

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И  
СПОРТА УКРАИНЫ**  
Государственное высшее учебное заведение  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ*

**Конспект лекций по физике для подготовки иностранных студентов  
подготовительного отделения**

**Часть 2**

*Магнетизм*

*Колебания и волны*

*Оптика*

*Атомная и ядерная физика*

Рассмотрено на заседании кафедры физики  
Протокол № 5 от 26 марта 2012 г.

Утверждено учебно-издательским  
Советом ДонНТУ  
Протокол № 3 от 06.06.2012 г.

**УДК 53(071)**

Васильев А.Г. Методическое пособие. Конспект лекций по физике для подготовки иностранных студентов подготовительного отделения. Часть 2. Магнетизм. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика.// Донецк: ДонНТУ, 2012.– 40 с.

Методическое пособие «Конспект лекций по физике для подготовки иностранных студентов подготовительного отделения. Часть 2. Магнетизм. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика» является составной частью комплекта учебно-методических пособий по курсу физики для подготовки иностранных студентов подготовительного отделения. В данном методическом пособии приведены определения основных физических понятий и величин, сформулированы физические законы, кратко разъяснена сущность описываемых ими явлений, изучаемых в разделах: магнетизм; колебания и волны; оптика; атомная и ядерная физика. В конце каждой лекции приведен словарь физических терминов изучаемой темы в переводе на английский и арабский языки.

Данное методическое пособие может быть использовано студентами для самостоятельной подготовки к практическим занятиям, лабораторным работам, решению задач по индивидуальным заданиям, а также при подготовке к сдаче экзамена и зачета.

Составил:

А. Г. Васильев, доц.

Рецензент:

А.Ф. Волков, проф.

Ответственный за выпуск

В.О.Гольцов, проф.

## СОДЕРЖАНИЕ

Лекция №11	
11. Магнитное поле.....	5
11.1 Взаимодействие параллельных токов.....	5
11.2 Вектор индукции магнитного поля.....	5
11.3 Вектор напряженности магнитного поля.....	5
11.4 Магнитное поле постоянных магнитов.....	5
11.5 Графическое изображение магнитного поля.....	6
11.6 Принцип суперпозиции.....	6
10.7 Поле прямого тока.....	6
11.8 Поле кругового тока в центре витка.....	6
11.9 Поле длинного соленоида.....	7
11.10 Сила Ампера.....	7
11.11 Сила Лоренца.....	7
11.12 Вращающий момент.....	8
11.13 Электромагнитная индукция.....	8
11.14 Индуктивность контура.....	9
11.15 Самоиндукция.....	10
11.16 Энергия магнитного поля.....	10
11.17 Словарь.....	10
Лекция №12	
12. Вещества в магнитном поле.....	11
12.1 Диамагнетики.....	11
12.2 Парамагнетики.....	11
12.3 Ферромагнетики.....	11
12.4 Машина постоянного тока.....	13
12.5 Принцип работы измерительного прибора магнитоэлектрической системы.....	14
12.6 Словарь.....	15
Лекция №13	
13. Механические колебания и волны.....	15
13.1 Классификация колебаний.....	15
13.2 Пружинный маятник.....	15
13.3 Математический маятник.....	17
13.4 Скорость и ускорение при гармонических колебаниях.....	17
13.5 Энергия механических колебаний.....	17
13.6 Механические волны.....	17
13.7 Интерференция.....	19
13.8 Эффект Доплера.....	20
13.8 Словарь.....	21
Лекция №14	
14. Электромагнитные колебания и волны	
Переменный электрический ток.....	21
14.1 Колебательный контур.....	21
14.2 Переменный электрический ток.....	22

14.3 Мощность цепи переменного тока.....	23
14.4 Трансформатор.....	23
14.5 Словарь.....	24
Лекция №15	
15. Геометрическая оптика.....	24
15.1 Основные законы геометрической оптики.....	24
15.2 Зеркала.....	25
15.3 Линзы.....	27
15.4 Словарь.....	29
Лекция №16	
16. Волновая и квантовая оптика.....	30
16.1 Интерференция света.....	30
16.2 Дифракция.....	31
16.3 Внешний фотоэффект.....	32
16.4 Фотон.....	33
16.5 Словарь.....	34
Лекция №17	
17. Атомная физика.....	34
17.1 Противоречия классической физики.....	34
17.2 Постулаты Бора.....	34
17.3 Атом водорода.....	35
17.4 Спектр излучений атома водорода.....	35
17.5 Словарь.....	36
Лекция №18	
18. Ядерная физика.....	36
18.1 Ядерная физика.....	36
18.2 Состав ядра.....	36
18.3 Характеристики ядра.....	37
18.4 Дефект массы.....	37
18.5 Энергия связи ядра.....	37
18.6 Ядерные реакции.....	38
18.7 Радиоактивность.....	38
18.8 Закон радиоактивного распада.....	39
18.9 Использование явления радиоактивности.....	40
18.10 Гамма-излучение.....	40
18.11 Словарь.....	40

## Лекция №11

*Магнитное поле.*

Начало исследований электромагнитных явлений было положено в начале 19-го века. В 1820 году Г. Эрстед обнаружил, что при пропускании по прямолинейному проводнику постоянного тока магнитная стрелка стремится расположиться перпендикулярно к проводнику. При изменении направления тока стрелка поворачивалась на  $180^\circ$ .

11.1 *Взаимодействие параллельных токов.* В том же году А. Ампер установил, что два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение при пропускании через них тока в одном направлении и отталкиваются, если токи имеют противоположные направления. Сила взаимодействия проводников пропорциональна величине токов и обратно пропорциональна расстоянию между ними.

$$F = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

здесь –  $I_1, I_2$  – сила тока в проводниках;  $l$  – длина проводников;  $d$  – расстояние между проводниками.

*Вывод из опытов Эрстеда и Ампера – Вокруг проводников с током существует магнитное поле.*

11.2 *Силовая характеристика магнитного поля векторная физическая величина, вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ . В системе СИ единица измерения индукции магнитного поля Тл (Тесла).*

11.3 *Напряженность магнитного поля.* Кроме вектора магнитной индукции для характеристики магнитного поля используют другую величину  $H$ , называемую напряженностью магнитного поля. *Напряженность магнитного поля  $\vec{H}$  – векторная величина, являющаяся количественной характеристикой магнитного поля. Напряженность магнитного поля не зависит от магнитных свойств среды.  $[H] = \text{А/м}$ . Магнитная индукция и напряженность связаны между собой соотношением:*

$$B = \mu\mu_0 H,$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  – магнитная постоянная;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $H$  – напряженность магнитного поля. *Магнитная проницаемость среды  $\mu$  – это физическая величина, показывающая, во сколько раз магнитная индукция поля в данной среде отличается от магнитной индукции поля в вакууме.*

11.4 *Магнитное поле постоянных магнитов*

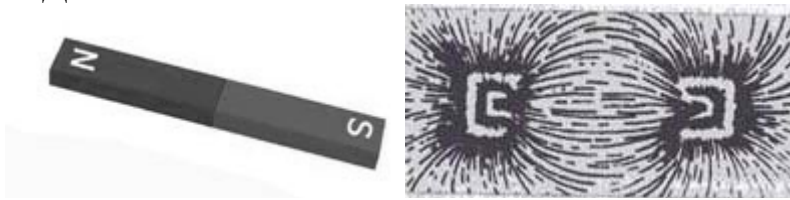
Постоянные магниты – это тела, длительное время сохраняющие намагниченность. Основное свойство магнитов: притягивать тела из железа или его сплавов (напр. стали). Постоянный магнит всегда имеет 2 магнитных полюса: северный (N) и южный (S). Наиболее сильно магнитное поле

постоянного магнита у его полюсов. Вектор индукции магнитного поля направлен от южного полюса к северному полюсу.

