовым числами:**

$$N = A - Z.$$

В общем случае любой химический элемент периодической таблицы Менделеева можно представить в виде символа  ${}^A_ZX$ , где под иксом подразумевается символ химического элемента.

С помощью опытов по дифракционному рассеянию альфа-частиц на ядрах различных атомов было установлено, что все ядра, за исключением самых лёгких, имеют приблизительно шарообразную форму. Радиус этого шарика прямо пропорционален кубическому корню из массового числа:  $r \approx r_0 A^{1/3}$  м. В этой формуле  $r_0 = 1,25 \cdot 10^{-15}$  м – «постоянная» величина, которая изменяется на 0,2 фм в зависимости от рассматриваемого ядра.

Отметим также то, что **в ядрах одного химического элемента всегда содержится одно и то же количество протонов, а число нейтронов может быть различным.** Например, в ядрах атома лития всегда содержится три протона, а вот число нейтронов колеблется от одного до десяти.

Впервые, на существование таких атомов обратил внимание Фредерик Содди в 1910 году. Он предложил называть такие разновидности атомов одного и того же химического элемента **изотопами** (что по-гречески означает «равноместные»), так как по своим химическим свойствам они должны быть помещены в одну и ту же клетку таблицы Менделеева.

Из всех известных на сегодняшний день изотопов (а они есть у всех химических элементов) только изотопы водорода имеют свои названия.

**Таблица изотопов водорода**

Название	Символ нуклида	$Z(p)$	$N(n)$
Протий	${}^1_1\text{H}$	1	0
Дейтерий	${}^2_1\text{H}$	1	1
Тритий	${}^3_1\text{H}$	1	2
Квадий	${}^4_1\text{H}$	1	3
Пентий	${}^5_1\text{H}$	1	4
Гексий	${}^6_1\text{H}$	1	5
Септий	${}^7_1\text{H}$	1	6

На основании многих экспериментов было установлено, что изотопы одинаково вступают в химические реакции и образуют одинаковые соединения. Это говорило о том, что **химические свойства элементов определяются не атомной массой, а зарядовым числом ядра.**

Действительно, например, нуклиды трития ( ${}^3_1\text{H}$ ) и гелия два-три ( ${}^3_2\text{He}$ ) имеют близкие по величине атомные массы, но принципиально разные химические свойства.

Предложенная Иваненко и Гейзенбергом протонно-нейтронная модель строения ядра впоследствии была полностью подтверждена экспериментально и в настоящее время является общепризнанной. Однако

эта модель породила ряд новых противоречий. Дело в том, между протонами, находящимися в ядре атома, действуют огромные силы электростатического отталкивания – порядка 230 Н, что, согласить, слишком много для частиц с массой порядка  $10^{-27}$  кг.

Причина устойчивости ядра кроется в существовании, кроме сил электростатического отталкивания между протонами, **ядерных сил** притяжения между нуклонами, которые примерно в 100 раз превышают кулоновские силы. Это самые мощные силы из всех сил, существующих в природе. Вследствие этого они представляют собой проявление самого интенсивного из всех известных в физике видов взаимодействия – так называемого **сильного взаимодействия**.

Важной особенностью ядерных сил является их короткодействие: они заметно проявляются лишь на расстояниях, сравнимых с размерами ядра ( $10^{-13}$  –  $10^{-12}$  см). На больших расстояниях преобладает действие сравнительно медленно убывающих кулоновских сил.

Многочисленные опытные данные также показали, что ядерные силы не являются центральными, а также то, что им присуща зарядовая независимость, то есть протоны и нейтроны в ядре взаимодействуют между собой и друг с другом совершенно одинаково.

Ядерные силы обладают и **свойством насыщения**. Иными словами, каждый нуклон в ядре взаимодействует не со всеми нуклонами ядра, а с их конечным числом – ближайшими соседями.

Ещё одной важной особенностью ядерных сил является то, что они являются так называемыми **обменными силами**. Они имеют квантовый характер, поэтому у них нет аналога в обычной физике.

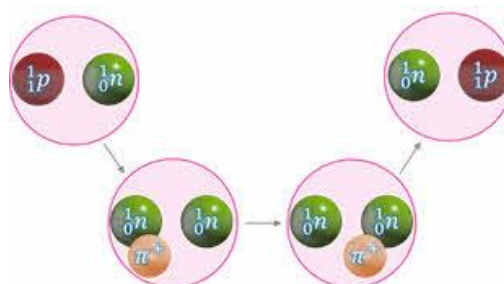
Взаимодействие между нуклонами возникает вследствие обмена между ними некоторой третьей **виртуальной частицей**. Названа она была так, из-за того, что **время её жизни чрезвычайно мало. Вследствие этого она не может быть обнаружена экспериментально.**

В результате многолетних исследований в космическом излучении в 1947 году были обнаружены частицы, которые могут реализовать ядерное взаимодействие.





Их назвали  $\pi$ -мезонами или **пионами**. Их изучение показало, что масса пионов примерно в 280 раз больше массы электрона. Помимо этого, было обнаружено, что существует три вида пи-мезонов: положительные и отрицательные, время жизни которых порядка 26 нс и нейтральные, время жизни которых около  $8,5 \cdot 10^{-17}$  с. Таким образом, взаимодействие между однородными нуклонами осуществляется нейтральными пионами, а взаимодействие между различными нуклонами – заряженными  $\pi$ -мезонами.



## 2. Энергия связи атомных ядер.

В ядре существуют силы особой природы – ядерные силы, которые действуют между нуклонами на расстояниях, сравнимыми с размерами самих ядер, и препятствуют взаимному электростатическому отталкиванию между протонами в ядре. Следовательно, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, не взаимодействующие между собой, необходимо совершить работу по преодолению ядерных сил. Другими словами, сообщить ядру определённую энергию.

Так вот, **минимальная энергия, необходимая для расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется энергией связи**. Чем она больше, тем стабильнее ядро. Из закона сохранения энергии следует, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

Самый простой способ определения энергии связи основан на одном замечательном законе природы, устанавливающим соотношение между



массой тел и их энергией. Из этого закона следует, что изменение массы тела влечёт за собой изменение энергии этого тела. При этом даже ничтожному изменению массы тела соответствует значительное изменение энергии.

Энергию связи любого ядра можно определить с помощью точного измерения его массы. С изобретением масс-спектрографов физики получили возможность измерять массы микрочастиц с очень высокой точностью. Эти измерения показывают, что масса любого ядра всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n.$$

**Разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра, называют дефектом массы:**

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}.$$

В качестве примера рассмотрим ядро атома гелия-4. Это химический элемент 18-й группы первого периода системы химических элементов Менделеева, с атомным номером два.



Масса ядра  ${}^4_2\text{He}$ :  $M_{\text{я}} = 4,00151$  а.е.м.

Число протонов:  $Z = 2$ .

Число нейтронов:  $N = A - Z = 4 - 2 = 2$ .

Масса нуклонов:  $M = Zm_p + Nm_n = 2 \cdot (1,00728 + 1,00866) = 4,03188$  а.е.м.

Дефект массы:  $\Delta M = M - M_{\text{я}} = 4,03188 - 4,00151 \cong 0,03037$  а.е.м.

В соответствии с соотношением Эйнштейна между массой и энергией, **дефект массы характеризует энергию связи атомного ядра:**

$$E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2.$$

Обращаем ваше внимание на то, что при использовании данной формулы, массу входящих в неё частиц следует выражать в килограммах. Тогда значение полученной энергии связи будет выражено в джоулях. Здесь же обратим ваше внимание на то, что энергия связи ядра намного порядков превышает энергию связи электронов с атомом (энергию ионизации). Поэтому при расчётах энергию связи электронов с атомом обычно не учитывают.

Давайте теперь для примера рассчитаем энергию связи ядра изотопа гелия-4.

**ДАНО**

$$m_p = 1,00728 \text{ а. е. м.}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ а. е. м.}$$

$$M_{\text{я}} = 4,00151 \text{ а. е. м.}$$

$$E_{\text{св}} = ?$$

**РЕШЕНИЕ**

Закон взаимосвязи массы и энергии:  $E_{\text{св}} = \Delta M c^2$ .

Дефект массы:  $\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$ .

$$\Delta M = 2 \cdot 1,00728 \text{ а. е. м.} + 2 \cdot 1,00866 \text{ а. е. м.} - 4,00151 \text{ а. е. м.} \cong 0,03037 \text{ а. е. м.}$$

Так как  $1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ , то  $\Delta M \cong 0,504 \cdot 10^{-28} \text{ кг}$ .

$$E_{\text{св}} = 0,504 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 \cong 4,54 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$$



**ОТВЕТ:** энергия связи ядра изотопа  ${}^4_2\text{He}$  примерно равна 4,54 пДж.

Как видим, энергии микромира крайне малы и работать с такими числами представляется крайне неудобным. Гораздо проще рассчитывать энергию связи в электронвольтах и мегаэлектронвольтах.

Давайте вспомним, что 1эВ равен энергии, необходимой для переноса элементарного заряда в электростатическом поле между точками с разницей потенциалов 1 В. Проще говоря, величина одного электронвольта равна значению элементарного заряда в джоулях. Но энергии связи таковы, что для их вычисления удобно использовать миллионы электронвольт, то есть мегаэлектронвольты.

$$1 \text{ эВ} \cong 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}; 1 \text{ МэВ} \cong 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

В этом случае массу частиц лучше всего выражать в энергетических единицах. Связь между различными единицами массы:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,5 \frac{\text{МэВ}}{c^2}.$$

В этом случае формула для определения энергии связи примет вид:

$$E_{\text{св}} = 931,5(Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}) \text{ (МэВ)}.$$

Обратите внимание на тот факт, что обычно в таблицах приводятся массы атомов, а не массы ядер. Поскольку при таком подходе учитываются и массы электронов, то для вычисления энергии связи ядра в этом случае целесообразно преобразовать формулу так, чтобы в неё входила не масса ядра, а масса соответствующего атома. Для этого вспомним, что масса ядра есть разность между массой атома и массой всех его электронов. Преобразуем формулу для дефекта масс с учётом последнего уравнения.

В полученном выражении первым слагаемым у нас стоит произведение зарядового числа на сумму масс протона и электрона. В природе существует единственный элемент, в ядре которого находится один протон, а вокруг ядра

вращается один электрон – это атом водорода. Поэтому формула для дефекта масс примет вид, показанный на экране:

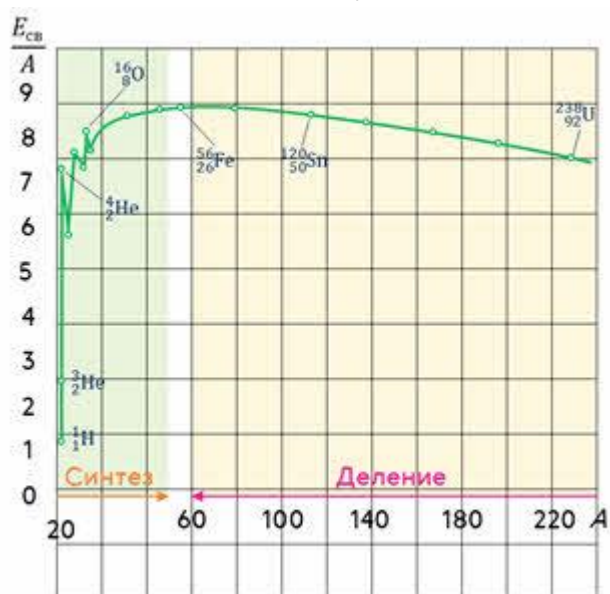
$$E_{\text{св}} = 931,5(Zm_{\text{H}} + Nm_{\text{n}} - m_{\text{a}}) \text{ (МэВ)}.$$

Ещё одной важной характеристикой в ядерной физике является **удельная энергия связи**. Так называют **энергию связи, приходящуюся на один нуклон**. Она равна отношению энергии связи к массовому числу:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

Соответственно, чем больше значение удельной энергии связи, тем сильнее связан каждый нуклон в ядре, и тем прочнее ядро.

