

Министерство сельского хозяйства РФ

**Новозыбковский филиал ФГБОУ ВО
«Брянский государственный аграрный универси-
тет»**

Физика

Учебное пособие

Брянск, 2015

УДК 53(07)
ББК 22.3
Ф 50

Физика: учебное пособие / Сост. М.И. Кублицкая - Брянск:
Издательство Брянского ГАУ, 2015. – 192 с.

Курс лекций составлен в соответствии с рабочей программой по дисциплине Физика. Помимо теоретического материала в нем содержатся вопросы для повторения и список литературы для подготовки к занятиям.

Печатается по решению методического совета Новозыбковского филиала Брянского ГАУ.

© Кублицкая М.И., 2015
© Брянский ГАУ, 2015

Содержание

Лекция №1 Основы молекулярно-кинетической теории и их опытные обоснования.	6
Лекция №2 Масса и размеры молекул. Идеальный газ. Основное уравнение МКТ.	10
Лекция №3 Температура. Абсолютная шкала температур.	16
Лекция №4 Уравнение состояния идеального газа.....	20
Лекция № 5 Внутренняя энергия. Работа и количество теплоты, как мера измерения внутренней энергии	25
Лекция №6 Первый закон термодинамики. Применение первого Закона термодинамики к изопроцессам в газе.	29
Лекция №7 Принцип действия тепловых двигателей.	32
Лекция №8 Насыщенный пар и его свойства. Влажность воздуха	33
Лекция №9 Свойства жидкости.....	36
Лекция №10 Кристаллические и аморфные тела.....	38
Лекция №11 Испарение, сублимация, плавление и кристаллизация ...	42
Лекция №12 Электризация тел. Закон Кулона.....	45
Лекция №13 Электрическое поле. Напряженность электрического поля.	47
Лекция № 14 Потенциал электрического поля. Работа электрического поля.	49
Лекция №15 Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Электроёмкость проводников.....	51
Лекция №16 Конденсаторы.	55
Лекция №17 Постоянный электрический ток, сила тока, плотность тока. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление.....	58
Лекция №18 Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи.....	60
Лекция №19 Электрические цепи с последовательным и параллельным соединением проводников.....	63
Лекция №20 Работа и мощность электрического тока.....	65
Лекция №21 Основные положения электронной теории проводимости металлов.	66
Лекция №22 Электрический ток в жидкостях.	71
Лекция №23 Электрический ток в газах и вакууме.	73
Лекция №24 Электрический ток в полупроводниках.....	77
Лекция №25 Магнитное поле и его свойства. Магнитная индукция. Закон Ампера.	81
Лекция №26 Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Магнитные свойства вещества.	84
Лекция №27 Явление электромагнитной индукции. ЭДС индукции. Опыт Фарадея.	87

Лекция №28 Величина ЭДС индукции. Вихревое электрическое поле. Явление самоиндукции. Энергия магнитного поля.	90
Лекция №29 Механические колебания и волны.	93
Лекция №30 Свободные электромагнитные колебания в контуре. Автоколебания.	95
Лекция №31 Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный ток. Производство и передача электрической энергии. .	99
Лекция №32 Электромагнитные волны. Изобретение радио А.С. Поповым.	103
Лекция №33 Звуковые волны, их свойства. Ультразвук и инфразвук.	106
Лекция №34 Электромагнитная природа света. Скорость света.	108
Лекция №35 Свойства света. Законы отражения и преломления света.	111
Лекция №36 Фотометрия. Сила света. Яркость. Освещённость.	112
Лекция №37 Интерференция и дифракция света. Поляризация света.	118
Лекция № 38 Дисперсия света. Виды спектров.	121
Лекция №39 Квантовая гипотеза Планка. Внешний фотоэффект. Законы фотоэффекта.	124
Лекция №40 Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Внутренний фотоэффект. Применение фотоэффекта.	127
Лекция №41 Строение атома. опыты Резерфорда. Постулаты Бора.	130
Лекция №42 Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.	133
Лекция № 43 Состав атомных ядер. Энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции.	140
Лекция №44 Деление ядер урана, цепная реакция деления. Ядерный реактор.	142
Лекция №45 Принцип относительности в классической механике. Постулаты Эйнштейна. Одновременность.	147
Литература.	152

Введение

Вы начинаете изучение дисциплины «Физика», задача которой – наука изучающая общие свойства и законы движения вещества и поля;

В предлагаемом методическом пособии лаконично рассмотрены основные физические понятия и величины, сформулированы физические законы, приведены основные формулы. В конце каждой темы приводятся контрольные вопросы по теме.

Цель создания данного учебного пособия – в полном объеме воспроизвести соответствующий учебный курс для студентов обучающихся на первом курсе академии.

Лекция №1 Основы молекулярно-кинетической теории и их опытные обоснования

1. Основные положения молекулярно-кинетической теории.

Теория, объясняющая свойства вещества на основе его молекулярного строения и непрерывного движения молекул, называется молекулярно-кинетической теорией (МКТ) МКТ базируется на трех основных положениях:

Первое положение МКТ. *Все вещества состоят из частиц - молекул, атомов или ионов.*

Электронные микроскопы позволяют видеть изображения отдельных атомов и молекул.

Основа строения вещества - атомы. *Атомом называют наименьшую частицу данного химического элемента, сохраняющую его химические свойства.* Атомы тоже имеют сложную структуру, они состоят из элементарных частиц-электронов, протонов, нейтронов. Атомы в целом электронейтральны. Атомы, имеющие избыток или недостаток электронов называются **ионами**. Бывают положительные и отрицательные ионы. Атомы могут объединяться в молекулы.

Молекулой называют наименьшую устойчивую частицу данного вещества, обладающую его химическими свойствами.

Второе положение МКТ.

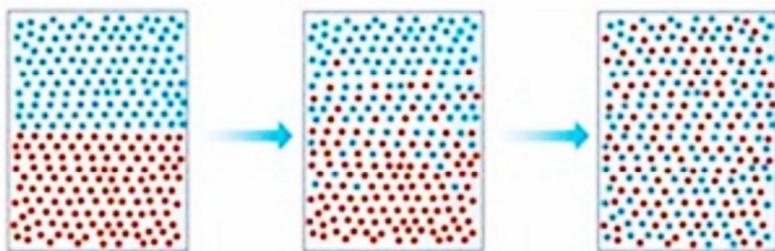
Частицы вещества беспорядочно и непрерывно движутся.

Беспорядочное (хаотичное) движение атомов и молекул в веществе называют **тепловым движением**, потому что скорость движения частиц увеличивается с ростом температуры. Экспериментальным подтверждением непрерывного движения атомов и молекул в веществе является **броуновское движение** **идиффузия**.

Броуновское движение - это тепловое движение мельчайших частиц, взвешенных в жидкости или газе. Оно было открыто английским ботаником Броуном (1827 г.) и явилось наглядным доказательством хаотичного молекулярного движения. Броуновские частицы движутся под влиянием ударов молекул. Из-за хаотичности теплового движения молекул, эти удары никогда не уравновешивают друг друга. В результате скорость броуновской частицы беспорядочно меняется по величине и направлению, а ее

траектория представляет собой сложную зигзагообразную линию. Молекулярно-кинетическая теория броуновского движения была создана А.Эйнштейном (1905 г.).

Явление самопроизвольного проникновения частиц одного вещества в промежутки между частицами другого вещества принято называть диффузией. При этом вещества перемешиваются. Почему же газы или жидкости перемешиваются, хотя их никто специально не перемешивает? Это можно объяснить, если вспомнить, что все вещества состоят из частиц, и между частицами есть промежутки. Раз газы или жидкости перемешиваются сами, значит,



Диффузия в жидкостях

частицы вещества все время движутся, движутся беспорядочно, во всех направлениях. Это движение частиц и есть причина перемешивания двух веществ. Диффузией также называется процесс самопроизвольного выравнивания концентраций молекул жидкости или газа в различных частях объема. Скорость диффузии сильно зависит от длины свободного пробега молекул, то есть от среднего расстояния, которое пролетают молекулы между двумя последовательными соударениями с другими молекулами. Диффузия может происходить не только в газах, но и в жидкостях, и в твердых телах. Причем, диффузия газов происходит очень быстро, а диффузия твердых тел очень медленно. Опыты показывают: чем выше температура, тем диффузия происходит быстрее. Мы ощущаем запахи, благодаря диффузии пахучего вещества в воздухе.

Третье положение МКТ. Частицы вещества взаимодействуют друг с другом.

Если бы между молекулами не существовало сил притяжения, то все тела при любых условиях находились бы только газооб-

разном состоянии. Но одни силы притяжения не могут обеспечить существования устойчивых образований из атомов и молекул. На очень малых расстояниях между молекулами обязательно действуют силы отталкивания. Благодаря этому молекулы не проникают друг в друга и куски вещества никогда не сжимаются до размеров одной молекулы. Молекула - это сложная система, состоящая из отдельных заряженных частиц: электронов и атомных ядер. Хотя в целом молекулы электрически нейтральны, тем не менее, между ними на малых расстояниях действуют значительные электрические силы: происходит взаимодействие электронов и атомных ядер соседних молекул. Если молекулы находятся на расстояниях, превышающих их размеры в несколько раз, то силы взаимодействия практически не сказываются. Силы между электрически нейтральными молекулами являются короткодействующими. На расстояниях, превышающих 2 - 3 диаметра молекул, действуют силы притяжения. По мере уменьшения расстояния между молекулами сила притяжения сначала увеличивается, а затем начинает убывать и убывает до нуля, когда расстояние между двумя молекулами становится равным сумме радиусов молекул. При дальнейшем уменьшении расстояния электронные оболочки атомов начинают перекрываться, и между молекулами возникают быстро нарастающие силы отталкивания.

Скорость частиц вещества

В 1920 году физиком Отто Штерном (1888-1969) впервые были экспериментально определены скорости частиц вещества. Прибор Штерна состоял из двух цилиндров разных радиусов, закрепленных на одной оси. Воздух из цилиндров был откачан до глубокого вакуума. Вдоль оси натягивалась платиновая нить, покрытая тонким слоем серебра. При пропускании по нити электрического тока она нагревалась до высокой температуры, и серебро с ее поверхности испарялось. В стенке внутреннего цилиндра была сделана узкая продольная щель, через которую проникали движущиеся атомы металла, осаждались на внутренней поверхности внешнего цилиндра, образуя хорошо наблюдаемую полоску. Цилиндры начинали вращать с постоянной угловой скоростью. Теперь атомы, прошедшие сквозь прорезь, оседали уже не прямо напротив щели, а смещались на некоторое расстояние, так как за время их полета внешний цилиндр успевал повернуться на некоторый угол. Зная величины радиусов цилиндров, скорость их вращения и величину смещения, легко найти скорость движения атомов. Если бы все атомы двигались с одинаковой скоростью, то при вращении

установки полоска на стенке внешнего цилиндра получалась бы точно такой же тонкой, как и в случае, когда установка не вращалась (см. рис. ниже). Однако при вращении полоска, образованная осевшими на стенку цилиндра атомами, оказывалась размытой. Значит, скорости атомов были разными:

$$v = \frac{\omega R(R-r)}{s} = \text{от } 50 \text{ до } 625 \text{ м/с}$$

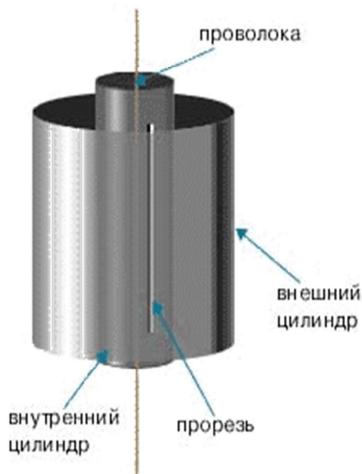
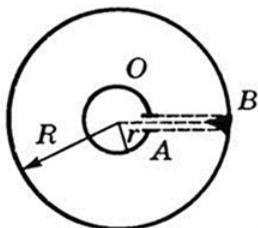
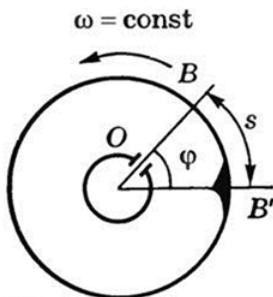


Схема установки Штерна.

a



б

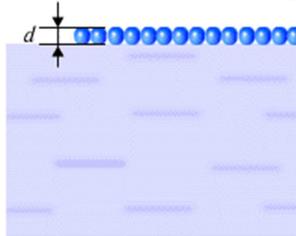


Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте основные положения МКТ.
2. Что такое молекула?
3. Что такое атом?
4. Чем обусловлено броуновское движение?
5. Что такое диффузия?

Лекция №2. Масса и размеры молекул. Идеальный газ. Основное уравнение МКТ

Свойства и поведение тел, в процессах передачи и превращения энергии, определяются движением взаимодействующих друг с другом частиц, из которых состоит тело: атомов, молекул и ионов. Каков размер этих частиц? Как его измерить? Еслисыпать горошины из стакана на стол, то толщина образованного ими на столе слоя окажется равной диаметру горошины. Подобный способ можно использовать для определения размеров частиц вещества. Конечно же, реальная форма частиц вещества не шарообразная, а гораздо более сложная. Но указанный способ позволяет, с известной точностью, оценить размеры частиц вещества. Частицы в жидкости располагаются достаточно плотно (см. рисунок ниже).



d – диаметр частицы вещества

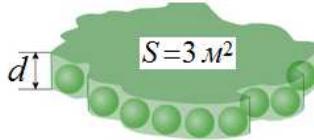
Можно считать, что на каждую частицу вещества приходится объем, равный объему куба, сторона которого равна диаметру частицы. Тогда, зная плотность жидкости и диаметр частицы вещества, а стало быть, и объем частицы, можно оценить массу частицы вещества. Оценки размера и массы молекулы сделаны ниже на рисунках для капли нефти.

Объём капли нефти

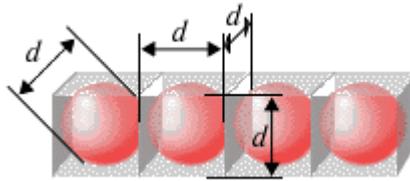
$$V = 1 \text{ мм}^3 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$$



Капля нефти растекается по поверхности воды плёнкой толщиной в одну молекулу



$$d = \frac{V}{S} = \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3}{3 \text{ м}^2} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$



Объём молекулы

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi d^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-10})^3 \approx 3,8 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$$

ρ - ПЛОТНОСТЬ

Масса молекулы

$$m_0 = \rho \cdot V_0 = 800 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot 3,8 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3 \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$$

Оценка объёма и массы молекулы.

В силу того, что массы частиц вещества крайне малы, удобно пользоваться не их абсолютными значениями (в килограммах), а относительными безразмерными величинами, называемыми *относительной атомной массой* и *относительной молекулярной мас-*

сой.

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Относительная молекулярная масса и относительная атомная массы:

$$M_0 = \frac{m_{\text{молекулы}}}{1 \text{ а.е.м.}} \quad A_0 = \frac{m_{\text{атома}}}{1 \text{ а.е.м.}}$$

Одинаковое число молекул разных веществ имеют разную массу. Принято сравнивать число молекул или атомов в данном веществе с числом атомов, содержащихся 0,012 кг углерода. Такое относительное число атомов или молекул характеризуется количеством вещества V :

$$V = \frac{N}{N_A}$$

В Международной системе СИ для измерения количества вещества V введена специальная единица - моль. **1 моль – это такое количество вещества, в котором содержится столько же частиц, сколько атомов содержится в 12 граммах изотопа ^{12}C углерода**.

1 моль любого вещества содержит, по определению, одинаковое число молекул (атомов). **Это число называют числом Авогадро:**

$$N_A = \frac{0,012 \text{ кг/моль}}{12m_0} = \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$$

Число молекул в 1 м^3 любого газа при нормальных условиях называется числом Лошмидта:

$$N_{\text{Л}} = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$$

Масса 1 моля вещества называется молярной массой (M). Численное значение молярной массы, выраженной в г/моль, равно

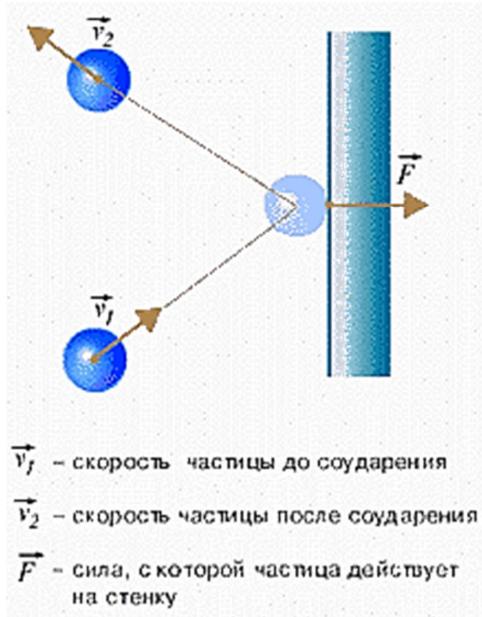
значению относительной атомной или молекулярной массы. Количество вещества, постоянная Авогадро, молярная масса, масса молекулы - эти величины связаны между собой соотношениями, которые приведены ниже на рисунках. Часто при решении той или иной задачи важнее знать не число частиц вещества, а их концентрацию. Концентрация (n) показывает, сколько частиц содержится в единице объема (чаще всего - в одном кубическом метре) данного вещества. Ниже на рисунках приведены формулы для расчёта массы молекулы m_0 , молярной массы M , количества вещества ν , числа молекул N и концентрации молекул n . (V - объем вещества).

Идеальный газ. Основное уравнение МКТ

Для выяснения наиболее общих свойств, присущих всем газам, используют упрощенную модель реальных газов - идеальный газ. Основные отличия идеального газа от реального газа:

1. Частицы идеального газа - сферические тела очень малых размеров, практически материальные точки.
2. Молекулы находятся на больших расстояниях друг от друга и движутся хаотически.
3. Молекулы взаимодействуют по законам упругих столкновений, силами притяжения между молекулами пренебрегают.
4. Скорости молекул разнообразны, но при определённой температуре средняя скорость молекул остаётся постоянной.

Реальные разреженные газы действительно ведут себя подобно идеальному газу. Воспользуемся моделью идеального газа для объяснения происхождения давления газа. Вследствие теплового движения, частицы газа время от времени ударяются о стенки сосуда (Рис.).



При каждом ударе молекулы действуют на стенку сосуда с некоторой силой (Рис.). Складываясь друг с другом, силы ударов отдельных частиц образуют некоторую силу давления, постоянно действующую на стенку. Понятно, что чем больше частиц содержится в сосуде, тем чаще они будут ударяться о стенку сосуда, и тем большей будет сила давления, а значит и давление. Чем быстрее движутся частицы, тем сильнее они ударяют в стенку сосуда. Чем больше масса частицы, тем больше сила удара. Чем быстрее движутся частицы, тем чаще они ударяются о стенки сосуда. Итак, *сила, с которой молекулы действуют на стенку сосуда, прямо пропорциональна числу молекул, содержащихся в единице объема (это число называется концентрацией молекул и обозначается n), массе молекулы m_0 , среднему квадрату их скоростей (средней квадратичной скорости (v_{cp}^2) и площади стенки сосуда.*

В результате получаем:

давление газа прямо пропорционально массе частицы, концентрации частиц и средней квадратичной скорости частицы.

Зависимость давления идеального газа от концентрации и от средней кинетической энергии частиц выражается **основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа**:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v_{cp}^2$$

Мы получили основное уравнение МКТ идеального газа из общих соображений, но его можно строго вывести, опираясь на законы классической механики.

Связь давления газа со средней кинетической энергией молекул

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы:

$$E = \frac{m_0 v^2}{2}$$

Тогда давление идеального газа равно:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v_{cp}^2 \cdot \frac{2}{2} = \frac{2}{3} n \frac{m_0 v_{cp}^2}{2} = \frac{2}{3} n E_{cp}$$

Таким образом: $p = \frac{2}{3} n E_{cp}$

Связь давления с плотностью газа.

Так как $\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 n$, то $p = \frac{1}{3} m_0 n v_{cp}^2 = \frac{1}{3} \rho v_{cp}^2$

Контрольные вопросы:

1. Что принимается за 1 а.е.м.?
2. Что такое относительная молекулярная масса?
3. Что называется количеством вещества? Единица измерения.
4. Каков физический смысл постоянной Авогадро?
5. Что показывает число Лошмидта?
6. Как найти массу одной молекулы?
7. Как найти число молей вещества?
8. Найдите массу одной молекулы воды.
9. Определить массу атома железа и молекулы углекислого

газа.

10. Сколько молекул газа находится в сосуде ёмкостью $0,15\text{ м}^3$ при нормальных условиях?

11. Сколько молей молекул находится в 100 г изделия из алюминия?

Задачи для самостоятельного решения.

(Задачи даны в порядке по нарастающей сложности)

Задача 1. Как изменится давление водорода, находящегося в закрытом сосуде, если каждая молекула распадётся на отдельные атомы, а средние квадраты скоростей не изменятся?

Задача 2. Имеются два одинаковых сосуда. В одном из них находится кислород, а в другом азот. Число молекул каждого газа и средние квадраты их скоростей одинаковы. Давление кислорода равно 32 кПа. Чему равно давление азота?

Задача 3. В результате нагревания газа в закрытом сосуде средняя квадратичная скорость молекул увеличилась в 2 раза. Как изменилось давление?

Задача 4. В сосуд, содержащий некоторое количество атомов гелия, добавляют такое же число молекул водорода, имеющих среднюю кинетическую энергию теплового движения, равную средней кинетической энергии теплового движения атомов гелия. Во сколько раз изменится давление в сосуде?

Задача 5. Рассчитайте силу удара молекулы газа о стенку сосуда, если она движется перпендикулярно стенке со скоростью u , масса молекулы m_0 , а время ее соударения со стенкой Δt .

Задача 6. Сколько ударов Z молекул о стенку площадью $S=1\text{ м}^2$ происходит за 1 с?

Задача 7 (проблемная). Спутник объемом $V = 1000\text{ м}^3$ заполнен гелием. Метеорит пробил в стенке спутника отверстие площадью $S = 1\text{ см}^2$. Оценить время, за которое давление упадет на 1%. Температуру внутри спутника считать неизменной. Средняя квадратичная скорость атомов гелия $v = 500\text{ м/с}$.

Лекция №3 Температура. Абсолютная шкала температур

Молекулярно-кинетическая теория позволяет нам понять, что представляет собой физическая сущность такого сложного по-

нения, как температура. Когда соприкасаются два тела (или несколько тел), между ними происходит теплообмен. Если система тел изолирована (т.е. не взаимодействует с окружающими телами и внешней средой), теплообмен будет длиться до тех пор, пока температуры тел не выровняются, и не установится тепловое равновесие.

Тепловым или термодинамическим равновесием называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры в системе сколь угодно долго остаются неизменными. Это означает, что в системе не меняются объем и давление, не изменяются агрегатные состояния вещества, концентрации веществ. Но микроскопические процессы внутри тела не прекращаются и при тепловом равновесии: меняются положения молекул, их скорости при столкновениях. В системе тел, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, объемы и давления могут быть различными, а температуры обязательно одинаковы.

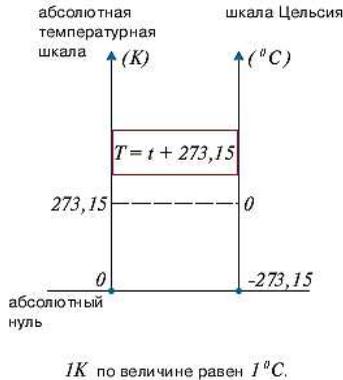
Таким образом, температура характеризует состояние термодинамического равновесия изолированной системы тел.

Для измерения температуры служат специальные приборы - термометры. Их действие основано на том факте, что при изменении температуры, изменяются и другие физические параметры тела, например, такие, как давление и объем.

В 1787 году Ж. Шарль из эксперимента установил прямую пропорциональную зависимость давления газа от температуры. Из опытов следовало, что при одинаковом нагревании давление любых газов изменяется одинаково.

Использование этого экспериментального факта легло в основу создания газового термометра. Если использовать температурную шкалу Цельсия, то экспериментально установленный Шарлем закон имеет вид: $p = p_0(1 + \alpha t^0)$, где p_0 - давление газа при температуре 0°C , α - установленный из опытов температурный коэффициент давления газа. Можно преобразовать формулу, выражающую зависимость давления от температуры, используя **абсолютную температурную шкалу** (T), предложенную Кельвином: $p = T \cdot \text{const}$. ($T = t^0 + 273 \text{ K}$). Измеряемая по шкале Цельсия температура может быть как положительной, так и отрицательной, в то время как абсолютная температура всегда неотрицательна. Наименьшая температура по абсолютной шкале - это абсолютный нуль. При такой температуре $p=0$, что согласно МКТ возможно, если средняя кинетическая энергия молекулы равна нулю.

Таким образом, при абсолютном нуле температуры прекращается тепловое движение частиц вещества. Ниже этой температуры быть уже не может. Эта температура приблизительно равна - 273°С. Единица абсолютной температуры называется кельвином (К).



Опытным путем было установлено, что при постоянном объеме и температуре давление газа прямо пропорционально его концентрации. Объединяя экспериментально полученные зависимости давления от температуры и концентрации, получаем уравнение: $p = nkT$, где - k коэффициент пропорциональности - постоянная Больцмана:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Постоянная Больцмана связывает температуру со средней кинетической энергией движения молекул в веществе. Это одна из наиболее важных постоянных величин в МКТ.

Давление идеального газа равно двум третям средней кинетической энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема.

$$p = \frac{2}{3} nE_{\text{кин}},$$

где $E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}$ - средняя кинетическая энергия молекул.

Так как, с одной стороны, $p = nkT$ - основное уравнение идеального газа.

а с другой $p = \frac{2}{3} nE_{cp}$, то $nkT = \frac{2}{3} nE_{cp}$,

отсюда:

$$T = \frac{1}{k} \cdot \frac{2}{3} E_{cp}$$

Температура прямо пропорциональна средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества. Следовательно, температуру можно назвать мерой средней кинетической энергии частиц, характеризующей интенсивность теплового движения молекул. Этот вывод хорошо согласуется с экспериментальными данными, показывающими увеличение скорости частиц вещества с ростом температуры.

Скорость теплового движения молекул:

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Рассуждения, которые мы проводили для выяснения физической сущности температуры, относятся к идеальному газу. Однако выводы, полученные нами, справедливы не только для идеального газа, но и для реальных газов.

Справедливы они и для жидкостей и твердых тел. В любом состоянии температура вещества характеризует интенсивность теплового движения его частиц.

Контрольные вопросы:

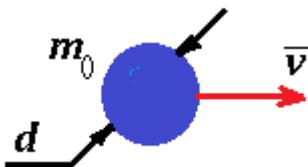
1. Сформулируйте определение температуры тела. Какая единица температуры используется в СИ?
2. Атмосферный воздух состоит из азота, кислорода, аргона и других газов. Одинакова ли тепловая скорость молекул этих газов?
3. Сформулируйте и запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории.
4. При какой температуре тепловая скорость молекул азота равна 900 км/ч?
5. Определите среднюю квадратичную скорость молекул кислорода и аргона в воздухе при температуре 20⁰С.
6. Идеальный газ оказывает на стенки сосуда давление 1,01·10⁵ Па. Тепловая скорость молекул 500 м/с. Найдите плотность

газа.

Лекция №4 Уравнение состояния идеального газа

Молекулярно-кинетическая теория рассматривает идеальный газ как множество частиц (молекул), расстояние между которыми намного превышает размеры самих частиц, находящихся в состоянии непрерывного хаотичного движения. Состояние идеального газа и процессы, проходящие в нем, будут определяться количеством частиц (молекул), из которых состоит газ, и их параметрами, такими как масса, диаметр, скорость, энергия и пр.

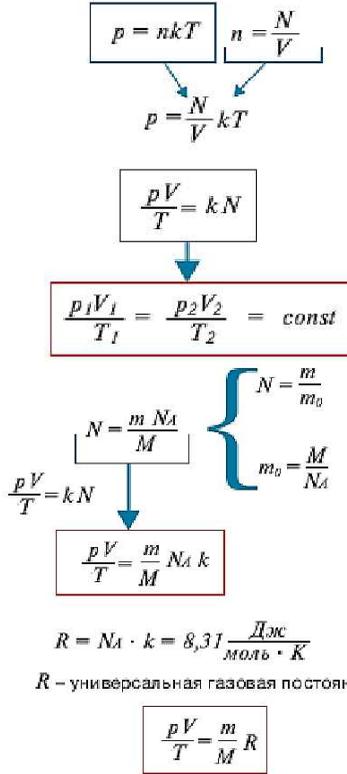
Такие параметры называются *микроскопическими* или *микропараметрами*:



Однако состояние газов можно охарактеризовать небольшим числом физических величин, относящимся не к каждой молекуле, а ко всему газу в целом. Такие параметры называются *макроскопическими* или *макропараметрами*. Если состояние газа не меняется, то не меняются и эти параметры.

Поэтому температуру, объем, давление и некоторые другие параметры принято называть параметрами состояния газа.

Из основного уравнения МКТ идеального газа можно получить уравнение состояния идеального газа, связывающее между собой параметры состояния p , V и T . Если исключить из уравнения МКТ микроскопический параметр - число частиц, - заменив его с помощью известных соотношений макроскопическим параметром - массой, то можно получить другую форму записи уравнения состояния:



Газовые законы. Изопроцессы

С помощью уравнения состояния идеального газа можно исследовать процессы, в которых масса газа и один из параметров - давление, объем или температура - остается постоянным, а изменяются только остальные два и получить теоретически газовые законы для этих условий изменения состояния газа.

Такие процессы называют **изопроцессами**. Законы, описывающие изопроцессы, были открыты задолго до теоретического вывода уравнения состояния идеального газа.

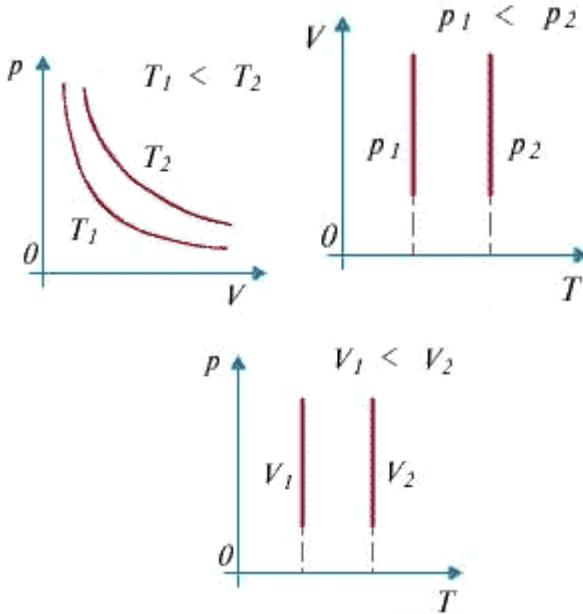
Изотермический процесс - процесс изменения состояния системы при постоянной температуре.

Для данной массы газа произведение давления газа на его объем постоянно, если температура газа не меняется. Это газовый закон **Бойля - Мариотта**.

Для того, чтобы температура газа оставалась в процессе неизменной, необходимо, чтобы газ мог обмениваться теплотой с большой внешней системой - термостатом. Роль термостата может играть внешняя среда (воздух атмосферы). Согласно закону Бойля-Мариотта, давление газа обратно пропорционально его объему:

$$p_1V_1 = p_2V_2 = const.$$

Графическая зависимость давления газа от объема изображается в виде кривой (гиперболы), которая носит название **изотермы**. Разным температурам соответствуют разные изотермы.