Взаимодействие магнитов: одноименные полюса отталкиваются, а разноименные полюса притягиваются. Взаимодействие магнитов объясняется тем, что любой магнит имеет магнитное поле, и эти магнитные поля взаимодействуют между собой.

Как выглядит магнитное поле постоянных магнитов? Представление о виде магнитного поля можно получить с помощью железных опилок. Стоит лишь положить на магнит лист бумаги и посыпать его сверху железными опилками.

Для постоянного полосового магнита:



11.5 *Графически магнитные поля можно изображать с помощью силовых линий магнитного поля. Силовая линия это линия, в любой точке которой вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен по касательной к ней. Силовые линии магнитного поля не имеют ни начала, ни конца. Если во всех точках некоторой части пространства вектор магнитной индукции  $B$  не изменяет своего направления и численного значения, то магнитное поле в этой части пространства называется однородным.*

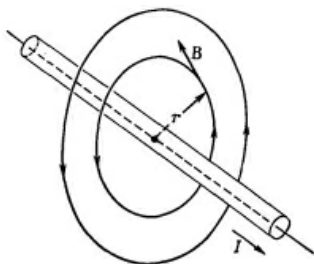
11.6 *Принцип суперпозиции. Если магнитное поле создается системой проводников с током, то индукция результирующего поля в любой его точке также равна векторной сумме индукций магнитных полей, создаваемых каждым током в отдельности:*

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

*Данное утверждение носит название принципа суперпозиции полей.*

11.7 *Поле прямого тока.*

Линии индукции прямого проводника с током представляют собой окружности в плоскости перпендикулярной к проводнику. Центры окружностей находятся на оси проводника. Направление линий индукции магнитного поля определяется по мнемоническому правилу буравчика: направление линий индукции совпадает с направлением ручки буравчика, ввинчиваемого вдоль направления тока.



$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0}$$

где  $r_0$  - кратчайшее расстояние от проводника с током до точки, в которой определяется магнитная индукция.

11.8 *Поле кругового тока в центре витка.*

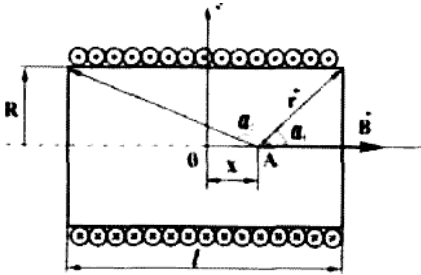
Индукция в центре кругового тока равна:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}$$

*Правило правого винта для кругового тока:*

1. Вращаем рукоятку по направлению тока;
2. Направление движения винта указывает на направление вектора индукции магнитного поля.

11.9 Поле длинного соленоида. Соленоид представляет собой провод, навитый на круглый цилиндрический каркас. На рисунке показано сечение соленоида. Магнитная индукция поля соленоида равна геометрической сумме магнитных индукций полей всех витков этого соленоида. В учении об электромагнетизме большую роль играет воображаемый бесконечно длинный соленоид. Причина этого заключается в том, что поле такого соленоида однородно и ограничено объемом соленоида. *Соленоид считается бесконечно длинным, если  $l \gg R$ .*

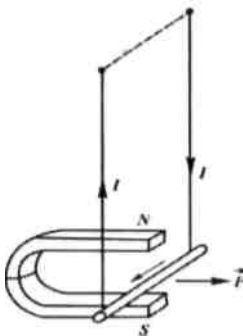


$$B = \mu\mu_0 nI$$

где  $n$  – число витков на единицу длины соленоида. Соответственно, напряженность магнитного поля внутри бесконечно длинного соленоида:

$$H = In.$$

11.10 Сила Ампера. Если проводник с током поместить между полюсами подковообразного магнита, то он будет или втягиваться, или выталкиваться из него в зависимости от направления тока. Сила действия пропорциональна силе тока и длине проводника.



$$F = BI \sin \alpha,$$

$\alpha$  – угол между направлением вектора индукции и током.

*Направление силы Ампера определяем по правилу левой руки для:*

*Вектор индукции входит в ладонь;*

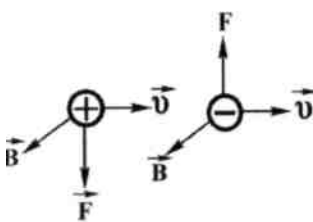
*Четыре пальца, сложенные вместе, направляем по направлению движения (скорости) заряда;*

3. Большой палец указывает на направление действия силы.

11.11 Сила Лоренца. Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные заряженные частицы, движущиеся в магнитном поле. Сила  $\vec{F}_L$ , действующая на электрический заряд  $q$ , движущийся в магнитном поле со скоростью  $\vec{v}$ , называется силой Лоренца. Сила Лоренца рассчитывается по формуле:

$$\vec{F}_L = qvB \sin \alpha$$

где:  $B$  – индукция магнитного поля, в котором движется заряд;  $\alpha$  – угол между векторами  $v$  и  $B$ . Направление силы Лоренца определяется для положительно заряженных частиц по правилу левой руки, для отрицательно заряженных частиц по правилу правой руки:



*Вектор индукции входит в ладонь;*

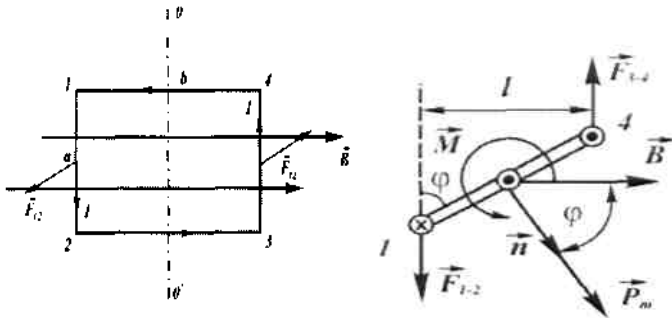
*Четыре пальца, сложенные вместе, направляем по направлению движения (скорости) заряда;*

### 3. Большой палец указывает на направление действия силы.

Сила Лоренца направлена всегда перпендикулярно к скорости движения заряженной частицы и сообщает ей центростремительное ускорение. Не изменяя модуля скорости, а лишь изменяя ее направление, сила Лоренца не совершает работы и кинетическая энергия заряженной частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

#### 11.12 Вращающий момент. Магнитный момент.

Рассмотрим плоский контур, находящийся в однородном магнитном поле  $B$ . Контур ориентирован так, что линии магнитной индукции параллельны плоскости контура. На стороны 1-2 и 3- контура действуют силы  $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{34}$ , которые стремятся повернуть контур относительно оси  $OO'$ .  $F_{12}=F_{34}=Iba$



Результирующий вращающий момент  $M$  равен моменту пары сил  $F_{12}$  и  $F_{34}$ . Модуль вектора  $M$ :

$$M = F_{12}b \sin \alpha = BIab \sin \alpha$$

$b$  – сторона контура 1-4;  $\alpha$  – угол между направлением вектора  $B$  и нормалью к контуру. Произведение  $ab$  дает площадь контура  $S$ . Формулу можно преобразовать, воспользовавшись понятием магнитного момента. *Магнитным моментом ( $p_m$ ) плоского замкнутого контура с током  $I$  называется векторная физическая величина, численно равная произведению тока  $I$  на площадь контура  $S$ .*

$$p_m = IS\vec{n}$$

где  $\vec{n}$  - единичный вектор нормали к поверхности.  $[p_m] = A \cdot m^2$ .