Как правило, лёгкие ядра обладают достаточно малой удельной энергией связи. К середине таблицы Менделеева энергия связи достигает своего максимального значения. А к концу – вновь начинает убывать.



Из графика зависимости удельной энергии связи от числа нуклонов в ядре видно, что при смещении ядер к центральной части графика удельная энергия связи увеличивается, следовательно, любые ядерные реакции, приводящие к такому смещению, являются энергетически выгодными (сопровождаются выделением энергии). Как видно из графика, подобное смещение возможно при реакциях синтеза лёгких ядер в области изменения массового числа примерно  $0 \rightarrow 50$  и при реакциях деления тяжёлых ядер в области изменения массового числа примерно  $250 \rightarrow 60$ . При этом реакции синтеза должны идти мощнее, поскольку подъем графика происходит круче, чем последующее уменьшение удельной энергии связи.

Энергию, выделяющуюся или поглощающуюся в процессе таких ядерных реакций, можно определить, если известны массы взаимодействующих и образующихся в результате этого взаимодействия

ядер и частиц. Эту энергию называют **энергетическим выходом ядерной реакции**. При этом, если в процессе ядерной реакции энергия выделяется, то реакцию называют **экзотермической**, если же энергия поглощается – то **эндотермической**:

$$\Delta E = E_0 - E.$$

## Лекция №42

### Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.

#### План

1. Радиоактивность. Виды радиоактивного излучения.
2. Закон радиоактивного распада.

#### Литература:

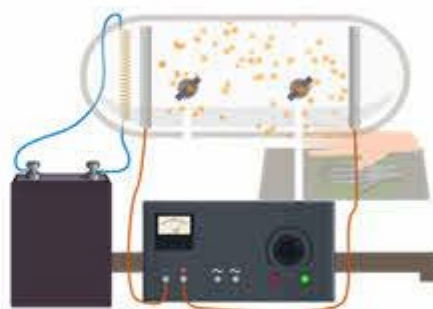
1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Что называют радиоактивностью?
2. Какие свойства и природа  $\alpha$ -частиц,  $\beta$ -частиц,  $\gamma$ -излучения?
3. Может ли радиоактивный элемент одновременно быть источником  $\alpha$ -частиц,  $\beta$ -частиц?
4. Сформулируйте правило смещения для  $\alpha$ -распада.
5. Сформулируйте правило смещения для  $\beta$ -распада.
6. Какие элементарные частицы испускаются при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах?
7. Какие из известных вам законов сохранения выполняются при радиоактивных превращениях?
8. Что называют периодом полураспада радиоактивного вещества? Что он характеризует? Назовите формулу закона радиоактивного распада.

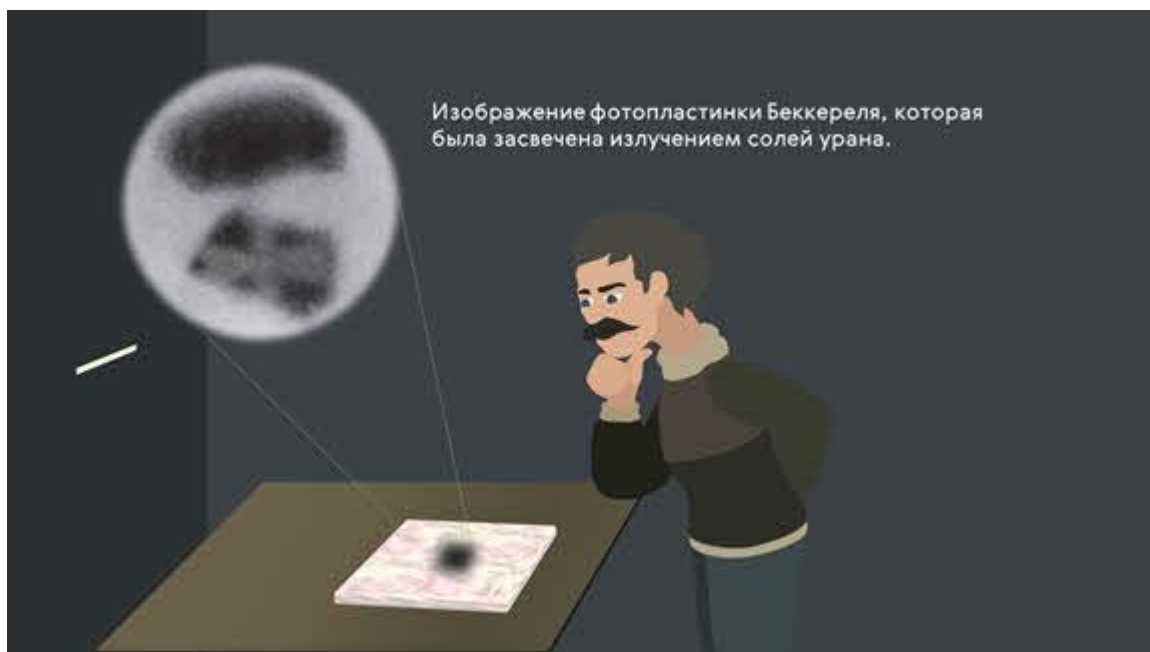
## 1. Радиоактивность. Виды радиоактивного излучения.

Открытие явления радиоактивности определило развитие науки и общества в течение всего XX века. Возможно, исследование радиоактивности и ядра атома стало важнейшим, что произошло в науке того времени. История, которая привела к открытию радиоактивности, началась 8 ноября 1895 года, когда немецкий физик Вильгельм Конрад Рёнтген проводил опыты с катодной трубкой. Дело было в ноябре, когда темнело рано, а рядом с экспериментальной установкой стоял экран, пропитанный раствором люминофора, и Рёнтген неожиданно обнаружил лёгкое свечение этого экрана. Взяв кусочек свинца и поднеся его к экрану учёный увидел удивительную вещь: на экране была тень от пальцев, на которой он увидел свои кости. Никто раньше не мог увидеть свой собственный скелет. Это открытие вызвало ажиотаж не только в научных кругах, но и в обществе.



Вильгельм Рёнтген  
1845—1923

Когда было обнародовано сообщение об этом открытии во Франции Беккерель решил установить возможную связь между явлением люминесценции и таинственными лучами. Экспериментируя с солями урана, Беккерель завернул фотопластинку в плотную чёрную бумагу, положил на неё сверху несколько кусочков урановой соли и выставил всё это на солнечный свет. После проявления фотопластинки на ней обнаружилось тёмные пятна в тех местах, где лежали крупинки соли. Учёный полагал, что это излучение возникает под действием солнечных лучей. Но однажды, в феврале 1896 года, провести очередной опыт ему не удалось из-за плохой погоды. Беккерель убрал пластинку в ящик стола, положив на неё сверху медный крест, покрытый солью урана.



Два дня спустя Беккерель на всякий случай проявил фотопластинку и с удивлением обнаружил на ней почернение в форме отчётливой тени креста. 23 марта 1896 года Беккерель продемонстрировал результаты опытов на заседании Парижской академии наук, предположив, что обнаружил разновидность фосфоресценции, но не обычной, а «невидимой и долгосрочной». В том же 1896 году Беккерель убедился, что открытое им излучение не является фосфоресценцией, так как оно, подобно рентгеновским лучам, ионизирует воздух и разряжает электроскоп.



Однако учёный долго не хотел принимать этот факт. В 1897 году он сделал лишь один доклад, в котором резюмировал результаты своей работы. В частности, он объявил о разряде электроскопа урановыми лучами и о том, что **интенсивность самопроизвольного излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит.** Отсюда следовало, что это свойство присуще не соединениям, а самому химическому элементу урану, точнее – его атомам.

После этого Беккерель вернулся к изучению фосфоресценции, оставив теорию «урановых лучей» в зачаточном состоянии. Но исследования



Беккереля стали фундаментом для работ других французских учёных – супругов Пьера и Марии Кюри. Систематическое исследование руд, содержащих уран, с помощью пьезоэлектрических весов, разработанных Пьером и его братом Жаком, квадрантного электрометра и ионизационной камеры, подсоединённой к батарее, позволило Марии Склодовской-Кюри к началу 1898 года открыть радиоактивность ряда веществ, в том числе тория.



Квадрантный электрометр (слева)  
и пьезоэлектрические весы



Мария Склодовская-Кюри  
1867—1934

13 июня того же года супруги Кюри смогли выделить новый, ранее неизвестный химический элемент – полоний, названный так в честь родины Марии Кюри – Польши.

В середине ноября супруги Кюри вернулись к своим опытам и буквально через месяц смогли выделить новый химический, который был в 2-3 миллиона раз активнее урана. 20 декабря новый элемент в лабораторной книге Кюри получил название «радий», что по латыни означает «лучистый».

Тридцатого (30) января тысяча восемьсот девяносто девятого (1899) года Мария Склодовская-Кюри опубликовала статью «Лучи Беккереля и полоний», в которой впервые вводит термины «радиоактивность» и «радиоактивный элемент».

В течение четырёх лет Мария Склодовская-Кюри работала над выделением радия, одного из новых элементов, и к 1902 году было получено порядка 100 мг радия. Казалось бы, что особенного: ещё один химический элемент, их открывают до сих пор. Но это было не просто открытие ещё одного элемента. Радий обладал уникальными свойствами: самопроизвольно разогревался, светился в темноте. У учёных оказался важнейший исследовательский инструмент в руках. Они стали изучать излучение, которое испускает радий, пытались понять природу энергии, которая заставляет его греться, светиться и испускать лучи.



Была проведена серия экспериментов с препаратами радия. К ним можно отнести эксперименты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц, которые в итоге привели к представлениям о строении атома, к понятию о том, что внутри атома есть ядро, которое положительно заряжено. Были проведены первые **ядерные реакции, то есть превращение одних элементов в другие** с помощью излучения радия. Удалось установить, что при распаде радия образуются новые химические элементы, и была выяснена природа радиоактивности. Стало понятно, что **радиоактивность – это процесс самопроизвольного превращения ядер неустойчивых изотопов одного химического элемента в ядра изотопов других химических элементов, сопровождающееся испусканием элементарных частиц, гамма-квантов или более лёгких ядер.** Так был положен конец представлениям, которые бытовали в химии на протяжении столетий, о неизменности химических элементов.