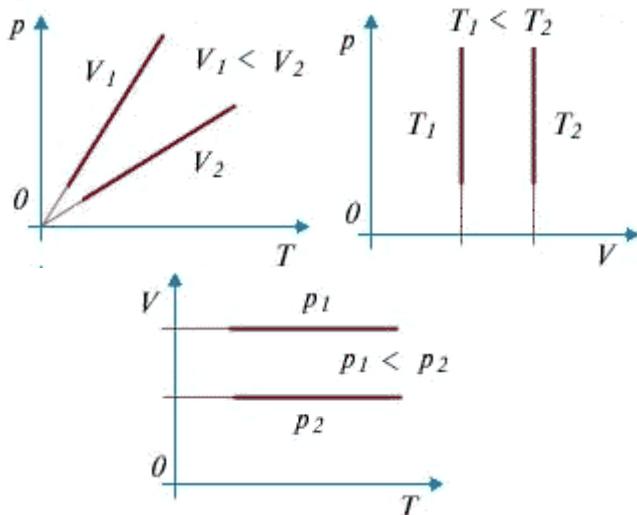
Изохорный процесс - процесс изменения состояния системы при постоянном объеме. Для данной массы газа отношение давления газа к его температуре остается постоянным, если объем газа не меняется. Этот газовый закон Шарля.

Согласно закону Шарля, **давление газа прямо пропорционально его температуре:**

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = const.$$

Графически эта зависимость в координатах P-T изображает-

ся в виде прямой, выходящей из точки $T=0$. Эту прямую называют **изохорой**. Разным объемам соответствуют разные изохоры. Закон Шарля не соблюдается в области низких температур, близких и температуре сжижения (конденсации) газов.

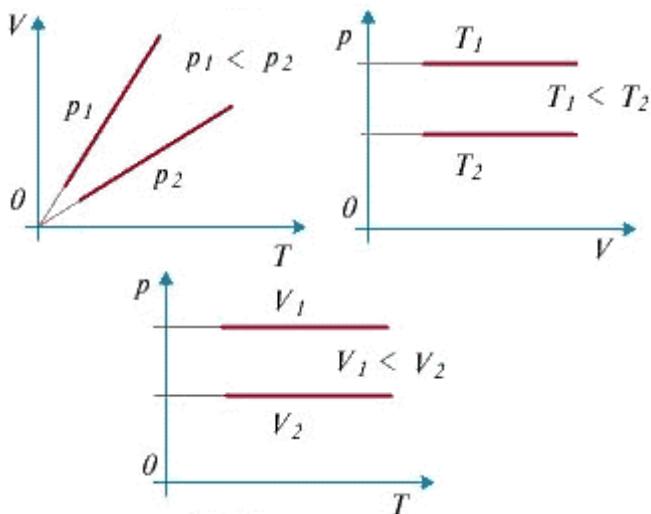


Изобарный процесс - процесс изменения состояния системы при постоянном давлении. *Для газа данной массы отношение объема газа к его температуре остается постоянным, если давление газа не меняется.* Это газовый закон Гей-Люссака.

Согласно закону Гей-Люссака, объем газа прямо пропорционален его температуре:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = const.$$

Графически эта зависимость в координатах V - T изображается в виде прямой, выходящей из точки $T=0$. Эту прямую называют **изобарой**. Разным давлениям соответствуют разные изобары.

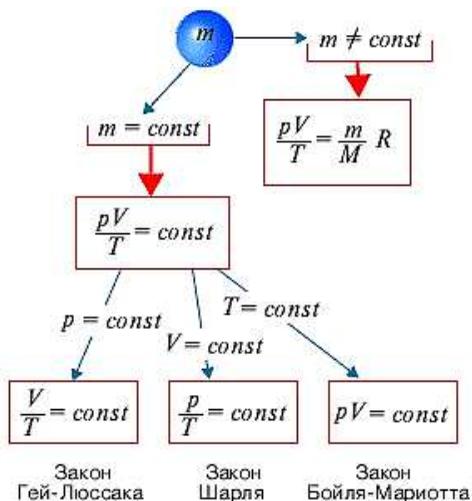


Закон Гей-Люссака, как и закон Шарля, не соблюдается в области низких температур, близких к температуре сжижения (конденсации) газов. Законы Бойля - Мариотта, Гей-Люссака и Шарля называют частными газовыми законами. Они являются частными случаями **объединенного газового закона**:

отношение произведения давления газа и объема к температуре для данной массы газа - величина постоянная:

$$\frac{pV}{T} = const.$$

Вывод частных уравнений газовых законов из объединённого газового закона:



Если идеальный газ является смесью нескольких газов, то согласно **закону Дальтона**, давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов. *Парциальное давление - это такое давление, которое производил бы газ, если бы он один занимал весь объем, равный объему смеси.*

Контрольные вопросы:

- Газ при давлении 0,2 МПа и температуре 15°C имеет объем 5 л. Чему равен объем газа этой массы при нормальных условиях?
- При температуре 27°C давление газа в закрытом сосуде было 75 кПа. Каким будет давление этого газа при температуре -13°C?
- Какие макроскопические параметры связывает уравнение Клапейрона – Менделеева?
- Какие процессы изменения состояния идеального газа называют изопроцессами?
- Какой процесс называют изотермическим? Сформулируйте закон Бойля – Мариотта. Постройте изотермы в осях pV , pT , VT .
- Какой процесс называют изобарным? Сформулируйте закон Гей-Люссака. Постройте изобары в осях pV , pT , VT .
- Какой процесс называют изохорным? Сформулируйте закон Шарля. Постройте изохоры в осях pV , pT , VT .

Лекция № 5. Внутренняя энергия. Работа и количество тепло-

ты, как мера измерения внутренней энергии

Термодинамика – это наука о тепловых явлениях. В противоположность **молекулярно-кинетической теории**, которая делает выводы на основе представлений о молекулярном строении вещества, термодинамика исходит из наиболее общих закономерностей тепловых процессов и свойств макроскопических систем. Выводы термодинамики опираются на совокупность опытных фактов и не зависят от наших знаний о внутреннем устройстве вещества, хотя в целом ряде случаев термодинамика использует молекулярно-кинетические модели для иллюстрации своих выводов.

Термодинамика рассматривает **изолированные** системы тел, находящиеся в состоянии **термодинамического равновесия**. Это означает, что в таких системах **прекратились все наблюдаемые макроскопические процессы**. Важным свойством термодинамически равновесной системы является **выравнивание температуры всех ее частей**.

Если термодинамическая система была подвержена внешнему воздействию, то в конечном итоге она перейдет в другое равновесное состояние. Такой переход называется **термодинамическим процессом**. Если процесс протекает достаточно медленно (в пределах бесконечно медленно), то система в каждый момент времени оказывается близкой к равновесному состоянию. Процессы, состоящие из последовательности равновесных состояний, называются **квазистатическими**.

Одним из важнейших понятий термодинамики является **внутренняя энергия** тела. Все макроскопические тела обладают энергией, заключенной внутри самих тел. С точки зрения молекулярно-кинетической теории внутренняя энергия вещества складывается из кинетической энергии всех атомов и молекул и потенциальной энергии их взаимодействия друг с другом. В частности, внутренняя энергия идеального газа равна сумме кинетических энергий всех частиц газа, находящихся в непрерывном и беспорядочном тепловом движении. Внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры и не зависит от объема (закон Джоуля).

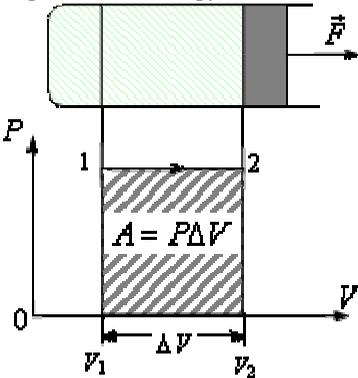
Молекулярно-кинетическая теория приводит к следующему выражению для внутренней энергии одного моля идеального одноатомного газа (гелий, неон и др.), молекулы которого совершают только поступательное движение:

$$U = \frac{3}{2} N_A kT = \frac{3}{2} RT.$$

Поскольку потенциальная энергия взаимодействия молекул зависит от расстояния между ними, в общем случае внутренняя энергия U тела зависит наряду с температурой T также и от объема V :

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

Таким образом, **внутренняя энергия U тела однозначно определяется макроскопическими параметрами, характеризующими состояние тела.** Она не зависит от того, каким путем было реализовано данное состояние. Принято говорить, что внутренняя энергия является функцией состояния.



Внутренняя энергия тела может изменяться, если действующие на него внешние силы совершают работу (положительную или отрицательную). Например, если газ подвергается сжатию в цилиндре под поршнем, то внешние силы совершают над газом некоторую положительную работу A' . В то же время силы давления, действующие со стороны газа на поршень, совершают работу $A = -A'$.

Если объем газа изменился на малую величину ΔV , то газ совершает работу $pS\Delta x = p\Delta V$, где p – давление газа, S – площадь поршня, Δx – его перемещение. При расширении работа, совершаемая газом, положительна, при сжатии – отрицательна. В общем случае при переходе из некоторого начального состояния (1) в конечное состояние (2) **работа газа** выражается формулой:

$$A = P \cdot V$$

Работа численно равна площади под графиком процесса на диаграмме (p, V). Величина работы зависит от того, каким путем совершался переход из начального состояния в конечное.

Процессы, которые можно проводить в обоих направлениях, называются **обратимыми**.

В отличие от газа, жидкости и твердые тела мало изменяют свой объем, так что во многих случаях работой, совершаемой при расширении или сжатии, можно пренебречь. Однако, внутренняя энергия жидких и твердых тел также может изменяться в результате совершения работы. При механической обработке деталей (например, при сверлении) они нагреваются. Это означает, что изменяется их внутренняя энергия. Другим примером может служить опыт Джоуля (1843 г.) по определению *механического эквивалента теплоты*. При вращении вертушки, погруженной в жидкость, внешние силы совершают положительную работу ($A' > 0$); при этом жидкость из-за наличия сил внутреннего трения нагревается, т. е. увеличивается ее внутренняя энергия. В этих двух примерах процессы не могут быть проведены в противоположном направлении. Такие процессы называются *необратимыми*.

Внутренняя энергия тела может изменяться не только в результате совершаемой работы, но и вследствие *теплообмена*. При тепловом контакте тел внутренняя энергия одного из них может увеличиваться, а внутренняя энергия другого – уменьшаться. В этом случае говорят о тепловом потоке от одного тела к другому.

Количеством теплоты Q , полученной телом, называют изменение внутренней энергии тела в результате теплообмена.

Передача энергии от одного тела другому в форме тепла может происходить только при наличии разности температур между ними.

Тепловой поток всегда направлен от горячего тела к холодному.

Количество теплоты Q является энергетической величиной. В СИ количество теплоты измеряется в единицах механической работы – **джоулях**(Дж).

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте определение внутренней энергии тела.
2. От каких величин зависит работа, совершаемая силой давления газа?
3. Какой геометрический смысл имеет работа на диаграмме pV ?
4. Азот массой 0,28 кг нагревается изобарно от температуры 290 К до температуры 490К. Какую работу совершает газ при этом нагревании? Найдите изменение его внутренней энергии.
5. Воздух массой 87 кг нагревается от 10⁰С до 30⁰С. Определите изменение внутренней энергии воздуха. Молярную массу

воздуха следует принять равной $2,9 \cdot 10^{-2}$ кг/моль, воздух считать двухатомным газом.

Лекция №6 Первый закон термодинамики. Применение первого Закона термодинамики к изопроцессам в газе

Из механики известно, что в замкнутой системе механическая энергия сохраняется. Сумма кинетической и потенциальной энергии постоянна.

Однако в реальных условиях, при наличии трения и неупругих соударений, механическая энергия не остается постоянной. Так, если навстречу друг другу движутся два тела равной массы с одинаковыми по модулю скоростями, то после неупругого соударения их кинетическая энергия превратится в нуль. Но при этом возрастет их внутренняя энергия, ибо при неупругом соударении температура тел повышается.

Проделаем опыт: Резким ударом по рукоятке воздушного огнива сожжем воздух в цилиндре. После прекращения действия внешней силы, сжатый воздух расширится и выбросит поршень из цилиндра. Этот опыт показывает, что возможны превращения различных видов энергии: сначала механическая энергия превращается во внутреннюю энергию сжатого газа, затем внутренняя энергия газа превращается в механическую энергию поступательного движения поршня.

Анализ результатов опытов и наблюдений природных явлений, выполненных к середине XIX века, привел немецкого ученого Р.Майера, английского ученого Д-Джоуля и немецкого ученого Г.Гельмгольца к выводу о существовании закона сохранения энергии: При любых взаимодействиях тел энергия не исчезает бесследно и не возникает из ничего. Энергия только передается от одного тела к другому или превращается из одной формы в другую. Внутренняя энергия U системы, изолированной от любых взаимодействий с внешней средой, не изменяется при любых взаимодействиях внутри системы.

Следовательно для изолированной системы $U = \text{const}$ или $U = 0$

В термодинамике рассматривают тела, положение центра тяжести которых, практически не изменяется и механическая энергия

таких тел остается постоянной. При переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия может изменяться, как за счет совершения работы, так и за счет передачи теплоты. Изменение внутренней энергии системы, при переходе ее из одного состояния в другое, равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданной системе:

$$U = A + Q$$

Если система изолирована и под ней не совершается работа, и не обменивается теплотой с окружающей средой $Q = 0$, то $U = U_2 - U_1 = 0$ т.е. $U_1 = U_2$, $U = \text{пост.}$

Внутренняя энергия изолированной системы неизменна.

Часто вместо работы внешней силы над системой A рассматривают работу системы A' , $A' = -A$, получаем $Q = U + A'$

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

Применим первый закон термодинамики к изопроцессам.

1. Изотермический процесс.

При изотермическом расширении и сжатии температура газа не меняется.

$$T = \text{const}, \quad U = 0; Q = A'$$

Если $Q > 0$ система получает тепло; $A' > 0$ газ совершает положительную работу.

$Q < 0$ - система отдает тепло;

$A' < 0$, $A > 0$. Работа внешних сил положительна.

2. Изохорный процесс.

$$V - \text{пост.} \quad V = 0, A' = P \quad V = 0, A' = 0$$

$U = Q$, $Q > 0$, $U > 0$ - увеличивается

$Q < 0$, $U < 0$ - уменьшается

Изменение внутренней энергии равно количеству теплоты.

3. Изобарный процесс.

P - пост. При нагревании газа (передача ему количества теплоты) происходит увеличение внутренней энергии и совершение работы расширения

$$Q = U + A = U + P \cdot V$$

При изобарном сжатии газа необходимо внешним силам совершить работу, чтобы давление осталось постоянным. Газ должен отдать окружающим телам некоторое количество теплоты

$$Q > A \text{ (при сжатии)}$$

$$U = A - Q$$

$$Q = A - U, \quad U < 0$$

4. Адиабатный процесс.

$Q = 0$ Адиабатным называется процесс изменения объема и давления газа при отсутствии теплообмена с окружающими телами. Быстро текущие процессы могут быть близки к адиабатным, если время за которое происходит изменение объема газа, значительно меньше времени, необходимого для установления теплового равновесия газа с окружающими телами.

Примеры:

а) сжатие воздуха в воздушном огнive (опыт);

б) сжатие воздуха в дизеле;

в) образование облаков.

$Q = 0, \quad U = -A$ - увеличение при сжатии

$U = AU$ - уменьшение при расширении

Температура воздуха при адиабатном расширении понижается.

Опыт: с вылетающей из бутылки пробки, содержащей насыщенный водяной пар, при накачивании в нее воздуха, в ней образуется туман.

Поскольку, при адиабатном сжатии температура газа повышается, давление растет быстрее, чем при изотермическом процессе.

Контрольные вопросы:

1. На что расходуется, согласно первому закону термодинамики, количество теплоты, подведенное к системе?

2. Сформулируйте первый закон термодинамики для изохорного процесса? для изотермического процесса?

3. Кислород массой 32 г находится в закрытом сосуде под давлением 0,1 МПа при температуре 17°С. После нагревания давление в сосуде увеличилось в 2 раза. Найдите: 1) объем сосуда; 2) температуру, до которой нагрели газ; 3) количество теплоты, сообщенное газу.

4. Какой процесс называется адиабатным? Сформулируйте первый закон термодинамики для адиабатного процесса.

5. При адиабатном расширении воздуха была совершена работа 500 Дж. Чему равно изменение внутренней энергии воздуха?

Лекция №7 Принцип действия тепловых двигателей

Развитие энергетики является одной из важнейших предпосылок научно-технического прогресса. Мощный расцвет промышленности и транспорта в XIX веке был связан с изобретением и усовершенствованием тепловых двигателей.

Тепловые двигатели – устройства, преобразующие внутреннюю энергию топлива в механическую.

1. Принцип работы тепловых двигателей.

В работе всех двигателей можно выделить следующие общие черты:

1) энергия топлива → механическая энергия.

При этом энергия топлива сначала превращается во внутреннюю энергию газа или пара, нагретых до высокой температуры.

2) Необходимо наличие двух тел с различными температурами. Они называются нагревателем и холодильником. Кроме того, необходимо рабочее тело (пар или газ).

В процессе работы теплового двигателя рабочее тело забирает у нагревателя некоторое количество теплоты Q_1 и превращает часть его в механическую энергию A , а непревращенную часть теплоты Q_2 передает холодильнику.

По закону сохранения и превращения энергии $A=Q_1-Q_2$

3) Работа любого теплового двигателя циклична.

– Каждый цикл состоит из разных процессов:

– получение энергии от нагревателя;

– рабочего хода (расширения рабочего тела и превращения части полученной энергии в механическую);

– передачи неиспользованной части холодильнику.

Наличие нагревателя, рабочего тела и холодильника – прин-

ципиально необходимое условие для непрерывной циклической работы любого теплового двигателя.

2. КПД теплового двигателя.

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}; \eta < 1, Q_2 < 0$$

Для идеального двигателя цикл Карно (С. Карно – французский физик):

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

не зависит от Q , ρ , V , m топлива;

Контрольные вопросы:

1. Какие устройства относятся к тепловым двигателям? Почему в качестве рабочего тела в тепловых двигателях используют газы и пары?

2. Почему наличие нагревателя и холодильника является необходимым условием для циклического получения полезной механической работы в тепловом двигателе?

3. Как определяют КПД замкнутого цикла?

4. Количество теплоты, получаемое двигателем от нагревателя, 100 Дж, а отдаваемое холодильнику 75 Дж. Найдите КПД двигателя и совершаемую работу.

5. Чему равно максимальное теоретическое значение КПД паровой машины, работающей в интервале температур 100 – 400⁰С?

Лекция 8. Насыщенный пар и его свойства. Влажность воздуха

Жидкости имеют свойство испаряться. Если бы мы капнули на стол по капле воды, эфира и ртути (только не делайте этого в домашних условиях!), смогли бы наблюдать, как постепенно капли исчезают – испаряются. Одни жидкости испаряются быстрее, другие медленнее. Процесс испарения жидкости еще называется парообразованием. А обратный процесс превращения пара в жидкость – конденсацией.

Эти два процесса иллюстрируют **фазовый переход** – процесс перехода веществ из одного агрегатного состояния в другое:

- испарение (переход из жидкого в газообразное состояние);
- конденсация (переход из газообразного состояния в жидкое);

- десублимация (переход из газообразного состояния в твердое, минуя жидкую фазу);
- возгонка, она же сублимация (переход из твердого в газообразное состояние, минуя жидкое).

Но вернемся к парообразованию. Мы продолжим экспериментировать и нальем жидкость – воду, например, в открытый сосуд, а к нему подсоединим манометр. Невидимое глазу, в сосуде происходит испарение. Все молекулы жидкости находятся в непрерывном движении. Некоторые движутся так быстро, что их кинетическая энергия оказывается сильнее той, что связывает молекулы жидкости вместе.

Покинув жидкость, эти молекулы продолжают хаотически двигаться в пространстве, подавляющее их большинство рассеивается в нем – так образуется **ненасыщенный пар**. Лишь небольшая их часть возвращается обратно в жидкость.

Если закроем сосуд, молекул пара постепенно будет становиться все больше. И все больше их будет возвращаться в жидкость. При этом будет увеличиваться давление пара. Это зафиксирует подсоединенный к сосуду манометр.

Спустя какое-то время число молекул, вылетающих из жидкости и возвращающихся в нее, сравняется. Давление пара перестанет изменяться. В результате **насыщения пара** установится термодинамическое равновесие системы жидкость-пар. То есть испарение и конденсация будут равны.

Свойства насыщенного пара

Чтобы их проиллюстрировать наглядно, используем еще один эксперимент. Призовите всю силу своего воображения, чтобы представить его. Итак, возьмем ртутный манометр, состоящий из двух колен – сообщающихся трубок. В оба налита ртуть, один конец открыт, второй запаян и над ртутью в нем находится еще некоторое количество эфира и его насыщенного пара. Если опускать и поднимать не запаянное колено, уровень ртути в запаянном будет также опускаться и подниматься.

При этом будет изменяться и количество (объем) насыщенного пара эфира. Разность уровней ртутных столбиков в обоих коленах манометра показывает давление насыщенного пара эфира. Оно будет сохраняться неизменным все время.

Отсюда вытекает свойство насыщенного пара – его давление не зависит от занимаемого им объема. Давление насыщенных паров различных жидкостей (воды и эфира, к примеру) разное при одинаковой температуре.

Однако температура насыщенного пара имеет значение. Чем выше температура, тем выше и давление. Давление насыщенного пара с увеличением температуры возрастает быстрее, чем это происходит с ненасыщенным паром. Температура и давление ненасыщенного пара связаны линейной зависимостью.

Можно провести еще один любопытный опыт. Взять пустую колбу без паров жидкости, закрыть ее и подсоединить манометр. Постепенно, по капле, подавать внутрь колбы жидкость. По мере поступления жидкости и ее испарения устанавливается давление насыщенного пара, наибольшее для данной жидкости при данной температуре.

Относительной влажностью воздуха φ называют отношение парциального давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению p_0 насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%$$

Существует несколько методов определения относительной влажности воздуха.

I. *Психрометром* – по разности температур термометров, резервуар у одного из которых окружен полоской ткани, опущенной в воду, а у другого остается сухим, и специальной таблице.

II. *Конденсационным гигрометром* – путем нахождения точки росы, т.е. температуры, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным, и с помощью таблицы зависимости давления насыщенного пара от температуры.

Чтобы легче было заметить появление росы на поверхности охлаждаемой камеры 1, ее окружают металлическим кольцом 2 с теплоизолирующей прокладкой. Наблюдение за появлением налета росы проводят путем сравнения поверхности охлажденной камеры с блестящей поверхностью кольца, которая во время опыта остается без изменений.

III. *Волосной гигрометр* – непосредственно показывает относительную влажность воздуха в процентах.

Контрольные вопросы:

1. Какое состояние называют паром?
2. Какой пар считают насыщенным?
3. Сформулируйте определение процессов испарения и ки-

пения. При каких условиях происходят эти процессы?

4. Сформулируйте определение относительной влажности воздуха.

5. Давление водяного пара в воздухе при температуре 30⁰С равно 2,52 кПа. Определите относительную влажность воздуха, если давление насыщенного пара при этой температуре равно 4,2 кПа.

Лекция №9. Свойства жидкости

Строение жидкостей. Жидкое состояние, занимая промежуточное положение между газами и кристаллами, сочетает в себе некоторые черты обоих этих состояний. В частности, для жидкостей, как и для кристаллических тел, характерно наличие определённого объёма, и вместе с тем жидкость, подобно газу, принимает форму того сосуда, в котором она находится, но в отличие от газов не занимает весь объём сосуда. Каждая молекула жидкости, также как и в твердом теле, «зажата» со всех сторон соседними молекулами и совершает тепловые колебания около некоторого положения равновесия. Однако, время от времени любая молекула может переместиться в соседнее вакантное место. Такие перескоки в жидкостях происходят довольно часто; поэтому молекулы не привязаны к определенным центрам, как в кристаллах и могут перемещаться по всему объему жидкости. Этим объясняется текучесть жидкостей. Согласно рентгенографическим исследованиям, в отношении характера расположения частиц жидкости занимают промежуточное состояние. В расположении частиц жидкости наблюдается так называемый ближний порядок.

Жидкости, как и твердые тела, изменяют свой объем при изменении температуры. Для не очень больших интервалов температур относительное изменение объема $\Delta V / V_0$ пропорционально изменению температуры ΔT

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T.$$

Коэффициент β называют температурным коэффициентом объемного расширения. Этот коэффициент у жидкостей в десятки раз больше, чем у твердых тел. У воды, например, при температуре 20 °С $\beta_w \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, у стали $\beta_{ст} \approx 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, у кварцевого стекла $\beta_{кв} \approx 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избытком потенциальной энергии по сравнению с энергией молекул,

находящихся внутри жидкости. Как и любая механическая система, поверхностный слой жидкости самопроизвольно переходит в такое состояние, при котором потенциальная энергия его минимальна, при этом площадь свободной поверхности жидкости сокращается.

Сила, обусловленная взаимодействием молекул жидкости, вызывающая сокращение ее свободной поверхности и направленная по касательной к этой поверхности, называется силой поверхностного натяжения $F_{\text{пл}}$.

Величина, равная силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины границы свободной поверхности жидкости, называется коэффициентом поверхностного натяжения σ или просто поверхностным натяжением.

Молекулы в пограничном слое жидкости, в отличие от молекул в ее глубине, окружены другими молекулами той же жидкости не со всех сторон. Силы межмолекулярного взаимодействия, действующие на одну из молекул внутри жидкости со стороны соседних молекул, в среднем взаимно скомпенсированы. Любая молекула в пограничном слое притягивается молекулами, находящимися внутри жидкости (силами, действующими на данную молекулу жидкости со стороны молекул газа (или пара) можно пренебречь). В результате появляется некоторая равнодействующая сила, направленная вглубь жидкости. Если молекула переместиться с поверхности внутрь жидкости, силы межмолекулярного взаимодействия совершат положительную работу. Наоборот, чтобы вытащить некоторое количество молекул из глубины жидкости на поверхность (т. е. увеличить площадь поверхности жидкости), надо затратить положительную работу внешних сил $\Delta A_{\text{внеш}}$, пропорциональную изменению ΔS площади поверхности:

$$\Delta A_{\text{внеш}} = \sigma \Delta S.$$

Коэффициент поверхностного натяжения σ может быть определен как модуль силы поверхностного натяжения, действующей на единицу длины линии, ограничивающей поверхность.

$$F_{\text{н}} \Delta x = \sigma 2L \Delta x \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{F_{\text{н}}}{2L}$$

Коэффициент поверхностного натяжения можно определить различными методами: методом отрыва капель, отрыва рамки, методом подъема воды в капилляре.

Форма которую принимает свободная поверхность жидкости, зависит от сил поверхностного натяжения, от взаимодействия с

ограничивающими поверхность твёрдыми стенками, а так же от силы земного тяготения, действующей на жидкость. Особыми оказываются условия равновесия на линии разреза жидкость - газ - твёрдая стенка в тонких плёнках и в узких сосудах – капиллярах. Капиллярные эффекты, широко известные в технике и быту, в основном обусловлены тем, что благодаря действию сил поверхностного натяжения давление в нутрии жидкости может отличаться на некоторую величину Δp от внешнего давления p газа или пара над поверхностью жидкости.

$$h=2\alpha/\rho g r$$

-высота поднятия или опускания жидкости в капилляре обратно пропорциональна его радиусу.

(α -коэффициент поверхностного натяжения; ρ -плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; r - радиус капилляра.)

Контрольные вопросы:

1. Почему число молекул, приходящихся на единицу поверхности жидкости, не изменяется при увеличении площади поверхностей?

2. Что характеризует коэффициент поверхностного натяжения жидкости?

3. Охарактеризуйте явление смачивания. При каких условиях жидкость смачивает (не смачивает) поверхность твердого тела?

4. Как высота подъема жидкости в капилляре зависит от его диаметра?

5. Открытая с обоих концов капиллярная трубка диаметром 0,2 мм опущена вертикально в воду на глубину 10 см. На какую высоту над уровнем жидкости в сосуде поднимется вода в капилляре? Чему равна масса воды в капилляре?

Лекция №10. Кристаллические и аморфные тела

Все твёрдые тела делятся на кристаллические и аморфные.

Кристаллы - это твёрдые тела, атомы или молекулы которых занимают определённые, упорядоченные положения в пространстве. Кристаллы одного и того же вещества имеют разнообразную форму. Углы между отдельными гранями кристаллов одинаковы. Некоторые формы кристаллов симметричны. Цвет кристаллов различен, — очевидно, это зависит от примесей.

Для наглядного представления внутренней структуры кристалла используют его изображение с помощью кристаллической решётки. Различают несколько типов кристаллов:

1)Ионные. 2) атомные 3)металлические 4)молекулярные.

Ионными называют такие кристаллические решетки, в узлах которых расположены ионы. Их образуют вещества с ионной связью, которой могут быть связаны как простые ионы Na^+ , Cl^- , так и сложные SO_4^{2-} , OH^- . Таким образом, ионные кристаллические решетки имеют соли, некоторые оксиды и гидроксиды металлов, т.е. те вещества, в которых существует ионная химическая связь. Рассмотрим кристалл хлорида натрия, он состоит из положительно чередующихся ионов Na^+ и отрицательных Cl^- , вместе они образуют решетку в виде куба. Связи между ионами в таком кристалле чрезвычайно устойчивы. Из-за этого вещества с ионной решеткой обладают сравнительно высокой прочностью и твердостью, они тугоплавки и нелетучи.

Атомными кристаллическими решетками называют такие кристаллические решетки, в узлах которых находятся отдельные атомы. В подобных решетках атомы соединяются между собой очень крепкими ковалентными связями. К примеру, алмаз – одно из аллотропных видоизменений углерода.

Вещества с атомной кристаллической решеткой не широко распространены в природе. К ним относятся кристаллический бор, кремний и германий, а также сложные вещества, например такие, в составе которых есть оксид кремния (IV) – SiO_2 : кремнезем, кварц, песок, горный хрусталь.

Подавляющее большинство веществ с атомной кристаллической решеткой имеют очень высокие температуры плавления (у алмаза она превышает 3500°C), такие вещества прочны и тверды, практически не растворимы.

Молекулярными называют такие кристаллические решетки, в узлах которых расположены молекулы. Химические связи в этих молекулах могут быть также, как полярными (HCl , H_2O), так и неполярными (N_2 , O_3). И хотя атомы внутри молекул связаны очень крепкими ковалентными связями, между самими молекулами действует слабые силы межмолекулярного притяжения. Именно поэтому вещества с молекулярными кристаллическими решетками характеризуются малой твердостью, низкой температурой плавления, летучестью.

Примерами таких веществ могут послужить твердая вода – лед, твердый оксид углерода (IV) – «сухой лед», твердые хлоро-

дород и сероводород, твердые простые вещества, образованные одно – (благородные газы), двух – (H_2 , O_2 , Cl_2 , N_2 , I_2), трех – (O_3), четырех – (P_4), восьмиатомными (S_8) молекулами. Подавляющее большинство твердых органических соединений обладают молекулярными кристаллическими решетками (нафталин, глюкоза, сахар).

Для металлов характерна **металлическая** кристаллическая решетка. В ней имеется металлическая связь между атомами. В металлических кристаллах ядра атомов расположены таким образом, чтобы их упаковка была как можно более плотной. Связь в таких кристаллах является делокализованной и распространяется на весь кристалл. Металлические кристаллы обладают высокой электрической проводимостью и теплопроводностью, металлическим блеском и непрозрачностью, легкой деформируемостью.

Идеальная форма кристалла имеет вид многогранника. Такой кристалл ограничен плоскими гранями, прямыми ребрами и обладает симметрией. В кристаллах можно найти различные элементы симметрии. Кристаллические тела делятся на монокристаллы и поликристаллы.