Вектор  $p_m$  направлен перпендикулярно плоскости контура. Сделаем замену получим:

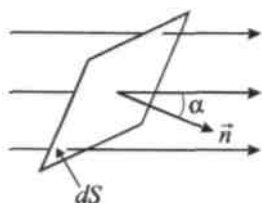
$$M = p_m B \sin \alpha$$

Если магнитное поле направлено перпендикулярно к плоскости контура, то векторы  $p_m$  и  $B$  будут сонаправлены. В этом случае вращающий момент  $M$  равен нулю. Силы, действующие на разные элементы контура, будут либо растягивать его, либо сжимать в зависимости от направления поля и тока.

#### 11.13 Электромагнитная индукция.

11.13.1 *Магнитный поток. Поток вектора магнитной индукции или магнитным потоком ( $d\Phi$ ) сквозь площадку  $dS$  называется скалярная физическая величина равная скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор элементарной площадки*

$$d\Phi = \vec{B}d\vec{S} = Bds \cos \alpha$$



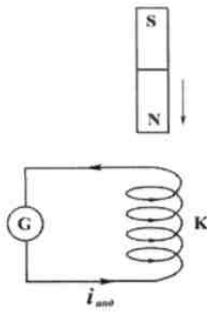
Где вектор элементарной площадки равен  $d\vec{S} = dS\vec{n}$ ,  $\vec{n}$  - нормаль к площадке;  $\alpha$  - угол между направлением нормали и вектором магнитной индукции.  $[\Phi] = Tл \cdot m^2 = Bб$  (вебер).



Магнитный поток сквозь произвольную поверхность  $S$ , если поле однородно :

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

11.13.2 *Явление электромагнитной индукции.* Опыты Эрстеда и Ампера показали, что вокруг проводников с током возникает магнитное поле. Фарадей выдвинул обратную идею: под действием изменяющегося магнитного поля в замкнутом проводнике должен возникать электрический ток. Для доказательства этой идеи Фарадей проделал ряд опытов. Один из них заключается в следующем. Если полосовой магнит перемещать вдоль оси катушки, то в ней появляется ток, который регистрирует гальванометр. Направление тока зависит от того, каким



полюсом был обращен магнит к катушке и от направления его движения. Открытое Фарадеем явление было названо явлением электромагнитной индукции.

*Явлением электромагнитной индукции называется явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока, пронизывающего этот контур.*

Возникший ток называют *индукционным*. Соответствующая ему эдс называется электродвижущей силой электромагнитной индукции  $\mathcal{E}$ .

11.13.2.1 *Закон Фарадея для электромагнитной индукции* Дальнейшие эксперименты показали, что эдс электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

*Выражение называется законом Фарадея для электромагнитной индукции. Знак « $-$ » введен в формулу в соответствии с правилом Ленца.*

11.13.2.2 *Правило Ленца:* Индукционный ток имеет такое направление, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызвавшего этот индукционный ток.

11.14 *Индуктивность контура.* Электрический ток, текущий в проводящем контуре, создает в окружающем пространстве магнитное поле. Полный магнитный поток, пронизывающий контур, прямо пропорционален току:

$$\Psi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  между полным магнитным потоком и силой тока называется индуктивностью контура или коэффициентом самоиндукции контура. *Индуктивность ( $L$ )* - это скалярная физическая величина, характеризующая магнитные свойства электрической цепи. За единицу индуктивности в СИ принимается индуктивность такого проводника (контура), у которого при силе тока в нем 1 А возникает сцепленный с ним полный поток  $\Psi$ , равный 1 Вб. Эту единицу называют генри (Гн). Индуктивность можно рассчитывать на основе геометрии проводника.

11.14.1 *Индуктивность соленоида:*

$$L = \mu\mu_0 n^2 V$$

где:  $V$  – объем соленоида;  $n = \frac{N}{l}$  – плотность намотки соленоида. Из формулы

следует, что индуктивность соленоида можно также представить как:

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l}$$

11.15 Самоиндукция – это явление возникновения эдс индукции в проводящем контуре при изменении в нем электрического тока, идущего по этому контуру. Самоиндукция является частным случаем электромагнитной индукции. При изменении тока в контуре меняется поток магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром. В результате этого в нем возбуждается эдс самоиндукции. При увеличении в цепи силы тока эдс самоиндукции препятствует его возрастанию, а при уменьшении тока – его убыванию. Из эксперимента следует, что величина эдс самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока и величине, называемой индуктивностью.

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}$$

Знак «–» обусловлен правилом Ленца.

11.16 Энергия магнитного поля. При протекании электрического тока в соленоиде возникает магнитное поле энергия которого равна:

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

Используя соотношения для индукции магнитного поля соленоида, индуктивности соленоида и объема получаем формулу объемной плотности энергии магнитного поля:

$$w = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}.$$

### 11.17 Словарь

1. Магнитное поле – The magnetic field- الحقل المغناطيسي
2. Постоянный магнит – Permanent Magne-المغناطيس الدائم
3. Индукция магнитного поля – Magnetic induction-الحث المغناطيسي
4. Напряженность магнитного поля – Intensity of a magnetic fields قوة الحقل المغناطيسي-
5. Магнитная постоянная – Magnetic constant-ثابت المغناطيسي
6. Магнитная проницаемость среды – The magnetic permeability of the medium النفاذية المغناطيسية
7. Сила Ампера – Force of Ampere-قوة امبير
8. Сила Лоренца – Lorentz force-قوة لورنز
9. Соленоид – Solenoid-الملف اللولبي
10. Поток вектора магнитной индукции – The flow of the magnetic induction vecto تدفق متجه الحث المغناطيسي

11. Магнитный момент контура – The magnetic moment of the circuit *اللحظة المغناطيسية للدائرة*
12. Явление электромагнитной индукции – The phenomenon of electromagnetic induction *ظاهرة الحث الكهرومغناطيسية*
13. Самоиндукция – inductance *الحث*
14. Правило Ленца – Lenz's Rule- *قاعدة لينز*
15. Закон электромагнитной индукции – The law of electromagnetic induction- *قانون الحث*

## Лекция №12

### *Вещества в магнитном поле.*

#### *Принципы действия электромагнитных приборов.*

12.1 *Диамагнетики* – вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля. В отсутствие внешнего магнитного поля диамагнетики немагнитны. Под действием внешнего магнитного поля каждый атом диамагнетика приобретает магнитный момент, пропорциональный магнитной индукции  $H$  и направленный навстречу полю. Поэтому магнитная восприимчивость у диамагнетиков всегда отрицательна. По абсолютной величине диамагнитная восприимчивость  $\chi$  мала и слабо зависит как от напряжённости магнитного поля, так и от температуры. Вследствие этого, *магнитная проницаемость диамагнетиков немного меньше единицы*. Диамагнетики выталкиваются из магнитного поля.

12.2 *Парамагнетики* – вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении внешнего магнитного поля. Парамагнетики относятся к слабомагнитным веществам, магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы .

$$\mu \geq 1$$

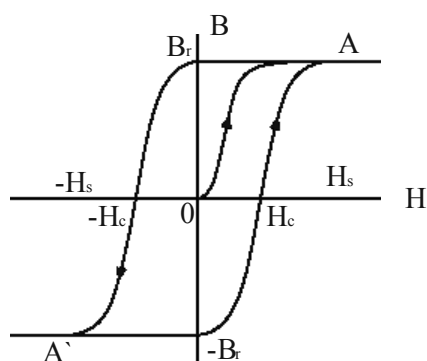
Термин «Парамагнетизм» ввёл в 1845 году Майкл Фарадей, который разделил все вещества (кроме ферромагнитных) на диа- и парамагнитные. Атомы (молекулы или ионы) парамагнетика обладают собственными магнитными моментами, которые под действием внешних полей ориентируются по полю и тем самым создают результирующее поле, превышающее внешнее. Парамагнетики втягиваются в магнитное поле. В отсутствие внешнего магнитного поля парамагнетик не намагничен, так как из-за теплового движения собственные магнитные моменты атомов ориентированы совершенно беспорядочно.