После открытия радиоактивных элементов началось исследование физической природы их излучения. В 1899 году уроженец Новой Зеландии Эрнест Резерфорд поставил классический опыт, позволивший обнаружить сложный состав радиоактивного излучения. Установка состояла из толстостенного свинцового ящика внутрь которого помещались крупинцы урановой соли. Из ящика сквозь узкое отверстие выходил направленный и сфокусированный пучок радиоактивного излучения и попадал на фотопластинку. После проявления фотопластинки на ней обнаруживалось одно тёмное пятно в том месте, куда попадал пучок.

Однако оказалось, что если пропустить излучение урана через магнитное поле, то излучение разделяется на два компонента, которые позже были названы альфа- и бета-лучами согласно первым буквам греческого алфавита.

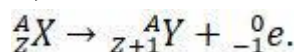


### Опыт по исследованию радиоактивности (1899 г.)

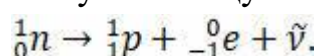


Эрнест Резерфорд  
1871—1937

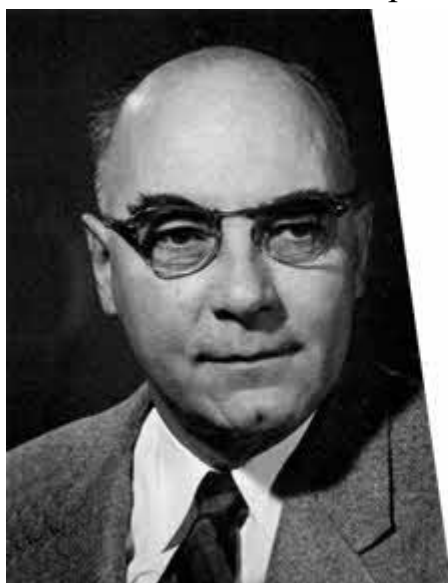
В 1900 году Беккерель первым измерил (приблизительно) отношения заряда к массе бета-частиц и установил, что оно такого же порядка, как и для частиц катодных лучей. Проще говоря, бета-лучи являются потоком электронов, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Отсюда следовало, что при бета-распаде ядро атома теряет один электрон, в результате чего образуется ядро нового элемента с тем же самым массовым числом, но с атомным номером на единицу больше, чем у материнского ядра:



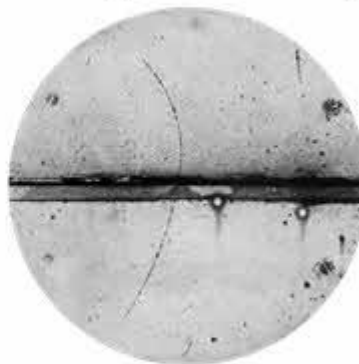
Здесь важно понимать, что электрон теряет не атом (в этом случае образовался бы положительный ион), а ядро атома в результате, как оказалось, распад нейтрона на протон, электрон и ещё какую-то нейтральную безмассовую частицу:



В 1932 году американский физик Карл Андерсон при наблюдении космического излучения с помощью камеры Вильсона смог сфотографировать следы частиц, которые очень напоминали следы электронов, но имели изгиб под действием магнитного поля, противоположный следам электронов.



Фотография первого из когда-либо наблюдавшихся позитронов

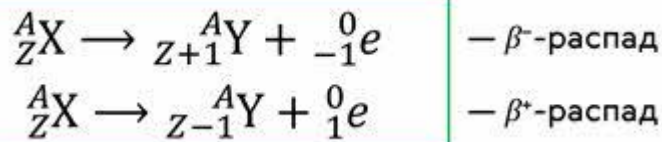


Карл Андерсон  
1905—1991

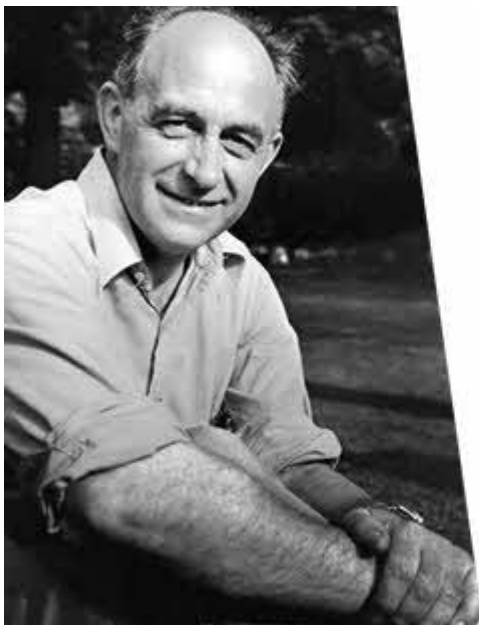
Это свидетельствовало о положительном электрическом заряде обнаруженных частиц. Андерсон назвал эти частицы «позитронами». Дальнейшие исследования позитронов показали, что их масса равна массе электрона, а заряд – модулю заряда электрона.

В 1934 году Ирен и Фредерик Жолио-Кюри открыли ещё один источник позитронов – бета плюс-радиоактивность.

Таким образом, существует два вида бета-распада:



Интересно, что изучение бета-распада показало, что в нём как-бы нарушаются два фундаментальных закона: закон сохранения энергии и импульса. Поэтому 4 декабря 1930 года швейцарский физик Вольфганг Эрнст Паули предположил, что при бета-распаде рождается ещё какая-то частица, которая и уносит часть энергии и импульса. Паули назвал её нейтроном. Однако впоследствии, как мы знаем, «нейтроном» была названа другая элементарная частица, наряду с протоном входящая в состав атомных ядер. А предсказанная Паули частица в работах итальянца Энрико Ферми 1933-1934 годов на итальянский манер была названа «нейтрино», что в переводе означает «нейтрончик».

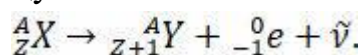


Свойства нейтрино оказались удивительными. Из-за отсутствия электрического заряда и очень малой массы нейтрино очень слабо взаимодействует с веществом, и поэтому оно было экспериментально обнаружено только в середине 50-х годов XX в. американскими физиками Фредериком Райнесом и Клайдом Коуэном.

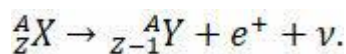


Фактически в любом веществе нейтрино ведёт себя так, как будто вещества нет. Например, если бы железная плита имела толщину, равную расстоянию от Земли до Солнца, то она задержала бы лишь одно из ста миллионов нейтрино. Поэтому нейтрино свободно пронизывает космическое пространство, пролетая сквозь Землю, Солнце и другие небесные тела.

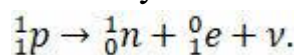
Таким образом, при бета минус-распаде ядра самопроизвольно испускают электрон и электронное антинейтрино. В результате образуется новое ядро с тем же самым массовым числом, но с атомным номером на единицу больше:



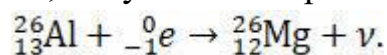
При бета плюс-распаде ядра самопроизвольно испускают позитрон и электронное нейтрино. В результате образуется новое ядро с тем же самым массовым числом, но с атомным номером на единицу меньше:



Отметим, что свободный протон, в отличие от нейтрона, стабилен. Однако в ядре становится возможным бета плюс-превращение протона в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино:



Существует ещё третий вид превращений ядер с участием бета-частиц, который называется **электронным** или **e-захватом**. При электронном захвате один из протонов ядра захватывает орбитальный электрон и превращается в нейтрон, испуская электронное нейтрино:



Но вернёмся к опытам по исследованию радиоактивности. В 1900 году французский физик Поль Вийяр при исследовании отклонение альфа- и бета-лучей в излучении радия обнаружил и третий, ранее неизвестный вид лучей, не отклоняющихся даже в самых сильных магнитных полях.



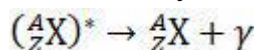
Опыт по исследованию радиоактивности (1900 г.)



Поль Вийяр  
1871—1937

Вийяр был скромным человеком, и не предложил конкретного названия для излучения, которое он обнаружил. Поэтому в 1903 году Эрнест Резерфорд предложил назвать лучи Вийяра гамма-лучами, потому что они были гораздо более проникающими, чем альфа- и бета-лучи, открытые им ранее.

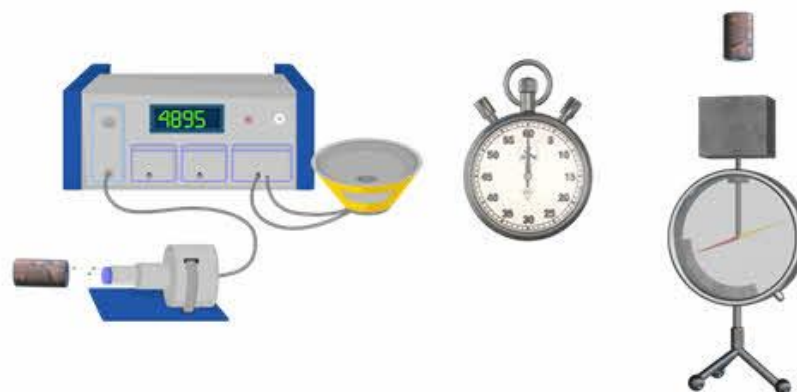
Поль Вийяр также показал, что открытый им вид излучения характеризуется чрезвычайно малой длиной волны и, вследствие этого, обладает ярко выраженными корпускулярными свойствами. В дальнейшем было доказано, что гамма-излучение представляет собой поток фотонов, имеющих высокую энергию.



Труднее всего было выяснить природу альфа-частиц, так как они слабее отклоняются магнитным и электрическим полями. Окончательно эту задачу удалось решить Резерфорду в 1913 году. Для начала он смог измерить отношение заряда частицы к её массе по отклонению в магнитном поле. Оно оказалось примерно в два раза меньше, чем у протона — ядра атома водорода. Отсюда следовало, что у альфа-частицы на один элементарный заряд приходится масса, равная двум атомным единицам массы.

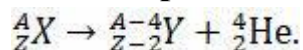
Затем Резерфорд поместил на пути частиц счётчик Гейгера и с его помощью измерил число частиц, испускаемых радиоактивным препаратом за определённое время.



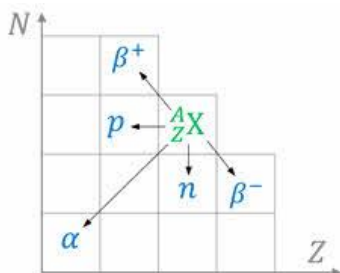


Затем он поставил на место счётчика металлический цилиндр, соединённый с чувствительным электрометром. С помощью электрометра учёный мог измерить заряд частиц, испущенных источником внутри цилиндра за такое же время, так как радиоактивность многих веществ почти не меняется со временем. Зная суммарный заряд альфа-частиц и их число, Резерфорду не составило труда определить заряд одной альфа-частицы. Он оказался равным двум элементарным. Собрав результаты трёх опытов воедино, учёный установил, что на два элементарных заряда альфа-частицы приходится четыре атомные единицы массы. Такой же заряд и такую же относительную атомную массу имеет ядро гелия. То есть альфа-частица – это ядро атома гелия, потерявшее два своих электрона.