Монокристаллы - одиночные кристаллы. (кварц, слюда...) Идеальная форма кристалла имеет вид многогранника. Такой кристалл ограничен плоскими гранями, прямыми ребрами и обладает симметрией. В кристаллах можно найти различные элементы симметрии (показывает на таблице, где изображены кристаллы). плоскость симметрии, ось симметрии, центр симметрии. На первый взгляд кажется, что число видов симметрии может быть бесконечно большим. В 1867 г. русский инженер А. В. Гадолин впервые доказал, что кристаллы могут обладать лишь 32 видами симметрии.. Убедимся в симметрии кристаллика снега- снежинки (рис. снежинки)

Симметрия кристаллов и другие их свойства, о которых мы будем говорить далее, привели к важной догадке о закономерностях в расположении частиц, составляющих кристалл. Может кто-нибудь из вас попытается ее сформулировать?

Частицы в кристалле образуют правильную пространственную решетку. Пространственные решетки различных кристаллов различны. Перед вами модель пространственной решетки поваренной соли. Шарики одного цвета имитируют ионы натрия, шарики другого цвета — ионы хлора. Если соединить эти узлы прямыми линиями, то образуется пространственная решетка, аналогичная представленной модели. В каждой пространственной решетке можно выделить некоторые

повторяющиеся элементы ее структуры, иначе говоря, элементарную ячейку. К наиболее простым элементарным ячейкам относятся куб, объемно-центрированный куб, гранецентрированный куб, гексагональная призма. (Показывает на таблице.) Понятие о пространственной решетке позволило объяснить свойства кристаллов.

Рассмотрим их свойства.

1) Внешняя правильная геометрическая форма. (модели)

2) Постоянная температура плавления.

3) Анизотропия – различие в физических свойствах от выбранного в кристалле направления. (показывает пример со слюдой)

Но монокристаллы в природе встречаются редко. Но такой кристалл можно вырастить в искусственных условиях. (доклады о выращивании кристаллов)

Поликристаллы - это твёрдые тела, состоящие из большого числа кристаллов, беспорядочно ориентированных друг относительно друга. (сталь, чугун ...)

Поликристаллы тоже имеют правильную форму и ровные грани, температура плавления у них имеет постоянное значение для каждого вещества. Но в отличие от монокристаллов, поликристаллы изотропны, т.е. физические свойства одинаковые по всем направлениям. Это объясняется тем, что кристаллы внутри располагаются беспорядочно, и каждый в отдельности обладает анизотропией, а в целом кристалл изотропен.

Кроме кристаллических тел существуют - аморфные тела.

Аморфные тела – это твёрдые тела, где сохраняется только ближний порядок в расположении атомов. (Кремнезём, смола, стекло, канифоль, сахарный леденец).

Аморфные тела:

1. Не имеют постоянной температуры плавления.

2. Не имеют кристаллического строения.

3. Изотропны.

4. Обладают текучестью.

5. Имеют только «ближний порядок» в расположении частиц.

6. Способны переходить в кристаллическое и жидкое состояние.

Главный признак **аморфного** (от греческого "*аморфос*" - бесформенный) состояние вещества - отсутствие атомной или молекулярной решетки, то есть трехмерной периодичности структу-

ры, характерной для кристаллического состояния.

Например, кварц может находиться как в кристаллическом состоянии, так и аморфном - кремнезём. (См. рис в учебнике). Они не имеют постоянной температуры плавления и обладают текучестью (показывает сгибание стеклянной палочки над спиртовкой). Аморфные тела изотропны, при низких температурах они ведут себя подобно кристаллическим телам, а при высокой подобны жидкостям.

Контрольные вопросы:

1. Чем отличаются аморфные тела от кристаллических?
2. Перечислите типы кристаллических структур.
3. Какого вида деформации испытывают: а) ножка скамейки; б) сиденье стула; в) натянутая струна гитары; г) винт мясорубки; д) сверло; е) зубья пилы?
4. Вещество, обладающее свойствами: невысокая прочность, легкоплавкость, неэлектропроводность водного раствора, имеет кристаллическую решетку какого типа?
5. Какие свойства характерны для веществ с ионной кристаллической решеткой?

Лекция №11. Испарение, сублимация, плавление и кристаллизация

Как в жидкостях, так и в твердых телах всегда имеется некоторое число молекул, энергия которых достаточна для преодоления притяжения к другим молекулам и которые способны оторваться от поверхности жидкости или твердого тела и перейти в окружающее их пространство. Этот процесс для жидкости называется **испарением** (или **парообразованием**), для твердых тел — **сублимацией** (или **возгонкой**).

Испарение жидкостей идет при любой температуре, но его интенсивность с повышением температуры возрастает. Наряду с процессом испарения происходит компенсирующий его процесс **конденсации** пара в жидкость. Если число молекул, покидающих жидкость за единицу времени через единицу поверхности, равно числу молекул, переходящих из пара в жидкость, то наступает **динамическое равновесие** между процессами испарения и конденсации. **Пар**, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называется насыщенным.

Для большинства твердых тел процесс сублимации при обычных температурах незначителен и давление пара над поверх-

ностью твердого тела мало; оно повышается с повышением температуры. Интенсивно сублимируют такие вещества, как нафталин, камфора, что обнаруживается по резкому, свойственному им запаху. Особенно интенсивно сублимация происходит в вакууме — этим пользуются для изготовления зеркал. Известный пример сублимации — превращение льда в пар — мокрое белье высыхает на морозе.

Если твердое тело нагревать, то его *внутренняя энергия* (складывается из энергии колебаний частиц в узлах решетки и энергии взаимодействия этих частиц) возрастает. При повышении температуры амплитуда колебаний частиц увеличивается до тех пор, пока кристаллическая решетка не разрушится, — твердое тело плавится. По мере сообщения твердому телу теплоты его температура повышается, а при температуре плавления $T_{пл}$, начинается переход тела из твердого состояния в жидкое. Температура $T_{пл}$ остается постоянной до тех пор, пока весь кристалл не расплавится, и только тогда температура жидкости вновь начнет повышаться.

Нагревание твердого тела до $T_{пл}$ еще не переводит его в жидкое состояние, поскольку энергия частиц вещества должна быть достаточной для разрушения кристаллической решетки. В процессе плавления теплота, сообщаемая веществу, идет на совершение работы по разрушению кристаллической решетки, а поэтому $T_{пл} = \text{const}$ до расплавления всего кристалла. Затем подводимая теплота пойдет опять-таки на увеличение энергии частиц жидкости и ее температура начнет повышаться. Количество теплоты, необходимое для расплавления 1 кг вещества, называется **удельной теплотой плавления**.

Если жидкость охлаждать, то процесс протекает в обратном направлении: сначала температура жидкости понижается, затем при постоянной температуре, равной $T_{пл}$, начинается **кристаллизация**, после ее завершения температура кристалла начнет понижаться. Для кристаллизации вещества необходимо наличие так называемых **центров кристаллизации** — кристаллических зародышей, которыми могут быть не только кристаллики образующегося вещества, но и примеси, а также пыль, сажа и т. д. Отсутствие центров кристаллизации в чистой жидкости затрудняет образование микроскопических кристалликов, и вещество, оставаясь в жидком состоянии, охлаждается до температуры, меньшей температуры кристаллизации, при этом образуется **переохлажденная жидкость**. При сильном переохлаждении начинается спонтанное образование центров кристаллизации и вещество кристаллизуется довольно быстро.

Обычно переохлаждение расплава происходит от долей до десятков градусов, но для ряда веществ может достигать сотен градусов. Из-за большой вязкости сильно переохлажденные жидкости теряют текучесть, сохраняя, как в твердые тела, свою форму. Эти тела получили название **аморфных твердых тел**; к ним относятся смолы, мех, сургуч, стекло. Аморфные тела, являясь, таким образом, переохлажденными жидкостями, **изотропны**, т. е. их свойства во всех направлениях одинаковы; для них, как и для жидкостей, характерен *ближний, порядок* в расположении частиц; в них в отличие от жидкостей подвижность частиц довольно мала. Особенностью аморфных тел является отсутствие у них определенной точки плавления, т. е. невозможно указать определенную температуру, выше которой можно было бы констатировать жидкое состояние, а ниже — твердое. Из опыта известно, что в аморфных телах со временем может наблюдаться процесс кристаллизации, например в стекле появляются кристаллики; оно, теряя прозрачность, начинает мутнеть и превращаться в поликристаллическое тело.

В последнее время широкое распространение в народном хозяйстве получили **полимеры** — органические аморфные тела, молекулы которых состоят из большого числа одинаковых длинных молекулярных цепочек, соединенных химическими (валентными) связями. К полимерам относятся как естественные (крахмал, белок, каучук, клетчатка и др.), так и искусственные (пластмасса, резина, полистирол, лавсан, капрон и др.) органические вещества. Полимерам присущи прочность и эластичность; некоторые полимеры выдерживают растяжение, в 5—10 раз превышающее их первоначальную длину. Это объясняется тем, что длинные молекулярные цепочки могут при деформации либо сворачиваться в плотные клубки, либо вытягиваться в прямые линии. Эластичность полимеров проявляется только в определенном интервале температур, ниже которого они становятся твердыми и хрупкими, а выше — пластичными. Хотя синтетических полимерных материалов создано очень много (искусственные волокна, заменители кожи, строительные материалы, заменители металлов и др.), но теория полимеров до настоящего времени полностью не разработана. Ее развитие определяется запросами современной техники, требующей синтеза полимеров с заранее заданными свойствами.

Контрольные вопросы:

1. Можно ли в алюминиевом сосуде расплавить медь? Цинк? Ответ обоснуйте.

2. Почему только в твердом агрегатном состоянии тела сохраняют свою форму? Чем отличается внутреннее строение твердых тел от внутреннего строения жидкостей и газов?

3. Какое количество теплоты необходимо для плавления 0,5 кг льда. Начальная температура льда -10°C .

4. В каком состоянии (твердом или жидком) находится серебро и вольфрам при температуре 1000°C ?

5. Что необходимо сделать, чтобы расплавить тело? Разрушить кристаллическую решетку?

Лекция №12. Электризация тел. Закон Кулона

Электрический заряд – это физическая величина, характеризующая свойство частиц или тел вступать в электромагнитные силовые взаимодействия.

Электрический заряд обычно обозначается буквами q или Q . Совокупность всех известных экспериментальных фактов позволяет сделать следующие выводы:

- Существует два рода электрических зарядов, условно названных положительными и отрицательными.

- Заряды могут передаваться (например, при непосредственном контакте) от одного тела к другому. В отличие от массы тела электрический заряд не является неотъемлемой характеристикой данного тела. Одно и то же тело в разных условиях может иметь разный заряд.

- Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются. В этом также проявляется принципиальное отличие электромагнитных сил от гравитационных. Гравитационные силы всегда являются силами притяжения.

Одним из фундаментальных законов природы является экспериментально установленный **закон сохранения электрического заряда**.

В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной.

С современной точки зрения, носителями зарядов являются элементарные частицы. Все обычные тела состоят из атомов, в состав которых входят положительно заряженные протоны, отрицательно заряженные электроны и нейтральные частицы – нейтроны. Протоны и нейтроны входят в состав атомных ядер, электроны образуют электронную оболочку атомов. Электрические заряды протона и электрона по модулю в точности одинаковы и равны элементарно-

му заряду e .

$$e = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

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

На основании многочисленных опытов Кулон установил следующий закон:

Силы взаимодействия неподвижных зарядов прямо пропорциональны произведению модулей зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}.$$

Взаимодействие неподвижных электрических зарядов называют *электростатическим* или *кулоновским* взаимодействием. Раздел электродинамики, изучающий кулоновское взаимодействие, называют *электростатикой*.

Закон Кулона справедлив для точечных заряженных тел. Практически закон Кулона хорошо выполняется, если размеры заряженных тел много меньше расстояния между ними.

Коэффициент пропорциональности k в законе Кулона зависит от выбора системы единиц. В Международной системе СИ за единицу заряда принят **кулон** (Кл).

Кулон – это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А. Единица силы тока (ампер) в СИ является наряду с единицами длины, времени и массы **основной единицей измерения**.

Коэффициент k в системе СИ обычно записывают в виде:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

где

– *электрическая постоянная*.

Опыт показывает, что силы кулоновского взаимодействия подчиняются **принципу суперпозиции**:

если заряженное тело взаимодействует одновременно с несколькими заряженными телами, то результирующая сила, действующая на данное тело, равна векторной сумме сил, действующих на это тело со стороны всех других заряженных тел.

Контрольные вопросы:

1. Что называется электрическим зарядом? Единица измерения электрического заряда?
2. Математическая запись и формулировка закона Кулона, какие величины входят в его формулу?
3. Математическая запись и формулировка закона сохранения электрического заряда? Какие величины входят в его формулу?
4. Чему равен коэффициент пропорциональности в законе Кулона?
5. Заряд $1,4 \cdot 10^{-9}$ Кл в керосине на расстоянии 0,005 м притягивает к себе второй заряд с силой $2 \cdot 10^{-4}$ Н. Диэлектрическая проницаемость керосина равна 2. Величина второго заряда равна

Лекция №13 Электрическое поле. Напряженность электрического поля

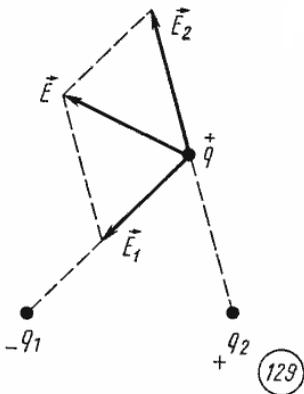
Пространство, в котором находится электрический заряд, обладает определенными физическими свойствами. *На всякий другой заряд, внесенный в это пространство, действуют электростатические силы Кулона.* Если в каждой точке пространства действует сила, то говорят, что в этом пространстве существует силовое поле. Поле наряду с веществом является формой материи. Если поле стационарно, то есть не меняется во времени, и создается неподвижными электрическими зарядами, то такое поле называется электростатическим. Электростатика изучает только электростатические поля и взаимодействия неподвижных зарядов.

Электрическое поле – особая форма материи, существующая вокруг электрического заряда, материально.

Основное свойство электрического поля: действие с силой на эл. заряд, внесенный в него.

Главное свойство электрического поля – действие на электрические заряды с некоторой силой. Электростатическое поле неподвижных зарядов не меняется совершенно и неразрывно связано с зарядами, которые его образуют.

Для характеристики электрического поля вводят понятие напряженности. *Напряженностью в каждой точке электрического поля называется вектор \vec{E} , численно равный отношению силы, с которой это поле действует на пробный положительный заряд, помещенный в данную точку, и величины этого заряда, и направленный в сторону действия силы.*



$$E = \frac{F_{\text{э}}}{|q_1|} = k \frac{|q||q_1|}{|q_1|r^2} = k \frac{|q|}{r^2}$$

Напряженность электрического поля точечного заряда в некоторой точке пространства прямо пропорциональна модулю заряда источника поля и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника поля до данной точки пространства.

Единицы напряженности в системе СИ: **Н/Кл=В/м**

Для графической интерпретации электрического поля вводят понятие силовой линии или линии напряженности. Это кривая, касательная в каждой точке к которой совпадает с вектором напряженности. Линия напряженности начинается на положительном заряде и заканчивается на отрицательном. Линии напряженности не пересекаются, так как в каждой точке поля вектор напряженности имеет лишь одно направление.

Если на электрический заряд q действуют одновременно электрические поля нескольких зарядов, то результирующая сила оказывается равной геометрической сумме сил, действующих со стороны каждого поля в отдельности. Это свойство электрических полей означает, что поля подчиняются *принципу суперпозиции*: если в данной точке пространства различные заряженные частицы создают электрические поля с напряженностями E_1, E_2 и т. д., **то вектор напряженности электрического поля равен сумме векторов напряженностей всех электрических полей** $E = E_1 + E_2 + \dots$

Контрольные вопросы:

1. Какое поле называют электрическим?
2. Что называется силовой линией напряжённости эл. поля, где они начинаются и где заканчиваются? Какое направление имеет вектор напряжённости эл. поля?
3. Какое эл. поле является однородным и чем оно создаётся?
4. Напишите формулы для расчёта напряжённости эл. поля
5. С какой силой действует однородное электростатическое поле, напряжённость которого $E = 200\,000 \text{ Н/Кл}$, на заряд $q = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$?

Лекция № 14. Потенциал электрического поля. Работа электрического поля

Для определения работы электростатического поля необходимо ввести энергетическую характеристику поля. Воспользуемся для этого тем, что каждой точке поля соответствует определенная потенциальная энергия W_p взаимодействия заряда q с полем. Но эта энергия не является характеристикой поля - она зависит от значения заряда q . Поскольку сила, с которой поле действует на заряд, прямо пропорциональна q , потенциальная энергия W_p также прямо пропорциональна q . Отсюда следует, что отношение W_p/q не зависит от заряда. Поэтому эта величина может служить характеристикой поля в определенной точке. Ее называют потенциалом и обозначают φ .

$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

Потенциал электростатического поля в определенной точке - это скалярная величина, характеризующая энергетические свойства поля равен отношению потенциальной энергии E_p электрического заряда, расположенного в этой точке поля, к значению q этого заряда.

Выражение для вычисления потенциала φ поля, созданного точечным зарядом Q , в точках на расстоянии r от этого заряда:

$$\varphi = k \frac{Q}{r}.$$

Потенциал в некоторой точке может иметь различные значения, связанные с выбором нулевой точки, поэтому важную роль здесь играет не сам потенциал, а *разность потенциалов*, что не зависит от выбора нулевой точки.

Когда в электростатическом поле заряд движется из точки 1 в точку 2, это поле выполняет *работу*, равную изменению потенциальной энергии заряда, взятому с противоположным знаком: $A = -\Delta W_{п}$. Таким образом $A = -W_{п1} - W_{п2}$.

Воспользовавшись выражением $W_{п} = q\phi$, получаем:

$$A_{12} = q(\phi_1 - \phi_2).$$

Разность потенциалов между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении заряда из начальной точки в конечную к этому заряду:

$$\phi_1 - \phi_2 = \frac{A_{12}}{q},$$

$$A = q(\phi_1 - \phi_2) = qU,$$

где U – *напряжение*.

В СИ работу выражают в джоулях, а заряд - в кулонах. Поэтому разность потенциалов между двумя точками поля равна 1, если при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую электрическое поле выполняет работу в 1 Дж: $\frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}} = 1\text{В}$

Связь напряженности электростатического поля с разностью потенциалов

$$E = (\phi_1 - \phi_2)/d,$$

т.е. напряженность однородного электрического поля будет равна разности потенциалов, которые приходится на единицу длины, которую взяли по силовой линии данного поля.

Поверхность, у которой потенциалы во всех ее точках имеют одну и ту же величину, называется *эквипотенциальной поверхностью*. Поверхность любого проводника при равновесии зарядов на нем является эквипотенциальной поверхностью. Эквипотенциальные поверхности используются для графического изображения распределения потенциала в электрическом поле. Все точки эквипотенциальной поверхности имеют одинаковый потенциал, поэтому перемещение заряда вдоль нее не требует совершения работы. Это значит, что сила, действующая на заряд, все время перпендикулярна к эквипотенциальной поверхности (к поверхности заряженного тела). Отсюда мы делаем заключение, что линии напря-

женности всегда перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям.

Контрольные вопросы:

1. Что понимают под работой электрического поля?
2. Как понимать выражение «электрическое поле потенциально»??
3. Какие поля называют потенциальными?
4. Как связано изменение потенциальной энергии с работой?
5. Чему равна потенциальная энергия заряженной частицы в однородном поле?
6. От чего зависит работа по перемещению заряда из одной точки поля в другую?
7. Чему равна работа по перемещению заряда по замкнутому контуру?

Лекция №15. Проводники и диэлектрики в электрическом поле. Электроёмкость проводников

В некоторых телах и веществах почти нет свободных электронов, так как они прочно удерживаются ядрами. У молекул и атомов таких тел трудно «отобрать» или «навязать» им лишние электроны. В таких телах нельзя создавать электрический ток. Тела и вещества, в которых можно создавать электрический ток, называют проводниками. Те же тела и вещества, в которых его создать нельзя, называют диэлектриками или непроводниками тока. К проводникам, кроме металлов, относятся также уголь, растворы солей, кислоты, щелочи, живые организмы и многие другие тела и вещества. Причем в растворах солей электрический ток создается не только электронами, но и положительными ионами. Диэлектриками являются воздух, стекло, парафин, слюда, лаки, фарфор, резина, пластмассы, различные смолы, маслянистые жидкости, сухое дерево, сухая ткань, бумага и другие вещества. Фарфоровыми, например, делают изоляторы для электропроводки, лаки используют для покрытия проводов, чтобы изолировать провода друг от друга и от других предметов.

Но есть еще большая группа веществ, называемых полупроводниками. К полупроводникам, в частности, относятся германий и

кремний. По электропроводности они занимают среднее место между проводниками и непроводниками. Считавшиеся когда-то непригодными для практических целей, сейчас они стали основным материалом для производства современных полупроводниковых приборов, например транзисторов, с которыми будет связана большая часть вашего творчества.

Как нам уже известно, проводник представляет собой тело, которое содержит большое число свободных электронов, заряды которых компенсируются положительными зарядами ядер атомов. Если металлический проводник поместить в электрическое поле, то под влиянием сил поля свободные электроны проводника придут в движение в сторону, противоположную направлению сил поля. В результате этого на одной стороне проводника возникает избыточный отрицательный заряд, а на другой стороне проводника — избыточный положительный заряд.

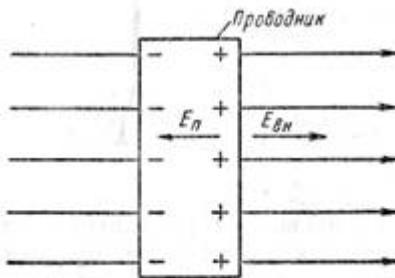


Рис. 12. Проводник в электрическом поле

Разделение зарядов в проводнике под влиянием внешнего электрического поля называется электризацией через влияние, или электростатической индукцией, а заряды на проводнике — индуцированными зарядами.

Индуцированные заряды проводника создают добавочное электрическое поле, направление

которого противоположно внешнему полю.

Результирующее электрическое поле внутри проводника уменьшается, а вместе с ним уменьшаются силы, действующие на перераспределение зарядов. Движение зарядов в проводнике прекратится, когда напряженность поля, вызванного индуцированными зарядами проводника $\xi_{вн}$, станет равной напряженности внешнего поля $\xi_{вп}$, а результирующая напряженность поля внутри проводника будет равна нулю.

Как было указано выше, диэлектрик отличается от проводника отсутствием свободных электронов (точнее, весьма малым количеством свободных электронов). Электроны атомов диэлектрика прочно связаны с ядром атома.

Диэлектрик, внесенный в электрическое поле, так же как и проводник, электризуется через влияние. Однако между электризацией проводника и диэлектрика имеется существенная разница. Если в проводнике под влиянием сил электрического поля свободные электроны передвигаются по всему объему проводника, то в диэлектрике свободного перемещения электрических зарядов произойти не может. Но в пределах каждой молекулы диэлектрика возникает смещение положительного заряда вдоль направления электрического поля и отрицательного заряда в обратном направлении. В результате на поверхности диэлектрика возникнут электрические заряды.

Рассматриваемое явление называется **поляризацией диэлектрика**.

Различают диэлектрики двух классов. У диэлектриков Пер-

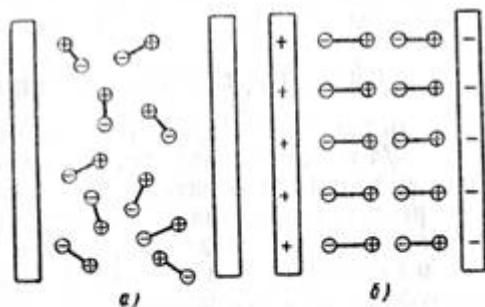


Рис. 13. Электрические заряды молекул диэлектрика:

а — без внешнего поля, б — при наличии поля

вого класса молекула в нейтральном состоянии имеет положительный и отрицательный заряды, настолько близко расположенные один к другому, что действие их взаимно компенсируется. (Под влиянием электрического поля положительные и отрицательные заряды в пределах молекулы

несколько смещаются один относительно другого, образуя диполь.

У диэлектриков второго класса молекулы и в отсутствие электрического поля образуют диполи. Такие диэлектрики называются **полярными**.

К ним относятся вода, аммиак, эфир, ацетон и т. д. У таких диэлектриков при отсутствии электрического поля диполи в пространстве расположены хаотически, и вследствие этого результирующее электрическое поле вокруг полярного диэлектрика равно нулю. Под действием внешнего электрического поля молекулы (а стало быть, и диполи) стремятся повернуться так, чтобы их оси совпали с направлением внешнего поля. С устранением электриче-

ского поля поляризация диэлектрика исчезает. Таким образом, поляризация представляет собой упругое смещение электрических зарядов в веществе диэлектрика.

При некоторой определенной величине напряженности электрического поля смещение зарядов достигает предельной величины, после чего происходит разрушение — пробой диэлектрика, в результате которого диэлектрик теряет свои изолирующие свойства и становится токопроводящим.

Напряженность электрического поля, при которой наступает пробой диэлектрика, называется пробивной напряженностью $\xi_{пр}$.

Выводы:

- Диэлектрики - это вещества, не содержащие свободных заряженных частиц.
- В полярных диэлектриках молекулы являются диполями, в которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают.
- Неполярные диэлектрики состоят из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают.
- При поляризации молекулы диэлектрика ориентируются по внешнему электрическому полю.
- Диэлектрическая проницаемость характеризует способность диэлектрика к ослаблению внешнего поля.
- Тепловое движение влияет на поляризацию полярных диэлектриков.
- Главное отличие проводников от диэлектриков - наличие свободных зарядов, которые могут перемещаться под действием кулоновских сил.
- Внутри заряженного проводника электростатическое поле отсутствует.
- Потенциал внутри проводника постоянен.
- Напряженность электростатического поля перпендикулярна поверхности проводника. Поверхность проводника является эквипотенциальной

Емкостью двух проводников называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между проводниками.

$$C = q/U;$$

$$(C) = 1\phi = 1\text{Кл/В}$$

Емкость проводника не зависит от металла, из которого он изготовлен. Емкость зависит от размеров и формы проводника, окружающей среды и наличия вблизи других проводников

Контрольные вопросы:

1. На какие группы делят вещества по способности передавать электрические заряды?
2. Какой характерной особенностью обладают полупроводники?
3. Перечислите области применения полупроводниковых приборов.
4. Какое явление называется поляризацией диэлектрика?
5. Что называется электроемкостью проводников? Назовите единицу измерения электроемкости? От чего зависит электроемкость проводника?
6. Напряженность электростатического поля в вакууме 20 кН/Кл. Какова напряженность этого поля в керосине, если его диэлектрическая проницаемость равна 2?

Лекция №16. Конденсаторы

Если двум изолированным друг от друга проводникам сообщить заряды q_1 и q_2 , то между ними возникает некоторая **разность потенциалов** $\Delta\varphi$, зависящая от величин зарядов и геометрии проводников. Разность потенциалов $\Delta\varphi$ между двумя точками в электрическом поле часто называют **напряжением** и обозначают буквой U . Наибольший практический интерес представляет случай, когда заряды проводников одинаковы по модулю и противоположны по знаку: $q_1 = -q_2 = q$. В этом случае можно ввести понятие **электрической емкости**.

Электроемкостью системы из двух проводников называется физическая величина, определяемая как отношение заряда q одного из проводников к разности потенциалов $\Delta\varphi$ между ними:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{q}{U}.$$

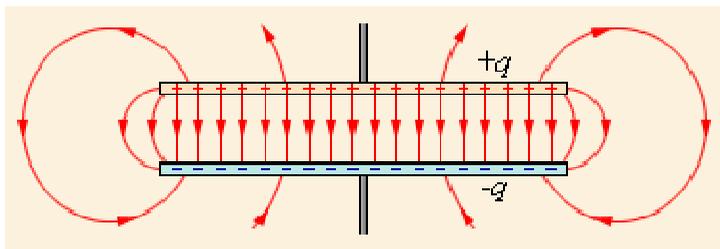
В системе СИ единица электроемкости называется **фарад**

$$1 \Phi = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

(Ф):

Величина емкости зависит от формы и размеров проводников и от свойств диэлектрика, разделяющего проводники. Существуют такие конфигурации проводников, при которых электрическое поле оказывается сосредоточенным (локализованным) лишь в некоторой области пространства. Такие системы называются **конденсаторами**, а проводники, составляющие конденсатор, – **обкладками**.

Простейший конденсатор – система из двух плоских проводящих пластин, расположенных параллельно друг другу на малом по сравнению с размерами пластин расстоянии и разделенных слоем диэлектрика. Такой конденсатор называется **плоским**. Электрическое поле плоского конденсатора в основном локализовано между пластинами (рис.); однако, вблизи краев пластин и в окружающем пространстве также возникает сравнительно слабое электрическое поле, которое называют **полем рассеяния**.



Каждая из заряженных пластин плоского конденсатора создает вблизи поверхности электрическое поле, модуль напряженности которого выражается соотношением

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}.$$

Согласно принципу суперпозиции, напряженность поля, создаваемого обеими пластинами, равна сумме напряженностей и полей каждой из пластин: $\vec{E} = \vec{E}^+ + \vec{E}^-$.

Внутри конденсатора вектора напряженности параллельны;

поэтому модуль напряженности суммарного поля равен

$$E = 2E_1 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$$

Вне пластин вектора напряженности направлены в разные стороны, и поэтому $E = 0$. Поверхностная плотность σ заряда пластин равна q/S , где q – заряд, а S – площадь каждой пластины. Разность потенциалов $\Delta\varphi$ между пластинами в однородном электрическом поле равна Ed , где d – расстояние между пластинами. Из этих соотношений можно получить формулу для электроемкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sigma \cdot S}{E \cdot d} = \frac{\epsilon_0 S}{d}.$$

Таким образом, электроемкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади пластин (обкладок) и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Если пространство между обкладками заполнено диэлектриком, электроемкость конденсатора увеличивается в ϵ раз:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}.$$

Примерами конденсаторов с другой конфигурацией обкладок могут служить сферический и цилиндрический конденсаторы. **Сферический конденсатор** – это система из двух концентрических проводящих сфер радиусов R_1 и R_2 . **Цилиндрический конденсатор** – система из двух соосных проводящих цилиндров радиусов R_1 и R_2 и длины L . Емкости этих конденсаторов, заполненных диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ , выражаются формулами:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad \text{и} \quad C = 2\pi\epsilon_0\epsilon \frac{L}{\ln R_2 / R_1}$$

Конденсаторы могут соединяться между собой, образуя батареи конденсаторов. При **параллельном соединении** конденсаторов напряжения на конденсаторах одинако-

вы: $U_1 = U_2 = U$, а заряды равны $q_1 = C_1U$ и $q_2 = C_2U$. Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор емкости C , заряженный зарядом $q = q_1 + q_2$ при напряжении между обкладками равном U . Отсюда следует

$$C = \frac{q_1 + q_2}{U} \quad \text{или} \quad C = C_1 + C_2$$

Таким образом, при параллельном соединении емкостей складываются.

При последовательном соединении одинаковыми оказываются заряды обоих конденсаторов: $q_1 = q_2 = q$, а напряжения на них равны. Такую систему можно рассматривать как единый конденсатор, заряженный зарядом q при напряжении между обкладками $U = U_1 + U_2$. Следовательно,

$$C = \frac{q}{U_1 + U_2} \quad \text{или} \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

При последовательном соединении конденсаторов складываются обратные величины емкостей.