12.3 *Ферромагнетики* – вещества (как правило, в твёрдом кристаллическом или аморфном состоянии), в которых ниже определённой критической температуры (точки Кюри) устанавливается дальний ферромагнитный порядок магнитных моментов атомов или ионов (в неметаллических кристаллах) или моментов коллективизированных электронов (в металлических кристаллах). Иными словами, ферромагнетик – такое вещество, которое, при температуре ниже точки Кюри, способно обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. *Магнитная проницаемость ферромагнетиков значительно*

больше единицы, зависит от температуры и величины индукции внешнего магнитного поля. Среди химических элементов ферромагнитными свойствами обладают переходные элементы Fe, Co и Ni (3 d-металлы) и редкоземельные металлы Gd, Tb, Dy, Ho, Er.

12.3.1 Магнитные домены. В ферромагнитных веществах магнитные моменты атомов благодаря обменному взаимодействию при температурах, меньших температуры Кюри  $T_C$ , ориентируются параллельно друг другу. В связи с этим любой ферромагнетик при  $T < T_C$  должен обладать *макроскопическим магнитным моментом или намагниченностью  $M$*  (магнитным моментом единицы объема ферромагнетика). Область спонтанной намагниченности материала называют магнитным доменом.

12.3.2 Магнитный гистерезис – явление отставания вектора намагничивания и вектора напряженности магнитного поля в веществе от приложенного внешнего поля. Именно магнитным гистерезисом объясняется существование постоянных магнитов.



### 12.3.3 Петля магнитного гистерезиса.

Предположим, что внутрь соленоида поместили ферромагнитный и ток в обмотке соленоида равен нулю. Если материал первоначально не был намагничен, то индукция магнитного поля в материале и напряженность внешнего магнитного поля равны нулю. Этому состоянию соответствует точка 0 на рисунке. Будем непрерывно увеличивать силу тока в соленоиде, при этом будет возрастать величина напряженности внешнего магнитного поля.

Это приведет к росту магнитной индукции образца. В точке A при некотором значении напряженности магнитного поля  $H_s$  магнитная индукция образца достигнет индукции насыщения. При уменьшении напряженности поля  $H$  намагниченность образца уменьшается по кривой отличной от первоначальной, и при  $H=0$  образец будет обладать некоторой индукцией, величина которой будет отлична от нуля. Эта индукция называется остаточной и обозначается  $B_r$ . Остаточная индукция (остаточная намагниченность) обусловлена тем, что при размагничивании, когда  $H=0$ , магнитные моменты доменов оказываются ориентированными вдоль оси легкого намагничивания, направление которой близко к направлению внешнего.

Для достижения полного размагничивания образца к нему необходимо приложить противоположное по знаку поле определенной напряженности. Напряженность такого поля называют коэрцитивной силой  $H_c$ . При дальнейшем усилении отрицательного поля магнитная индукция тоже становится отрицательной и в точке A' при  $H=-H_s$  достигает значения индукции технического насыщения ( $B=-B_s$ ). После уменьшения отрицательного поля, а затем увеличения положительного поля кривая перемагничивания опишет петлю, называемую предельной петлей магнитного гистерезиса, которая является важной технической характеристикой магнитных материалов. Пользуясь предельной петлей

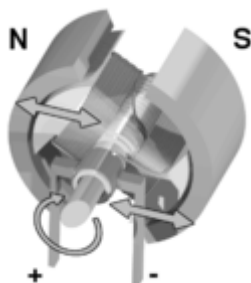
магнитного гистерезиса можно определить основные параметры материала: коэрцитивную силу  $H_c$ , индукцию насыщения  $B_s$ , остаточную индукцию  $B_r$  и др.

Такие характеристики материала, как точка Кюри и индукция насыщения, зависят только от химического состава магнитных материалов. Коэрцитивная сила  $H_c$ , магнитная проницаемость  $\mu$  и площадь петли гистерезиса являются структурночувствительными. По величине коэрцитивной силы магнитные материалы подразделяются на магнитомягкие и магнитотвердые. Материалы, у которых  $H_c < 4$  кА/м, относятся к магнитомягким, у которых  $H_c > 4$  кА/м – к магнитотвердым.

Для магнитомягких материалов характерно малое значение коэрцитивной силы. У промышленных образцов наименьшая  $H_c = 0,4$  А/м. Поэтому они намагничиваются до индукции технического насыщения при невысоких напряженностях поля. У магнитомягких материалов высокая магнитная проницаемость, малые потери на перемагничивание и узкая петля гистерезиса при высоких значениях магнитной индукции.

Для магнитотвердых материалов характерна широкая петля гистерезиса с большой коэрцитивной силой. У промышленных образцов наибольшая  $H_c = 800$  кА/м. Магнитотвердые материалы намагничиваются при высокой напряженности внешнего магнитного поля, но зато длительное время сохраняют сообщенную энергию.

12.4 Машина постоянного тока – электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую постоянного тока (генератор) или для обратного преобразования (двигатель). Машина постоянного тока обратима.



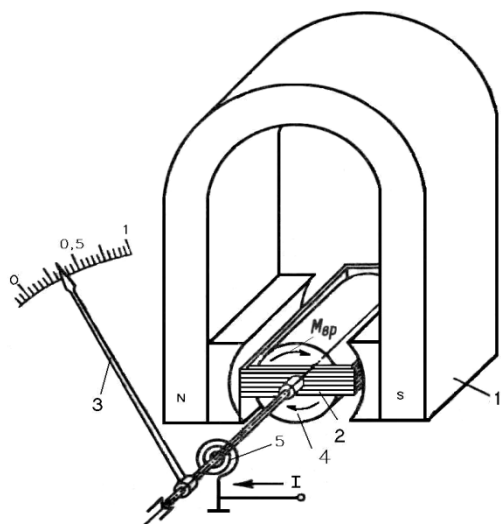
Машина постоянного тока образуется из синхронной обращённой конструкции, если её якорь снабдить коллектором, который в генераторном режиме играет роль выпрямителя, а в двигательном – преобразователя частоты. Благодаря наличию коллектора по обмотке якоря проходит переменный ток, а во внешней цепи, связанной с якорем, – постоянный.

12.4.1 *Электродвигатели постоянного тока* стоят почти на каждом автомобиле, это стартер, электропривод стеклоочистителя, вентилятор «печки» и др. Двигатель состоит из статора, на котором расположена обмотка. На неё подаётся постоянный ток, в результате чего вокруг неё создаётся постоянное магнитное поле. Обмотка ротора состоит из проводников, запитанных через коллектор. В результате на них действуют пары сил Ампера, которые вызывают вращающий момент. Направление сил определяется по правилу «левой руки». Однако этот вращающий момент способен повернуть ротор только на 180 градусов, после чего он остановится. Чтобы это предотвратить, используется щёточно-коллекторный узел, выполняющий роль переключателя полюсов ротора.

12.4.2 *Генератор* также состоит из статора, создающий постоянное магнитное поле между соответствующими полюсами. При вращении ротора, в проводниках обмотки якоря, перемещающихся в магнитном поле, по закону электромагнитной индукции наводится ЭДС, направление которой определяется

по правилу Ленца. Переменная ЭДС обмотки якоря выпрямляется с помощью коллектора, через неподвижные щетки, посредством которых обмотка соединяется с внешней сетью.