Следовательно, **продуктом распада материнского ядра оказывается элемент, зарядовое число которого на две единицы меньше, а массовое число на четыре единицы меньше, чем у материнского ядра:**



В том же году американцем Казимиром Фаянсом и англичанином Фредериком Содди особенности альфа- и бета-распада были сведены в общее правило – **правило смещения: при  $\alpha$ -распаде ядро теряет положительный заряд  $2e$  и масса его убывает примерно на 4 а. е. м. В результате элемент смещается на две клетки к началу Периодической системы. При  $\beta^-$ -распаде элемент смещается на одну клетку ближе к концу, а при  $\beta^+$ -распаде – на одну клетку ближе к началу Периодической системы.**



Отметим одну очень важную особенность явления радиоактивности: **при всех ядерных превращениях сохраняются массовые и зарядовые числа, а также выполняются все известные законы сохранения.**

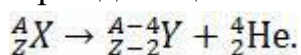
## 2. Закон радиоактивного распада.

Серия экспериментов, проведённая с солями урана в период 1899-1900 гг., показала, что радиоактивное излучение в сильном магнитном поле распадается на три составляющие:

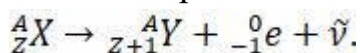
- лучи первого типа отклоняются так же, как поток положительно заряженных частиц. Их назвали альфа-лучами;
- лучи второго типа обычно отклоняются в магнитном поле так же, как поток отрицательно заряженных частиц, их назвали бета-лучами (существуют, однако, позитронные бета-лучи, отклоняющиеся в противоположную сторону);
- а лучи третьего типа, которые не отклоняются магнитным полем, назвали гамма-излучением.

Хотя в ходе исследований были обнаружены и другие типы частиц, испускающихся при радиоактивном распаде, эти названия сохранились до сих пор, поскольку соответствующие типы распадов наиболее распространены.

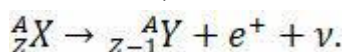
Позже было установлено, что альфа-лучи представляют собой поток ядер атома гелия. А продуктом распада материнского ядра оказывается элемент, зарядовое число которого на две единицы меньше, а массовое число на четыре единицы меньше, чем у материнского ядра:



При бета-минус-распаде ядро атома испускает один электрон и антинейтрино, в результате чего образуется ядро нового элемента с тем же самым массовым числом, но с атомным номером на единицу больше, чем у материнского ядра:



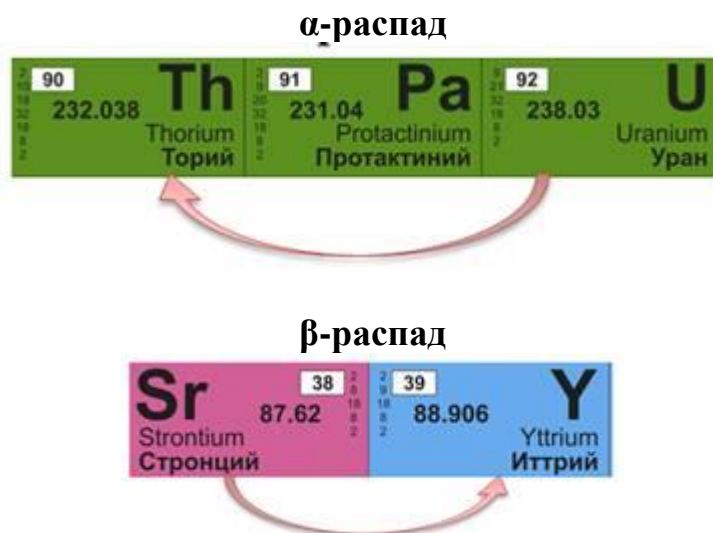
А при бета-плюс-распаде ядра самопроизвольно испускают позитрон и электронное нейтрино. Ядро нового химического элемента имеет то же самое массовое число, но его атомный номер уменьшается на единицу:



Исследование изотопов различных химических элементов показало, что большинство из них превращается в более устойчивые изотопы путём радиоактивного распада. При этом очевидно, что в процессе радиоактивного



распада число ядер со временем уменьшается. Но предсказать, когда именно распадётся то или иное ядро, оказалось невозможным.



Однако было установлено, что для каждого радиоактивного ядра существует некоторое характерное время, называемое **периодом полураспада**, спустя которое в исходном состоянии остаётся половина первоначального количества радиоактивных ядер. При этом распавшиеся ядра превращаются в ядра других, более устойчивых изотопов.

Изотоп	Период полураспада
Актиний-225	10 сут
Висмут-209	$1,9 \cdot 10^{19}$ лет
Йод-131	8 сут
Кобальт-60	5,3 года
Плутоний-239	24,4 года
Радий-219	$10^{-3}$ с
Радий-226	1620 лет
Радон-222	3,8 дня
Торий-229	7000 лет
Уран-235	$7,1 \cdot 10^8$ лет
Уран-238	$4,5 \cdot 10^9$ лет

Период полураспада характеризует такое свойство, как активность радионуклида. Данная величина указывает на интенсивность радиоактивных

превращений, т. е. на количество радиоактивных распадов атомных ядер, происходящих за единицу времени.

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

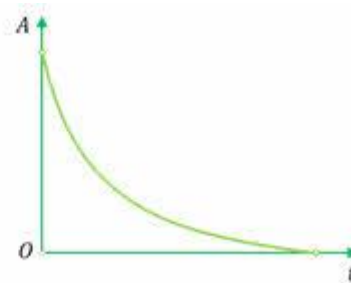
В СИ единицей активности является беккерель. **1 Бк – это активность радиоактивного препарата, в котором происходит распад одного ядра за одну секунду.** Внесистемной единицей активности служит кюри (1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк).

Таким образом, чем меньше период полураспада радионуклида, тем быстрее происходит его распад и тем активнее элемент.

Отметим также, что период полураспада не зависит от того, в каком состоянии находится вещество: твёрдом, жидком или газообразном. Кроме того, период полураспада не зависит от времени, места и условий, в которых находится радиоактивное вещество. Поэтому количество радиоактивных ядер «тогда», и «сейчас» зависит только от промежутка времени, прошедшего с момента начала регистрации процесса распада ядер.

Как мы говорили, точно предсказать, когда произойдёт распад данного ядра невозможно. Однако можно оценить среднее число ядер, которые распадутся за данный промежуток времени. Закон, который описывает интенсивность радиоактивного распада от времени и количества радиоактивных атомов в образце, был открыт Фредериком Содди и Эрнестом Резерфордом в 1903 году. В своих работах «Сравнительное изучение радиоактивности радия и тория» и «Радиоактивные превращения» они сформулировали закон радиоактивного распада следующим образом: **«Во всех случаях, когда отделяли один из радиоактивных продуктов и исследовали его активность независимо от радиоактивности вещества, из которого он образовался, было обнаружено, что активность при всех исследованиях уменьшается со временем по закону геометрической прогрессии».**

$$A = A_0 2^{-\lambda t}$$



Давайте с вами получим математическую форму закона радиоактивного распада. Для этого будем считать, что в начальный момент времени число радиоактивных ядер составляло «Эн нулевое». Тогда, через

промежуток времени, равный периоду полураспада, у нас останется? Правильно, половина от их первоначального количества.

За второй период полураспада у нас распадётся половина от половины исходного числа ядер. То есть нераспавшимися останется четверть от начального числа ядер. Рассуждая далее аналогичным образом, найдём, что за промежуток времени, равный  $n$  периодам полураспада, радиоактивных ядер останется:

$$N = \frac{N_0}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-n}.$$

Поскольку  $n$  – это отношение времени наблюдения к периоду полураспада радиоактивного элемента, то последнюю запись можно представить в том виде, который вы сейчас видите на экране:

$$N = \frac{N_0}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$

Полученное соотношение и выражает **математическую запись закона радиоактивного распада**. С его помощью можно найти число нераспавшихся ядер в любой момент времени.

Для примера давайте с вами решим такую задачу. Изотоп  $^{137}_{55}\text{Cs}$  является  $\beta^-$ -радиоактивным с периодом полураспада 30 лет. Определите заряд  $\beta^-$ -частиц, испущенных этим изотопом за 15 лет, если масса исходного препарата равна 2 г.

#### ДАНО

$$T = 30 \text{ лет}$$

$$t = 15 \text{ лет}$$

$$m = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$M = 1,37 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$q = ?$$

#### РЕШЕНИЕ

Правило смещения  $\beta^-$ -распада:  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}$ .

Заряд, испущенный за время  $t$ :  $q = e\Delta N = e(N_0 - N) = \frac{emN_A}{M} (1 - 2^{-\frac{t}{T}})$ .

Число распавшихся ядер:  $\Delta N = N_0 - N$ .

Число оставшихся ядер:  $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$ .

Начальное число ядер:  $\nu = \frac{m}{M} = \frac{N_0}{N_A} \Rightarrow N_0 = \frac{m}{M} N_A$ .

$$q = \frac{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{1,37 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}} \cdot (1 - 2^{-\frac{15 \text{ лет}}{30 \text{ лет}}}) \cong -412 \text{ Кл}$$

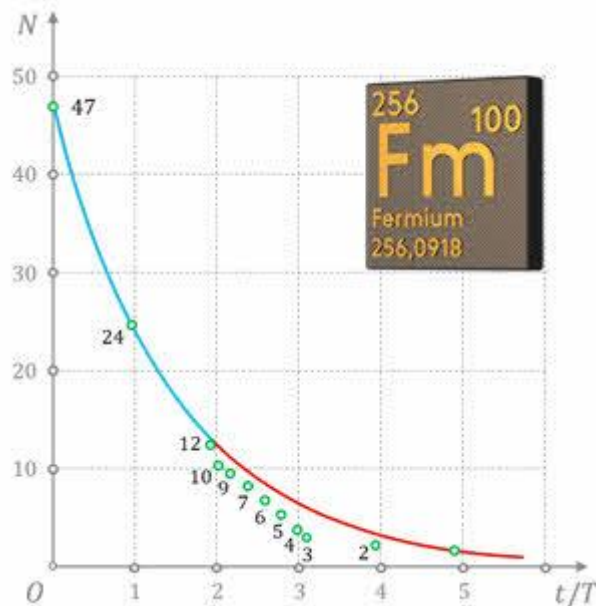


**ОТВЕТ:** суммарный заряд  $\beta^-$ -частиц, испущенных за 15 лет  $^{137}_{55}\text{Cs}$ , примерно равен  $-412$  Кл.

Отметим, что закон радиоактивного распада является статистическим, так как он справедлив до тех пор, пока число нераспавшихся ядер остаётся достаточно большим.

Вы видите теоретический и экспериментальный графики распада 47 ядер изотопа фермия-256, период полураспада которого равен 3,5 часам. Из

графиков хорошо видно, что пока ядер было достаточно много (от 47 до 12), показательная функция хорошо описывала закон распада. Однако при меньшем числе ядер истинная зависимость существенно отличается от показательной функции.