Контрольные вопросы:

1. Что такое конденсатор? Каково его устройство?
2. Что понимают под зарядом конденсатора?
3. Почему емкость конденсатора не зависит от окружающих тел?
4. Формула емкости при последовательном и параллельном соединении конденсаторов в батарее.
5. Формула энергии и плотности энергии электрического поля заряженного конденсатора.

6. От какого напряжения нужно зарядить конденсатор емкостью 4 мкФ, чтобы ему сообщить заряд 0,44 мКл?

Лекция №17. Постоянный электрический ток, сила тока, плотность тока. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление

Электрический ток-упорядоченное движение заряженных частиц.

За направление электрического тока принято считать направление движения положительных зарядов.

Электрические заряды могут двигаться упорядоченно под действием электрического поля. Поэтому достаточным условием

для существования электрического тока является наличие электрического поля и свободных носителей электрического заряда.

Электрическое поле может быть создано, например, двумя разноименно заряженными телами. Соединяя проводником разноименно заряженные тела, можно получить электрический ток, протекающий в течении короткого интервала времени.

Прохождение электрического тока по проводнику сопровождается следующими его действиями:

1. Магнитным (наблюдается во всех проводниках)
2. Тепловым (наблюдается во всех проводниках, кроме сверхпроводников)
3. Химическим (наблюдается в электролитах)

Сила тока:

Процесс протекания тока в цепи характеризуется силой тока I . Это величина, численно равная заряду, протекающему через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = q / t$$

За единицу измерения силы тока в СИ принят- 1 Ампер (А). Эта формула справедлива для постоянного тока, при котором сила тока и его направление не изменяются со временем.

Для описания процессов, происходящих в электрических цепях, иногда используется плотность тока f (единица измерения- $1 \text{ A}/\text{m}^2$).

Плотность тока- величина, равная силе тока, протекающего через единичное поперечное сечение проводника:

$$f = I / S$$

Работу сторонних сил по перемещению заряженных частиц характеризует электродвижущая сила источника тока-ЭДС (E), ее единица измерения-1В (Вольт).

ЭДС-физическая величина, равная работе, совершаемой сторонними силами при перемещении по электрической цепи единичного положительного заряда:

$$E_{(\text{эдс})} = A_{\text{ст}} / q$$

Сопротивление проводников:

Сила тока в цепи зависит от того, по каким проводникам идет тока. Способность проводника влиять на величину силы тока в цепи характеризует сопротивление проводника R (единица измерения сопротивления-1 Ом).

Под действием электрического поля в вакууме свободные заряды двигались бы ускоренно. В веществе они движутся в среднем равномерно, т.к. часть энергии отдается частицам при взаимодействии. Из природы электрического сопротивления, следует, что:

$$R=p*L/S$$

L -длина проводника;

S -площадь поперечного сечения;

p -коэффициент пропорциональности, названный удельным сопротивлением материала.

Удельным сопротивлением называется сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм². Удельное сопротивление обозначается буквой греческого алфавита ρ . Каждый материал, из которого изготавливается проводник, обладает своим удельным сопротивлением.

Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине, т. е. чем длиннее проводник, тем больше его электрическое сопротивление.

Сопротивление проводника обратно пропорционально площади его поперечного сечения, т. е. чем толще проводник, тем его сопротивление меньше, и, наоборот, чем тоньше проводник, тем его сопротивление больше.

Контрольные вопросы:

1. Что называется электрическим током?
2. Какие действия оказывает электрический ток на проводник? (приведите примеры из жизни)
3. Что называют силой тока? Как найти силу тока, какие у нее единицы измерения?
4. Как формулируется и записывается закон Ома для участка цепи?
5. Что называют электрическим сопротивлением?
6. Как найти сопротивление, какие у него единицы измерения?

Лекция №18. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи

Рассмотрим простейшую полную (т. е. замкнутую) цепь, состоящую из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора сопротивлением R (рис.15.9). Источник тока имеет ЭДС \mathcal{E} и сопротивление r . Сопротивление источника часто называют *внутренним сопротивлением* - в отличие от

внешнего сопротивления R цепи. В генераторе r - это сопротивление обмоток, а в гальваническом элементе - сопротивление раствора электролита и электродов.

Закон Ома для замкнутой цепи связывает силу тока в цепи, ЭДС и *полное сопротивление цепи* $R+r$. Эта связь может быть установлена теоретически, если использовать закон сохранения энергии и закон Джоуля - Ленца.

Пусть за время Δt через поперечное сечение проводника проходит электрический заряд Δq . Тогда работу сторонних сил при перемещении заряда можно записать так: $A_{ст} = \varepsilon \Delta q$. Согласно определению силы тока $\Delta q = I \Delta t$. Поэтому

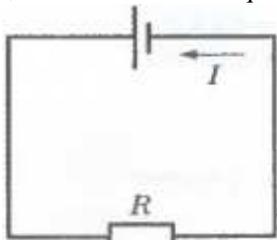


Рис. 15.9

$$A_{ст} = \varepsilon I \Delta t.$$

При совершении этой работы на внутреннем и внешнем участках цепи, сопротивления которых r и R выделяется некоторое количество теплоты. По закону Джоуля - Ленца оно равно:

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t.$$

По закону сохранения энергии $A_{ст} = Q$, откуда получаем $\varepsilon = I r + I R$;

Произведение силы тока и сопротивления участка цепи часто называют *падением напряжения на этом участке*. Таким образом, ЭДС равна сумме падений напряжения на внутреннем и внешнем участках замкнутой цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи записывают в виде:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Сила тока в цепи зависит от трех величин: ЭДС ε , сопротивлений R внешнего и r внутреннего участков цепи. Внутреннее сопротивление источника тока не оказывает заметного влияния на силу тока, если оно мало по сравнению с сопротивлением внешней части цепи ($R \gg r$). При этом напряжение на зажимах источника примерно равно ЭДС

$$U = I R = \varepsilon - I r \approx \varepsilon$$

При коротком замыкании, когда R , сила тока в цепи определяется именно внутренним сопротивлением источника и при электродвижущей силе в несколько вольт может оказаться очень большой, если r мало (например, у аккумулятора $r \approx 0,1-0,001$ Ом). Про-

вода могут расплавиться, а сам источник выйти из строя.

Если цепь содержит несколько последовательно соединенных элементов с ЭДС ε_1 , " ε ", ε_3 и т. д., то *полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных элементов*. Для определения знака ЭДС любого источника нужно вначале условиться относительно выбора положительного направления обхода контура.



Рис. 15.10

На рисунке положительным (произвольно) считают направление обхода против часовой стрелки.

Если при обходе цепи данный источник стремится вызвать ток в направлении обхода, то его ЭДС берется положительной, $\varepsilon > 0$. Сторонние силы внутри источника совершают при этом положительную работу.

Если же при обходе цепи данный источник вызывает ток против направления обхода цепи, то его ЭДС будет отрицательной, $\varepsilon < 0$. Сторонние силы внутри источника совершают отрицательную работу. Так, для цепи, изображенной на рисунке 15.10, при обходе контура против часовой стрелки получаем следующее уравнение:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = |\varepsilon_1| - |\varepsilon_2| + \varepsilon_3$$

Если $\varepsilon > 0$, то сила тока $I > 0$, т. е. направление тока совпадает с направлением обхода контура. При $\varepsilon < 0$, наоборот, направление тока противоположно направлению обхода контура. Полное сопротивление цепи R_n равно сумме всех сопротивлений: $R_{\text{пол}} = R + r_1 + r_2 + r_3$.

Сила тока в замкнутой цепи равна ЭДС в этой цепи, деленной на ее полное сопротивление.

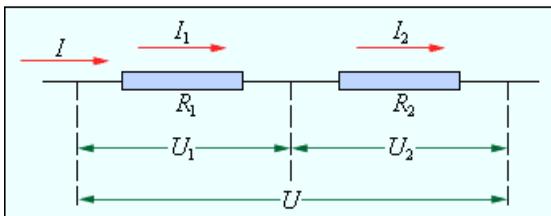
Контрольные вопросы:

1. Прочитайте закон Ома для участка цепи. Для полной цепи.
2. Что называется электродвижущей силой?
3. Чем опасно короткое замыкание?
4. При каком виде соединения источников ЭДС увеличивается? Почему?
5. Найти силу тока в цепи, если известно что сопротивление цепи 11 Ом, а источник подключенный к ней имеет ЭДС 12 В и внутреннее сопротивление 1 Ом.

Лекция №19. Электрические цепи с последовательным и параллельным соединением проводников

При последовательном соединении проводников конец каждого проводника соединяется с началом следующего за ним проводника.

Рассмотрим два резистора R_1 и R_2 , соединённых последовательно и подключённых к источнику постоянного напряжения U :



Сила тока во всех последовательно соединенных проводниках одинакова:

Общее напряжение в последовательной цепи равно сумме напряжений на последовательных участках. В случае соответствующем рисунку, напряжение U на обоих проводниках равно сумме напряжений U_1 и U_2 . действительно, по закону Ома, напряжения U_1 и U_2 на проводниках равны

$$U_1 = IR_1, \quad U_2 = IR_2.$$

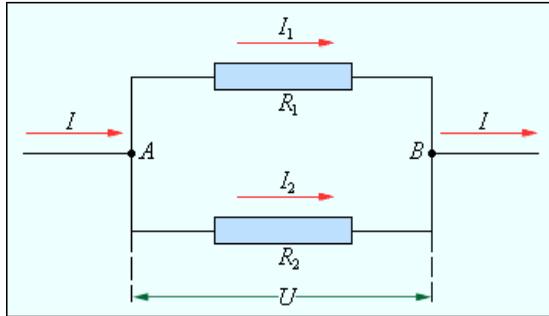
$$U = U_1 + U_2 = I(R_1 + R_2) = IR,$$

где R – электрическое сопротивление всей цепи. Отсюда следует:

$$\mathbf{R = R_1 + R_2.}$$

При последовательном соединении полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников. Этот результат справедлив для любого числа последовательно соединенных проводников.

Параллельное соединение проводников



Напряжения на всех параллельных проводниках одинаковы. В случае соответствующем рисунку 2, напряжения U_1 и U_2 на обоих проводниках одинаковы:

$$U_1 = U_2 = U.$$

Сумма токов, протекающих по параллельным проводникам, равна току в неразветвленной цепи. Действительно, в точках разветвления токов в цепи постоянного тока не могут накапливаться заряды. Например, к узлу А за время Δt подтекает заряд $I\Delta t$, а утекает от узла за то же время заряд $I_1\Delta t + I_2\Delta t$. Следовательно,

$$I = I_1 + I_2.$$

Записывая на основании закона Ома

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \quad \text{и} \quad I = \frac{U}{R},$$

где R – электрическое сопротивление всей цепи, получим

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

При параллельном соединении проводников величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям параллельно включенных проводников. При параллельном соединении проводников действует простое правило - общее сопротивление параллельного участка, меньше меньшего. Т.е. если параллельный участок составляют резисторы

сопротивлениями 3 и 5 Ом, то общее сопротивление будет меньше 3 Ом. Простой подсчет, по приведенной выше формуле, дает результат: 1,875 Ом.

Этот результат справедлив для любого числа параллельно включенных проводников.

Линейную зависимость сопротивления от длины проводника используют при устройстве реостата. Назначение реостата – изменять сопротивление цепи, в которую он включен.

Контрольные вопросы:

1. Чему равно общее электрическое сопротивление последовательно соединенных резисторов?
2. Как найти общее сопротивление параллельно соединенных резисторов?
3. Почему лампы в квартире соединяют параллельно, а лампочки в елочных гирляндах – последовательно?
4. Сопротивление каждого проводника равно 1 Ом. Чему равно сопротивление двух таких проводников, соединенных: 1) последовательно; 2) параллельно?
5. Как включаются в цепь реостат и потенциометр?

Лекция №20. Работа и мощность электрического тока

При протекании тока по однородному участку цепи электрическое поле совершает работу. За время Δt по цепи протекает заряд $\Delta q = I \Delta t$. Электрическое поле на выделенном участке совершает работу

$$\Delta A = (\varphi_1 - \varphi_2) \Delta q = \Delta \varphi_{12} I \Delta t = U I \Delta t,$$

где $U = \Delta \varphi_{12}$ – напряжение. Эту работу называют *работой электрического тока*.

Если обе части формулы $I = \frac{U}{R}$.

выражающей закон Ома для однородного участка цепи с сопротивлением R , умножить на $I \Delta t$, то получится соотношение

$$R I^2 \Delta t = U I \Delta t = \Delta A.$$

Это соотношение выражает закон сохранения энергии для однородного участка цепи.

Работа ΔA электрического тока I , протекающего по неподвижному проводнику с сопротивлением R , преобразуется в тепло ΔQ , выделяющееся на проводнике.

$$\Delta Q = \Delta A = R I^2 \Delta t.$$

Закон преобразования работы тока в тепло был экспериментально установлен независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э. Ленцем и носит название **закона Джоуля–Ленца**.

Мощность электрического тока равна отношению работы тока ΔA к интервалу времени Δt , за которое эта работа была совершена:

$$P = \frac{\Delta A}{\Delta t} = UI = I^2 R =$$

Работа электрического тока в СИ выражается в **джоулях** (Дж), мощность – в **ваттах** (Вт).

Контрольные вопросы:

1. Запишите закон Джоуля – Ленца.
2. Что называют работой тока?
3. Что такое мощность тока? В каких единицах она выражается?
4. Объясните, почему количество теплоты, выделяемое при прохождении тока, может быть и прямо пропорционально, и обратно пропорционально сопротивлению участка цепи.
5. Найдите работу, совершенную силами электрического поля при прохождении зарядом 3 мкКл разности потенциалов 220В.

Лекция №21. Основные положения электронной теории

проводимости металлов

Основные положения электронной теории проводимости металлов:

1. хорошая электропроводность металлов объясняется наличием в них большого числа свободных электронов.

2. под действием внешнего электрического поля на беспорядочное движение электронов накладывается упорядоченное движение, т.е. возникает электрический ток.

3. сила электрического тока, идущего по металлическому проводнику, как известно, определяется законом Ома для участка цепи, установленного экспериментально.

4. так как внутреннее строение у разных веществ различное, то и сопротивление тоже будет различным. Это связано с расположением ионов в кристаллической решетке и с концентрацией свободных электронов в веществе.

5. Несмотря на то, что скорость направленного движения электронов в проводнике очень мала, ток в проводнике возникает практически мгновенно. (при подключении проводника к источнику тока на каждый электрон действует электрическое поле, распространяющееся со скоростью света. Увеличение его внутренней энергии)

6. У всех металлов с увеличением температуры растет и сопротивление/

Скорость упорядоченного движения электронов:

$$I = envS.$$

Электронная проводимость металлов была впервые экспериментально доказана немецким физиком Э.Рикке в 1901 г. Через три плотно прижатых друг к другу отполированных цилиндра — медный, алюминиевый и снова медный — длительное время (в течение года) пропускали электрический ток. Общий заряд, прошедший за это время, был равен $3.5 \cdot 10^6$ Кл. Поскольку массы атомов меди и алюминия существенно отличаются друг от друга, то массы цилиндров должны были бы заметно измениться, если бы носителями заряда были ионы.

Результаты опытов показали, что масса каждого из цилиндров осталась неизменной. В соприкасающихся поверхностях были обнаружены лишь незначительные следы взаимного проникновения металлов, которые не превышали результатов обычной диффу-

зии атомов в твердых телах. Следовательно, свободными носителями заряда в металлах являются не ионы, а такие частицы, которые одинаковы и в меди, и в алюминии. Такими частицами могли быть только электроны.

Прямое и убедительное доказательство справедливости этого предположения было получено в опытах, поставленных в 1913 г. Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси и в 1916 г. Т. Стюартом и Р. Толменом.

На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум металлическим дискам, изолированным друг от друга. К концам дисков с помощью скользящих контактов присоединяют гальванометр.

Катушку приводят в быстрое вращение, а затем резко останавливают. После резкой остановки катушки свободные заряженные частицы будут некоторое время двигаться вдоль проводника по инерции, и, следовательно, в катушке возникнет электрический ток. Ток будет существовать короткое время, так как из-за сопротивления проводника заряженные частицы тормозятся и упорядоченное движение частиц прекращается.

Средняя скорость теплового движения электронов

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{\pi m_e}} = 1,1 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ при } T = 300 \text{ К.}$$

Направление тока говорит о том, что он создается движением отрицательно заряженных частиц. Переносимый при этом заряд пропорционален отношению заряда частиц, создающих ток, к их массе

Поэтому, измеряя заряд, проходящий через гальванометр за все время существования тока в цепи, удалось определить отношение —. Оно оказалось равным $1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. Эта величина совпадает с отношением заряда электрона к его массе, найденным ранее из других опытов.

Таким образом, электрический ток в металлах создается движением отрицательно заряженных частиц электронов. Согласно классической электронной теории проводимости металлов (П. Дрейде, 1900 г., Х.Лоренц, 1904 г.), металлический проводник можно рассматривать как физическую систему совокупности двух подсистем:

1. свободных электронов с концентрацией $\sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$ и
2. положительно заряженных ионов, колеблющихся около

положения равновесия.

Появление свободных электронов в кристалле можно объяснить следующим образом.

При объединении атомов в металлический кристалл слабее всего связанные с ядром атома внешние электроны отрываются от атомов (рис. 2). Поэтому в узлах кристаллической решетки металла располагаются положительные ионы, а в пространстве между ними движутся электроны, не связанные с ядрами своих атомов. Эти электроны называются **свободными** или **электронами проводимости**. Они совершают хаотическое движение, подобное движению молекул газа. Поэтому совокупность свободных электронов в металлах называют **электронным газом**.

Если к проводнику приложено внешнее электрическое поле, то на беспорядочное хаотическое движение свободных электронов накладывается направленное движение под действием сил электрического поля, что и порождает электрический ток. Скорость движения самих электронов в проводнике — несколько долей миллиметра в секунду, однако возникающее в проводнике электрическое поле распространяется по всей длине проводника со скоростью, близкой к скорости света в вакууме ($3 \cdot 10^8$ м/с).

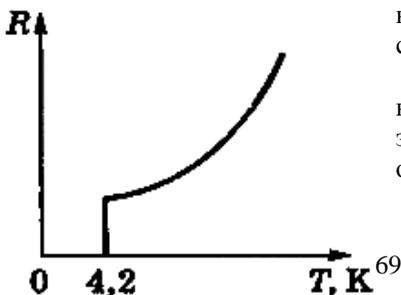
Так как электрический ток в металлах образуют свободные электроны, то проводимость металлических проводников называется **электронной проводимостью**.

Электроны под влиянием постоянной силы, действующей со стороны электрического поля, приобретают определенную скорость упорядоченного движения (ее называют дрейфовой). Эта скорость не увеличивается в дальнейшем со временем, так как при столкновении с ионами кристаллической решетки электроны передают кинетическую энергию, приобретенную в электрическом поле, кристаллической решетке.

В 1911 г. голландский физик Г. Камерлинг-Оннес, изучая изменение электрического сопротивления ртути при низких температурах, обнаружил, что при температуре около 4 К (т.е. при -269°C) удельное сопротивление скачком уменьшается практически до нуля. Это явление обращения электрического сопротивления в

нуль Г. Камерлинг-Оннес назвал сверхпроводимостью. (см. рис.).

В дальнейшем было выяснено, что более 25 химических элементов — металлов при очень низких температурах ста-



новятся сверхпроводниками. У каждого из них своя критическая температура перехода в состояние с нулевым сопротивлением. Самое низкое значение ее у вольфрама — 0,012К, самое высокое у ниобия — 9К.

Вещества в сверхпроводящем состоянии обладают необычными свойствами:

1. электрический ток в сверхпроводнике может существовать длительное время без источника тока;

2. внутри вещества в сверхпроводящем состоянии нельзя создать магнитное поле;

3. магнитное поле разрушает состояние сверхпроводимости. Сверхпроводимость — явление, объясняемое с точки зрения квантовой теории. Достаточное сложное его описание выходит за рамки школьного курса физики.

Широкому применению сверхпроводимости до недавнего времени препятствовали трудности, связанные с необходимостью охлаждения до сверхнизких температур, для чего использовался жидкий гелий. Тем не менее, несмотря на сложность оборудования, дефицитность и дороговизну гелия, с 60-х годов XX века создаются сверхпроводящие магниты без тепловых потерь в их обмотках, что сделало практически возможным получение сильных магнитных полей в сравнительно больших объемах. Именно такие магниты требуются для создания установок управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы, для мощных ускорителей заряженных частиц. Сверхпроводники используются в различных измерительных приборах, прежде всего в приборах для измерения очень слабых магнитных полей с высочайшей точностью.

В настоящее время в линиях электропередачи на преодоление сопротивления проводов уходит 10 - 15% энергии. Сверхпроводящие линии или хотя бы вводы в крупные города принесут громадную экономию. Другая область применения сверхпроводимости — транспорт.

На основе сверхпроводящих пленок создан ряд быстродействующих логических и запоминающих элементов для счетно-решающих устройств. При космических исследованиях перспективно использование сверхпроводящих соленоидов для радиационной защиты космонавтов, стыковки кораблей, их торможения и ориентации, для плазменных ракетных двигателей.

В настоящее время созданы керамические материалы, обладающие сверхпроводимостью при более высокой температуре — свыше 100К, то есть при температуре выше температуры кипения

азота. Возможность охлаждать сверхпроводники жидким азотом, который имеет на порядок более высокую теплоту парообразования, существенно упрощает и удешевляет все криогенное оборудование, обещает огромный экономический эффект.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите основные положения электронной теории проводимости металлов.
2. Какой проводимостью обладают металлы? Чем это объясняется?
3. Какова зависимость сопротивления металлических проводников от температуры.
4. Что такое сверхпроводимость?
5. Сопротивление вольфрамовой нити электрической лампы при 20°C равно 35,8 Ом. Какова будет температура нити лампочки, если при включении в сеть напряжением 120 В по нити идет ток 0,33 А? Температурный коэффициент сопротивления вольфрама $0,0046 \text{ K}^{-1}$.

Лекция №22. Электрический ток в жидкостях

Жидкости по степени электропроводности делятся на:

- диэлектрики (дистиллированная вода),
- проводники (электролиты),
- полупроводники (расплавленный селен).

Если в стеклянный сосуд налить воды и прибавить в нее несколько капель серной кислоты (или какой-либо другой кислоты или щелочи), а затем взять две металлические пластины и присоединить к ним проводники опустив эти пластины в сосуд, а к другим концам проводников подключить источник тока через выключатель и амперметр, то произойдет выделение газа из раствора, причем оно будет продолжаться непрерывно, пока замкнута цепь т.к. подкисленная вода действительно является проводником. Кроме того, пластины начнут покрываться пузырьками газа. Затем эти пузырьки будут отрываться от пластин и выходить наружу.

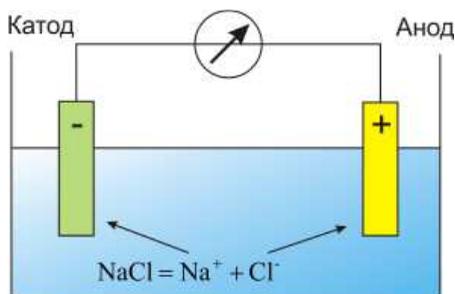
При прохождении по раствору электрического тока происходят химические изменения, в результате которых выделяется газ.

Электролитами принято называть проводящие среды, в которых протекание электрического тока сопровождается переносом вещества. Носителями свободных зарядов в электролитах являются

положительно и отрицательно заряженные ионы.

Основными представителями электролитов, широко используемыми в технике, являются водные растворы неорганических кислот, солей и оснований. Прохождение электрического тока через электролит сопровождается выделением веществ на электродах. Это явление получило название *электролиз*.

Электрический ток в электролитах представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях. Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (*катоду*), отрицательные ионы – к положительному электроду (*аноду*). Ионы обоих знаков появляются в водных растворах солей, кислот и щелочей в результате расщепления части нейтральных молекул. Это явление называется *электролитической диссоциацией*.



Закон электролиза был экспериментально установлен английским физиком М. Фарадеем в 1833 году.

Первый закон Фарадея определяет количества первичных продуктов, выделяющихся на электродах при электролизе: масса m вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду q , прошедшему через электролит: $m = kq = kIt$,

где k – *электрохимический эквивалент вещества*:

$$k = \frac{1}{F} \frac{\mu}{\nu}$$

$F = eN_A = 96485$ Кл / моль. – *постоянная Фарадея*.

Второй закон Фарадея электрохимические эквиваленты различных веществ относятся их химические эквиваленты:

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{k_{r2}}{k_{r1}}$$

Объединенный закон Фарадея для электролиза:

$$m = \frac{1}{F} \frac{\mu}{z} It$$

Электролитические процессы классифицируются следующим образом:

- получение неорганических веществ (водорода, кислорода, хлора, щелочей и т.д.);
- получение металлов (литий, натрий, калий, бериллий, магний, цинк, алюминий, медь и т.д.);
- очистка металлов (медь, серебро,...);
- получение металлических сплавов;
- получение гальванических покрытий;
- обработка поверхностей металлов (азотирование, борирование, электрополировка, очистка);
- получение органических веществ;
- электродиализ и обессоливание воды;

Контрольные вопросы:

1. Какие вещества относятся к электролитам? Объясните проводимость электролитов.
2. Что называется электролитической диссоциацией?.
3. Что такое электролиз? Как он происходит? Сфера его применения.
4. Как выражается зависимость сопротивления электролитов от температуры.
5. Объясните формулы закона электролиза. Что такое электрохимический эквивалент вещества?
6. При силе тока 1,6 А на катоде электролитической ванны за 10 мин отложилась медь массой 0,316 г. Определите электрохимический эквивалент меди.

Лекция №23. Электрический ток в газах и вакууме

Газы (в том числе и воздух) в обычных условиях не проводят электрический ток. Например, голые провода воздушных линий,

будучи подвешены параллельно друг другу, оказываются изолированными один от другого слоем воздуха.

Однако под воздействием высокой температуры, большой разности потенциалов и других причин газы, подобно жидким проводникам, **ионизируются**, т. е. в них появляются в большом количестве частицы молекул газа, которые, являясь переносчиками электричества, способствуют прохождению через газ электрического тока.

Но вместе с тем ионизация газа отличается от ионизации жидкого проводника. Если в жидкости происходит распад молекулы на две заряженные части, то в газах под действием ионизации от каждой молекулы всегда отделяются электроны и остается ион в виде положительно заряженной части молекулы.

Стоит только прекратить ионизацию газа, как он перестанет быть проводящим, тогда как жидкость всегда остается проводником электрического тока. Следовательно, проводимость газа — явление временное, зависящее от действия внешних причин.

Однако есть и другой вид электрического разряда, называемый **дуговым разрядом** или просто электрической дугой. Явление электрической дуги было открыто в начале 19-го столетия первым русским электротехником В. В. Петровым.

В. В. Петров, проделывая многочисленные опыты, обнаружил, что между двумя древесными углями, соединенными с источником тока, возникает непрерывный электрический разряд через воздух, сопровождаемый ярким светом. В своих трудах В. В. Петров писал, что при этом "темный покой достаточно ярко освещен быть может". Так впервые был получен электрический свет, практически применил который еще один русский ученый-электротехник Павел Николаевич Яблочков.

"Свеча Яблочкова", работа которой основана на использовании электрической дуги, совершила в те времена настоящий переворот в электротехнике.

Дуговой разряд применяется как источник света и в наши дни, например в прожекторах и проекционных аппаратах. Высокая температура дугового разряда позволяет использовать его для устройства дуговой печи. В настоящее время дуговые печи, питаемые током очень большой силы, применяются в ряде отраслей промышленности: для выплавки стали, чугуна, ферросплавов, бронзы и т.д. А в 1882 году Н. Н. Бенардосом дуговой разряд впервые был использован для резки и сварки металла.

В газосветных трубках, лампах дневного света, стабилизато-

рах напряжения, для получения электронных и ионных пучков используется так называемый **глюющий газовый разряд**.

Искровой разряд применяется для измерения больших разностей потенциалов с помощью шарового разрядника, электродами которого служат два металлических шара с полированной поверхностью. Шары раздвигают, и на них подается измеряемая разность потенциалов. Затем шары сближают до тех пор, пока между ними не проскочит искра. Зная диаметр шаров, расстояние между ними, давление, температуру и влажность воздуха, находят разность потенциалов между шарами по специальным таблицам. Этим методом можно измерять с точностью до нескольких процентов разности потенциалов порядка десятков тысяч вольт.

Вакуум- это такая степень разрежения газа, при которой соударений молекул практически нет;

- электрический ток невозможен, т.к. возможное количество ионизированных молекул не может обеспечить электропроводность;

- создать эл.ток в вакууме можно, если использовать источник заряженных частиц;

- действие источника заряженных частиц может быть основано на явлении термоэлектронной эмиссии.

Термоэлектронная эмиссия- это испускание электронов твердыми или жидкими телами при их нагревании до температур, соответствующих видимому свечению раскаленного металла.

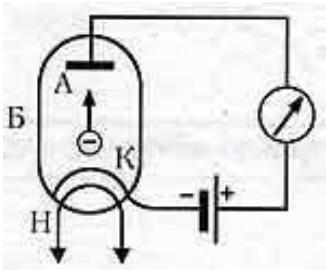
Нагретый металлический электрод непрерывно испускает электроны, образуя вокруг себя электронное облако.

В равновесном состоянии число электронов, покинувших электрод, равно числу электронов, возвратившихся на него (т.к. электрод при потере электронов заряжается положительно).

Чем выше температура металла, тем выше плотность электронного облака.

Вакуумный диод

Электрический ток в вакууме возможен в электронных лампах.



Электронная лампа - это устройство, в котором применяется явление термоэлектронной эмиссии.

Вакуумный диод - это двух-электродная (А- анод и К - катод) электронная лампа.

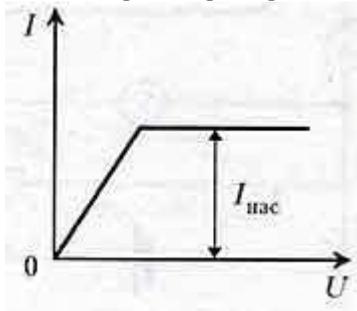
Внутри стеклянного баллона

создается очень низкое давление (10^{-6} - 10^{-7} мм.РТ.ст.).

Н - нить накала, помещенная внутри катода для его нагревания. Поверхность нагретого катода испускает электроны. Если анод соединен с + источника тока, а катод с -, то в цепи протекает постоянный термоэлектронный ток. Вакуумный диод обладает односторонней проводимостью.

Т.е. ток в аноде возможен, если потенциал анода выше потенциала катода. В этом случае электроны из электронного облака притягиваются к аноду, создавая электрического ток в вакууме.

Вольтамперная характеристика вакуумного диода.



При малых напряжениях на аноде не все электроны, испускаемые катодом, достигают анода, и электрический ток небольшой. При больших напряжениях ток достигает насыщения, т.е. максимального значения.

Вакуумный диод используется для выпрямления переменного тока.

Электронные пучки- это поток быстро летящих электронов в электронных лампах и газоразрядных устройствах.

Свойства электронных пучков:

- отклоняются в электрических полях;
- отклоняются в магнитных полях под действием силы Лоренца;
- при торможении пучка, попадающего на вещество возникает рентгеновское излучение;
- вызывает свечение (люминисценцию) некоторых твердых и жидких тел (люминофоров);
- нагревают вещество, попадая на него.

Электронно - лучевая трубка (ЭЛТ)- используются явления термоэлектронной эмиссии и свойства электронных пучков.

ЭЛТ состоит из электронной пушки, горизонтальных и вер-

тикальных отклоняющих пластин - электродов и экрана.