12.5 Принцип работы измерительного прибора магнитоэлектрической системы состоит во взаимодействии магнитного поля, которое создаёт



постоянный магнит, с током в обмотке подвижной части, представляющая собой рамку с обмоткой. С нитями (растяжками) соединены выводы обмотки, через них обмотка совмещена с внешней электрической цепью. Указательная стрелка укреплена на нити, в дальнейшем она перемещается при повороте рамки, которая с обмоткой находится в воздушном зазоре между полюсных наконечников и сердечником, изготовленным из стали. Магнитное поле в данном воздушном зазоре однородное за счёт конструкции, а также взаимному расположению магнитной части прибора, состоящего из магнитопровода,

постоянного магнита, сердечника и полюсных наконечников. В конечном итоге взаимодействия магнитного поля постоянного магнита с магнитным полем, создаваемым током и идущим по обмотке рамки, на рамку действует пара сил. Обе эти силы прямо пропорциональны силе тока, проходящего по обмотке. Пара сил создает вращающий момент  $M_{вп}$ . Подвижная часть механизма поворачивается под действием вращающего момента, при этом противодействующий момент, создаваемый пружинами, препятствует процессу. Момент  $M_{вп}$  при определенном угле поворота уравнивается противодействующим моментом  $M_{пр}$ , создаваемым пружиной. Стрелка устанавливается на определенном делении шкалы при равенстве моментов  $M_{вп} = M_{пр}$ . Угол поворота стрелки: прямо пропорционален величине измеряемого тока  $I$ , следовательно, шкала магнитоэлектрического прибора равномерная.

$$\alpha = c \cdot I$$

$\alpha$  – угол поворота подвижной части механизма;  $c$  – коэффициент, который зависит от упругости пружин.

Направление вращающегося момента, определяемое по правилу левой руки, изменяется, если ток меняет свое направление, поэтому на клеммах прибора обязательно указывается полярность (+ и -) для правильного включения прибора.

Если такой прибор включить в цепь переменного синусоидального тока, то на его измерительную катушку (рамку) будут действовать быстро изменяющиеся по величине и направлению силы, среднее значение которых равно нулю. В результате стрелка прибора не будет отклоняться от нулевого положения. Поэтому для измерений в цепях переменного тока магнитоэлектрические приборы можно применять только со специальными преобразователями.

## 12.6 Словарь.

1. Диамagnetик – diamagnetic
2. Парамагнетик – paramagnet- المتوازي المغناطيسي
3. Ферромагнетик – ferromagnet
4. Гистерезис – Hysteresis-التخلفية نزعة المادة الممغنطة إلى البقاء في حالة مغناطيسية
5. Петля магнитного гистерезиса – Magnetic Hysteresis Loop-الحلقة المغناطيسية التباطؤية
6. Коэрцитивная сила – The coercive force-القوة القسرية
7. Остаточная намагниченность – Remanent magnetization-الاستبقاء
8. Перемагничивание – reversal-انعكاس
9. Генератор – generator-مولد كهربائي
10. Электрический двигатель – The electric motor-المحرك الكهربائي
11. Электроизмерительный прибор – electrical measuring instrument-اداة المقياس الكهربائية-الكهربائية
12. Магнитоэлектрическая система – magnetic device of the electrical system-نظام الكهرومغناطيسي

## Лекция № 13

### *Механические колебания и волны.*

*Колебаниями называются процессы, повторяющиеся во времени.*

13.1 *Классификация колебаний.* В зависимости от физической природы повторяющегося процесса различают колебания: механические; электромагнитные; Электромеханические.

Система, совершающая колебания, называется колебательной системой или осциллятором. В зависимости от характера воздействия, оказываемого на колебательную систему, различают колебания:

1. *Свободные или собственные.* Свободными или собственными называются колебания, которые происходят в системе, предоставленной самой себе после того, как ей был сообщен толчок, либо она была выведена из положения равновесия.
2. *Затухающие.* Затухающими называются свободные колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени.
3. *Вынужденные.* Вынужденными называются колебания, в процессе которых колеблющаяся система подвергается воздействию внешней периодически изменяющейся силы.
4. *Автоколебания.* Автоколебаниями называются колебания, сопровождающиеся воздействием на колеблющуюся систему внешних сил, при этом система сама управляет этим воздействием.

### 13.2 Пружинный маятник

Рассмотрим тело массой  $m$ , прикрепленное к пружине жесткостью  $k$ . Сместим тело от положения равновесия на расстояние, равное  $x$ , после чего

предоставим систему самой себе. Возникшая сила упругости стремится вернуть тело в положение равновесия. По закону Гука

$$F = -kx$$

По второму закону Ньютона

$$F = ma$$

Учитывая, что ускорение тела это вторая производная координаты получаем:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx$$

Или

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0$$

Введем обозначение:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (3.5)$$

Тогда с учетом этого уравнение можно переписать в виде:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (3.6)$$

где  $\omega$  – это физический параметр, характеризующий колебательные свойства системы и называемый собственной частотой колебаний. Общее решение уравнения имеет вид:

$$\xi(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0) \text{ или } \xi(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

Таким образом тело на пружине будет совершать гармонические незатухающие колебания. *Гармонические незатухающие колебания – это колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется по закону косинуса или синуса.*

### 13.2.1 Характеристики колебаний.

1. *Амплитуда колебаний (A)* – максимальное значение колеблющейся величины. Амплитуда – положительная величина.

3. *Период колебаний (T)* – время одного полного колебания. [T]=с. Период колебаний пружинного маятника:

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

4. *Частота колебаний (ν)* — число колебаний за единицу времени. [ν]=1/с=Гц (Герц)

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

5. *Циклическая частота (ω)* – число колебаний за 2π секунд. [ω]=рад/с

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$$

6. *Фаза колебаний (φ)* – величина, характеризующая мгновенное состояние колебательной системы

$$\varphi = \omega t + \varphi_0$$

где (φ<sub>0</sub> – начальная фаза (значение фазы при t=0), [φ]=рад .



Амплитуда колебаний и начальная фаза определяются начальными условиями, а частота и период – свойствами колебательной системы.

**13.3 Математический маятник.** Математический маятник – это материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити и совершающая колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести.

Хорошим приближением к математическому маятнику служит небольшой шарик массой  $m$ , подвешенный на нити длиной  $l$ . Математический маятник можно рассматривать как предельный случай физического маятника, масса которого сосредоточена в одной точке. Период колебаний математического маятника

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

#### 13.4 Скорость и ускорение при гармонических колебаниях

Из курса механики известно, что скорость изменения физической величины определяется как первая производная этой величины по времени:

$$V = \frac{d\xi}{dt} = -A\omega \sin(\omega t - \varphi_0) = -V_{\max} \sin(\omega t - \varphi_0)$$

где  $V_{\max} = A\omega$  – максимальное (амплитудное) значение скорости.

Ускорение определяется как вторая производная величины по времени:

$$a = \frac{d^2\xi}{dt^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi_0) = -a_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Где  $a_{\max} = A\omega^2$  – максимальное (амплитудное) значение ускорения.

**13.5 Энергия механических колебаний** складывается из кинетической и потенциальной энергии гармонического колебания

$$W_k = \frac{mV^2}{2} = \frac{m}{2} A\omega^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0)$$

$$W_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{k}{2} A^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0)$$

Полная энергия гармонического колебания равна:

$$W = \frac{m}{2} A\omega^2 \sin^2(\omega t + \varphi_0) + \frac{k}{2} A^2 \cos^2(\omega t + \varphi_0) = \frac{kA^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2}$$

так как согласно  $\omega^2 = \frac{k}{m}$ .

$$W = \frac{kA^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2}$$

**13.6 Механические волны.** Механическая волна – это процесс распространения колебаний в упругой среде. Механические волны не переносят частицы среды, но переносят энергию.

##### 13.6.1 Классификация волн

В зависимости от физической природы источника распространяющихся колебаний волны делят на:

– механические (звуковые, ударные, сейсмические и т.д.);

– волны на поверхности жидкости;

В зависимости от взаимной ориентации направления колебаний и направления распространения волн различают: поперечные волны; продольные волны.