Теперь давайте с вами выясним, от чего же зависит активность радионуклида. Для этого вспомним, что в процессе радиоактивного распада количество нераспавшихся ядер уменьшается, значит, активность образца равна скорости уменьшения количества нераспавшихся ядер:

$$A = -\frac{dN}{dt} = -N'.$$

Подставим в данное уравнение математическую запись закона радиоактивного распада и возьмём первую производную по времени полученного выражения.

$$A = -\left(N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}\right)' = \frac{N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \cdot \ln 2}{T} = \frac{N \ln 2}{T}.$$

После всех математических преобразований получим, что **активность источника прямо пропорциональна числу радиоактивных ядер, имеющих в образце в данный момент времени, и обратно пропорциональна периоду полураспада данного радиоактивного вещества.**

Представим полученную нами формулу в том виде, как это показано на экране:

$$A = \frac{N \ln 2}{T} \cong \frac{0,693N}{T} \cong \frac{N}{1,44T}.$$

Произведение, стоящее в знаменателе формулы представляет собой **среднее время жизни радиоактивного изотопа**. Оно также равно периоду, за который количество нераспавшихся ядер уменьшается в  $e \cong 2,72$  раз.

Как вы уже знаете, все радиоактивные ядра данного изотопа одинаковы. Поэтому и вероятность распада для каждого из них одинакова в каждую секунду. То есть распад ядра – это, так сказать, не «смерть от старости», а скорее «несчастный случай» в его жизни. Ядро может распасться сейчас, а может прожить в образце неопределённо долго без распада.

**Вероятность распада одного ядра данного изотопа за одну секунду называется постоянной распада** и обозначается греческой буквой лямбда ( $\lambda$ ). Для любого ядра данного изотопа постоянная распада одинакова. Но для ядер различных изотопов постоянная распада различна.

Давайте предположим, что в некотором радиоактивном образце имеется  $N$  ядер. Тогда вероятность распада равна той части ядер ( $dN/N$ ) образца, которая распадётся за единицу времени:

$$\lambda = -\frac{dN}{N \cdot dt},$$

(знак «-» в уравнении указывает на убывание числа радиоактивных ядер данного изотопа с течением времени). Из этой формулы следует, что доля распавшихся ядер равна произведению постоянной распада на малый промежуток времени, за который они распались:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt.$$

Проинтегрируем это выражение от начального до произвольного момента времени:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t.$$

Воспользовавшись свойствами логарифма, мы с вами получим второй вариант записи **закона радиоактивного распада**:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}.$$

На основании полученного уравнения мы с вами можем определить, от чего зависит постоянная радиоактивного распада. Итак, предположим, что время наблюдения за радиоактивным препаратом равно его периоду полураспада. Значит, через этот промежуток времени в образце останется половина от первоначального количества ядер:

$$N_1 = \frac{N_0}{2}.$$

Перепишем закон радиоактивного распада с учётом этого выражения.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \Rightarrow 2^{-1} = e^{-\lambda T}.$$

И прологарифмируем полученное равенство по основанию «Е».

$$-\ln 2 = -\lambda T \ln e \Rightarrow \ln 2 = \lambda T.$$

Из полученной записи видно, что постоянная распада обратно пропорциональна периоду полураспада радиоактивного элемента:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \cong \frac{0,693}{T} \cong \frac{1}{1,44T}.$$

Сравнивая эти формулы с формулой, полученной нами ранее для активности вещества, видим, что **активность образца равна произведению постоянной распада и числа радиоактивных ядер в образце в данный момент:**

$$A = \lambda N.$$

#### **Основные выводы:**

Существуют **три вида радиоактивных излучений**:  $\alpha$ -распад,  $\beta$ -распад и  $\gamma$ -излучение.

**$\alpha$ -распад** характеризуется испусканием  $\alpha$ -частиц, то есть ядер гелия два четыре  ${}^4_2\text{He}$ .

**$\beta$ -распад** характеризуется испусканием электрона и антинейтрино.

При  **$\gamma$ -излучении** ядро не претерпевает никаких изменений. Изменяется только состояние ядра и это изменение сопровождается испусканием гамма-кванта.

В общем случае,  $\alpha$ - и  $\beta$ -распад описывается **правилом смещения**, которое было сформулировано Фредериком Содди:

при  **$\alpha$ -распаде** ядро теряет положительный заряд  $2e$  и его масса убывает примерно на 4 а.е.м. В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы.

При  **$\beta$ -распаде** ядро приобретает положительный заряд равный  $e$ , в результате чего смещается на одну клетку ближе к концу периодической системы.

При радиоактивном распаде сохраняется суммарный электрический заряд и приближенно сохраняется относительная масса ядер.



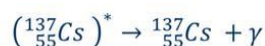
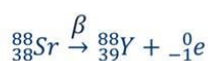
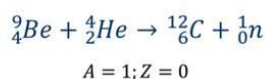
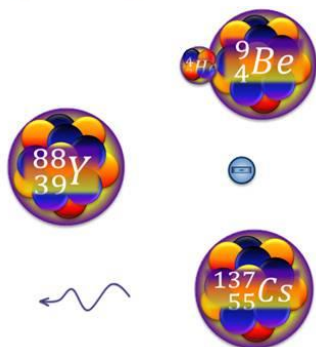
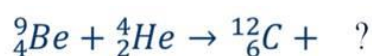
**Законом радиоактивного распада** определяется число оставшихся активных ядер в определенный момент времени.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

**Период полураспада  $T$**  – это промежуток времени, за который количество активных ядер уменьшается вдвое. Исходя из этого, можно вывести другую формулу описывающую закон радиоактивного распада.

$$N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

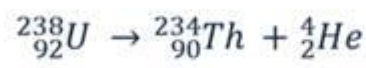
**Задача 1.** Закончите реакции. Найдите недостающие элементы и определите тип реакции.



**Задача 2.** При  $\alpha$ -распаде  ${}^{238}_{92}\text{U}$  образовалось 100 г некоторого вещества. Найдите массу этого вещества через трое суток.

<b>Дано:</b>
${}^{238}_{92}\text{U} \xrightarrow{\alpha}$
$m_0 = 100 \text{ г}$
$t = 3 \text{ дн}$
$T = 24 \text{ дн}$
$m = ?$

**Решение:**  
Найдем вещество, которое образовалось в результате  $\alpha$ -распада:



$$m = \frac{MN}{N_A} \Rightarrow \frac{N}{N_0} = \frac{m}{m_0}$$

Из закона радиоактивного распада:

$$\frac{N}{N_0} = 2^{-\frac{t}{T}} \Rightarrow m = m_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

$$m(3) = 100 \cdot 2^{-\frac{3}{24}} = 91,7 \text{ г}$$





## Лекция №43

### Деление и синтез ядер. Термоядерные реакции. Ядерная энергетика.

#### План

1. Искусственная радиоактивность. Ядерные реакции. Цепная реакция деления.
2. Ядерный реактор. Термоядерные реакции.

#### Литература:

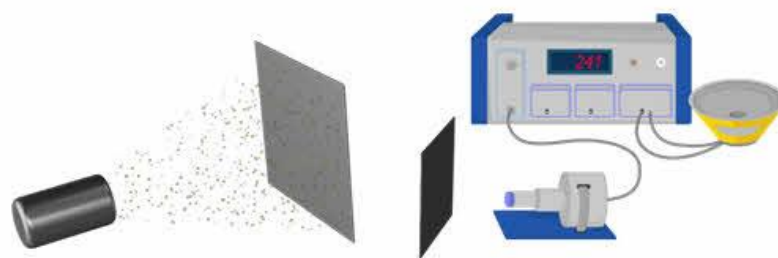
1. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. организаций: базовый уровень / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. Н.А. Парфентьевой. – 3-е изд. – М. : Просвещение, 2016. – 432 с. ил.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Какой процесс называется ядерной реакцией?
2. Как символически записывается ядерная реакция?
3. Как классифицируются ядерные реакции? Приведите примеры.
4. Что называют энергетическим выходом ядерной реакции? В каких случаях реакция протекает с поглощением энергии, а в каких – с выделением?
5. Кто и когда совершил ядерную реакцию, которая экспериментально подтвердила, что в состав атомных ядер входят нейтроны?
6. Как объяснить способность тяжелых ядер к делению? Почему при делении ядер происходит выделение энергии?
7. Напишите недостающие обозначения в следующих ядерных реакциях:  
1)  ${}_{13}^{27}\text{Al}(n,\alpha) {}_Z^AX$  ; 2)  ${}_{9}^{19}\text{F}(p,x) {}_8^{16}\text{O}$  ; 3)  ${}_{25}^{55}\text{Mn}(x,n) {}_{26}^{55}\text{Fe}$  ; 4)  ${}_{7}^{14}\text{N}(n,x) {}_6^{14}\text{C}$  ; 5)  ${}_Z^AX(p,\alpha) {}_{11}^{22}\text{Na}$  ; 6)  ${}_{17}^{27}\text{Al}(\alpha,n) {}_Z^AX$  ; 7)  ${}_4^9\text{Be}(x,n) {}_6^{12}\text{C}$ .

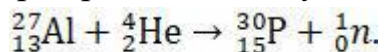
## 1. Искусственная радиоактивность. Ядерные реакции. Цепная реакция деления.

Спустя 38 лет после открытия Беккереля французские учёные Фредерик и Ирен Жолио-Кюри провели один очень интересный опыт. Они поместили вблизи источника быстрых альфа-частиц алюминиевую фольгу и подвергли её облучению в течение нескольких минут. Затем они удалили источник и поднесли к фольге счётчик Гейгера. Какого же было удивление учёных, когда они обнаружили, что алюминиевая фольга стала радиоактивной: она испускала позитроны в течение некоторого времени.

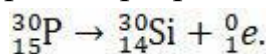


Фредерик Жолио-Кюри (1900—1958)  
Ирен Жолио-Кюри (1897—1956)

Дальнейшие исследования показали, что при облучении, ядра алюминия захватывают альфа-частицы и превращаются в ядра изотопа фосфора-тридцать с испусканием нейтрона:



Полученный искусственно изотоп фосфора радиоактивен. Поэтому он в течение очень короткого промежутка времени самопроизвольно испускает позитрон и превращается в стабильный изотоп кремния-тридцать:



Так было открыто явление искусственной радиоактивности, за которое супруги Жолио-Кюри в 1935 году были удостоены Нобелевской премии по химии.

**Искусственная радиоактивность** – это распад изотопов, полученных искусственным путём (то есть в результате ядерных реакций).

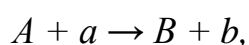
**Ядерными реакциями** мы с вами будем называть превращение атомных ядер при их взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом.

Ядерные реакции происходят лишь тогда, когда частицы приближаются друг к другу настолько, что попадают в зону действия ядерных сил.

Сразу обратим ваше внимание на то, что **в любой ядерной реакции выполняются законы сохранения энергии и импульса.** При этом, что важно, **сумма зарядовых и массовых чисел ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядовых и массовых чисел ядер и частиц, получающихся в результате реакции.**

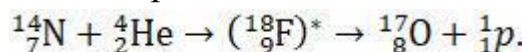
Действие законов сохранения ограничивает возможные варианты ядерных реакций и позволяет предсказать возможные пути (механизмы) ядерных превращений.

Чаще всего символически ядерные реакции записываются, как:



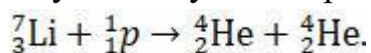
где  $A$  – это исходное ядро,  $a$  – бомбардирующая частица. Соответственно,  $B$  – это конечное ядро, а  $b$  – испускаемая частица.