В электронной пушке электроны, испускаемые подогревным катодом, проходят через управляющий электрод-сетку и ускоряются анодами. Электронная пушка фокусирует электронный пучок в точку и изменяет яркость свечения на экране. Отклоняющие горизонтальные и вертикальные пластины позволяют перемещать электронный пучок на экране в любую точку экрана. Экран трубки покрыт люминофором, который начинает светиться при бомбардировке его электронами.

Существуют два вида трубок:

- 1) с электростатическим управлением электронного пучка (отклонение эл. пучка только лишь электрическим полем);
- 2) с электромагнитным управлением (добавляются магнитные отклоняющие катушки).

Основное применение ЭЛТ:

кинескопы в телеаппаратуре;

дисплеи ЭВМ;

электронные осциллографы в измерительной технике.

Контрольные вопросы:

1. Что такое вакуум?
2. Дайте определение понятия термоэлектронной эмиссии.
3. Устройство и принцип работы вакуумного диода.
4. Как можно сделать воздух проводником?
5. Что такое ионизация газа и рекомбинация газа.
6. Что такое газовый разряд?
7. Несамостоятельный разряд в газах.
8. Виды самостоятельных разрядов в газах.

Лекция №24. Электрический ток в полупроводниках

Полупроводник- вещество, у которого удельное сопротивление может изменяться в широких пределах и очень быстро убывает с повышением температуры., а это значит, что электрическая проводимость ($1/R$) увеличивается. (наблюдается у кремния, германия, селена и у некоторых соединений).

Механизм проводимости у полупроводников:

Кристаллы полупроводников имеют атомную кристаллическую решетку, где внешние электроны связаны с соседними атомами ковалентными связями.

При низких температурах у чистых полупроводников свободных электронов нет и он ведет себя как диэлектрик.

Полупроводники чистые (без примесей)

Если полупроводник чистый (без примесей), то он обладает **собственной** проводимостью, которая невелика.

Собственная проводимость бывает двух видов:

1) ***электронная (проводимость "n" - типа)***

При низких температурах в полупроводниках все электроны связаны с ядрами и сопротивление большое; при увеличении температуры кинетическая энергия частиц увеличивается, рвутся связи и возникают свободные электроны - сопротивление уменьшается.

Свободные электроны перемещаются противоположно вектору напряженности электрического поля.

Электронная проводимость полупроводников обусловлена наличием свободных электронов.

2) ***дырочная (проводимость "p" - типа)***

При увеличении температуры разрушаются ковалентные связи, осуществляемые валентными электронами, между атомами и образуются места с недостающим электроном - "дырка".

Она может перемещаться по всему кристаллу, т.к. ее место может замещаться валентными электронами. Перемещение "дырки" равноценно перемещению положительного заряда.

Перемещение дырки происходит в направлении вектора напряженности электрического поля.

Кроме нагревания, разрыв ковалентных связей и возникновение собственной проводимости полупроводников могут быть вызваны освещением (фотопроводимость) и действием сильных электрических полей.

Общая проводимость чистого полупроводника складывается из проводимостей "p" и "n" - типов и называется электронно-дырочной проводимостью.

Полупроводники при наличии примесей

- у них существует **собственная + примесная** проводимость. Наличие примесей сильно увеличивает проводимость.

При изменении концентрации примесей изменяется число носителей эл. тока - электронов и дырок.

Возможность управления током лежит в основе широкого применения полупроводников.

Существуют:

1) **донорные** примеси (отдающие)

- являются дополнительными поставщиками электронов в кристаллы полупроводника, легко отдают электроны и увеличивают число свободных электронов в полупроводнике.

2) Это проводники "**n**" - типа, т.е. полупроводники с донорными примесями, где основной носитель заряда - электроны, а неосновной - дырки.

Такой полупроводник обладает электронной примесной проводимостью.

Например - мышьяк.

2) **акцепторные** примеси (принимающие)

- создают "дырки" , забирая в себя электроны.

Это полупроводники "**p**" - типа, т.е. полупроводники с акцепторными примесями, где основной носитель заряда - дырки, а неосновной - электроны.

Такой полупроводник обладает дырочной примесной проводимостью.

Например - индий.

Электрические свойства "p-n" перехода

"p-n" переход (или электронно-дырочный переход) - область контакта двух полупроводников, где происходит смена проводимости с электронной на дырочную (или наоборот).

В кристалле полупроводника введением примесей можно создать такие области. В зоне контакта двух полупроводников с различными проводимостями будет проходить взаимная диффузия электронов и дырок и образуется запирающий электрический слой. Электрическое поле запирающего слоя препятствует дальнейшему переходу электронов и дырок через границу. Запирающий слой имеет повышенное сопротивление по сравнению с другими областями полупроводника.

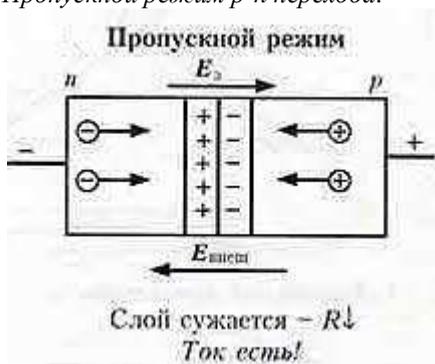
Внешнее электрическое поле влияет на сопротивление запирающего слоя.

При прямом (пропускном) направлении внешнего эл. поля эл. ток проходит через границу двух полупроводников.

Т.к. электроны и дырки движутся навстречу друг другу к границе раздела, то электроны, переходя границу, заполняют дыр-

ки. Толщина запирающего слоя и его сопротивление непрерывно уменьшаются.

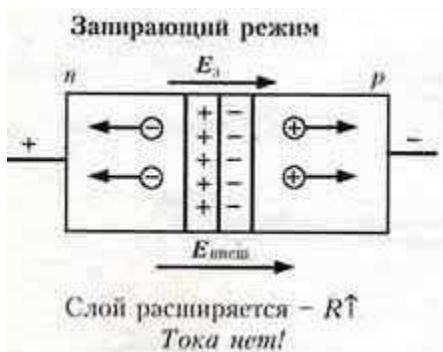
Пропускной режим p-n перехода:



При запирающем (обратном) направлении внешнего электрического поля электрический ток через область контакта двух полупроводников проходить не будет.

Т.к. электроны и дырки перемещаются от границы в противоположные стороны, то запирающий слой утолщается, его сопротивление увеличивается.

Запирающий режим p-n перехода:



Таким образом, электронно-дырочный переход обладает односторонней проводимостью.

Полупроводниковые диоды

Полупроводник с одним "p-n" переходом называется полупроводниковым диодом.

При наложении эл. поля в одном направлении сопротивление полупроводника велико, в обратном - сопротивление мало.

Контрольные вопросы:

1. Какие вещества относятся к полупроводникам?
2. Чистые полупроводники.
3. Полупроводники с примесями.
4. В каких приборах используется зависимость сопротивления полупроводника от температуры и освещенности?
5. Как образуется р-п-переход? Применение р-п-перехода.
6. Назовите электрические свойства р-п-перехода.

Лекция №25. Магнитное поле и его свойства.

Магнитная индукция. Закон Ампера

Взаимное отталкивание одноименных и притяжение разноименных полюсов магнита похоже на взаимодействие электрических зарядов. Но попытки установить связь между этими явлениями длительное время не давали результатов.

В 1820 году Х. Эрстед (датский физик) заметил, как магнитная стрелка поворачивается при включении и отключении электрического тока в цепи. В этом же году А. Ампер (французский физик) обнаружил, как два параллельных проводника с током отталкиваются при прохождении по ним токов противоположных направлений и притягиваются, если токи имеют одинаковое направление. На основании опытов Ампер сделал вывод, что никаких магнитных зарядов в природе нет, взаимодействуют движущиеся электрические заряды.

Особая форма материи, через которую осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами – магнитное поле. – Существует магнитное поле около проводников с током и порождается током.

Свойства магнитного поля:

1. Магнитное поле **создается** движущимися заряженными частицами и телами, проводниками с током, постоянными магнитами.
2. Магнитное поле **действует** на движущиеся заряженные частицы и тела, на проводники с током, на постоянные магниты, на рамку с током.
3. Магнитное поле **вихревое**, т.е. не имеет источника.
Вектор магнитной индукции – это величина, количественно

характеризующая магнитное поле.

Направление магнитного поля устанавливают с помощью вектора магнитной индукции.

Вектор магнитной индукции направлен от южного полюса S к северному полюсу N, и устанавливается с помощью правила буравчика (штопора, правого винта):

Если направление поступательного движения буравчика указывает движение тока в проводнике, то вращательное движение рукоятки буравчика покажет направление линий магнитной индукции.

Графически магнитное поле изображают с помощью линий магнитной индукции.

Линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым направлены так же, как и вектор B в данной точке поля.

Свойства линий магнитной индукции:

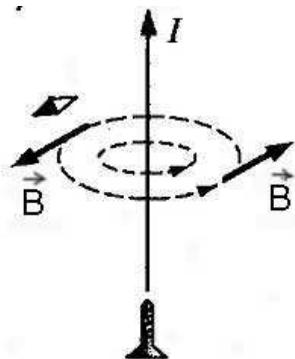
- имеют направление;
- непрерывны;
- замкнуты (т.е. магнитное поле является вихревым);
- не пересекаются;
- по их густоте судят о величине магнитной индукции.

Если поле образовано такими линиями, то поле считается вихревым. Значит магнитное поле – вихревое.

Направление линий магнитной индукции определяется по правилу буравчика или по правилу правой руки.

Правило буравчика (в основном для прямого проводника с током):

Если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением линий магнитного поля тока.



Правило правой руки (для определения магнитных линий внутри соленоида):

Если обхватить соленоид ладью правой руки так, чтобы четыре пальца были направлены вдоль тока в витках, то отставленный большой палец покажет направление линий магнитного поля внутри соленоида.

Чтобы характеризовать силовое действие магнитного поля на проводник с током вводится величина, называемая – **вектор магнитной индукции B** .

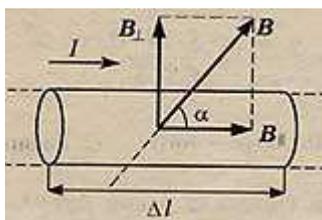
При исследовании магнитного поля с помощью прямолинейного проводника с током экспериментально получили формулы для определения магнитной индукции:

$$B = F/IL; B = M/IS;$$

где F – сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током (Н);

I – сила тока (А); L – длина проводника (м); M – момент силы (Нм); S – площадь рамки с током (м²)

Единица измерения индукции определяется: $(B) = 1Н/ 1А \cdot 1м = 1 = 1Тл$ (*тесла*)



Максимальная **сила Ампера** вычисляется по формуле:

$$F_A = I \Delta L B$$

При произвольном значении угла α между расположением проводника с током к вектору магнитной индукции, для определения силы Ампера применяют формулу:

$$F = I B L \sin \alpha - \text{закон Ампера}$$

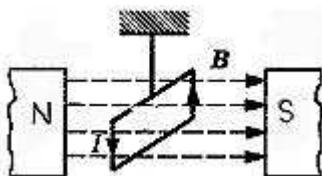
Направление силы Ампера определяется с помощью **правила левой руки**: левую руку располагаем так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца показывали направление тока в проводнике, то большой палец отогнутый на 90° покажет направление силы Ампера.

Магнитный поток:

$$\Phi = B S;$$

Измеряется магнитный поток: 1 вебер (Вб) = 1 Тл·м.

Действие магнитного поля на рамку с током: однородное магнитное поле ориентирует



рамку (т.е. создается вращающий момент и рамка поворачивается в положение, когда вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости рамки).

Неоднородное магнитное поле ориентирует + притягивает или отталкивает рамку с током.

Так, в магнитном поле прямого проводника с током (оно неоднородно) рамка с током ориентируется вдоль радиуса магнитной линии и притягивается или отталкивается от прямого проводника с током в зависимости от направления токов.

Контрольные вопросы:

1. Какие опытные факты подтверждают существование магнитного поля Земли?

2. Какие линии называют линиями магнитной индукции? В чем состоит их характерная особенность.

3. В чем состоит и что доказывает опыт Эрстеда?

4. Какая векторная физическая величина характеризует магнитное поле?

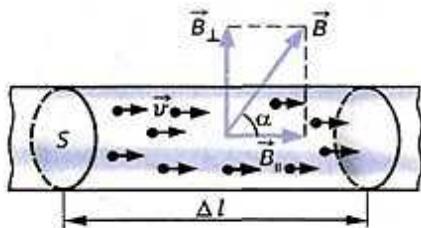
5. Сформулируйте правило буравчика и правило правой руки, определяющее направление вектора магнитной индукции.

6. Сформулируйте закон Ампера. Запишите его математическое выражение.

7. Прямой проводник длиной 15 см помещен в однородное магнитное поле с индукцией 0,4 Тл, направленной перпендикулярно направлению тока. Сила тока, протекающего по проводнику 6А. Найдите силу Ампера, действующую на проводник.

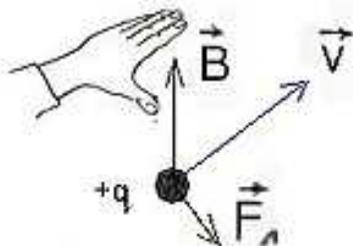
Лекция №26. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Магнитные свойства вещества

Сила, которая действует на единичную, движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля назвали **силой Лоренца**. В честь основателя электронной теории голландского физика Х. Лоренца.



$$F_{\text{Л}} = |q| v B \sin \alpha ,$$

где α - угол между вектором скорости и вектором B ; q - заряд частицы; v - скорость заряда; B - индукции магнитного поля;



Направление силы Лоренца определяют с помощью правила левой руки: ладонь левой руки располагают так, чтобы составляющая магнитной индукции входила в ладонь, четыре, вытянутые пальца, показывали направление движения положительного заряда (против движения отрицательного), то тогда отогнутый на 90° большой палец укажет направление действующей на заряд силы Лоренца .

Так как сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости заряда, то она не совершает работы (т.е. не изменяет величину скорости заряда и его кинетическую энергию).

Так как сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости заряда, то она не совершает работы (т.е. не изменяет величину скорости заряда и его кинетическую энергию).

Если заряженная частица движется параллельно силовым линиям магнитного поля, то $F_{\text{Л}} = 0$, и заряд в магнитном поле движется равномерно и прямолинейно.

Если заряженная частица движется перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, то сила Лоренца является центростремительной.

Магнитные свойства вещества объясняются согласно гипотезе Ампера циркулирующими внутри любого вещества замкнутыми токами:

внутри атомов, вследствие движения электронов по орбитам, существуют элементарные электрические токи, которые создают элементарные магнитные поля.

Поэтому:

1. если вещество не обладает магнитными свойствами - элементарные магнитные поля несориентированы(из-за теплового движения);

2. если вещество обладает магнитными свойствами - элементарные магнитные поля одинаково направлены (сориентированы) и образуется собственное внутреннее магнитное поле вещества.

Намагничивание вещества - появление собственного внутреннего магнитного поля.

Все вещества, помещенные во внешнее магнитное поле, создают собственное внутреннее магнитное поле.

По своим магнитным свойствам все вещества подразделяются на:

парамагнетики	диамагнетики	ферромагнетики
слабомагнитные вещества	слабомагнитные вещества	сильномагнитные вещества
O ₂ , Al, Pb и др.	гелий, аргон, Au, Zn, Cu, вода, стекло и др.	небольшая группа кристаллич. тел: Fe, Ni, Co и сплавы
внутреннее магнитное поле направлено также, как и внешнее магнитное поле	внутреннее магнитное поле направлено противоположно внешнему магнитному полю, но слабовыражено	внутреннее магнитное поле в 100-1000 раз больше внешнего магнитного поля

Ферромагнетики сохраняют сильную намагниченность и после удаления внешнего магнитного поля и называются постоянными магнитами. Сильное внутреннее магнитное поле ферромагнетиков объясняется не только обращением электронов по орбитам, но, в основном, вращением их вокруг собственной оси. Чтобы полностью размагнитить ферромагнетик, надо поместить его во внешнее магнитное поле противоположно направленное. Существуют ферромагнетики, не проводящие электрический ток - ферриты.

Точка Кюри:

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура - точка Кюри.

1. Если t вещества $<$ t Кюри, то вещество обладает ферро-

магнитными свойствами.

2. Если t вещества $> t$ Кюри, то ферромагнитные свойства (намагниченность) исчезают, и вещество становится парамагнетиком.

Поэтому постоянные магниты при нагревании теряют свои магнитные свойства.

Магнитная проницаемость вещества

Если проводник с током создает в вакууме магнитное поле с магнитной индукцией B_0 , то в другой среде магнитное поле, созданное этим же проводником с током будет иметь индукцию B . Т.е. значение магнитной индукции зависит от среды, в которой существует магнитное поле. Отношение магнитной индукции B поля в данной среде к магнитной индукции B_0 в вакууме, характеризует магнитные свойства данной среды и называется относительной магнитной проницаемостью вещества - μ .

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

Если $\mu > 1$ для парамагнетиков, если $\mu < 1$ для диамагнетиков, если $\mu \ll 1$ для ферромагнетиков.

Применение ферромагнитов: постоянные магниты, изготовление магнитной ленты и пленки; сердечники трансформаторов, генераторов, электродвигателей.

Контрольные вопросы:

1. На какие заряды способно действовать магнитное поле?
2. Какую силу называют силой Лоренца?
3. Что такое электромагнитная индукция?
4. Сформулируйте правило левой руки.
5. Опишите опыт, в котором с помощью магнитного поля можно получить электрический ток.
6. Как устроен генератор постоянного тока?
7. Индукция магнитного поля равна $0,3$ Тл направлена в положительном направлении по оси Ox . Найдите модуль и направление силы Лоренца, действующей на протон, движущийся в положительном направлении оси Oy со скоростью $5 \cdot 10^6$ м/с. (заряд протона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Лекция №27. Явление электромагнитной индукции. ЭДС ин-

дукции. Опыт Фарадея

М. Фарадей - 1831 г. установил, что электрический ток может возникать в контуре не только при движении проводника в магнитном поле, но и при любом изменении магнитного поля тока в контуре.

Способы получения индукционного тока

1. перемещение магнита и катушки относительно друг друга;
2. перемещение одной катушки относительно другой;
3. изменение силы тока в одной из катушек;
4. замыкание и размыкание цепи;
5. перемещение сердечника;

Явление электромагнитной индукции- возникновение электрического тока в замкнутом проводящем контуре, который либо покоится в переменном во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле так, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется. Чем быстрее меняется число линий магнитной индукции, тем больше индукционный ток.

На концах проводника, движущегося в магнитном поле, возникает разность потенциалов, или *ЭДС индукции*:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = U = El = vBl,$$

где v - скорость движения проводника; B – вектор магнитной индукции; l – длина проводника.

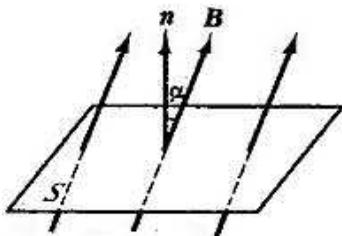
Закон электромагнитной индукции: ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -\dot{\Phi}.$$

Магнитным потоком через поверхность площадью S называют величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции B на площадь S и косинус угла между векторами B и n .

$$\Phi = B \cdot S \cdot \sin\alpha$$

Магнитный поток пропорционален числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью S .



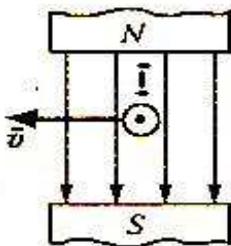
Магнитный поток характеризует распределение магнитного поля по поверхности, ограниченной контуром:

$$\Phi = (B \cdot \Delta S)$$

$$[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2$$

Магнитный поток в 1 Вб создается однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м², расположенной перпендикулярно вектору магнитной индукции.

Прямолинейный проводник



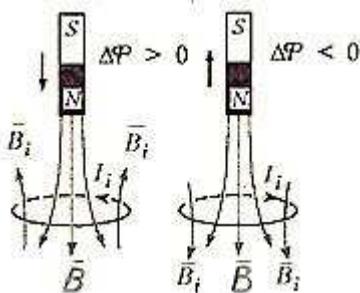
Направление индукционного тока определяется по правилу правой руки:

Если поставить правую руку так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, отставленный на 90 градусов большой палец указывал направление вектора скорости, то выпрямленные 4 пальца покажут направление индукционного тока в проводнике.

проводнике.

Замкнутый контур

Направление индукционного тока в замкнутом контуре определяется по правилу Ленца.



Правило Ленца: возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует изменению магнитного потока, которым он вызван.

Применение правила Ленца:

1. показать направление вектора B внешнего магнитного поля;
2. определить увеличивается или уменьшается магнитный поток через контур;
3. показать направление вектора B_i магнитного поля индукционного тока (при уменьшении магнитного потока вектора B внешнего м.поля и B_i магнитного поля индукционного тока должны быть направлены одинаково, а при увеличении магнитного потока B и B_i должны быть направлены противоположно);
4. по правилу буравчика определить направление индукционного тока в контуре.

Контрольные вопросы:

1. Объясните причину возникновения и направление индукционного тока в опытах Фарадея.
2. Чему равна ЭДС индукции на концах проводника длиной l , движущегося в магнитном поле?
3. В чем состоит явление электромагнитной индукции?
4. Сформулируйте закон электромагнитной индукции.
5. Сформулируйте правило Ленца. Приведите примеры его применения.
6. Найдите направление и величину ЭДС индукции в проводочной рамке при равномерном уменьшении магнитного потока на 6 мВб за $0,05 \text{ с}$.

Лекция №28. Величина ЭДС индукции. Вихревое электрическое поле. Явление самоиндукции. Энергия магнитного поля

Самоиндукция является важным частным случаем электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий ЭДС индукции, создается током в самом контуре. Если ток в рассматриваемом контуре по каким-то причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока, а, следовательно, и собственный магнитный поток, пронизывающий контур. В контуре возникает ЭДС самоиндукции, которая согласно правилу Ленца препятствует изменению тока в контуре. Собственный магнитный поток Φ , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока I :

$$\Phi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности L в этой формуле называется коэффициентом самоиндукции или индуктивностью катушки.

Индуктивность контура – физическая величина, определяемая магнитным потоком самоиндукции через поверхность, ограниченную проводящим контуром с током I А.

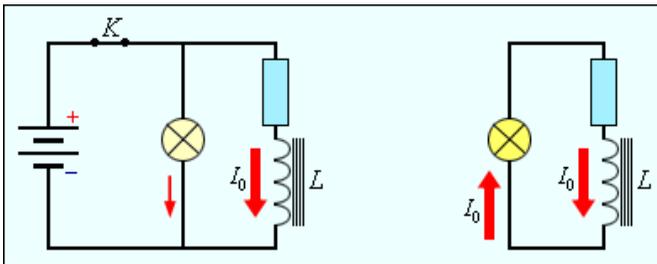
Единица индуктивности в СИ называется генри (Гн). Индуктивность контура или катушки равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А собственный поток равен 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ А}.$$

ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно формуле Фарадея равна

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \mathcal{E}_L = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в ней. 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. 4.21.1). Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.



Магнитная энергия катушки. При размыкании ключа К лампа ярко вспыхивает

Из закона сохранения энергии следует, что вся энергия, запасенная в катушке, выделится в виде джоулева тепла. Если обозначить через R полное сопротивление цепи, то за время Δt выделится количество теплоты $\Delta Q = I^2 R \Delta t$.

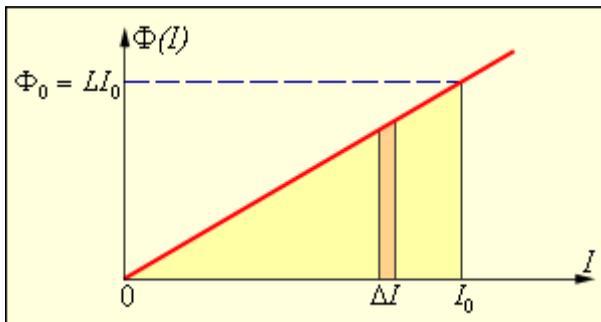
Выражение для ΔQ можно записать в виде

$$\Delta Q = -LI \Delta I = -\Phi(I) \Delta I.$$

В этом выражении $\Delta I < 0$; ток в цепи постепенно убывает от первоначального значения I_0 до нуля. Полное количество теплоты, выделившейся в цепи, можно получить, выполнив операцию интегрирования в пределах от I_0 до 0. Это дает

$$Q = \frac{LI_0^2}{2}.$$

Эту формулу можно получить графическим методом, изобразив на графике зависимость магнитного потока $\Phi(I)$ от тока I (рис. 4.21.2). Полное количество выделившейся теплоты, равное первоначальному запасу энергии магнитного поля, определяется площадью изображенного на рис. 4.21.2 треугольника.



Вычисление энергии магнитного поля

Таким образом, энергия W_m магнитного поля катушки с индуктивностью L , создаваемого током I , равна

$$W_{\text{м}} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$

Контрольные вопросы:

1. Какое физическое явление называется самоиндукцией? Чему равна ЭДС самоиндукции?
2. Что называется индуктивностью контура?
3. Чему равна энергия магнитного поля катушки?
4. Как зависит индуктивность катушки от числа витков? Почему?
5. При равномерном возрастании индукции магнитного поля, перпендикулярного поперечному сечению проволочной катушки площадью 10 см^2 , от 0 до 0,2 Тл за 0,001 с на ее концах возникло напряжение 100В. Сколько витков имеет катушка?

Лекция №29. Механические колебания и волны

Колебаниями называются движения или процессы, которые характеризуются определенной повторяемостью во времени. Колебательные процессы широко распространены в природе и технике, например качание маятника часов, переменный электрический ток и т.д. При колебательном движении маятника изменяется координата его центра масс, в случае переменного тока колеблются напряжение и ток в цепи.

Физическая природа колебаний может быть разной, поэтому различают колебания механические, электромагнитные и др.

Колебания называются *свободными* (или *собственными*), если они совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему (систему, совершающую колебания).

Простейшим типом колебаний являются *гармонические колебания* — колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса). Гармонические колебания величины описываются уравнением типа:

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где A — максимальное значение колеблющейся величины, называемое *амплитудой колебания*; ω_0 — *круговая (циклическая)*

частота. Периодически изменяющийся аргумент косинуса $(\omega_0 t + \varphi)$ называется *фазой колебания*. Она определяет смещение колеблющейся величины от положения равновесия в данный момент времени t . Величина φ в уравнении гармонических колебаний называется *начальной фазой*. Она определяет смещение колеблющейся величины от положения равновесия в начальный момент времени ($t = 0$).

Определенные состояния системы, совершающей гармонические колебания, повторяются через промежуток времени T , называемый *периодом колебания*.

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

Величина, обратная периоду колебаний,

$$\nu = \frac{1}{T},$$

т.е. число полных колебаний, совершаемых в единицу времени, называется *частотой колебаний*.

Единица частоты — герц (Гц): 1 Гц — частота периодического процесса, при которой за 1 с совершается один цикл процесса.

Энергия колеблющегося тела при отсутствии сил трения рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{mv^2}{2} = \frac{kx^2}{2}$$

Вынужденные колебания совершаются при воздействии на систему, в которой могут происходить колебания, периодической силы. При этом может наблюдаться *резонанс*: резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения внешней силы с собственной частотой колебаний системы.

Пружинный маятник — это груз массой m , подвешенный на абсолютно упругой и совершающий гармонические колебания под действием упругой силы $F = -kx$, где k — *жесткость* пружины. Пружинный маятник совершает гармонические колебания по закону $x = \cos(\omega_0 t + \varphi)$ с циклической частотой

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

и периодом

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

Математический маятник — это идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на нерастяжимой невесомой нити, колеблющаяся под действием силы тяжести. Выражение для периода колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Свободные гармонические колебания в колебательном контуре.

Среди различных физических явлений особое место занимают электромагнитные колебания, при которых электрические величины (заряды, токи) периодически изменяются и которые сопровождаются взаимными превращениями электрического и магнитного полей. Для возбуждения и поддержания электромагнитных колебаний используется **колебательный контур** — цепь, состоящая из включенных последовательно катушки индуктивностью L конденсатора емкостью C резистора сопротивлением R .

Контрольные вопросы:

1. Какие колебания называют механическими?
2. Какие колебания называют свободными? Какие колебания называют вынужденными? Назовите примеры.
3. Запишите уравнения описывающее свободные колебания. Охарактеризуйте каждую величину.
4. Что называется периодом колебаний, циклической частотой, фазой и амплитудой колебания?
5. Какой процесс называется резонансом?

Лекция №30. Свободные электромагнитные колебания в кон-

туре. Автоколебания

В электрических цепях, так же как и в механических системах, таких как груз на пружине или маятник, могут возникать **свободные колебания**.

Электромагнитными колебаниями называют периодические взаимосвязанные изменения заряда, силы тока и напряжения.

Свободными колебаниями называют такие, которые совершаются без внешнего воздействия за счет первоначально накопленной энергии.

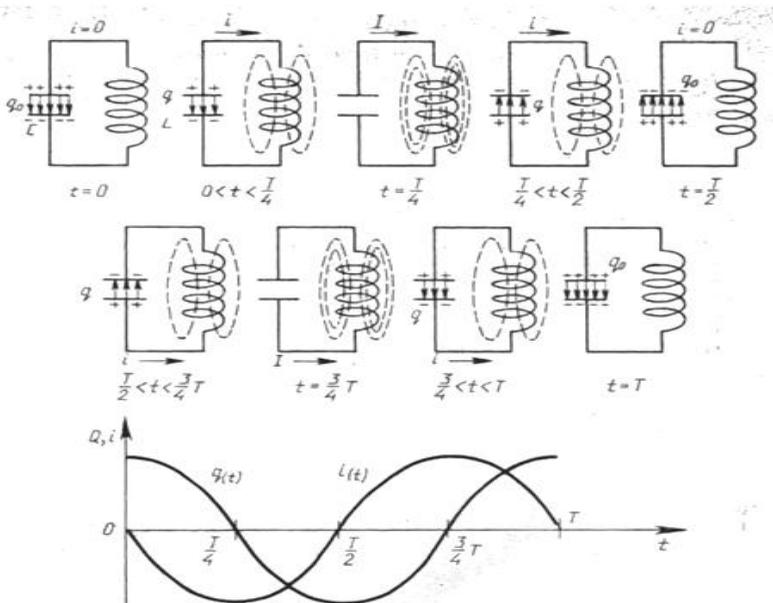
Вынужденными называются колебания в цепи под действием внешней периодической электродвижущей силы

Свободные электромагнитные колебания – это периодически повторяющиеся изменения электромагнитных величин (q – электрический заряд, I – сила тока, U – разность потенциалов), происходящие без потребления энергии от внешних источников.

Простейшей электрической системой, способной совершать свободные колебания, является **последовательный RLC-контур** или **колебательный контур**.

Колебательный контур – это система, состоящая из последовательно соединенных конденсатора емкости C , катушки индуктивности L и проводника с сопротивлением R

Рассмотрим, как происходят колебания в колебательном контуре и какие изменения энергии при этом происходят. Рассмотрим сначала случай, когда в контуре нет потерь электромагнитной энергии ($R = 0$).



Если зарядить конденсатор до напряжения U_0 то в начальный момент времени $t_1=0$ на обкладках конденсатора установятся амплитудные значения напряжения U_0 и заряда $q_0 = CU_0$.

Полная энергия W системы равна энергии электрического поля $W_{эл}$:

$$W = W_{эл} = \frac{CU_0^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C}$$

Если цепь замыкают, то начинает течь ток. В контуре возникает э.д.с. самоиндукции

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Вследствие самоиндукции в катушке конденсатор разряжается не мгновенно, а постепенно (так как, согласно правилу Ленца, возникающий индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван. Т.е. магнитное поле индукционного тока не дает мгновенно увеличиться магнитному потоку тока в контуре). При этом ток увеличивается постепенно, достигая своего максимального значения

I_0 в момент времени $t_2=T/4$, а заряд на конденсаторе становится равным нулю.