*Волна называется поперечной, если направление колебаний частиц среды перпендикулярно направлению распространения волны.*

*Волна называется продольной, если направление колебаний частиц среды происходит вдоль направления распространения волны.*

Поперечные упругие волны могут возникнуть лишь в среде, обладающей сопротивлением сдвигу, поэтому в жидкой и газообразной средах возможно возникновение только продольных волн. В твердой среде возможно возникновение как продольных, так и поперечных волн.

Распространяясь от источника колебаний, волновой процесс охватывает все новые области пространства.

*Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к Моменту времени, называется фронтом волны. Фронт волны представляет собой ту поверхность, которая отделяет часть пространства, уже вовлеченную в волновой процесс, от области, в которой колебания еще не возникли.* В зависимости от геометрии фронта волны бывают плоские или сферические. Плоские волны возникают от плоского или удаленного источника. Их волновые фронты представляют собой плоскости. Сферические волны возникают от точечного источника в пространстве. Их волновые фронты представляют собой сферы.

### 13.6.2 Характеристики волн

Особое значение в теории волн имеет представление о гармонической волне, т.е. бесконечной синусоидальной волне, в которой все изменения состояния происходят по закону синуса или косинуса. Такие волны могли бы распространяться в однородной среде без искажения формы. Основными характеристиками волны являются:

*Длина волны ( $\lambda$ ) – расстояние между ближайшими точками, колеблющимися в одинаковой фазе.*

*Период колебаний ( $T$ ) – время, в течение которого совершается один полный цикл колебаний.*

*Амплитуда ( $A$ ) – максимальное отклонение физической величины от положения равновесия.*

Длина волны и период связаны соотношением:

$$\lambda = VT$$

где  $V$  – скорость волны. Данная формула справедлива для волн любой природы. Используя соотношение, можно дать другое определение длины волны. *Длина волны – то расстояние, на которое распространяется фронт волны за время, равное периоду колебаний.*

Вместо периода  $T$  часто пользуются частотой  $\nu$ , которая равна числу колебаний за единицу времени  $\nu = \frac{1}{T}$ . При этом

$$\lambda \nu = V, \lambda = \frac{V}{\nu}$$

### 13.6.3 Плоская монохроматическая волна

Гармоническая волна называется монохроматической, если ее частота  $\nu$  и амплитуда  $A$  с течением времени не меняются. Если фронт волны представляет собой плоскость, то волна называется плоской.

#### 13.6.3.1 Уравнение плоской монохроматической волны

Уравнением волны называется выражение, которое определяет, как смещение  $z$  колеблющейся частицы зависит от координаты  $x$  и времени  $t$ :  $z=z(x,t)$ . Ось  $x$  совместим с направлением распространения волны. Волновые поверхности будут перпендикулярны оси  $x$ . Колебания точек, лежащих в плоскости  $x=0$ , имеют вид:

$$z=z(x,t)=A\cos\omega t.$$

Чтобы пройти путь от плоскости  $x=0$  до плоскости с произвольным значением  $x$ , нужно время

$$\tau = \frac{x}{V}$$

где  $V$  – скорость волны. Это значит, что колебания частиц, лежащих в плоскости  $x$ , будут отставать по времени на  $\tau$ . Их уравнение имеет вид:

$$z(x,t)=A\cos(\omega(t - x/V))$$

Уравнению можно придать другой вид. Для этого введем величину

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

которую называют волновым числом. С учетом волнового числа, и того, что  $V = \lambda \nu$ , получим:

$$z(x,t) = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi \nu x}{\lambda \nu}\right)$$

$$\text{или } \xi(x,t) = A \cos(\omega t - kx)$$

Уравнение (9.3) называют уравнением плоской бегущей волны.

13.6.3.2 Скорость распространения гармонической волны – это скорость перемещения фазовой плоскости, поэтому ее называют *фазовой скоростью*. Волны распространяются с конечной скоростью, которая зависит от свойств среды и природы волны. Скорость распространения продольной волны (звука) в газах:

$$V = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты газа,  $M$  – молярная масса газа,  $R$  – молярная газовая постоянная,  $T$  – термодинамическая температура.

13.7 Интерференция. Когерентность Интерференция волн – это явление наложения когерентных волн, в результате которого происходит перераспределение энергии светового поля, т.е. образуются светлые участки (максимумы) и темные участки (минимумы) интерференционной картины.

*Когерентные волны* – волны, колеблющиеся в одной плоскости, имеющие одинаковую частоту и приходящие в данную точку пространства с не изменяющейся со временем разностью фаз.

### 13.7.1 Условия максимума и минимума интерференции

Рассмотрим наложение двух плоских волн, возбужденных когерентными источниками  $S_1$  и  $S_2$ , в точке М. Эти волны описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} Z_1(x_1, t) &= A_1 \cos(\omega t - kx_1) \\ Z_2(x_2, t) &= A_2 \cos(\omega t - kx_2) \end{aligned}$$

Пусть амплитуды колебаний одинаковы, а волна 1 проходит до встречи с волной 2 меньший путь. Тогда фазы первой и волн:

$$\varphi_1 = \omega t - kx_1, \varphi_2 = \omega t - kx_2 = \varphi_1 - k\Delta x.$$

Величину  $x_2 - x_1 = \Delta x$  называют *геометрической разностью хода*. Математически наложение волн это сложение колебаний в точке М. При сложении волн, используя формулы тригонометрии получаем:

$$\begin{aligned} Z_1 + Z_2 &= A \cos \varphi_1 + A \cos(\varphi_1 - k\Delta x) = 2A \cos \frac{k\Delta x}{2} \cos(\varphi_1 - k\Delta x / 2) \\ Z(x, t) &= 2A \cos \frac{k\Delta x}{2} \cos(\omega t - k(x_1 + \Delta x / 2)) \end{aligned}$$

Из последнего выражения следует, что амплитуда результирующего колебания зависит от разности хода волн:

$$A = 2A \cos \frac{k\Delta x}{2}$$

Установим, каковы условия наблюдения максимумов минимумов.

1. Интенсивность максимальна, если

$$\begin{aligned} \cos \frac{k\Delta x}{2} &= \pm 1, \text{ или} \\ \frac{k\Delta x}{2} &= m\pi \end{aligned}$$

где  $m=0, 1, 2, \dots$ , т.е. целое число. Число  $m$  называется порядком максимума.

Учитывая, что  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  получаем:

$$\Delta x = 2m \frac{\lambda}{2}$$

Таким образом *максимум интерференции волн будет наблюдаться тогда на разности хода волн уложится четное число полуволн.*

2. Нетрудно показать, что *минимум интерференции волн наблюдается, если на разности хода волн укладывается нечетное число полуволн, или выполняется соотношение:*

$$\Delta x = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

13.8 *Эффект Доплера* – изменение частоты и длины волн, регистрируемых приёмником, вызванное движением их источника и/или движением приёмника.

Если источник волн движется относительно среды, то расстояние между гребнями волн (длина волны) зависит от скорости и направления движения. Если

источник движется по направлению к приёмнику, то есть догоняет испускаемую им волну, то длина волны уменьшается, если удаляется – длина волны увеличивается.

$$\lambda_n = \lambda_u \frac{c - v_n}{c - v_u}, f_n = f_u \frac{c - v_n}{c - v_u}$$

Здесь:  $c$  – скорость волны;  $n$  – приемник;  $u$  – источник;  $\lambda$  – длина волны;  $f$  – частота;  $v$  – скорость.