Для осуществления ядерной реакции под действием положительно заряженной частицы необходимо, чтобы частица обладала кинетической энергией, достаточной для преодоления сил кулоновского отталкивания. Например, в исторически первой ядерной реакцией, в результате которой в 1919 году Эрнестом Резерфордом был открыт протон, лишь одна из примерно 50 000 альфа-частиц захватывалась ядром азота с последующим испусканием протона:

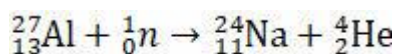


Поэтому для осуществления таких ядерных реакций необходимо заряженным частицам сообщать достаточно большую кинетическую энергию, например, в ускорителях. В них заряженные частицы разгоняются электрическим полем, двигаясь по замкнутым орбитам или спирали, где они удерживаются с помощью магнитного поля. В современных ускорителях заряженные частицы или ядра атомов разгоняются от десятков мегаэлектронвольт до сотен гигаэлектронвольт.

Первая ядерная реакция на быстрых протонах была осуществлена в 1932 году. В ней удалось расщепить ядро лития-7 на две альфа-частицы:

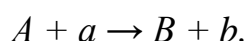


Открытие нейтрона дало новый импульс в исследовании ядерных реакций. Поскольку у нейтронов нет электрического заряда, то они могут беспрепятственно проникать в атомные ядра и вызывать их изменение. Например, если нейтрон влетит в ядро алюминия, то образуется изотоп натрия и альфа-частица:



Великий итальянский физик Энрико Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми нейтронами (с энергией в несколько мегаэлектронвольт), но и медленными (десятые доли электронвольта). Причём медленные нейтроны во многих случаях более эффективны, чем быстрые, так как они более вероятно вступают в реакции с данной мишенью.

Как вы могли заметить, в большинстве ядерных реакций, которые называют **прямыми ядерными взаимодействиями**, участвуют два ядра и две частицы. Первая пара «ядро – частица» называется **исходной**, а вторая – **конечной**:



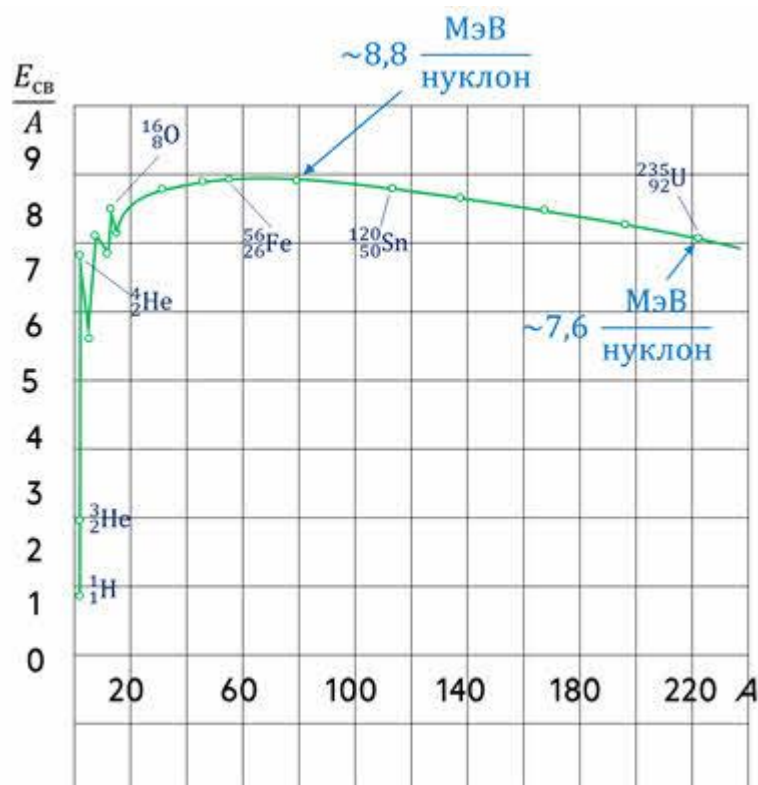
В таких реакциях энергия, вносимая в ядро, передаётся преимущественно одному или небольшой группе нуклонов. Такой механизм реакции является основным при больших энергиях бомбардирующих частиц.

При малых энергиях бомбардирующих частиц наряду с прямыми ядерными реакциями в соответствии с представлениями, развитыми Нильсом Бором, осуществляются также реакции, происходящие в два этапа, с образованием **составного ядра**:



На первом этапе ядро поглощает (то есть захватывает) частицу и образуется составное ядро в возбуждённом состоянии. Энергия поглощённой частицы распределяется между всеми нуклонами составного ядра, причём энергия, приходящаяся на каждый нуклон, меньше удельной энергии связи. На втором этапе вследствие обмена энергией между нуклонами на одном или нескольких из них может сконцентрироваться энергия, достаточная для преодоления ядерных сил и вылета из составного ядра. В результате составное ядро превращается в конечное с испусканием частицы или гамма-кванта и высвобождением избытка энергии.

Особый тип ядерных реакций представляют реакции деления элементов, расположенных в конце Периодической системы химических элементов. В результате таких реакций выделяется огромное количество энергии. Почему это происходит? Обратимся к графику удельной энергии связи нуклонов.



Итак, для тяжёлых ядер, например таких, как уран-235, удельная энергия связи, приходящаяся на нуклон, составляет примерно 7,6 МэВ. Ядра химических элементов из середины периодической системы элементов Менделеева обладают максимальной удельной энергией связи – до 8,8 МэВ на нуклон. Таким образом, при расщеплении тяжёлого ядра на два три более лёгких осколка энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличится на величину порядка одного мегаэлектронвольта. А исходя из закона сохранения энергии, такое же количество энергии выделится при делении ядра. Следовательно, в ходе ядерной реакции, приводящей к появлению ядер с большей удельной энергией связи, должна выделяться энергия.

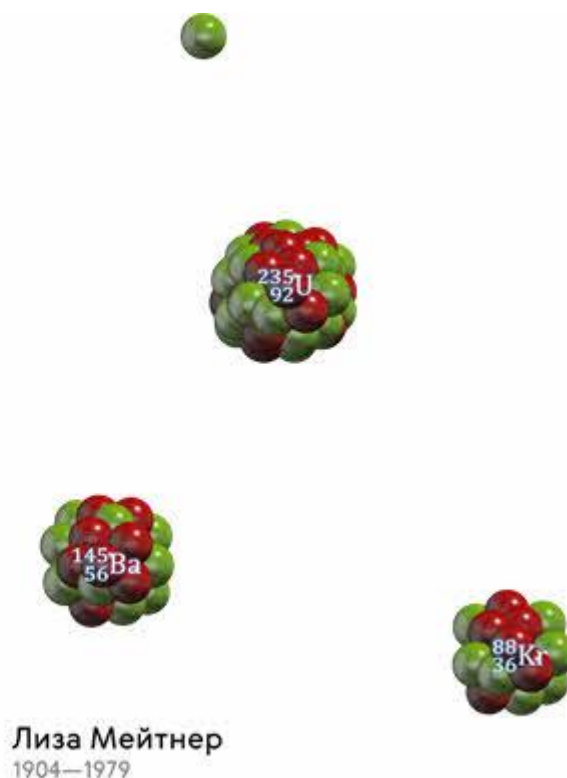
Напомним, что ядерная реакция, сопровождающаяся выделением энергии, называется **экзотермической**. Если же наоборот, ядерная реакция происходит за счёт поглощения энергии, то её называют **эндотермической**.

Процессы, происходящие при ядерных реакциях, очень сложны, но их энергетический выход вычислить довольно просто благодаря великой формуле Эйнштейна. Для этого необходимо знать только массы всех компонентов ядерной реакции:

$$E = (m_{\text{исх}} - m_{\text{пр}})c^2.$$

В этом году немецкие учёные Отто Ган и Фриц Штрассман при поиске трансурановых элементов (элементов, расположенных за ураном в таблице Менделеева) облучали уран нейтронами и в продуктах реакции нашли следы бария. 17 декабря 1938 года они провели решающий опыт, на основании

которого Ган заключил, что ядро урана «лопается», распадаясь на более лёгкие элементы.



В 1939 году австрийский физик Лиза Мейтнер и её племянник Отто Роберт Фриш дали верную интерпретацию это явления. По мнению учёных, при попадании нейтрона в тяжёлое ядро урана происходит деление последнего на две примерно равные части. Поскольку в дочерних относительно лёгких ядрах оказывается избыток нейтронов, то вероятен ещё и вылет нескольких нейтронов.

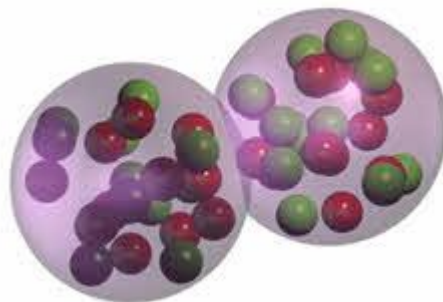
Фриш незамедлительно сообщил об открытии Нильсу Бору, который на знаменитой конференции по теоретической физике в Вашингтоне 26 января 1939 года сообщил об открытии деления урана. Интересно, что многие физики, принимавшие участие в этой конференции, не дожидаясь конца доклада, один за другим стали покидать заседание, чтобы проверить сообщение в своих лабораториях. Так было открыто расщепление ядра.

В том же году Фредерик Жолио-Кюри, Ханс Халбан и Лев Николаевич Коварский показали, что действительно при делении одного ядра урана на два осколка освобождается два или три нейтрона и выделяется около 200 МэВ энергии.

Чтобы понять, почему ядро урана под действием нейтрона начинает делиться, представим его себе в виде капли заряженной жидкости (**капельная модель ядра**). Согласно этой модели, нейтрон при поглощении ядром передаёт ему дополнительную энергию, которая распределяется

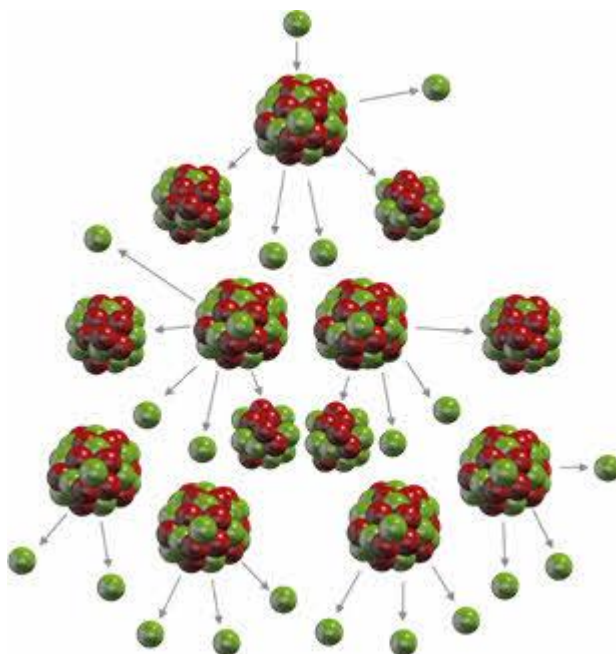


между всеми входящими в состав ядра нуклонами. Образуется новое промежуточное ядро, находящееся в возбуждённом состоянии. Ядерная «жидкость» начинает совершать колебания и ядро приобретает удлинённую форму типа гантели. И как только крайние части ядра во время колебаний отдаляются на расстояние, где ядерные силы уменьшаются, тогда ядро и разделяется на два осколка, испуская при этом два – три нейтрона.