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля. Полная энергия контура после разрядки конденсатора равна энергии магнитного поля W_m :

$$W = W_m = \frac{LI^2}{2}$$

В следующий момент времени ток течет в том же направлении, уменьшаясь до нуля, что вызывает перезарядку конденсатора. Ток не прекращается мгновенно после разрядки конденсатора вследствие самоиндукции (теперь магнитное поле индукционного тока не дает магнитному потоку тока в контуре мгновенно уменьшиться). В момент времени $t_3=T/2$ заряд конденсатора опять максимален и равен первоначальному заряду $q = q_0$, напряжение тоже равно первоначальному $U = U_0$, а ток в контуре равен нулю $I = 0$.

Затем конденсатор снова разряжается, ток через индуктивность течет в обратном направлении. Через промежуток времени T система приходит в исходное состояние. Завершается полное колебание, процесс повторяется.

График изменения заряда и силы тока при свободных электромагнитных колебаниях в контуре показывает, что колебания силы тока отстают от колебаний заряда на $\pi/2$.

В любой момент времени полная энергия:

$$W = W_{эл} + W_m = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_0^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C}$$

При свободных колебаниях происходит периодическое превращение электрической энергии $W_э$, запасенной в конденсаторе, в магнитную энергию W_m катушки и наоборот. **Если в колебательном контуре нет потерь энергии, то полная электромагнитная энергия системы остается постоянной.**

Параметры L и C колебательного контура определяют только

собственную частоту свободных колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и период колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \text{ - формула Томпсона}$$

При свободных колебаниях энергия системы уменьшается. В связи с этим стали широко применяться **автоколебания** — незатухающие колебания, поддерживаемые в системе за счет **постоянно-го** внешнего источника энергии, причем сама система управляет им, обеспечивая согласованность поступления энергии определенными порциями в нужный момент времени.

Контрольные вопросы:

1. Что называют электромагнитными колебаниями?
2. Какую электрическую цепь называют колебательным контуром?
3. В чем различие между свободными и вынужденными электромагнитными колебаниями?
4. Объясните, почему в контуре возникают гармонические незатухающие колебания заряда и силы тока.
5. Чему равна энергия контура в произвольный момент времени?
6. Как зависит период собственных колебаний в колебательном контуре от величины электроемкости конденсатора и индуктивности катушки?
7. Конденсатор электроемкостью 1 мкФ, заряжен до напряжения 225 В, подключили к катушке с индуктивностью 10 мГн. Найдите максимальную силу тока в контуре.

Лекция №31. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный ток. Производство и передача электрической Энергии

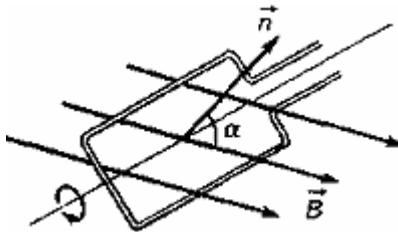
Как и в случае механических колебаний, вынужденные **электромагнитные колебания** проявляются при наличии внешней периодически изменяющейся силы. Такие колебания проявляются, например, при наличии в цепи периодической электродвижущей силы. Переменная ЭДС индукции возникает в проводочной рамке из нескольких витков, вращающейся в поле постоянного магнита. При этом магнитный поток, пронизывающий рамку, периодически меняется. В соответствии с законом электромагнитной индукции периодически меняется и возникающая ЭДС индукции. Если рамку замкнуть на гальванометр, его стрелка начнет колебаться около положения равновесия, показывая, что в цепи

идет переменный ток. Отличительной особенностью вынужденных колебаний является зависимость их амплитуды от частоты изменения внешней силы.

Гармоническая ЭДС возникает, например, в рамке, которая вращается с постоянной угловой скоростью в однородном магнитном поле с индукцией B . Магнитный поток Φ , пронизывающий рамку с площадью S ,

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t$$

где - $\alpha = \omega t$ угол между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции .



По закону электромагнитной индукции Фарадея ЭДС индукции равна

$$\varepsilon_i = - \Delta \Phi / \Delta t$$

где - $\Delta \Phi / \Delta t$ скорость изменения потока магнитной индукции.

Гармонически изменяющийся магнитный поток вызывает синусоидальную ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = BS \omega \sin \omega t = \varepsilon_m \sin \omega t$$

где - $\varepsilon_m = BS \omega$ амплитудное значение ЭДС индукции.

Если к контуру подключить источник внешней гармонической ЭДС

$$e = \varepsilon_m \sin \omega t$$

то в нем возникнут вынужденные колебания, происходящие с циклической частотой ω , совпадающей с частотой источника.

При этом вынужденные колебания совершают заряд q , разность потенциалов u , сила тока i и другие физические величины.

Это незатухающие колебания, так как к контуру подводится энергия от источника, которая компенсирует потери. Гармонически изменяющиеся в цепи ток, напряжение и другие величины называют переменными. Они, очевидно, изменяются по величине и направлению. Токи и напряжения, изменяющиеся только по величине, называют пульсирующими.

В промышленных цепях переменного тока России принята частота 50 Гц.

Для подсчета количества теплоты Q , выделяющейся при прохождении переменного тока по проводнику с активным сопротивлением R , нельзя использовать максимальное значение мощности, так как оно достигается только в отдельные моменты времени. Необходимо использовать среднюю за период мощность - отношение суммарной энергии W , поступающей в цепь за период, к величине периода:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} I_{\text{м}} U_{\text{м}} = \frac{1}{2} I_{\text{м}}^2 R$$

Поэтому количество теплоты, выделится за время T :

$$Q = \frac{1}{2} I_{\text{м}} U_{\text{м}} T$$

Действующее значение I силы переменного тока равно силе такого постоянного тока, который за время, равное периоду T , выделяет такое же количество теплоты, что и переменный ток:

$$I^2 RT = \frac{1}{2} I_{\text{м}}^2 RT$$

Отсюда действующее значение тока

$$I = \frac{I_{\text{м}}}{\sqrt{2}},$$

где $I_{\text{м}}$ - амплитуда силы тока;

Аналогично *действующее значение напряжения*

$$U = \frac{U_{\text{м}}}{\sqrt{2}},$$

где U_m – амплитуда напряжения;

Индуктивное сопротивление катушки: $X_L = \omega L$;

Колебания силы тока в катушке индуктивности отстают по фазе на $\pi/2$ от колебаний напряжения на ней.

Емкостное сопротивление: $X_c = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1}{\omega C}$

Колебания силы тока в цепи конденсатора опережают по фазе колебания напряжения на его обкладках на $\pi/2$.

При вынужденных электромагнитных колебаниях возможен **резонанс** – резкое возрастание амплитуды колебаний силы тока и напряжения при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебания.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Трансформатор - устройство, увеличивающее или уменьшающее напряжение в несколько раз практически без потерь энергии.

Трансформатор состоит из стального сердечника, собранного из отдельных пластин, на котором крепятся две катушки с проводочными обмотками. Первичная обмотка подключается к источнику переменного напряжения, а к вторичной присоединяют устройства, потребляющие электроэнергию.

Величину

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

называют **коэффициентом трансформации**. Для понижающего трансформатора $K > 1$, для повышающего $K < 1$.

Контрольные вопросы:

1. Чему равно индуктивное сопротивление катушки?
2. Что называют действующими значениями силы тока и напряжения?
3. Как связаны между собой действующее значение силы тока и напряжения на конденсаторе в цепи переменного тока?
4. Как связаны между собой действующее значение силы тока и напряжения на катушке индуктивности в цепи переменного тока?

5. Что называется резонансом в цепи электрической?

Лекция №32 Электромагнитные волны. Изобретение радио А.С. Поповым

Электромагнитное поле- это порождающие друг друга переменные электрические и магнитные поля. Теория электромагнитного поля создана Джеймсом Максвеллом в 1865 г.

Он теоретически доказал, что:

любое изменение со временем магнитного поля приводит к возникновению изменяющегося электрического поля, а всякое изменение со временем электрического поля порождает изменяющееся магнитное поле.

Если электрические заряды движутся с ускорением, то создаваемое ими электрическое поле периодически меняется и само создает в пространстве переменное магнитное поле и т.д.

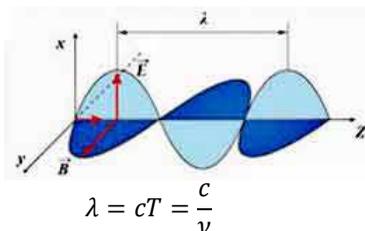
Источниками электромагнитного поля могут быть:

- движущийся магнит;
- электрический заряд, движущийся с ускорением или колеблющийся (в отличие от заряда движущегося с постоянной скоростью, например, в случае постоянного тока в проводнике, здесь создается постоянное магнитное поле).

Электрическое поле существует всегда вокруг электрического заряда, в любой системе отсчета, магнитное – в той, относительно которой электрические заряды движутся,

электромагнитное – в системе отсчета, относительно которой электрические заряды движутся с ускорением.

Электромагнитная волна- это электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды.



Свойства электромагнитных волн:

- распространяются не только в веществе, но и в вакууме;
- распространяются в вакууме со скоростью света ($C = 300$

000 км/с);

- это поперечные волны;
- это бегущие волны (переносят энергию).

Источником электромагнитных волн являются ускоренно движущиеся электрические заряды.

Колебания электрических зарядов сопровождаются электромагнитным излучением, имеющим частоту, равную частоте колебаний зарядов.

Все окружающее нас пространство пронизано электромагнитным излучением. Солнце, окружающие нас тела, антенны передатчиков испускают электромагнитные волны, которые в зависимости от их частоты колебаний носят разные названия.

Спектр электромагнитного излучения в порядке увеличения частоты составляют:

- Низкочастотные волны;
- Радиоволны;
- Инфракрасное излучение;
- Световое излучение;
- Рентгеновское излучение;
- Гамма излучение.

Радиоволны—это электромагнитные волны (с длиной волны от более чем 10000м до 0,005м), служащие для передачи сигналов (информации) на расстояние без проводов.

В радиосвязи радиоволны создаются высокочастотными токами, текущими в антенне.

Радиоволны различной длины распространяются по-разному.

Электромагнитные излучения с длиной волны, меньшей чем 0,005м, но большей чем 770 нм, т. е. лежащие между диапазоном радиоволн и диапазоном видимого света, называются **инфракрасным излучением (ИК)**.

Инфракрасное излучение испускают любые нагретые тела. Источниками инфракрасного излучения служат печи, батареи водяного отопления, электрические лампы накаливания. С помощью специальных приборов инфракрасное излучение можно преобразовать в видимый свет и получать изображения нагретых предметов в полной темноте. Инфракрасное излучение применяется для сушки окрашенных изделий, стен зданий, древесины.

К **видимому свету** относят излучения с длиной волны примерно от 770нм до 380нм, от красного до фиолетового света. Зна-

чения этого участка спектра электромагнитных излучений в жизни человека исключительно велико, так как почти все сведения об окружающем мире человек получает с помощью зрения. Свет является обязательным условием для развития зеленых растений и, следовательно, необходимым условием для существования жизни на Земле.

Невидимое глазом электромагнитное излучение с длиной волны меньше, чем у фиолетового света, называют **ультрафиолетовым излучением** (УФ).. Ультрафиолетовые излучение способно убивать болезнетворных бактерий, поэтому его широко применяют а медицине. Ультрафиолетовое излучение в составе солнечного света вызывает биологические процессы, приводящие к потемнению кожи человека – загару. В качестве источников ультрафиолетового излучения в медицине используются газоразрядные лампы. Трубки таких ламп изготавливают из кварца, прозрачного для ультрафиолетовых лучей; поэтому эти лампы называют кварцевыми лампами.

Рентгеновские лучи (Ри) невидимы глазом. Они проходят без существенного поглощения через значительные слои вещества, непрозрачного для видимого света. Обнаруживают рентгеновские лучи по их способности вызывать определенное свечение некоторых кристаллов и действовать на фотопленку. Способность рентгеновских лучей проникать через толстые слои вещества используется для диагностики заболеваний внутренних органов человека.

В технике рентгеновские лучи применяются для контроля внутренней структуры различных изделий, сварных швов. Рентгеновское излучение обладает сильным биологическим действием и применяется для лечения некоторых заболеваний.

Гамма-излучением называют электромагнитное излучение, испускаемое возбужденными ядрами и возникающее при взаимодействии элементарных частиц.

Организм человека также является источником электрических и магнитных полей. Каждому органу присущи свои электромагнитные поля. В течение жизни поле человека постоянно меняется.

Наиболее совершенный прибор для определения электромагнитных полей человека – энцефалограф. Он позволяет точно измерить поле в разных точках вокруг головы и по этим данным восстановить распределение электрической активности в коре мозга. С помощью энцефалографа врачи диагностируют многие заболевания.

В 1887 году Г.Герц впервые получил электромагнитные волны.

Для получения электромагнитных волн Генрих Герц использовал открытый колебательный контур.

Александр Степанович Попова (1859—1905), повторяя опыты Герца с электроволнами, усовершенствовал приборы так, что в 1889 г. в его приемных резонаторах стали возникать довольно сильные искры. А уже в 1894 г. Попов построил вполне чувствительный к электрическим волнам приемник, принципиальны особенности которого сохранились в радиоаппаратуре до сих пор.

Для увеличения чувствительности приемника Попов использовал явление резонанса, а также изобрёл высоко поднятую приемную антенну. Другой особенностью приемника Попова был способ регистрации волн, для чего Попов применил не искру, а специальный прибор — когерер, незадолго до этого изобретенный Бранли и применявшийся для лабораторных опытов. Когерер представлял собой стеклянную трубку с мелкими металлическими опилками внутри, в оба конца трубки вводились провода, соприкасающиеся с опилками. В обычных условиях электрическое сопротивление в опилках было большим, но когда в цепи создавался переменный ток высокой частоты, между опилками проскакивали искорки и опилки сваривались, так что сопротивление когерера уменьшалось. Встряхиваясь, когерер вновь получал большое сопротивление, и молоточек звонка ударял по колокольчику.

7 мая 1895 г. Попов продемонстрировал действие своего приемника на заседании Русского физико-химического общества. Этот день считается днем рождения радио.

Контрольные вопросы:

1. Что является источником электромагнитных волн?
2. Перечислите основные свойства электромагнитных волн.
3. Начертите схему и объясните принцип действия открытого колебательного контура.
4. Каков принцип работы вибратора Герца?
5. Что называют радиосвязью?

Лекция №33 Звуковые волны, их свойства.

Ультразвук и инфразвук

Звуковыми волнами или просто **звуком** принято называть волны, воспринимаемые человеческим ухом. Диапазон звуковых частот лежит в пределах приблизительно от 20Гц до 20кГц. Волны с частотой менее 20Гц называются **инфразвуком**, а с частотой более 20кГц – **ультразвуком**. Волны звукового диапазона могут распространяться не только в газе, но и в жидкости (продольные волны) и в твердом теле (продольные и поперечные волны). Однако волны в газообразной среде – среде нашего обитания – представляют особый интерес.

Изучением звуковых явлений занимается раздел физики, который называют **акустикой**.

Свойства звуковых волн:

Спектр – разложение на гармонические колебания по частотам. Восприятие звука органами слуха зависит от того, какие частоты входят в состав звуковой волны. Шум - звуки, образующие набор частот, непрерывно заполняющих некоторый интервал (сплошной спектр частот). Музыкальные (тональные) звуки – звуки, образующие линейчатый спектр частот: частоты n входящие в состав музыкальных звуков, образуют ряд дискретных значений. Музыкальным звукам соответствуют периодические или почти периодические колебания. Каждая синусоидальная звуковая волна называется **тоном**. Высота тона зависит от частоты: чем больше частота, тем выше тон.

Музыкальные звуки с одним и тем же основным тоном различаются тембром, который определяется наличием обертонов - их частотами и амплитудами, характером нарастания амплитуд в начале звучания и их спадом в конце звучания.

Высота звука, качество звука, определяемое человеком субъективно на слух и зависящее в основном от его частоты, т. е. от числа колебаний в секунду.

Громкость звука зависит от интенсивности звука, т. е. определяется амплитудой колебаний в звуковой волне. Наибольшей чувствительностью органы слуха обладают к звукам с частотами от 700 до 6000 Гц. В этом диапазоне ухо способно воспринимать звуки с интенсивностью около $10^{-12} - 10^{-11}$ Вт/м².

Скорость звука - это характеристика среды, в которой распространяется волна. Она определяется двумя факторами: упругостью и плотностью материала. Как правило, в газах скорость звука меньше, чем в жидкостях, а в жидкостях скорость звука меньше,

чем в твёрдых телах, что связано в основном с убыванием сжимаемости веществ в этих фазовых состояниях соответственно. В среднем, в идеальных условиях, в воздухе скорость звука составляет 340—344 м/с.

Хорошо известны животные, обладающие способностью к эхолокации — летучие мыши и дельфины. По своему совершенству эхолокаторы этих животных не уступают, а во многом и превосходят (по надёжности, точности, энергетической экономичности) современные эхолокаторы, созданные человеком.

Эхолокаторы, используемые под водой, называются гидролокаторами или сонарами (название sonar образован из начальных букв трех английских слов: sound — звук; navigation — навигация; range — дальность). Сонары незаменимы при исследованиях морского дна (его профиля, глубины), для обнаружения и исследования различных объектов, движущихся глубоко под водой. При их помощи могут быть легко обнаружены как отдельные большие предметы или животные, так и стаи небольших рыб или моллюсков.

Волны ультразвуковых частот широко используются в медицине в диагностических целях. УЗИ-сканеры позволяют исследовать внутренние органы человека. Ультразвуковое излучение менее вредно для человека, чем рентгеновское.

Контрольные вопросы:

1. Какие диапазоны частот соответствуют звуковой волне?
2. Что изменяется в звуковой волне при переходе из воздуха в воду?
3. Какова длина звуковой волны в воздухе, если ее частота 90 Гц?
4. Ухо человека наиболее чувствительно к частоте 355 Гц. Определите для этой частоты длину звуковой волны в воздухе (скорость звука принять равной 340 м/с).

Лекция №34. Электромагнитная природа света. Скорость света

В начале XIX в. опытным путём была подтверждена справедливость гипотезы о волновой природе света. В то время ни о каких волнах, кроме механических, учёные ещё не знали. Поэтому считали, что свет, подобно звуку, представляет собой механическую упругую волну.

Вы уже знаете, что упругие волны могут возникать только в веществе, поскольку именно частицы вещества совершают упругие колебания, распространяющиеся в пространстве (вспомните опыт, доказывающий, что звук не распространяется в вакууме).

Значит, если свет — упругая волна, то для его распространения нужна среда.

Однако свет от звёзд доходит до нас через такие области космического пространства, где нет вещества. Учитывая этот факт, сторонники волновых воззрений на природу света выдвинули гипотезу о том, что всё мировое пространство заполнено некоей невидимой упругой средой, которую они называли светоносным эфиром (идея о существовании эфира была высказана ещё в XVII в.). Считалось, что именно в этом эфире и распространяется свет.

В то же время предположение о существовании светоносного эфира порождало много противоречий и вопросов. Так, например, в конце второго десятилетия XIX в. было выяснено, что свет является поперечной волной. Известно, что упругие поперечные волны возникают только в твёрдых телах. Получалось, что светоносный эфир представляет собой твёрдое тело. В связи с этим возникал вопрос о том, как планеты и другие небесные тела могут двигаться сквозь твёрдый эфир, не испытывая при этом никакого сопротивления.

Во второй половине XIX в. Максвелл создал теорию электромагнитного поля, согласно которой электромагнитные волны, подобно световым, являются поперечными и распространяются в вакууме со скоростью света. Исходя из того, что световые и электромагнитные волны обладают общими свойствами, Максвелл предположил, что свет является частным проявлением электромагнитных волн.

Дальнейшее развитие физики подтвердило это предположение. Стало ясно, что видимый свет — это только небольшой диапазон электромагнитных волн с длиной волны от $3,8 \cdot 10^{-7}$ до $7,6 \cdot 10^{-7}$ м или с частотами от $4,0 \cdot 10^{14}$ до $8,0 \cdot 10^{14}$ Гц (см. рис. 136).

Тем не менее представление о том, что в некоторых случаях свет ведёт себя аналогично потоку частиц, не потеряло своей актуальности.

К началу XX в. выяснилось, что электродинамика Максвелла не позволяет объяснить некоторые экспериментальные факты. Противоречия между теорией и экспериментальными данными удалось разрешить, предположив, что свет обладает корпускулярными свойствами. В 1900 г. немецкий физик Макс Планк выдвинул гипотезу, что атомы

испускают электромагнитную энергию отдельными порциями — квантами. Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu,$$

где h — коэффициент пропорциональности, получивший название постоянной Планка.

В 1905 г. немецкий физик Альберт Эйнштейн выдвинул идею, согласно которой электромагнитные волны с частотой ν можно рассматривать как поток квантов излучения с энергией

$$E = h\nu.$$

В настоящее время квант электромагнитного излучения называют также фотоном. Фотон (от греч. phos, photos — свет) — это элементарная частица, являющаяся квантом электромагнитного излучения (в том числе света). Фотон не обладает ни массой, ни зарядом и всегда распространяется со скоростью света.

Таким образом, свет обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами.

С увеличением частоты электромагнитного излучения в большей степени проявляются его корпускулярные свойства, т. е. свойства, присущие потоку частиц, и в меньшей — волновые. Из всех диапазонов электромагнитных волн наиболее ярко выраженными корпускулярными свойствами обладает гамма-излучение.

Сейчас мы спокойно относимся к тому, что электромагнитное поле распространяется со скоростью в 300 000 000 м/сек, но в свое время эта величина произвела ошеломляющее впечатление на весь ученый мир. Она была несравнима ни со скоростью распространения упругих волн в воздухе, т. е. звука (330 м/сек), ни со скоростью их распространения в воде (1500 м/сек), ни со скоростью их распространения в твердом теле (5000 м/сек).

Французские физики И. Физо (в. 1849 г.) и Ж. Фуко (в 1850 г.) измерили скорость света в земных условиях и получили результат, весьма близкий к 300000000 м/сек.

, где электрическая постоянная вакуума ϵ_0 и магнитная постоянная вакуума μ_0 .

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} .$$

Подставив значения постоянных получим с величину скорости распространения электромагнитных волн в вакууме:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек.}$$

Контрольные вопросы

1. Каковы были представления учёных о природе света в начале XIX в.?
2. Чем была вызвана необходимость выдвижения гипотезы о существовании светоносного эфира?
3. Какое предположение о природе света было сделано Максвеллом? Какие общие свойства света и электромагнитных волн явились основанием для такого предположения?
4. Как называется частица электромагнитного излучения?

Лекция №35. Свойства света. Законы отражения и преломления света

Закон отражения: отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучем и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения; угол отражения β равен углу падения α .

Закон прямолинейного распространения света: свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

Закон преломления:

Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред, называемая относительным показателем преломления второй среды относительно первой.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21},$$

где n_{21} – относительный показатель преломления (показатель преломления второй среды относительно первой).

Относительный показатель преломления равен отношению абсолютных показателей преломления двух сред:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Абсолютным показателем преломления называется отношение скорости электромагнитных волн в вакууме к величине скорости распространения волн в среде.

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}; \quad n_{21} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Вещество, имеющее больший показатель преломления n_1 , называется оптически более плотной средой, если $n_1 > n_2$. Вещество, имеющее меньший показатель преломления n_1 , называется оптически менее плотной средой, если $n_1 < n_2$.

Свет распространяется из оптически более плотной среды (показатель преломления n_1) в оптически менее плотную среду (показатель преломления n_2 и $n_2 < n_1$). Согласно закону преломления: $\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{n_1}{n_2} > 1$, т.е. угол преломления β больше, чем угол падения α .

Контрольные вопросы:

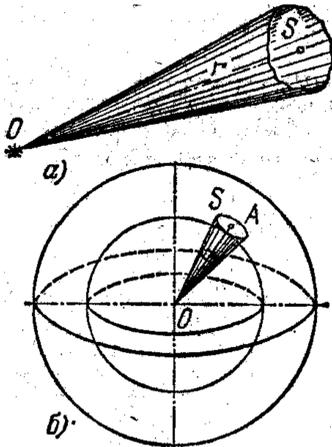
1. Каков физический смысл показателя преломления?
2. Чем отличается относительный показатель преломления от абсолютного?
3. Сформулируйте закон преломления света.
4. Какое физическое явление называют полным внутренним отражением?
5. Найдите скорость распространения света в алмазе.

Лекция №36. Фотометрия. Сила света. Яркость. Освещённость

Раздел оптики, занимающийся измерениями светового потока, изучением характеристик источников света и освещенностей предметов, называют **фотометрией** (от греч. «фотос» — свет).

Электромагнитное излучение, как и любые волны, при своем распространении в какой-либо среде переносит энергию от точки к точке. Если на некотором расстоянии от источника электромагнитных волн мысленно выделить поверхность так, чтобы сквозь нее проходили волны, то энергию, переносимую этими волнами через поверхность за единицу времени, называют **поток**ом излучения или **лучистым потоком** через выделенную поверхность; поток

излучения имеет размерность мощности и измеряется в ваттах.



Когда расстояние от источника электромагнитного излучения до выделенной поверхности велико по сравнению с размерами самого источника, его можно назвать **точечным**. Часто условно считают, что излучение точечного источника не зависит от направления, т. е. происходит равномерно во все стороны.

Поток излучения, падающий на какую-либо поверхность, зависит от площади этой поверхности S , от её положения в пространстве и от расстояния до источника излучения.

В большинстве случаев, приходится рассматривать поток излучения, распространяющийся в ограниченной части пространства. Например, если источник излучения O , линейные размеры которого малы по сравнению с sr (рис.), посылает излучение на площадку S , перпендикулярную к направлению распространения излучения, то на нее попадает только излучение, ограниченное заштрихованной конической поверхностью с вершиной в точке O .

Часть пространства, ограниченную конической поверхностью, называют **телесным углом Ω** . Точку O на рис. называют **вершиной телесного угла**. Когда вершина телесного угла находится в центре шара, угол называют **центральный**. Если из точки O провести шаровые поверхности с различными радиусами r , то, как известно из геометрии, для заданного телесного угла отношение площади вырезанной этим углом поверхности шара S к r^2 для всех поверхностей будет одинаково и может служить мерой телесного угла Ω , т. е.: $\Omega = S/r^2$

Единица телесного угла: $\Omega = 1\text{ м}^2 / 1\text{ м}^2 = 1$ ср.

Стерadianом (ср) называют центральный телесный угол, который вырезает на поверхности шара площадь, равную квадрату радиуса этого шара.

Полный телесный угол $\Omega_{\text{п}}$, охватывающий все пространство: $\Omega = 4\pi$ ср.

Световой поток.

Световое ощущение у человека создает электромагнитное излучение с длиной волны в вакууме в диапазоне примерно от 400

до 760 нм, причем каждой длине волны в этом диапазоне соответствует определенное цветовое ощущение.

Опыты показали, что лучистые потоки, одинаковые, но соответствующие различной длине волны, вызывают неодинаковое раздражение окончаний светочувствительного нерва на сетчатке глаза и поэтому создают световые ощущения, отличающиеся не только по цвету, но и по интенсивности. Наиболее чувствителен наш глаз к излучению с длиной волны 555 нм (зеленый цвет). Одинаковые лучистые потоки с длиной волны, большей или меньшей 555 нм, создают более слабое световое ощущение. Чтобы оценить эту разницу количественно, поступим следующим образом.

Возьмем источники монохроматического излучения разных цветов, но одинаковой мощности (например, в 1 Вт) и будем поочередно сравнивать их в одинаковых условиях с источником излучения с длиной волны 555 нм, мощность которого можно регулировать. Тогда для каждого монохроматического источника мы сможем подобрать такую мощность эталонного источника с длиной волны $\lambda=555$ нм, чтобы световые ощущения, создаваемые этими источниками, были одинаковы по интенсивности. Для сравнения источников можно например, освещать ими соседние участки одного текста, добиваясь одинаковой четкости.

Назовем отношение найденной из таких опытов мощности эталонного источника с длиной волны $\lambda=555$ нм к мощности сравниваемого с ним монохроматического источника **коэффициентом относительной видности**. Оказывается, например, что лучистый поток оранжевых лучей ($\lambda=610$ нм) мощностью в 1 Вт создает световое ощущение такой же интенсивности, как поток зеленых лучей ($\lambda=555$ нм) мощностью 0,5 Вт. Значит, для длины волны $\lambda=610$ нм коэффициент относительной видности $K=0,5$. Для оценки действия излучения на глаз пользуются световым потоком Φ . **Световым потоком называют ту часть потока излучения, которая вызывает в глазу ощущение света и оценивается по световому ощущению.**

Сила света. Единицы силы света и светового потока.

Величина, которая характеризует зависимость светового потока, испускаемого источником света, от направления излучения, называется силой света. Сила света источника малых размеров измеряется световым потоком, испускаемым этим источником внутрь единичного телесного угла в заданном направлении: $J=\Phi/\Omega$.

Будем считать силу света точечного источника по всем

направлениям одинаковой.

В СИ единица силы света **кандела**. *Канделой (кд) называют 1/60 силы света, создаваемой 1см² плоской поверхности платины при температуре ее затвердевания (2046 К) по направлению перпендикуляра к этой поверхности.*

Для источников света, сила света которых зависит от направления, иногда **пользуются средней сферической силой света $J_{\text{ср}}$** . Ее находят из соотношения:

$$J_{\text{ср}} = \Phi_{\text{п}}/4\pi$$

где $\Phi_{\text{п}}$ — полный световой поток лампы.

Единица светового потока в СИ: $\Phi=1$ лм.

В СИ за единицу светового потока принят **люмен (лм)**. **Люменом** называют световой поток, испускаемый точечным источником света в 1 кд внутрь телесного угла в 1 ср.

Так как полный телесный угол содержит 4π стерадиан, то полный поток, испускаемый точечным источником света, выразится формулой:

$$\Phi_{\text{п}}=4\pi J$$

Освещенность.

Величину E , характеризующую различную видимость отдельных тел и обусловленную величиной падающего на них светового потока, называют освещенностью. При равномерном распределении падающего на поверхность светового потока ее освещенность измеряется световым потоком, приходящимся на единицу площади этой поверхности, т. е. $E=\Phi/S$.

Выведем единицу освещенности E в СИ: $E=1$ лк.

В СИ за единицу освещенности принимается **люкс (лк)** (от лат. «люкс» — свет). **Люксом** называют освещенность такой поверхности, на каждый квадратный метр которой равномерно падает световой поток в один люмен.

Приведем несколько примеров. Солнечные лучи в полдень (на средних широтах) создают освещенность порядка 100 000 лк, а полная Луна — около 0,2 лк. Лампа накаливания мощностью 100 Вт, висящая на высоте 1 м над столом, создает на поверхности стола (под лампой) освещенность 100 лк.

Яркость.

Читая книгу, мы отчетливо видим буквы на белом фоне листа, хотя его освещенность можно считать везде одинаковой, Объясняется это тем, что белый лист и буквы по-разному отражают

падающий на них световой поток.

Поскольку от листа бумаги распространяется световой поток, то лист можно считать источником света. Заметим, что от листа распространяется не его собственный свет, а отраженный, поэтому лист удобно назвать вторичным источником света. Величина светового потока, распространяющегося как от первичного так и от вторичного источника света, вообще говоря, зависит от направления. Это означает, что, подобно первичным источникам света, вторичные источники можно характеризовать силой света. Белая поверхность листа кажется нам значительно ярче, чем буквы на ней, поэтому сила света с единицы площади в первом случае больше, чем во втором.