### 13.9 Словарь

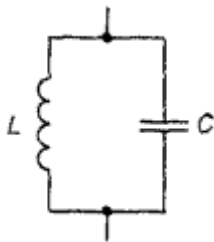
1. Гармонические колебания – Harmonic oscillations متناسق التذبذبات
2. Волны – Waves امواج
3. Амплитуда – amplitude سعة
4. Циклическая частота – Cyclic frequency تردد الدوري
5. Частота – frequency تردد
6. Период колебаний – The period of oscillation-فترة التذبذب
7. Пружинный маятник – Spring pendulum
8. Математический маятник – Pendulum-رصاص الساعة
9. Волновое число – Wavenumber-موجة رقمية
10. Длина волны – Wavelength طول الموجة
11. Интерференция – interference-تدخل
12. Эффект Доплера – Doppler effect-تأثير دوبلر

## Лекция №14

### Электромагнитные колебания и волны. Переменный электрический ток.

#### 14.1 Колебательный контур

Колебательный контур – цепь, состоящая из катушки индуктивностью  $L$  и конденсатора емкостью  $C$ . Колебания в контуре можно вызвать, сообщив обкладкам конденсатора некоторый начальный заряд. Обкладки конденсатора зарядятся, между ними возникнет электрическое поле, энергия которого



$$W_e = \frac{q^2}{2C}$$

Если затем отключить источник напряжения и замкнуть конденсатор на индуктивность, то конденсатор начнет разряжаться и в контуре потечет ток, В результате этого энергия электрического поля будет уменьшаться, но возникнет магнитное поле с энергией

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

которая возрастает. Так как активное сопротивление отсутствует, то полная энергия не расходуется на нагревание проводов и остается величиной постоянной

$$W_3 + W_m = \text{const}$$

$$\text{или } \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$$

Продифференцируем соотношение по времени, произведем сокращения и, разделив каждый член уравнения на  $L$ , получим:

$$I \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} q \frac{dq}{dt} = 0$$

Так как по определению  $I = \frac{dq}{dt}$ , то соответственно:  $\frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}$

На основании этого можно записать:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC} q = 0$$

Введем обозначение

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

и приведем уравнение к виду:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \omega^2 q = 0$$

Решением этого уравнения является функция

$$q(t) = q_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

где  $q_{\max}$ , – максимальное (амплитудное) значение заряда. Для периода колебаний колебательного контура получается формула Томпсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Напряжение на конденсаторе отличается от заряда множителем  $1/C$

$$U(t) = U_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

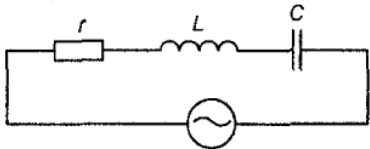
где  $U_{\max} = \frac{q_{\max}}{C}$  – амплитудное значение напряжения.

Продифференцировав функцию по времени, получим выражение для силы тока:

$$I(t) = -U_{\max} \omega \sin(\omega t + \varphi_0) = I_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2})$$

где  $I_{\max} = U_{\max} \omega$  – амплитудное значение силы тока. Таким образом, сила тока опережает по фазе напряжение на конденсаторе на  $\pi/2$ .

14.2 *Переменный электрический ток. Рассмотрим цепь, состоящую из последовательно включенных активного сопротивления, катушки индуктивности и конденсатора.* При воздействии на такую цепь переменного (в простейшем случае гармонического) напряжения, через катушку и конденсатор будет протекать переменный ток, величина (амплитуда) которого может быть вычислена согласно закону Ома:



где  $I = \frac{U}{Z}$ .

Где:  $Z$  – полное сопротивление цепи переменному току (импеданс);

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2};$$

$X_L$  и  $X_C$  индуктивное и емкостное сопротивление и равны соответственно;

$$X_L = L\omega; X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Видно, что на некоторой частоте

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

реактивные сопротивления катушки и конденсатора равны по модулю, общее сопротивление цепи принимает минимальное значение. На этой частоте в цепи наблюдается максимум тока, который ограничен только активным сопротивлением цепи. Резкое возрастание амплитуды тока при приближении частоты к  $\omega_p$  называют резонансом, а  $\omega_p$  называют резонансной частотой или собственной частотой.

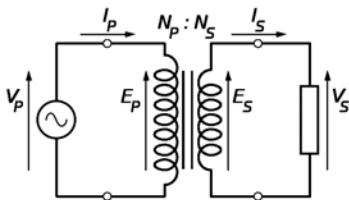
14.3 *Мощность цепи переменного тока.* При протекании переменного тока мощность электрического тока постоянно изменяется. Это связано с тем, что переменный ток создает переменное магнитное поле в индуктивности, изменяется электрическое поле конденсатора и изменяется падение напряжения и ток активного сопротивления. В отдельные моменты времени потребляемая электрическая мощность может возрастать, в другие уменьшаться. При определенных значениях индуктивности и емкости цепи в отдельные моменты времени электрическая цепь может даже отдавать электрическую мощность во внешнюю цепь. Явлениями переменного электрического тока занимается целая отрасль науки – электротехника. Мы же отметим лишь малую часть ее достижений. Принято различать три вида электрической мощности:

1. *Полная мощность* –  $S = UI$ , эта величина измеряется в ВА (вольтампер);

2. *Активная мощность*  $P = S \cos \varphi$ , измеряется в Вт (ватт),  $\cos \varphi$  называют коэффициентом мощности. Он равен:  $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ ;

3. *Реактивная мощность* –  $Q = S \sin \varphi$ , измеряется в ВАр (вольтампер реактивный).

14.4 *Трансформатор.* Трансформатор – электрический прибор



осуществляющий преобразование напряжения переменного тока. Конструктивно трансформатор может состоять из нескольких изолированных проволочных обмоток (катушек), охватываемых общим магнитным потоком, намотанных, как правило, на сердечник из ферромагнитного магнито-мягкого материала.

Рассмотрим самый простой случай, трансформатор состоящий из двух обмоток: первичной и вторичной. Из закона электромагнитной индукции следует, что отношение ЭДС в первичной обмотке  $E_p$  к ЭДС во вторичной  $E_s$  равно отношению соответствующего числа витков обмоток:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}.$$

В случае малых потерь энергии в обмотках и сердечнике трансформатора (идеальный трансформатор) ЭДС практически совпадает с напряжениями на обмотках и выполняется условие обратного отношения токов в обмотках:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}.$$

#### 14.5 Словарь.

1. Трансформатор – transformer-محول
2. Первичная обмотка – The primary winding-اللف الاساسي
3. Вторичная обмотка – The secondary winding-اللف الثانوي
4. Активное сопротивление – Active resistance-مقاومة فعالة
5. Индуктивное сопротивление – Inductive reactance-مقاومة غير فعالة
6. Емкостное сопротивление – Capacitance-سعة المقاومة
7. Полная мощность – Full power-
8. Активная мощность – Active power
9. Реактивная мощность – Reactive power
10. Коэффициент мощности – Power factor-قوة العمل
11. Резонанс – resonanceصدى
12. Колебательный контур – oscillatory circuitتذبذب الدوائر

#### Лекция №15

##### *Геометрическая оптика.*

*Оптика – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом. Учение о свете принято делить на три части:*

1. *Геометрическая или лучевая оптика, в основе которой лежит представление о световых лучах;*
2. *Волновая оптика, изучающая явления, в которых проявляются волновые свойства света;*
3. *Квантовая оптика, изучающая взаимодействие света с веществом, при котором проявляются корпускулярные свойства света.*

##### 15.1 Основные законы геометрической оптики.

15.1.1 *Закон прямолинейного распространения света: в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно. Опытным доказательством этого закона могут служить резкие тени, отбрасываемые непрозрачными телами при освещении светом источника достаточно малых размеров («точечный источник»). Другим доказательством может служить известный опыт по прохождению света далекого источника сквозь небольшое отверстие, в результате чего образуется узкий световой пучок. Этот опыт приводит к представлению о световом луче как о геометрической линии, вдоль которой распространяется свет.*



На границе раздела двух прозрачных сред свет может частично отразиться так, что часть световой энергии будет распространяться после отражения по новому направлению, а часть пройдет через границу и продолжит распространяться во второй среде.