А теперь представим, что у нас есть некоторое количество ядер урана-двести тридцать пять. Образовавшиеся в результате первого деления нейтроны смогут разделить новые ядра урана образовав новые нейтроны. Так, при определённых условиях процесс, начавшись однажды с одного нейтрона, может принять характер цепной реакции.

**Ядерная реакция деления, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой же реакции, называется цепной.**

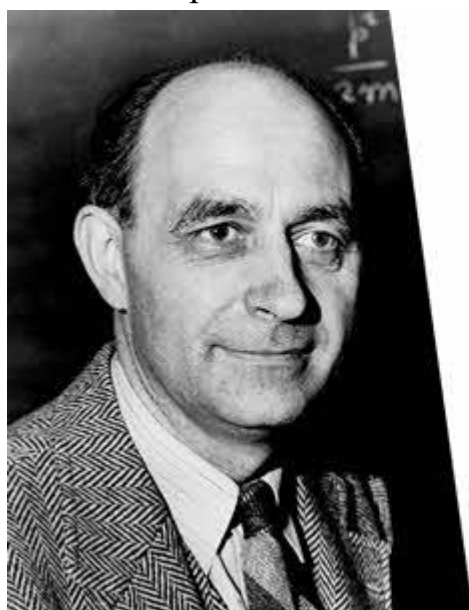


Интересно, что первым, кто заметил, что процесс ядерного деления может породить цепную реакцию и привести к большим выбросам энергии, была Лиза Мейтнер. Её заявление вызвало сенсацию в научной среде. Но знания, при помощи которых можно было создать оружие невероятной силы, могли оказаться в немецких руках. Американские учёные убедили Альберта



Эйнштейна написать предупреждающее письмо президенту США Франклину Рузвельту, после чего был создан проект «Манхэттен» по разработке ядерного оружия. Будучи по убеждениям пацифисткой, Мейтнер отказалась работать в этом проекте, заявив: «Я не буду делать бомбу!» Но было поздно – бомбу смогли сделать и без неё.

Первая управляемая цепная ядерная реакция была осуществлена Энрико Ферми в США в 1942 году. А в СССР первая цепная реакция была осуществлена Игорем Васильевичем Курчатовым в 1946 году.



Макет первого атомного реактора «Чикагская поленница-1» (1942 г.)



Энрико Ферми  
1901–1954

Скорость цепной реакции деления ядер характеризуется коэффициентом размножения нейтронов.

**Коэффициент размножения нейтронов равен отношению числа нейтронов в теле в данном поколении цепной реакции к их числу в следующем поколении:**

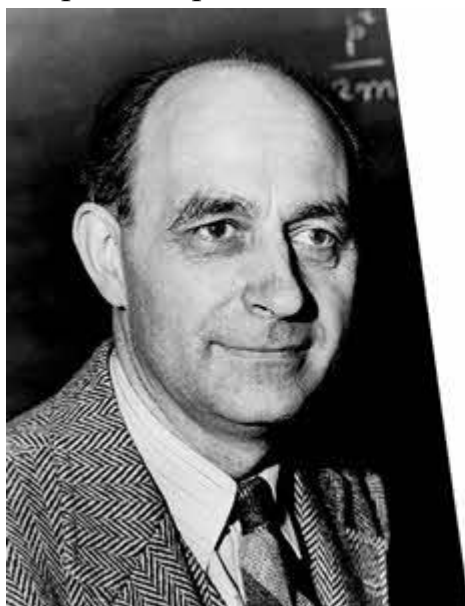
$$k = \frac{N_{i+1}}{N_i}.$$

Цепная ядерная реакция будет самоподдерживающейся, если количество нейтронов в каждом следующем поколении не уменьшается (то есть коэффициент размножения нейтронов будет равен единице). Если же коэффициент размножения нейтронов будет меньше единицы, то реакция будет затухающей, если же больше единицы – то скорость реакции нарастает со временем, что может привести к ядерному взрыву.



Энергия, освобождаемая при делении ядра, уносится осколками деления, нейтронами, гамма-квантами и электронами с сопровождающими их антинейтрино. В конечном итоге вся энергия деления ядра (а это около 200 МэВ), переходит во внутреннюю энергию, которая выделяется как в самом реакторе, так и в окружающих его материалах. Эту энергию и используют для производства электрической энергии.

Напомним, что впервые управляемая цепная реакция деления ядер была осуществлена в 1942 году в США под руководством итальянского физика Энрико Ферми.



Макет первого атомного реактора «Чикагская поленница-1» (1942 г.)

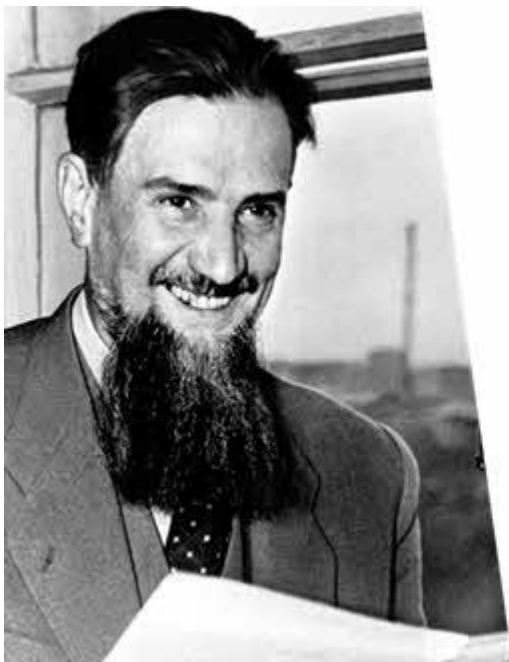


Энрико Ферми  
1901—1954

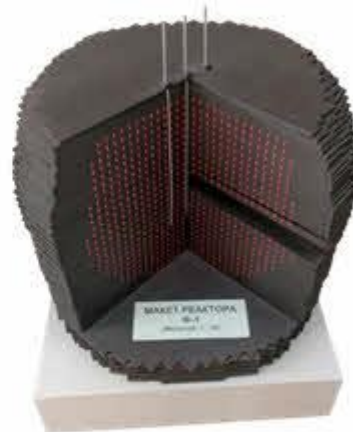
Секретная разработка реактора была первым крупным техническим достижением для Манхэттенского проекта (создания атомной бомбы во время Второй мировой войны). В качестве топлива использовался природный (необогащённый) уран в виде прессованных оксидов общей массой около тридцати семи тонн (около 33 т  $UO_2$  и около 3,7 т  $U_3O_8$ ) и металлических слитков, общей массой около пяти целых и шести десятых тонны (5,6 т). Замедлителем был выбран графит, общей массой около 350 т.

Активная зона была выполнена в виде послойно уложенных графитовых блоков, укреплённых деревянным каркасом. Блоки каждого второго слоя имели полости, в которые укладывалось ядерное топливо, образуя кубическую решётку. Цепная реакция с  $k = 1,0006$  длилась всего 28 минут, после чего реактор был остановлен.

Первый ядерный реактор (Ф-1) в Советском Союзе и в Европе в целом был запущен в 1946 году под руководством академика Игоря Васильевича Курчатова. Он проработал почти 66 лет и был заглушен 2012 году.

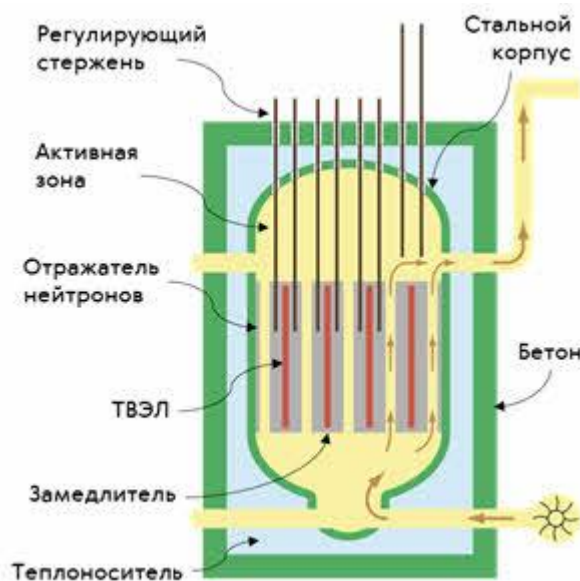


Макет реактора Ф-1



Игорь Курчатов  
1903—1960

Как правило, ядерный реактор имеет пять основных составных частей. Главную часть реактора называют **активной зоной**. Она содержит ядерное горючее в виде таблеток, находящихся в специальных тепловыделяющих элементах (ТВЭЛах по первым буквам словосочетания). ТВЭЛы представляют собой очень длинные трубки, проходящие через всю активную зону реактора. Масса топлива в каждом ТВЭЛе значительно меньше критической (**критической принято называть минимальную массу вещества, необходимую для осуществления цепной ядерной реакции**). Поэтому в одном стержне цепная реакция происходить не может (это делается специально из соображений безопасности). Она начинается после погружения в активную зону всех стержней, то есть когда масса делящегося вещества достигнет критического значения.



Активная зона окружена отражателем нейтронов, возвращающим их внутрь активной зоны для продолжения реакции. Хорошим отражателем нейтронов является бериллий.

В качестве ядерного горючего используется три вида радиоактивных изотопов: урана-238, уран-235, а также изотопа плутония-239. Последние два изотопа наиболее эффективно делятся под действием медленных (тепловых) нейтронов. Но вторичные нейтроны, образующиеся при делении ядер, являются быстрыми с энергией порядка 2 МэВ. Поэтому их замедляют, вводя в активную зону замедлитель. В качестве замедлителя обычно используется простая ( $H_2O$ ) или тяжёлая ( $D_2O$ ) вода. Замедлитель эффективно отбирает энергию у быстрых нейтронов, рождающихся в реакции деления.



Чтобы понять принцип работы замедлителя, проведём аналогию с двумя бильярдными шарами. Итак, при лобовом столкновении движущегося шара с неподвижным налетающий шар останавливается, а изначально неподвижный приобретает его скорость. В случае не лобового столкновения энергия движущегося шара уменьшается частично. Аналогичная картина происходит при торможении нейтронов водой. Для уменьшения энергии нейтрона с 2-3 МэВ до тепловых значений, требуется в среднем около 18 его столкновений с ядрами водорода в молекулах воды. Хорошим замедлителем также считается графит, ядра которого не поглощают нейтронов.