Итак, различные области поверхностей реальных источников света (первичных и вторичных), рассматриваемые по определенному направлению, могут значительно отличаться своей яркостью, например, одни витки спирали включенного в сеть электрического нагревателя кажутся светлее, чем другие.

Величину V , характеризующую различную видимость отдельных участков поверхности в заданном направлении, обусловленную распространяющимися от этой поверхности световым потоком, называют яркостью. При равномерном распространении светового потока от всех участков поверхности в выбранном направлении яркость измеряют силой света с единицы площади этой поверхности.

Если сила, света определяется по направлению перпендикуляра к поверхности, то яркость последней находится по формуле: $V=J/S$.

Выведем единицу яркости в СИ: $V=1 \text{ кд}/1 \text{ м}^2=1 \text{ кд}/\text{м}^2$.

За единицу яркости в СИ принимают $\text{кд}/\text{м}^2$ — яркость такой плоской, равномерно светящейся поверхности, с каждого квадратного метра которой в перпендикулярном к ней направлении получается сила света в 1 кд.

Заметим, что наименьшая яркость, на которую реагирует глаз человека, составляет около $10^{-6} \text{ кд}/\text{м}^2$, а яркость более $10^8 \text{ кд}/\text{м}^2$ вызывает болезненное ощущение в глазу и может повредить зрение. Яркость поверхности Солнца составляет $1,5 \cdot 10^9 \text{ кд}/\text{м}^2$, а Поверхности Луны — $2,5 \cdot 10^3 \text{ кд}/\text{м}^2$.

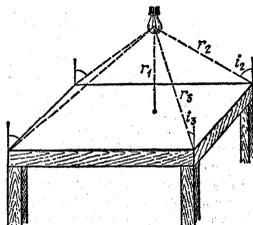
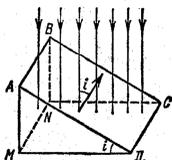
Законы освещенности.

Освещенность, создаваемая точечным источником света, зависит от силы света E и расстояния от источника до поверхности r .

Первый закон освещенности: при перпендикулярномпа-

дении лучей освещенность, создаваемая точечным источником света, прямо пропорциональна его силе света и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до освещаемой поверхности.

$$E_0 = J/r^2.$$



Рассмотрим теперь, как зависит освещенность от угла падения лучей.

$$E = E_0 \cos i.$$

Это соотношение является математическим выражением второго закона освещенности: освещенность поверхности, создаваемая параллельными лучами, прямо пропорциональна косинусу угла падения лучей на эту поверхность.

Из второго закона освещенности следует, что при увеличении угла падения освещенность поверхности должна уменьшаться. Смена времен года на Земле объясняется именно изменением угла падения солнечных лучей на ее поверхность. В северном полушарии наименьший угол падения лучей на поверхность Земли получается летом в конце июня, а наибольший угол — зимой в конце декабря.

Для точечного источника света E_0 получим обобщенную формулу для вычисления освещенности:

$$E = (J/r^2) \cos i.$$

По этой формуле можно вычислять освещенность различных участков, создаваемую электрической лампой.

Для измерения силы света используют прибор, который называют **фотометром**.

Контрольные вопросы:

1. Что изучает фотометрия?
2. Что называется телесным углом? Какой величиной обозначается и в каких единицах измеряется?
3. Что называется световым потоком?
4. Какая величина называется силой света? В чем измеряется сила света в системе СИ?

5. Какая величина называется освещенностью? В чем измеряется освещенность в системе СИ?

6. Какая величина называется яркостью? В чем измеряется яркость в системе СИ?

Лекция №37. Интерференция и дифракция света. Поляризация света

Интерференция присуща волнам любой природы. Интерferируют только когерентные волны.

Интерференция волн – сложение в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором в разных его точках получается усиление или ослабление результирующей волны”. Для образования устойчивой интерференционной картины необходимы когерентные (согласованные) источники волн.

Когерентными называются волны, имеющие одинаковую частоту и постоянную разность фаз.

Волны от источников S1 и S2 придут в точку С в одинаковых фазах и «усилят друг друга». Волны от источников S1 и S2 придут в точку С в противофазах и "погасят друг друга”.

Интерференционная картина – регулярное чередование областей повышенной и пониженной интенсивности света.

Интерференция света – пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн. Следовательно, в явлениях интерференции и дифракции света соблюдается закон сохранения энергии. В области интерференции световая энергия только перераспределяется, не превращаясь в другие виды энергии. Возрастаение энергии в некоторых точках интерференционной картины относительно суммарной световой энергии компенсируется уменьшением её в других точках (суммарная световая энергия – это световая энергия двух световых пучков от независимых источников).

Связь между разностью фаз φ и оптической разностью хода

$$\Delta: \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta.$$

Светлые полосы соответствуют максимумам энергии, темные – минимумам.

Условие интерференционных максимумов: $\Delta = \pm k\lambda_0$

Условие интерференционных минимумов:

$$\Delta = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{2}, \text{ где } k=0,1,2,\dots$$

Дифракция волн – это явление огибания волнами встречающихся препятствий. Дифракция хорошо наблюдается только в том случае, если размеры препятствий (или отверстий) соизмеримы с длинами этих волн. Дифракция световых волн обуславливает отклонение от закона прямолинейного распространения света. Она объясняется на основе волновой теории света. Согласно **принципу Гюйгенса–Френеля** каждую точку волнового фронта можно рассматривать как точечный источник вторичных световых волн, которые распространяются по различным направлениям и проникают, таким образом, в область геометрической тени. Вторичные волны когерентны и за препятствием интерферируют.

Поскольку вторичными источниками являются точки волновой поверхности, то все эти фиктивные источники действуют в одинаковой фазе и являются когерентными. Таким образом, для определения в некоторой точке пространства результирующей интенсивности надо учесть интерференцию всех вторичных волн. В результате может оказаться так, что там, где проходит прямолинейный путь от источника света, будет темная область, а в пределах геометрической тени – светлая область (световые лучи как бы огибают препятствие).

Увидеть четкую картину распределения максимумов и минимумов света можно с помощью ***дифракционной решетки, которая представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками.***

Перед вами дифракционная решетка, у которой на каждый $1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$ приходится 100 штрихов. Если ширина прозрачной щели равна a , и ширина непрозрачного промежутка b , то величина $d = a + b$ называется периодом решетки и в нашем случае:

$$d = l / N = 10^{-5} \text{ м}$$

Когда на дифракционную решетку падает пучок монохроматического света, световые лучи, проходя через щели решетки, отклоняются из-за дифракции на различные углы. Эти волны когерентны, поэтому на экране возникнет интерференционная картина. В центре экрана собираются волны с разностью хода, равной нулю, поэтому там образуется интерференционный максимум (большое красное пятно), а в точках, где оптическая разность хода равна четному числу длин волн или нечетному, образуются красные макси-

мумы и темные минимумы.

Разность хода

$$\Delta d = r_2 - r_1 = d \sin \alpha,$$

и тогда

максимум интерференции будет наблюдаться, если $d \sin \alpha = k \lambda$, а

минимум интерференции, если $d \sin \alpha = (2k+1) \lambda/2$.

В этой формуле d – период решетки, k – порядок дифракционного максимума или минимума ($k = \pm 1; \pm 2 \dots$), $\sin \alpha$ при малых углах равен $\operatorname{tg} \alpha = y/x$, где x – расстояние от дифракционной решетки до экрана, а y – расстояние от центрального максимума до любого следующего.

Интерференция позволяет с помощью простых приспособлений измерять длину световой волны.

Самой длинной волной обладает красный свет $\lambda_{\text{кр}} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, а самой короткой – фиолетовый, у которого длина волны $\lambda_{\text{ф}} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Все остальные цветные лучи принимают промежуточные значения.

Поляризованной волной называется такая поперечная волна, в которой колебания всех частиц происходят в одной плоскости.

Такую волну можно получить с помощью резинового шнура, если на его пути поставить преграду с тонкой щелью. Щель пропустит только те колебания, которые происходят вдоль нее.

Устройство, выделяющее колебания, происходящие в одной плоскости, называется поляризатором.

Устройство, позволяющее определить плоскость поляризации (вторая щель) называется анализатором.

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение интерференции света.
2. Каким способом получают когерентные световые волны?
3. Почему не могут интерферировать волны, идущие от двух независимых источников света?
4. Как можно получить интерференцию световых волн при помощи бипризмы Френеля?
5. Какое световое излучение называется монохроматическим?
6. Сформулируйте условия усиления и ослабления интерферирующих световых волн.

7. Как объясняется интерференция света в тонких пленках?
8. Как определить длину волны света по кольцам Ньютона?
9. При каких условиях наблюдается дифракция света?
10. Что представляет собой дифракционная решетка?

Лекция № 38. Дисперсия света. Виды спектров

Виды спектров:

Непрерывный (сплошной) спектр. В наблюдаемых спектрах мы видим все цвета радуги, то есть волны всех длин. В спектре нет разрывов и он представляет сплошную, непрерывную разноцветную полосу. Такие спектры называют непрерывными или сплошными. Солнечный спектр или спектр дугового фонаря является непрерывным. Непрерывные (или сплошные) спектры, как показывает опыт, дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии, а также сильно сжатые газы. Для получения непрерывного спектра нужно нагреть тело до высокой температуры. Характер непрерывного спектра и сам факт его существования определяются не только свойствами отдельных излучающих атомов, но и в сильной степени зависят от взаимодействия атомов друг с другом. Непрерывный спектр дает также высокотемпературная плазма.

Линейчатый спектр. Каждый из спектров - это частокол цветных линий различной яркости, разделённых широкими тёмными полосами. Такие спектры называются линейчатыми. Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определенных длин волн (точнее, в определенных очень узких спектральных интервалах). Каждая из линий имеет конечную ширину.

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Это самый фундаментальный, основной тип спектров. Изолированные атомы данного химического элемента излучают строго определенные длины волн. При увеличении плотности атомарного газа отдельные спектральные линии расширяются и, наконец при очень большой плотности газа, когда взаимодействие атомов становится существенным, эти линии перекрывают друг друга, образуя непрерывный спектр.

Полосатые спектры. Для наблюдения молекулярных спек-

тров так же, как и для наблюдения линейчатых спектров, обычно используют свечение паров в пламени или свечение газового ряда. С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно обнаружить, что каждая полоса представляет собой совокупность большого числа очень тесно расположенных линий, разделённых тёмными промежутками. Это полосатый спектр. В отличие от линейчатых спектров полосатые спектры создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

Спектры поглощения. Все вещества, атомы которых находятся в возбужденном состоянии, излучают световые волны, энергия которых определенным образом распределена по длинам волн. Поглощение света веществом также зависит от длины волны. Так, красное стекло пропускает волны, соответствующие красному свету и поглощает все остальные. Если пропускать белый свет сквозь холодный, неизлучающий газ, то на фоне непрерывного спектра источника появляются темные линии. Газ поглощает наиболее интенсивно свет как раз тех длин волн, которые он испускает в сильно нагретом состоянии. Темные линии на фоне непрерывного спектра - это линии поглощения, образующие в совокупности спектр поглощения.

Спектральный анализ - метод определения химического состава вещества по его спектру. Подобно отпечаткам пальцев у людей линейчатые спектры имеют неповторимую индивидуальность. Неповторимость узоров на коже пальца помогает часто найти преступника. Точно так же благодаря индивидуальности спектров каждого атома химического элемента, имеется возможность определить химический состав тела. С помощью спектрального анализа можно обнаружить данный элемент в составе сложного вещества, если даже его масса не превышает 10-10г. Количественное содержание элемента в исследуемом образце определяется путем сравнения интенсивности отдельных линий спектра этого элемента с интенсивностью линий другого химического элемента, количественное содержание которого в образце известно. Количественный анализ состава вещества по его спектру затруднен, так как яркость спектральных линий зависит не только от массы вещества, но и от способа возбуждения свечения. Так, при низких температурах многие спектральные линии вообще не появляются. Однако при соблюдении стандартных условий возбуждения свечения можно проводить и количественный спектральный анализ. В настоящее время определены спектры всех атомов и составлены таблицы спектров. С помощью спектрального анализа были откры-

ты многие новые элементы: рубидий, цезий и др. Элементом часто давали названия в соответствии с цветом наиболее интенсивных линий спектра. Рубидий дает темно-красные, рубиновые линии. Слово цезий означает «небесно-голубой». Это цвет основных линий спектра цезия.

Дисперсия света – это зависимость показателя преломления света от частоты колебаний (или длины волны).

В 1666 году англ. физик Исаак Ньютон обратил внимание на радужную окраску изображений звезд в телескопе. Он заинтересовался этим явлением и поставил опыт. Ньютон направил световой пучок малого поперечного сечения на призму. Пучок солнечного света проходил в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов. Эту радужную полоску Ньютон назвал спектром (от лат. слова spectrum - “видение”).

Проделав опыт, Ньютон сделал вывод, что *белый свет состоит из семи цветов*. Их совместное действие дает нам ощущение белого света, а после прохождения через призму эти цвета разделяются. Ньютон доказал это, направив эту радужную полосу на вторую призму и получив опять белый свет. Значит, призма не раскрашивает белый свет, а разделяет его на содержащиеся в нем простые составные цветовые части.

Разложение белого света есть следствие дисперсии.

Свет разных цветов – это электромагнитные волны различной длины и частоты.

Монохроматический свет – одноцветный свет, каждой цветности соответствует своя длина и частота волны (в вакууме).

Красный	Оранжевый	Желтый	Зеленый	Голубой	Синий	Фиолетовый
760–620 нм	620 – 590 нм	590 – 560 нм	560 – 500 нм	500 – 480 нм	480 – 450 нм	450 – 380 нм

Значит, в одном и том же веществе скорости света для

разных частот (или длин волн) различны. Различны будут и показатели преломления. Следовательно, показатель преломления света в среде зависит от его частоты.

При переходе из одной среды в другую изменяются скорость света и длина волны, частота же, определяющая цвет, остается постоянной. Границы диапазонов белого света и составляющих его цветов принято характеризовать их длинами волн в вакууме. Т. о., белый свет – это совокупность волн длинами от 380 до 760 нм.

Контрольные вопросы:

1. Что такое дисперсия света?
2. Почему только узкий световой пучок дает спектр после прохождения сквозь призму?
3. Какую волну называют монохроматической?
4. Перечислите виды спектров и дайте краткую характеристику по каждому виду.

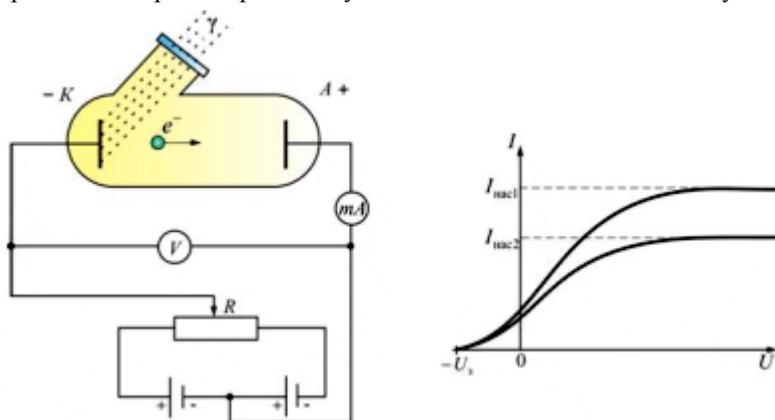
Лекция №39 Квантовая гипотеза Планка. Внешний фотоэффект. Законы фотоэффекта

Фотоэффект – испускание электронов веществом под действием света.

В 1887 г. Немецкий физик Генрих Герц экспериментировал с разрядником для излучения электромагнитных волн – парой металлических шаров; при приложении разности потенциалов между ними проскакивала искра. Когда же он освещал один из шаров ультрафиолетовыми лучами, разряд усиливался. Таким образом, был обнаружен внешний фотоэффект.

В 1888 г. другой немец, Вильгельм Гальвакс, установил, что облученная ультрафиолетовым светом металлическая пластинка заряжается положительно. Так произошло второе открытие фотоэффекта. Третьим, не зная об опытах Герца и Гальвакса, его наблюдал в том же году итальянец Аугусто Рики. Он выяснил, что фотоэффект возможен и в металлах, и в диэлектриках. Рики сконструировал фотоэлемент – прибор, преобразующий свет в электрический ток. Но и это еще не вся история: российский физик Александр Григорьевич Столетов был четвертым ученым, независимо от других открывшим фотоэффект (1888 г.). Используя фотоэле-

мент собственной конструкции, Столетов два года всесторонне исследовал новое явление и вывел его основные закономерности. Оказалось, что сила фототока (электрического тока, возникающего под действием ультрафиолетового излучения), во-первых, прямо пропорциональна интенсивности падающего света, а во-вторых, при фиксированной интенсивности облучения сначала растет по мере повышения разности потенциалов, но достигнув определенного значения (ток насыщения), уже не увеличивается. В 1899 г. немец Филипп Ленард и англичанин Джозеф Томсон доказали, что падающий на металлическую поверхность свет выбивает из нее электроны, движение которых и приводит к появлению фототока. Однако понять природу фотоэффекта с помощью классической электродинамики так и не удалось. Необъяснимым оставалось, почему фототок возникал лишь тогда, когда частота падающего света превышала строго определенную для каждого металла величину.



Первый закон. Сила тока насыщения (фактически, число выбиваемых с поверхности электронов за единицу времени) прямо пропорциональна интенсивности светового излучения, падающего на поверхность тела.

Начальные данные: $P = 0,5$ мВт, $\lambda = 400$ нм, $U = 0$ В. Увеличиваем разность потенциалов между электродами, при фиксированной интенсивности, замечаем, что сила тока нарастает. При напряжении $U = 2,7$ В она достигает максимального значения $I = 0,5$ мА и перестает увеличиваться. Ток достиг насыщения. Затем увеличиваем интенсивность и видим что, сила тока насыщения увеличивается.

Второй закон. Максимальная кинетическая энергия фото-

электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

Начальные данные: $P = 0,2$ мВт, $\lambda = 550$ нм, $U = 0$ В, $I = 0,007$ мА. При этих данных часть вырванных светом электронов достигает левого электрода. Изменяем полярность батареи – сила тока уменьшается, и при $U = -0,3$ В становится равной нулю. Это значит, что электрическое поле тормозит вырванные электроны до полной остановки и затем возвращает их на катод. Теперь, изменяем интенсивность света – задерживающее напряжение не меняется, следовательно, не меняется кинетическая энергия фотоэлектронов, а значит и скорость фотоэлектронов не меняется. Уменьшаем длину волны падающего света (т.е. увеличиваем частоту) – видим, что задерживающее напряжение следует увеличить. Это означает, что возрастает кинетическая энергия, а значит, максимальная скорость фотоэлектронов зависит от частоты (линейно возрастает) и не зависит от интенсивности света.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV^2}{2}$$

где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электронов из материала катода,

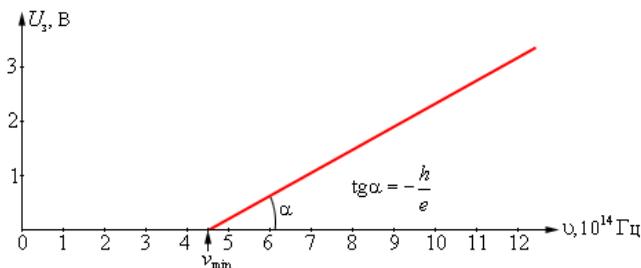
а $\frac{mV^2}{2}$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

Отсюда следует, что красная граница фотоэффекта определяется формулой

$$\nu_{\text{min}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}.$$

Запирающее напряжение, которое необходимо приложить, чтобы фототок прекратился, можно найти по формуле

$$U_3 e = \frac{mV^2}{2}$$



Зависимость запирающего потенциала от частоты падающего света

Третий закон. Если частота света меньше некоторой определенной для данного вещества минимальной частоты $\nu_{кр}$, то фотоэффект не наблюдается (достигается т. н. **красная граница фотоэффекта**).

Начальные данные: $\lambda = 550$ нм. Увеличиваем длину волны и видим, что при $\lambda = 662$ нм фототок прекращается и при дальнейшем увеличении больше не возникает. Эта длина волны и есть красная граница фотоэффекта.

Кроме внешнего фотоэффекта существует и внутренний фотоэффект: при облучении полупроводника или диэлектрика фотонами в нем появляются дополнительные свободные электроны и (или) так называемые дырки, что приводит к увеличению электропроводности.

Контрольные вопросы:

1. Какое физическое явление называют фотоэффектом?
2. Опишите принципиальную схему опытов Столетова. Что такое фототок и фотоэлектроны?
3. Сформулируйте три закона фотоэффекта.
4. Объясните график зависимости кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света.

Лекция №40. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

Внутренний фотоэффект. Применение фотоэффекта

Только в 1905 г. Эйнштейн превратил эту загадку в совершенно прозрачную, понятную во всех деталях картину. Развивая квантовую гипотезу Планка, он предположил, что электромагнит-

ное излучение не просто испускается порциями – оно и распространяется в пространстве, и поглощается веществом тоже в виде порций – световых квантов (фотонов). Поэтому-то для возникновения фотоэффекта важна отнюдь не интенсивность падающего светового пучка. Главное, хватает ли отдельному световому кванту энергии, чтобы выбить электрон из вещества. Минимальную энергию, необходимую для этого, называют *работой выхода* $A_{\text{вых}}$. В итоге Эйнштейн вывел следующее уравнение фотоэффекта:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + E_{\text{к}}$$

В его левой части – энергия, которую отдает фотон электрону вещества, в правой – работа выхода электрона из вещества плюс кинетическая энергия уже освобожденного электрона. Ясно, что фотоэффект может вызвать только световая волна достаточно высокой частоты, а сила фототока пропорциональна интенсивности поглощенного света, т.е. числу фотонов, способных выбить электроны из вещества. В 1907г. Эйнштейн, работая над теорией теплоемкости твердых тел, сделал еще одно уточнение квантовой гипотезы. Почему тело (атом, молекула, кристалл) излучает свет, согласно Планку, только порциями? А потому, отвечал Эйнштейн, что атомы имеют лишь дискретный набор возможных значений энергии. Таким образом, теория излучения и поглощения приняла законченный вид.

В современной физике фотон рассматривается как одна из элементарных частиц. Таблица элементарных частиц уже многие десятилетия начинается с фотона.

При испускании и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц с энергией $E = h\nu$, зависящей от частоты. Порция света оказалась неожиданно очень похожей на то, что принято называть частицей. Свойства света, обнаруживаемые при взаимодействии с веществом (излучении и поглощении), называют **корпускулярными**, а сама же световая частица получила название **фотона** или **светового кванта**. При распространении света проявляются его волновые свойства. Свет обладает своеобразным дуализмом (двойственностью) свойств.

Энергия фотона: $E = h\nu = h\omega$, где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Масса фотона: $m = \frac{h\nu}{c^2}$. Фотон лишен массы покоя, т.е. он

не существует в состоянии покоя и при рождении сразу имеет скорость c .

Импульс фотона:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Направлен импульс фотона по световому лучу.

Гипотеза де Бройля. Длина волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Внутренним фотоэффектом называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твёрдых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений. Он проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению *фотопроводимости* или *вентильного фотоэффекта*.

Фотопроводимостью называется увеличение электрической проводимости вещества под действием излучения.

Фотоэлемент представляет собой электровакуумный или полупроводниковый прибор, способный изменять свои параметры (ток, сопротивление, э. д. с.) под действием света (видимого или невидимого). Имеются три основных вида фотоэлементов с внешним фотоэффектом, внутренним фотоэффектом и с запирающим слоем (вентильные).

В отличие от металлов в полупроводниках и диэлектриках также возникает так называемый **внутренний фотоэффект**, состоящий в возбуждении электронов из валентной зоны в зону проводимости. Для внутреннего фотоэффекта энергия поглощённого светового кванта не должна быть меньше ширины запрещённой зоны (разность энергии между нижней границей зоны проводимости и верхней границей валентной зоны).

Двухфотонный внутренний фотоэффект в полупроводнике наблюдался ещё в 1964 г. при использовании рубинового лазера.

Контрольные вопросы:

1. Найдите энергию фотона с длиной волны 400 нм.
2. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта, охарактеризуйте каждую величину.

3. Что называется работой выхода?
4. Как определить энергию, массу и импульс фотона, зная частоту световой волны?
5. Что такое красная граница фотоэффекта?
6. В чем состоит отличие между внутренним и внешним фотоэффектом?

Лекция №41 Строение атома. Опыты Резерфорда. Постулаты Бора

Э. Резерфорд, исследуя рассеяние α -частиц веществом, установил существование атомного ядра. Положительный заряд и почти вся масса атома сосредоточены в атомном ядре, размер которого составляет $10^{-12} - 10^{-13}$ см. Заряд атомного ядра равен порядковому номеру элемента в периодической системе элементов Д.И. Менделеева, умноженному на модуль заряда электрона. Ядром атома водорода является протон.

На основе своих опытов Э.Резерфорд предложил планетарную модель атома. Электроны в этой модели обращаются вокруг ядра, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца. Однако такой атом согласно законам классической физики не может быть устойчивым. Электроны должны излучать, теряя энергию, и падать на ядро. В действительности же все атомы устойчивы.

Выход из этих противоречий был найден Н.Бором на пути дальнейшего развития квантовой теории. Основу теории Бора составляют два постулата.

Первый постулат Бора гласит: атомная система может находиться только в особых, стационарных, или квантовых, состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n ; в стационарном состоянии атом не излучает.

Согласно **второму постулату Бора** излучение или поглощение света происходит при переходе атома из одного стационарного состояния в другое. Энергия излученного или поглощенного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n.$$

При излучении фотона $k > n$, при поглощении $k < n$. Здесь $(E_k - E_n)$ - разность энергий стационарных состояний; k и n - номера стационарных состояний, или главные квантовые числа.

После экспериментальных проверок правильности модели

атома Резерфорда и принятия постулатов Бора ученым пришлось признать ограниченность применения законов классической физики для микроскопических тел.

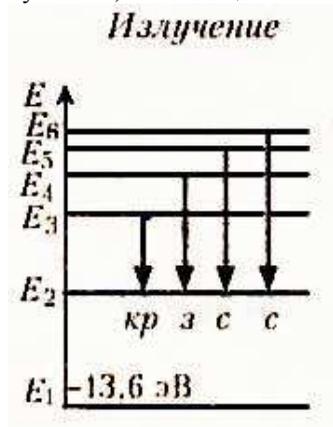
Модель атома водорода по Бору

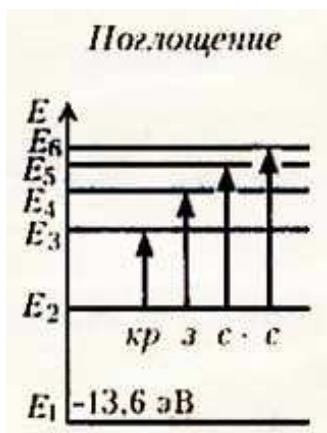
Свои постулаты Н. Бор применил для построения теории строения простейшего атома (атома водорода).

Согласно этой теории Бор смог вычислить для атома водорода:

- возможные радиусы орбит электрона и размеры атома
- энергии стационарных состояний атома
- частоты излучаемых и поглощаемых электромагнитных волн.

Распределение энергетических уровней при излучении (испускании) и поглощении атомом водорода электромагнитных волн:





При ($n = 1$) - основное энергетическое состояние, ему соответствует радиус орбиты электрона $r = 0,5 \cdot 10^{-11}$ м.

При (n больше 1) - возбужденные состояния.

При поглощении атомом кванта энергии (фотона) атом переходит в возбужденное состояние, при этом электрон переходит на более отдаленную орбиту и его связь с ядром слабеет.

Частоты каждой серии спектра можно подсчитать по формуле Бальмера-Ритберга:

$$\nu_{kn} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

где R – постоянная Ритберга;

В спектре водорода обнаружены следующие серии:

$n = 1$ - серия Лаймана - ультрафиолетовое излучение

$n = 2$ - серия Бальмера - видимое излучение

$n = 3$ - серия Пашена - инфракрасное излучение и т.д.

Теория Н.Бора дала правильные значения для всех частот линейчатого спектра излучения водорода. Кроме того, она позволила теоретически вычислить радиус атома водорода.

На основе квантовой теории излучения были построены квантовые генераторы радиоволн и квантовые генераторы видимого света – лазеры. Лазеры создают когерентное излучение очень большой мощности. Излучение лазеров очень широко применяется в различных областях науки и техники.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность планетарной модели атома Резерфорда?
2. Сформулируйте первый и второй постулат Бора.
3. Какие затруднения вызвала планетарная модель Резерфорда для объяснения процессов излучения энергии атомами?
4. Запишите и сформулируйте правило квантования круговых орбит.
5. Что такое лазер? Объясните принцип действия лазера?

Лекция №42. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада

Сто лет назад, в феврале 1896г, французский физик Анри Беккерель обнаружил самопроизвольное излучение солей урана ^{238}U , однако он не понимал природы этого излучения.

В 1898г супруги Пьер и Мария Кюри открыли новые, ранее неизвестные элементы – полоний ^{209}Po и радий ^{226}Ra , у которых излучение, аналогичное излучению урана, было значительно более сильным. Радий – редкий элемент; чтобы получить 1 грамм чистого радия, надо переработать не менее 5 тонн урановой руды; его радиоактивность в несколько миллионов раз выше радиоактивности урана.

Самопроизвольное излучение некоторых химических элементов было названо по предложению П.Кюри радиоактивностью, от латинского *radio* «излучать». Неустойчивые ядра превращаются в устойчивые.

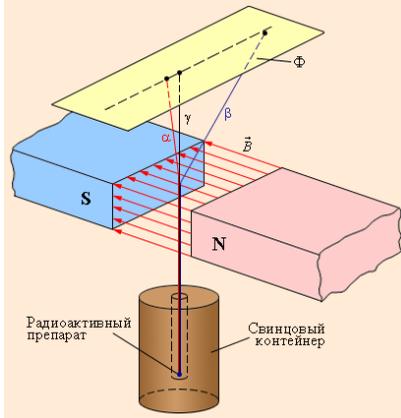
Явление самопроизвольного превращения неустойчивых ядер атомов в ядра других атомов с испусканием частиц и излучением энергии называется *естественной радиоактивностью*.

Химические элементы с номера 83 являются радиоактивными, то есть самопроизвольно излучают, причем, степень излучения не зависит от того, в состав какого соединения они входят.

Изучением природы радиоактивного излучения занимался великий физик начала 20 века Эрнест Резерфорд.

В 1899 г Эрнест Резерфорд обнаружил неоднородность излучения. Препарат радия помещали в свинцовый контейнер с отверстием. Напротив отверстия помещали фотопластинку. На излучение действовало сильное магнитное поле. Почти 90 % известных ядер нестабильны. Исследуя излучение радия в магнитном поле, он обнаружил, что поток радиоактивного излучения имеет сложную структуру: состоит из трех самостоя-

тельных потоков, названных α -, β - и γ -лучами.



Проникающая способность α , β , γ излучения:

α –лучи обладают наименьшей проникающей способностью. Слой бумаги толщиной 0.1мм для них уже непрозрачен.

β -лучи полностью задерживает алюминиевая пластинка толщиной несколько мм.

γ -лучи при прохождении через слой свинца в 1см уменьшают интенсивность в 2 раза.

Физическая природа α , β , γ излучения:

γ -излучение электромагнитные волны 10^{-10} - 10^{-13} м

β -лучи-поток электронов, движущихся со скоростями близкими к скорости света.

α –лучи- ядра атома гелия (краткое описание исследований Резерфорда)

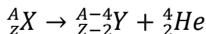
Резерфорд измерил отношение заряда частицы к массе по отклонению в магнитном поле. Электронетром измерил заряд, испущенный частицами источника, счетчиком Гейгера измерил их число. Резерфорд установил, что на каждый из двух элементарных зарядов приходится две атомные единицы массы. То есть α -частица – это ядро атома гелия.