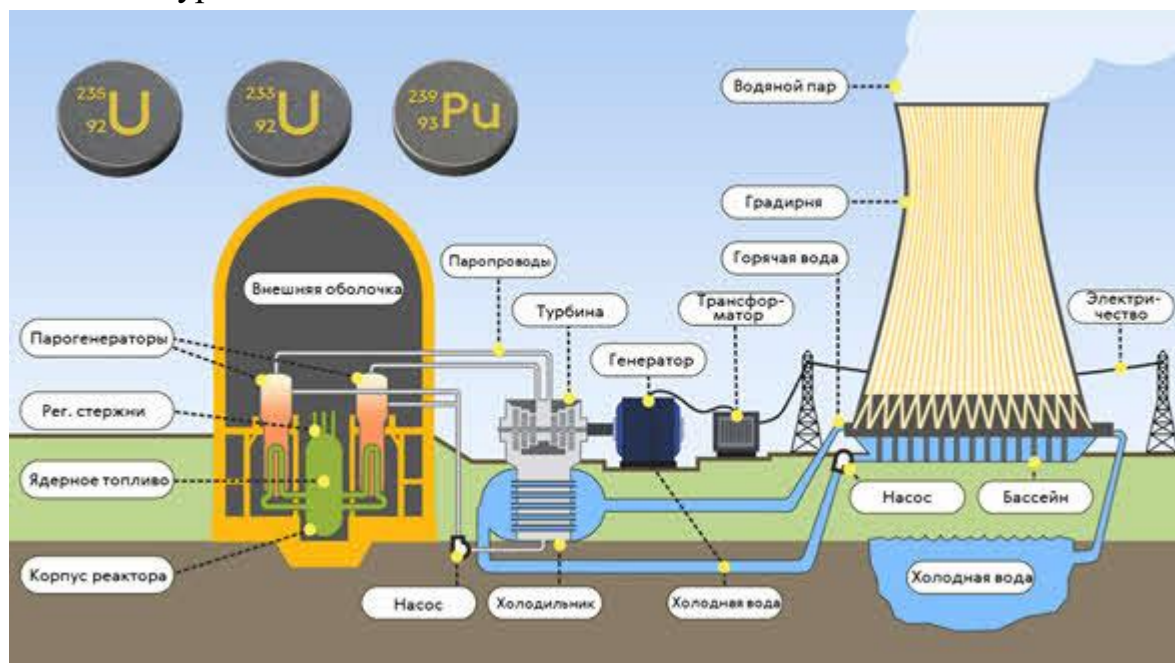
Для управления цепной реакцией в реакторе предусмотрены регулирующие стержни, которые состоят из материалов (чаще из соединения кадмия или бора), активно поглощающих нейтроны. Если стержни с поглотителем ввести в активную зону, то коэффициент размножения нейтронов уменьшается. И наоборот, выведение стержней из активной зоны увеличивает коэффициент размножения. Этим и достигается управление реакцией. Обычно это делается автоматически. В случае же внештатных ситуаций предусмотрена ручная регулировка погружения стержней.

Для отвода из активной зоны реактора выделяющуюся энергию, чаще всего используется обычная вода. Она нагревается стенками ТВЭЛов в среднем до 300 °С и под высоким давлением (порядка 100 атм) выводится из



активной зоны. Далее вода превращается в пар и направляется к паровым турбинам для генерации электрической энергии.

Снаружи активная зона реактора окружена отражателем нейтронов. А поверх отражателя располагается стальной корпус реактора и защитный слой бетона, которые ослабляют радиоактивное излучение до биологически безопасного уровня.



Мы рассмотрели принцип действия реактора на медленных нейтронах, под действием которых делятся лишь достаточно редкие в природе изотопы урана-235, и не встречающиеся в природе изотопы урана-233 и плутония-239, в то время как гораздо более распространённые изотопы урана-238 поглощают тепловые нейтроны без деления на осколки.

Для решения этой проблемы в 1958 году в СССР в городе Обнинске был построен первый в мире реактор на быстрых нейтронах с ненулевой мощностью – БР-5. В реакторах на быстрых нейтронах используются урано-плутониевый цикл, в котором ядро урана-238 превращается в ядро плутония-239. И ториевый цикл, в котором ядро тория-230 превращается в ядро урана-233. Ядра этих изотопов по способности к взаимодействию с нейтронами похожи на изотопы урана-235. При захвате нейтрона их ядра делятся с испусканием в среднем трёх нейтронов, которые способны поддерживать развитие цепной реакции.

Ядерный реактор на быстрых нейтронах выполняет одновременно две функции – производство энергии и воспроизводство ядерного горючего. Именно поэтому он называется ещё **реактором-размножителем** (бридером).

Как мы упоминали в начале урока, выработка электроэнергии, основанная на использовании управляемой ядерной реакции, производится

на атомных электростанциях. Первая в мире АЭС была построена в СССР в городе Обнинске и дала ток 27 июня 1954 года. Её мощность составляла всего 5 МВт.

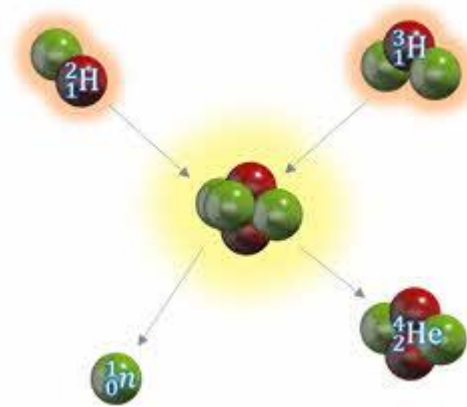


Несмотря на то, что атомные электростанции экологически более чистые по сравнению с тепловыми электростанциями и потребляют значительно меньше топлива, у атомной энергетики есть существенные недостатки, которые можно устранить, если для получения энергии использовать не реакции деления тяжёлых ядер, а реакции синтеза лёгких ядер. Эти реакции эффективно протекают при сверхвысоких температурах и само-поддерживаются за счёт значительного выделения в них энергии. Такие реакции были названы **термоядерными**. Причина выделения энергии та же, что и в случае реакций деления, – удельная энергия связи продуктов реакции выше, чем исходных материалов.

Как мы уже с вами знаем, частицы в атомном ядре удерживаются ядерными силами, которые действуют только на сверхмалых расстояниях. Поэтому при реакциях синтеза необходимо сблизить ядра на столь малое расстояние, чтобы «в игру вступили» ядерные силы. Но этому сближению будут препятствовать силы электрического отталкивания, действующие между положительно заряженными ядрами. Поэтому для преодоления этих сил, ядра изотопов изначально должны обладать большой кинетической энергией. А большая кинетическая энергия теплового движения ядер означает, что вещество должно обладать очень высокой температурой.

Возможность использования термоядерных реакций открывает перед человечеством новый путь получения практически неисчерпаемого источника энергии. Одной из самых перспективных в этом отношении является реакция





Давайте рассчитаем энергию, выделяющуюся при такой реакции.

**ДАНО**

$$m_{{}^2_1\text{H}} = 2,01410 \text{ а. е. м.}$$

$$m_{{}^3_1\text{H}} = 3,01605 \text{ а. е. м.}$$

$$m_{{}^4_2\text{He}} = 4,00260 \text{ а. е. м.}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ а. е. м.}$$

$$E = ?$$

**РЕШЕНИЕ**

Масса частиц, вступивших в реакцию:  $m_1 = m_{{}^2_1\text{H}} + m_{{}^3_1\text{H}}$ .

$$m_1 = 2,01410 \text{ а. е. м.} + 3,01605 \text{ а. е. м.} = 5,03015 \text{ а. е. м.}$$

Масса частиц после реакции:  $m_2 = m_{{}^4_2\text{He}} + m_n$ .

$$m_2 = 4,00260 \text{ а. е. м.} + 1,00866 \text{ а. е. м.} = 5,01126 \text{ а. е. м.}$$

Дефект массы:  $\Delta M_1 = m_1 - m_2$ .

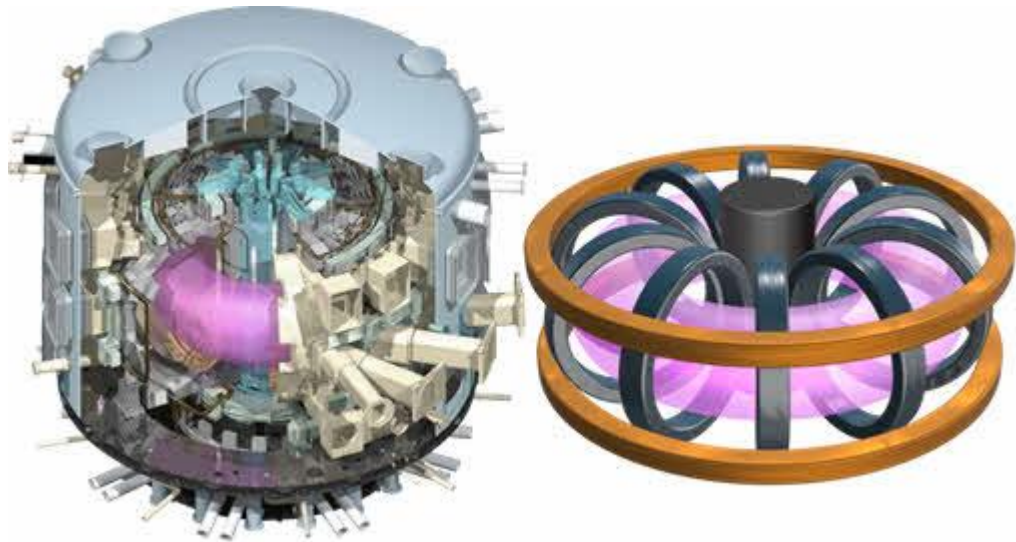
$$\Delta M = 5,03015 \text{ а. е. м.} - 5,01126 \text{ а. е. м.} = 0,01889 \text{ а. е. м.}$$

Энергетический выход:  $E_1 = 931,5 \cdot \Delta M_1$ .

$$E = 931,5 \cdot 0,01889 \text{ а. е. м.} \cong 17,6 \text{ МэВ} \Rightarrow \frac{\Delta E}{A_{D+T}} \cong 3,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$$

**ОТВЕТ:** в результате реакции синтеза выделяется 17,6 МэВ энергии.

Одной из основных проблем, возникающих при попытке осуществить управляемый термоядерный синтез – это удержания высокотемпературной дейтерий-тритиевой смеси. Эта смесь не должна касаться стенок установки, в которой она находится, иначе стенки просто испарятся. Ещё в середине XX века российские учёные Андрей Дмитриевич Сахаров и Игорь Евгеньевич Тамм предложили для удержания термоядерной смеси использовать магнитное поле особой конфигурации. Данная идея в последствии была реализована в установках типа «ТОКАМАК» – **Т**Ороидальных **К**Амерах с **М**агнитными **К**атушками. Однако проблема удержания высокотемпературной плазмы в течение длительного времени не решена и по сей день.



Сейчас «мировой рекорд» принадлежит китайским учёным, которым в ночь на 3 июля 2017 года удалось удерживать плазменный шнур в стабильном состоянии более 100 секунд. Но о полноценной управляемой термоядерной реакции пока речь не идёт. На данном этапе своей эволюции человечество смогло осуществить лишь неуправляемую термоядерную реакцию взрывного типа в водородной бомбе.

В естественных условиях термоядерные реакции синтеза протекают в недрах звёзд и являются основным источником их энергии. Поэтому термоядерные реакции играют очень важную роль в эволюции Вселенной, в частности в преобразованиях химических веществ в ней.