Превращение атомных ядер часто сопровождается испусканием α -, β -лучей. Если одним из продуктов радиоактивного превращения является ядро атома гелия, то такую реакцию называют α -распадом, если же – электрон, то β -распадом.

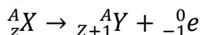
Эти два распада подчиняются правилам смещения, которые впервые сформулировал английский ученый Ф.Содди. Давайте по-

смотрим, как выглядят эти реакции.

1. **При α -распаде** ядро теряет положительный заряд $2e$ и его масса убывает на 4 а.е.м. В результате α -распада элемент смещается на две клетки к началу периодической системы Менделеева:



2. **При β -распаде** из ядра вылетает электрон, что увеличивает заряд ядра на $1e$, масса же остается почти неизменной. В результате β -распада элемент смещается на одну клетку к концу периодической таблицы Менделеева.



Кроме альфа- и бета-распадов радиоактивность сопровождается гамма-излучением. При этом из ядра вылетает фотон.

3. **γ -излучение** – не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало. Ядра, которые возникли в результате радиоактивного распада, в свою очередь также могут быть радиоактивны. Возникает цепочка радиоактивных превращений. Ядра, связанные с этой цепочкой, образуют радиоактивный ряд или радиоактивное семейство. В природе существует три радиоактивных семейства: урана, тория и актиния. Семейство урана заканчивается свинцом. Измеряя количество свинца в урановой руде, можно определить возраст этой руды.

Резерфорд опытным путём установил, что активность радиоактивных веществ убывает с течением времени. Для каждого радиоактивного вещества существует интервал времени, на протяжении которого активность убывает в 2 раза. Это время называется **периодом полураспада T** .

Закон радиоактивного распада: установлен Ф. Содди.

$$N=N_02^{-t/T}$$

Период полураспада – основная величина, определяющая скорость радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем меньше времени живут атомы, тем быстрее происходит распад. Для разных веществ период полураспада имеет разные значения.

–Одинаково опасными являются как быстро, так и медленно распадающиеся ядра. Быстро распадающиеся ядра интенсивно излучают за малый промежуток времени, а медленно распадающиеся ядра радиоактивны на большом интервале времени. С различными

уровнями радиации человечество встречается как в естественных условиях, так и в искусственно созданных обстоятельствах.

Экспериментальные методы исследования элементарных частиц:

Счетчик Гейгера — один из важнейших приборов для автоматического счета частиц, изобретенный в 1908г.

Счетчик Гейгера состоит из металлического цилиндра, являющегося катодом (т. е. отрицательно заряженным электродом) и натянутой вдоль его оси тонкой проволоочки — анода (т. е. положительного электрода). Катод и анод через сопротивление R присоединены к источнику высокого напряжения (порядка 200—1000В), благодаря чему в пространстве между электродами возникает сильное электрическое поле.

Оба электрода помещают в герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом (обычно аргоном).

Действие счетчика основано на ударной ионизации.

Пока газ не ионизирован, ток в электрической цепи источника напряжения отсутствует. Если же в трубку сквозь ее стенки влетает какая-нибудь частица, способная ионизировать атомы газа, то в трубке образуется некоторое количество электрон-ионных пар. Электроны и ионы начинают двигаться к соответствующим электродам.

Если напряженность электрического поля достаточно велика, то электроны на длине свободного пробега (т. е. между соударениями с молекулами газа) приобретают достаточно большую энергию и тоже ионизируют атомы газа, образуя новое поколение ионов и электронов, которые тоже могут принять участие в ионизации, и т. д. В трубке образуется так называемая электронно-ионная лавина, в результате чего происходит кратковременное и резкое возрастание силы тока в цепи и напряжения на сопротивлении R . Этот импульс напряжения, свидетельствующий о попадании в счетчик частицы, регистрируется специальным устройством.

Поскольку сопротивление R очень велико (порядка $10^9 \Omega$), то в момент протекания тока основная доля напряжения источника падает именно на нем, в результате чего напряжение между катодом и анодом резко уменьшается и разряд автоматически прекращается (так как это напряжение становится недостаточным для образования новых поколений электрон-ионных пар). Счетчик готов к регистрации следующей частицы.

Счетчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов, но существуют модели, пригодные и для регистрации

γ -квантов.

Счетчик Гейгера позволяет только регистрировать тот факт, что через него пролетает частица.

После выступления проводится демонстрация работы счетчика Гейгера.

Камера Вильсона.

Гораздо большие возможности для изучения микромира дает прибор, изобретенный в 1912г. и называемый камерой Вильсона.

Камера Вильсона состоит из невысокого стеклянного цилиндра со стеклянной крышкой. Внутри цилиндра может двигаться поршень. На дне камеры находится черная ткань. Благодаря тому, что ткань увлажнена смесью воды со спиртом, воздух в камере насыщен парами этих жидкостей.

Действие камеры Вильсона основано на конденсации перенасыщенного пара на ионах с образованием капелек воды.

При быстром движении поршня вниз находящиеся в камере воздух и пары расширяются, их внутренняя энергия уменьшается, температура понижается.

В обычных условиях это вызвало бы конденсацию паров (появление тумана). Однако в камере Вильсона этого не происходит, так как из нее предварительно удаляются так называемые ядра конденсации (пылинки, ионы и пр.). Поэтому в данном случае при понижении температуры в камере пары становятся пересыщенными, т. е. переходят в крайне неустойчивое состояние, при котором они будут легко конденсироваться на любых образующихся в камере ядрах конденсации, например на ионах.

Изучаемые частицы впускаются в камеру через тонкое окошко (иногда источник частиц помещают внутри камеры). Пролетая с большой скоростью через газ, частицы создают на своем пути ионы. Эти ионы и становятся ядрами конденсации, на которых пары конденсируются в виде маленьких капелек (водяной пар конденсируется преимущественно на отрицательных ионах, пары этилового спирта — на положительных). Вдоль всего пути частицы возникает тонкий след из капелек (трек), благодаря чему траектория движения становится видимой.

Если поместить камеру Вильсона в магнитное поле, то траектории заряженных частиц искривляются. По направлению изгиба следа можно судить о знаке заряда частицы, а по радиусу кривизны определять ее массу, энергию, заряд.

Треки существуют в камере недолго, так как воздух нагревается, получая тепло от стенок камеры, и капельки испаряются. Что-

бы получить новые следы, необходимо удалить имеющиеся ионы с помощью электрического поля, сжать воздух поршнем, выждать, пока воздух в камере, нагретый при сжатии, охладится, и произвести новое расширение.

Обычно треки частиц в камере Вильсона не только наблюдают, но и фотографируют. При этом камеру освещают сбоку мощным пучком световых лучей.

С помощью камеры Вильсона был сделан ряд важнейших открытий в области ядерной физики и физики элементарных частиц.

После выступления проводится демонстрация камеры Вильсона.

Пузырьковая камера.

В 1952г. американским ученым Д. Глейзером было предложено использовать для обнаружения треков частиц перегретую жидкость. В такой жидкости на ионах, образующихся при движении быстрой заряженной частицы, возникают пузырьки пара, дающие видимый трек. Камеры такого типа были названы пузырьковыми. Они состоят из стеклянного цилиндра, заполненного жидкостью и немного напоминают камеру Вильсона.

Принцип действия ее основан на том, что в перегретом состоянии чистая жидкость, находясь под высоким давлением, не закипает при температуре выше точки кипения. При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой и в течение небольшого времени она будет находиться в неустойчивом состоянии. Заряженные частицы, пролетающие именно в это время, вызывают появление треков, состоящих из пузырьков пара. В качестве жидкостей используются главным образом жидкий водород и пропан. Длительность рабочего цикла пузырьковой камеры невелика — около 0,1с.

Треки в камере Вильсона и пузырьковой камере — один из главных источников информации о поведении и свойствах частиц.

Наблюдение следов элементарных частиц производит сильное впечатление, создает ощущение непосредственного соприкосновения с микромиром.

Метод толстослойных фотоэмульсий.

Для регистрации частиц наряду с камерами Вильсона и пузырьковыми камерами применяются толстослойные фотоэмульсии. Ионизирующее действие быстрых заряженных частиц на эмульсию фотопластинки позволило французскому физiku А. Беккерелю открыть в 1896г. радиоактивность. Метод фотоэмульсии был разра-

ботан в 1928г. советскими физиками Л. В. Мысовским, А. П. Ждановым.

Этот метод проделывают при помощи фотопластины покрытой фотоэмульсией.

Его сущность заключается в использовании специальных фотоэмульсий для регистрации заряженных частиц.

Фотоэмульсия содержит большое количество микроскопических кристалликов бромида серебра. Быстрая заряженная частица, пронизывая кристаллик, отрывает электроны от отдельных атомов брома. Цепочка таких кристалликов образует скрытое изображение. При проявлении в этих кристалликах восстанавливается металлическое серебро и цепочка зерен серебра образует трек частицы. По длине и толщине трека можно оценить энергию и массу частицы.

Из-за большой плотности фотоэмульсии треки получаются очень короткими (порядка 10^{-2} см для α -частиц, испускаемых радиоактивными элементами), но при фотографировании их можно увеличить.

Метод сцинтилляций.

Этот метод был использован Резерфордом в 1911г, а предложил его У. Крупе в 1903г. Простейшим средством регистрации излучений был экран, покрытый люминесцирующим веществом (от лат. *lumen* – свет). Это вещество светится при ударе о него заряженной частицы, если энергии этой частицы достаточно для возбуждения атомов вещества. В том месте, куда частица попадает, возникает вспышка – сцинтилляция (от лат. *scintillatio* – сверкание, искрение). Вспышки на экране наблюдаются с помощью микроскопа. Такие счётчики и получили название сцинтилляционные.

Вся эта установка помещается в сосуд, из которого откачен воздух (чтобы устранить рассеяние частиц за счет их столкновений с молекулами воздуха). Если на пути частиц нет никаких препятствий, то они попадают на экран узким, слегка расширяющимся пучком. При этом все возникающие на экране вспышки сливаются в одно небольшое светлое пятно.

Но этот метод не дает точности, так как результат подсчета вспышек на экране в большей степени зависит от остроты зрения наблюдателя. Кроме того, длительное наблюдение оказывается *невозможным*, так как глаз быстро устает.

Контрольные вопросы:

1. Кто впервые из ученых назвал явление самопроизвольного

излучения радиоактивностью?

2. Что представляют собой, γ излучение?

3. В результате α и β распада элемент смещается на сколько клеток по таблице Д.И.Менделеева?

4. Что называется периодом полураспада?

5. Имеется 10^9 атомов радиоактивного изотопа йода ${}_{53}^{128}\text{I}$, период его полураспада 25 мин. Какое примерно количество ядер изотопа останется нераспавшимся через 50 мин?

6. На каком принципе основано действие газоразрядного счетчика Гейгера?

7. На каком принципе основано действие пузырьковой камеры?

Лекция № 43. Состав атомных ядер. Энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

В. Гейзенберг и Д.Д. Иваненко предположили протонно-нейтронную модель атомного ядра. Атомное ядро состоит из элементарных частиц – протонов (p) и нейтронов (n). Протоны и нейтроны называются нуклонами. Заряд $p = +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса $m_p = 1836 \cdot m_e$; заряд $n = 0$, масса $m_n = 1839 \cdot m_e$.

Символ химического элемента: ${}_Z^A\text{X}$, где Z – зарядовое число ядра, равно числу протонов в ядре; совпадает с порядковым номером химического элемента в Периодической системе; A – массовое число, равно числу нуклонов в ядре (сумме протонов Z и нейтронов N). Например: ${}_{11}^{23}\text{Na}$.

Заряд ядра: $+Ze$. Поскольку атом нейтрален, заряд ядра определяет и число электронов в атоме.

Ядра с одним и тем же числом протонов Z, но с разным числом нейтронов N называют изотопами. Их химические свойства тождественны.

Протоны и нейтроны удерживаются внутри ядра мощными короткодействующими силами. Эти силы называются ядерными.

Масса атомного ядра практически совпадает с массой атома, потому что масса электронов всех атомов, кроме водородного, составляет примерно $2,5 \cdot 10^{-4}$ массы атомов. Массу атомов выражают в атомных единицах массы (а.е.м.). За а.е.м. принята $1/12$ масса

атома углерода ${}_{6}^{12}\text{C}$.

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

$$m_{\text{я}} = m_{\text{а}} - Z m_{\text{е}}$$

Ядро атома водорода ${}^1_1\text{H}$ называется **протоном**

$$m_{\text{протона}} = 1,00783 \text{ а.е.м.}, \quad m_{{}^1_1\text{H}} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Схема атома водорода

В 1932 г. была открыта частица названная нейтроном, обладающая массой близкой к массе протона ($m_{\text{нейтрона}} = 1,00867 \text{ а.е.м.}$) и не имеющая электрического заряда. Тогда же Д.Д. Иваненко сформулировал гипотезу о протонно - нейтронном строении ядра: ядро состоит из протонов и нейтронов и их сумма равна массовому числу A . Зарядовое число Z определяет число протонов в ядре, число нейтронов $N = A - Z$.

Элементарные частицы - протоны и нейтроны, входящие в состав ядра, получили общее название нуклонов. Нуклоны ядер находятся в состояниях, существенно отличающихся от их свободных состояний. Между нуклонами осуществляется особое ядерное взаимодействие. Говорят, что нуклон может находиться в двух «зарядовых состояниях» - протонном с зарядом $+e$, и нейтронном с зарядом 0 .

Ядерные частицы - протоны и нейтроны - прочно удерживаются внутри ядра, поэтому между ними действуют очень большие силы притяжения, способные противостоять огромным силам отталкивания между одноименно заряженными протонами. Эти особые силы, возникающие на малых расстояниях между нуклонами, называются ядерными силами. Ядерные силы не являются электростатическими (кулоновскими).

Изучение ядра показало, что действующие между нуклонами ядерные силы обладают следующими особенностями:

а) это силы короткодействующие - проявляющиеся на расстояниях порядка 10^{-15} м и резко убывающие даже при незначительном увеличении расстояния;

б) ядерные силы не зависят от того, имеет ли частица (нуклон) заряд - зарядовая независимость ядерных сил. Ядерные силы, действующие между нейтроном и протоном, между двумя нейтронами, между двумя протонами равны. Протон и нейтрон по отношению к ядерным силам одинаковы.

Энергия связи является мерой устойчивости атомного ядра. Энергия связи ядра равна работе, которую нужно совершить для

расщепления ядра на составляющие его нуклоны без сообщения им кинетической энергии

$$M_{\text{я}} < \Sigma(m_p + m_n)$$

$M_{\text{я}}$ - масса ядра

Измерение масс ядер показывает, что масса покоя ядра меньше, чем сумма масс покоя составляющих его нуклонов.

Величина

$$\Delta m_0 = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$$

служит мерой энергии связи и называется **дефектом массы**.

Уравнение Эйнштейна в специальной теории относительности связывает энергию и массу покоя частицы.

$$E_0 = mc^2.$$

В общем случае энергия связи ядра может быть подсчитана по формуле

$$E = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}]c^2,$$

где Z - зарядовое число (число протонов в ядре);

A - массовое число (общее число нуклонов в ядре);

m_p , m_n и $M_{\text{я}}$ - масса протона, нейтрона а ядра

Дефект массы (Δm) равный 1 а.е. м. (а.е.м. - атомная единица массы) соответствует энергий связи ($E_{\text{св}}$), равной 1 а.е.э. (а.е.э. - атомная единица энергии) и равной $1 \text{ а.е.м.} \cdot c^2 = 931 \text{ МэВ}$.

Контрольные вопросы:

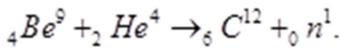
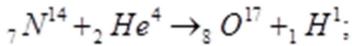
1. Из чего состоит ядро?
2. Какую массу имеют нейтроны? Каков заряд нейтрона?
3. Каков состав ядра натрия Na?
4. Сколько нейтронов содержит изотоп урана ? Чему равно число протонов в ядре?
5. Определите дефект массы, энергию связи и удельную энергию ядра азота .

Лекция №44. Деление ядер урана, цепная реакция деления. Ядерный реактор

Изменения ядер при взаимодействии их с отдельными частицами и друг с другом принято называть ядерными реакциями.

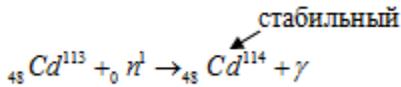
Различают следующие, наиболее часто встречающиеся ядерные реакции.

1. Реакция превращения. В этом случае налетевшая частица остается в ядре, но промежуточное ядро испускает какую-либо другую частицу, поэтому ядро - продукт отличается от ядра-мишени.

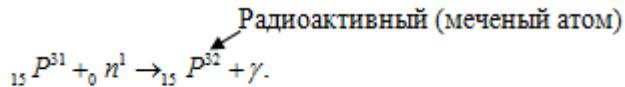


2. Реакция радиационного захвата. Налетевшая частица застревает в ядре, но возбужденное ядро испускает избыточную энергию, излучая γ - фотон (используется в работе ядерных реакторов)

Пример реакции захвата нейтронов кадмием



или фосфором



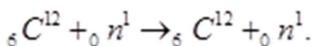
3. Рассеяние. Промежуточное ядро испускает частицу, тождественную

с налетевшей, причем может быть:

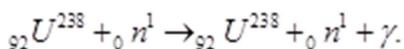
- **упругое рассеяние**, при котором $\sum W_{K_{\text{вых}}} = const$;

- **неупругое рассеяние**, при котором $\sum W_{K_{\text{вых}}} \neq const$.

Упругое рассеяние нейтронов углеродом (используется в реакторах для замедления нейтронов):

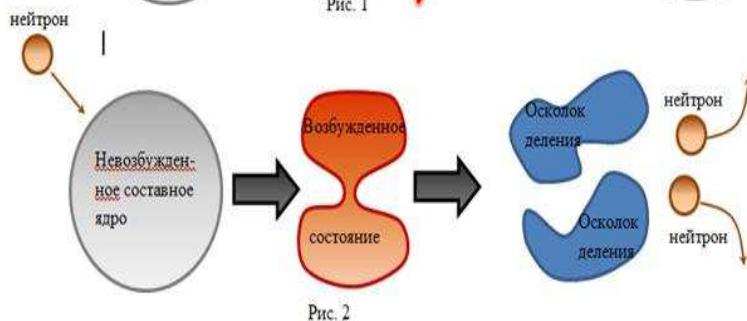
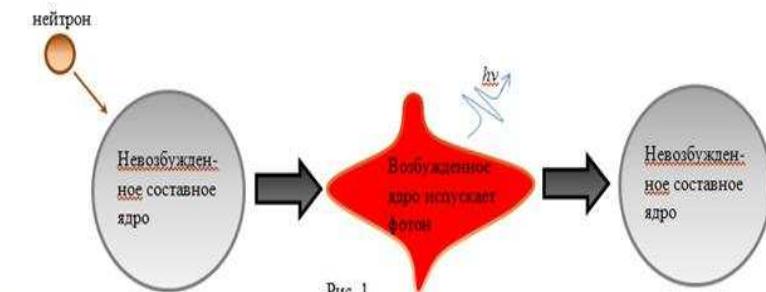


Неупругое рассеяние:



4. Реакция деления. Это реакция, идущая всегда с выделением энергии. Она является основой для технического получения и использования ядерной энергии. При реакции деления возбуждение промежуточного составного ядра столь велико, что оно делится на два, примерно равных осколка, с выделением нескольких нейтронов.

Если энергия возбуждения невелика, то разделение ядра не происходит, а ядро, потеряв избыток энергии путем испускания γ -фотона или нейтрона, возвратится в нормальное состояние (рис. 1). Но если вносимая нейтроном энергия велика, то возбужденное ядро начинает деформироваться, в нем образуется перетяжка и в результате оно делится на два осколка, разлетающихся с огромными скоростями, при этом испускается два нейтрона (рис. 2).



Цепная реакция - саморазвивающаяся реакция деления. Для

осуществления её необходимо, чтобы из вторичных нейтронов, образующихся при одном акте деления, хотя бы один смог вызвать следующий акт деления: (так как некоторые нейтроны могут участвовать в реакциях захвата не вызывая деления) . Количественно условие существования цепной реакции выражает **коэффициент размножения**

$$k = \frac{N^1}{N} \left[\frac{\text{количество нейтронов после деления}}{\text{количество нейтронов до деления}} \right].$$

$k < 1$ - цепная реакция невозможна, $k = 1$ ($m = m_{кр}$) - цепная реакция с постоянным количеством нейтронов (в ядерном реакторе), $k > 1$ ($m > m_{кр}$) - ядерные бомбы.

Способностью к цепной ядерной реакции обладает изотоп урана ^{235}U . При наличии определенных критических параметров (критическая масса — 50 кг, шаровая форма радиусом 9 см) три нейтрона, выделившиеся при делении первого ядра, попадают в три соседних ядра и т. д. Процесс идет в виде цепной реакции, которая протекает за доли секунды в виде ядерного взрыва. Неуправляемая ядерная реакция применяется в атомных бомбах. Впервые решил задачу об управлении цепной реакцией деления ядер физик Энрико Ферми. Им был изобретен ядерный реактор в 1942 г. У нас в стране реактор был запущен в 1946 г. под руководством И. В. Курчатова.

Термоядерные реакции — это реакции синтеза легких ядер, происходящие при высокой температуре (примерно 107 К и выше). Для слияния необходимо, чтобы они сблизилась на расстоянии 10^{12} см для попадания в сферу действия ядерных сил.

Необходимые условия для синтеза ядер гелия из протонов имеются в недрах звезд. На Земле термоядерная реакция осуществлена только при экспериментальных взрывах, хотя ведутся международные исследования по управлению этой реакцией.

Ядерный реактор- это устройство на атомной электростанции для получения атомной энергии.

Назначение ядерного реактора: преобразование внутренней энергии атомного ядра в электрическую энергию.

В ядерном реакторе осуществляется управляемая цепная реакция деления ядер (при $k = 1$).

Ядерными реакторами оснащены все АЭС (атомные электростанции).

Основные элементы ядерного реактора:
-топливо (уран-235, уран-238, плутоний-239) в виде стержней
-замедлитель нейтронов (тяжелая вода, графит)
-теплоноситель (вода, жидкий натрий)
-устройство для регулирования реакции (кадмий, бор)
- ащита (оболочка из бетона и железа).

Реактор работает на медленных нейтронах (более эффективно идет деление ядер урана-235).

Активная зона реактора, содержит ядерное топливо - урановые стержни и замедлитель - воду. Вода вокруг урановых стержней является не только замедлителем нейтронов, но и служит для отвода тепла, т.к. внутренняя энергия разлетающихся осколков переходит во внутреннюю энергию окружающей среды - воды. Активная зона окружена отражателем для возвращения нейтронов и защитным слоем бетона.

Достижение критической массы топлива осуществляется введением регулирующих стержней (до достижения массы урана = критической массе).

Активная зона посредством труб соединена в кольцо (1-ый контур).

Вода прокачивается по трубам контура насосом и отдает свою энергию змеевику в теплообменнике, нагревая воду в змеевике (во 2-м контуре).

Вода в змеевике превращается в пар, температура которого может достигать 540 градусов.

Пар вращает турбину, энергия пара превращается в механическую энергию.

Ось турбины вращает ротор электрогенератора, превращая механическую энергию в электрическую.

Отработанный (охлажденный) пар поступает в конденсатор, где превращается в воду, возвращающуюся в 1-ый контур.

Первая АЭС была построена в г. Обнинске (СССР).

Преимущества АЭС:

- ядерные реакторы не потребляют кислород и органическое топливо

- не загрязняют окружающую среду золой и вредными для человека продуктами органического топлива

- биосфера надежно защищена от радиоактивного воздействия при нормальном режиме эксплуатации АЭС.

Недостатки АЭС:

- необходимость захоронения радиоактивных отходов и демонтаж отслуживших свой срок реакторов
- опасность радиоактивного заражения местности при аварийных выбросах
- опасность экологических катастроф ((1986 г. - Чернобыльская АЭС).

Контрольные вопросы:

1. Расскажите о механизме протекания цепной ядерной реакции.
2. За счет каких факторов можно увеличить число свободных нейтронов в куске урана, обеспечив тем самым возможность протекания в нем реакции?
3. Что называется ядерным реактором? Назовите основные части реактора.
4. Какие реакции называют термоядерными? Каковы условия осуществления термоядерных реакций?
5. Благодаря чему оказалось возможным осуществление цепной реакции деления? Что называют коэффициентом размножения нейтронов?

Лекция №45. Принцип относительности в классической механике. Постулаты Эйнштейна. Одновременность

Во второй половине XIX в. Максвелл развил теорию электромагнетизма. Он показал, что свет - электромагнитная волна. Уравнение Максвелла подсказало, что скорость света $\ll 3 \cdot 10^8$ м/с. Предсказания совпали с экспериментальными измерениями в пределах погрешности. Но в какой системе отсчета?

У Максвелла в уравнениях нет оговорок насчет относительной скорости. Физики предположили, что свет распространяется в какой-то среде. Эту среду назвали эфиром, который заполняет все пространство.

Предположим, что значение скорости по Максвеллу достигается в Системе отсчета, связанной с эфиром. Тогда скорость света в различных системах отсчета различна?

А. Майкельсон и Э. Морин провели опыты по измерению скорости света в направлении движения Земли и в противоположном направлении. Никакого различия в скорости света им обнаружить не удалось. Это означало, что никакой среды эфира не суще-

ствуется.

Таким образом, обнаружилось определенные противоречия между электродинамикой и механикой Ньютона, законы которой согласуются с принципом относительности. Возникшие противоречия можно было преодолеть тремя различными способами:

1. Объяснить несостоятельность принципа относительности в применении к электромагнитным явлениям. На эту точку встал голландский физик Х. Лоренц.

2. Считать неправильными сами уравнения Максвелла и попытаться изменить их таким образом, чтобы они при переходе от одной инерционной системы к другой не менялись. Такая попытка была предпринята Г. Герцем.

3. В отказе от классических представлений о пространстве и времени, с тем чтобы сохранить как принцип относительности, так и уравнения Максвелла.

Единственно правильным оказалась именно третья возможность. Последовательно развил ее Эйнштейн. Он пришел к новым представлениям о пространстве и времени.

Первые два пути были опровергнуты экспериментами.

Принцип относительности (главный постулат теории Эйнштейна): законы механики имеют один и тот же вид во всех инерциальных системах, т.е. все законы природы одинаковы в любой инерциальной системе отсчета.

Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы в природе, в том числе и на электромагнитные.

Второй постулат - скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета.

Она не зависит не от скорости источника, ни от скорости приемника света. Скорость света занимает особое положение.

В данном случае специальная теория относительности находится в противоречии с классическими представлениями о пространстве и времени, которые при больших скоростях движения уже несправедливы. Наличием верхнего предела скорости объясняется существование «черной дыры» - астрономического объекта.

Релятивистский закон сложения скоростей

Опыт Майкельсона-Морли показал, что скорость света в вакууме постоянна и не зависит от скорости движения источника или приемника. Это означает, что преобразование Галилея и закон сло-

жения скоростей неверен при скорости движения, соизмеримой со скоростью света.

Материальная часть (тело) не может двигаться с большей скоростью, чем скорость света.

Релятивистский закон сложения скоростей справедлив при любой скорости движения, т. е.:

$$V=(V_1+V_2)/(1+V_1V_2/c^2).$$

Относительность времени

Существование предельной скорости передачи взаимодействий вызывает необходимость глубокого изменения обычных представлений о пространстве и времени, основанных на повседневном опыте. Представление об абсолютном времени, которое течет раз и навсегда заданным темпом, совершенно независимо от материала и его движения, оказывается неправильным.

Если допустить мгновенное распространение сигналов, то утверждение, что события в двух отдельных точках А и В произошли одновременно, будет иметь абсолютный смысл. Поместить в точках А и В часы и синхронизировать. Если в точке А часы показывают 0 ч 30 мин и отправить сигнал в точку В тоже в 0 ч. 30 мин, то часы покажут одинаковое время, т. е. будут идти синхронно.

Только располагая в точке А и точке В синхронизированными часами, можно судить о том, произошли ли два события этих точках одновременно или нет. Как можно синхронизировать часы, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, если скорость распространения сигналов не бесконечно велика?

Такой способ используется для проверки часов по радио. Зная расстояние от радиостанции до дома, можно вычислить поправку на запаздывание сигнала. Эта поправка невелика, но при огромных космических расстояниях может оказаться весьма существенной.

Например, космонавт синхронизирует часы, находящиеся в разных концах корабля. Для этого с помощью источника, находящегося неподалеку относительно корабля и расположенного в середине, должна произойти вспышка. Если свет дошел одновременно до обоих часов, то они идут синхронно. Это относится к системе, связанной с кораблем.

В системе отсчета, относительно которой движется корабль, положение иное. Часы на носу корабля удаляются от того места,

где произошла вспышка, свет преодолевает расстояние больше половины корабля. Напротив, на корме часы приближаются к месту вспышки, и путь оказывается меньше половины корабля. Наблюдатель придет к выводу - сигнал достигнет часов неодновременно. Часы будут идти неодинаково.

Согласно классическим представлениям, течение времени абсолютно. Предполагалось, что движущие часы не изменяют своего ритма.

Наблюдения световых явлений показывают, что движущиеся часы изменяют свой ритм.

Пульт космического корабля, движущегося со скоростью v и может измерять время по часам, покоящимся относительно корабля.

Время t' называется собственным временем. Собственное время - время, измеренное наблюдателем, движущимся вместе с часами.

Время в неподвижной системе отсчета и движущееся относительно нее, течет с разной скоростью:

$$t \neq t'.$$

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- время неподвижного наблюдения.

Контрольные вопросы:

1. Объясните сущность теории относительности.
2. Каким путем Эйнштейн решил противоречия, возникшие при применении принципа относительности к законам электродинамики?
3. Сформулируйте постулаты теории относительности и объясните их сущность.
4. Почему результаты эксперимента Майкельсона-Морли противоречат классическому закону сложения скоростей?
5. Почему осуществление событий в нашем чувственном восприятии не означает их одновременности?
6. Какой промежуток времени пройдет на звездолете, движущемся относительно Земли со скоростью, равной 0,4 скорости света, за 25 земных лет?

Литература

1. Физика : учебник / А.А. Пинский, Г.Ю. Граковский; под общ.ред. Ю.И. Дика, Н.С. Пурышевой. – 4-е изд., испр. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2014. – 560с.: ил.

2. Лабораторные работы по физике с вопросами и заданиями: учебное пособие / Тарасов О.М. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2013. – 96 с.

3. Физика. 10 класс: учеб. Для общеобразоват. учреждений с прил. на электрон. Носителе: базовый и профил. уровни / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. В.И. Николаева, Н.А. Парфентьевой. – 20-е изд. – М.: Просвещение, 2011. – 366 с.,

4. Физика. 11 класс: учеб. Для общеобразоват. учреждений с прил. на электрон. Носителе: базовый и профил. уровни / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. В.И. Николаева, Н.А. Парфентьевой. – 20-е изд. – М.: Просвещение, 2011. – 399 с.,

5. Физика. Задачник. 10-11 кл.: Пособие для общеобразоват. Учреждений. – 8-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2004. – 192 с.: ил.

6. Сборник дидактических заданий по физике: Учеб. Пособие для техникумов. – М.: Высш. шк., 1986, - 416 с., ил.

Учебное издание

М.И. Кублицкая

Физика

Учебное пособие

Редактор Павлютина И.П.

Подписано в печать 17.11.2015 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага типографская офсетная. Усл. печ. л. 8,60.
Тираж 25 экз. Изд. № 3841.

Издательство Брянского ГАУ.
243365 Брянская обл., Выгоничский р-он, с. Кокино,
Брянский ГАУ