15.1.2 *Закон отражения света: падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения  $\gamma$  равен углу падения  $\alpha$ .*

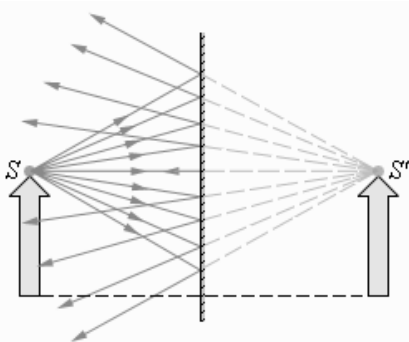
15.1.3 *Закон преломления света: падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\beta$  есть величина, постоянная для двух данных сред:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n.$$

Постоянную величину  $n$  называют относительным показателем преломления второй среды относительно первой. Показатель преломления среды относительно вакуума называют абсолютным показателем преломления. Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления.

## 15.2 Зеркала

15.2.1 *Плоское зеркало.* Простейшим оптическим устройством, способным



создавать изображение предмета, является плоское зеркало. Изображение предмета, даваемое плоским зеркалом, формируется за счет лучей, отраженных от зеркальной поверхности. Это изображение является мнимым, так как оно образуется пересечением не самих отраженных лучей, а их продолжений в «зазеркалье». Ход лучей при отражении от плоского зеркала. Точка  $S'$  является мнимым изображением точки  $S$ . Вследствие закона отражения света мнимое

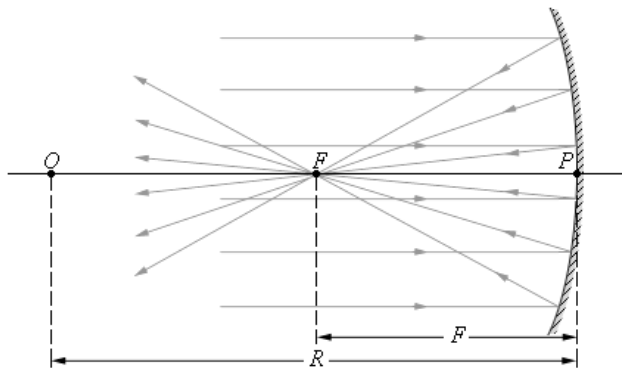
изображение предмета располагается симметрично относительно зеркальной поверхности. Размер изображения равен размеру самого предмета.

15.2.2 *Сферическим зеркалом называют зеркально отражающую поверхность, имеющую форму сферического сегмента. Центр сферы, из которой вырезан сегмент, называют оптическим центром зеркала. Вершину сферического сегмента называют полюсом. Прямая, проходящая через оптический центр и полюс зеркала, называется главной оптической осью сферического зеркала. Главная оптическая ось выделена из всех других прямых, проходящих через оптический центр, только тем, что она является осью симметрии зеркала.*

*Сферические зеркала бывают вогнутыми и выпуклыми.*

Если на вогнутое сферическое зеркало падает пучок лучей, параллельный главной оптической оси, то после отражения от зеркала лучи пересекутся в точке, которая называется главным фокусом  $F$  зеркала. Расстояние от фокуса до полюса зеркала называют фокусным расстоянием и обозначают той же буквой  $F$ . У

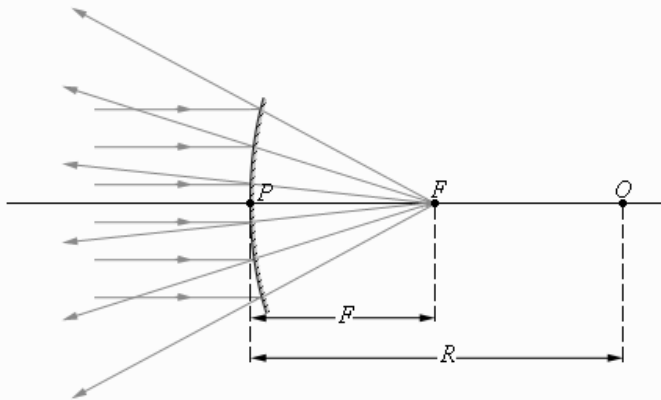
вогнутого сферического зеркала главный фокус действительный. Он расположен посередине между центром и полюсом зеркала.



Отражение параллельного пучка лучей от вогнутого сферического зеркала. Точки  $O$  – оптический центр,  $P$  – полюс,  $F$  – главный фокус зеркала;  $OP$  – главная оптическая ось,  $R$  – радиус кривизны зеркала. Следует иметь в виду, что отраженные лучи пересекаются приблизительно в одной

точке только в том случае, если падающий параллельный пучок был достаточно узким (так называемый параксиальный пучок).

Главный фокус выпуклого зеркала является мнимым. Если на выпуклое зеркало падает пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после отражения в фокусе пересекутся не сами лучи, а их продолжения.



Отражение

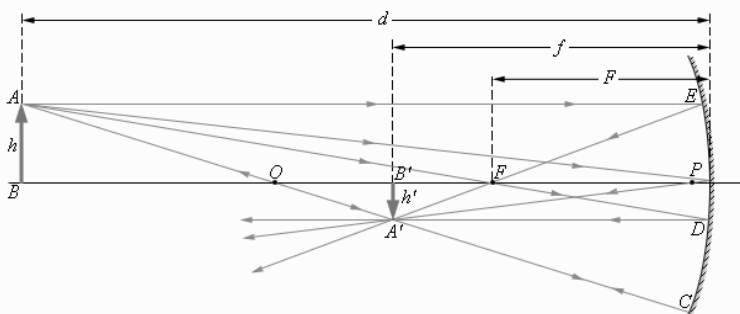
параллельного пучка лучей от выпуклого зеркала.  $F$  – мнимый фокус зеркала,  $O$  – оптический центр;  $OP$  – главная оптическая ось

Фокусным расстоянием сферических

зеркал приписывается определенный

знак: для вогнутого зеркала для выпуклого где  $R$  – радиус кривизны зеркала.

Изображение какой-либо точки  $A$  предмета в сферическом зеркале можно



построить с помощью любой пары стандартных лучей: луч  $AOC$ , проходящий через оптический центр зеркала; отраженный луч  $COA$  идет по той же прямой; луч  $AFD$ , идущий через фокус зеркала; отраженный луч идет параллельно главной оптической

оси; луч  $AP$ , падающий на зеркало в его полюсе; отраженный луч симметричен с падающим относительно главной оптической оси. луч  $AE$ , параллельный главной оптической оси; отраженный луч  $EFA$  проходит через фокус зеркала. На рисунке перечисленные выше стандартные лучи изображены для случая вогнутого зеркала. Все эти лучи проходят через точку  $A'$ , которая является изображением точки  $A$ . Все остальные отраженные лучи также проходят через точку  $A'$ . Ход лучей, при котором все лучи, вышедшие из одной точки, собираются в другой точке, называется стигматическим. Отрезок  $A'B'$  является изображением предмета  $AB$ . Аналогичны построения для случая выпуклого зеркала. *Линейное увеличение*

сферического зеркала  $\Gamma$  определяется как отношение линейных размеров изображения  $h'$  и предмета  $h$ . Величине  $h'$  удобно приписывать определенный знак в зависимости от того, является изображение прямым ( $h' > 0$ ) или перевернутым ( $h' < 0$ ). Величина  $h$  всегда считается положительной.

$$\Gamma = \frac{h'}{h}$$

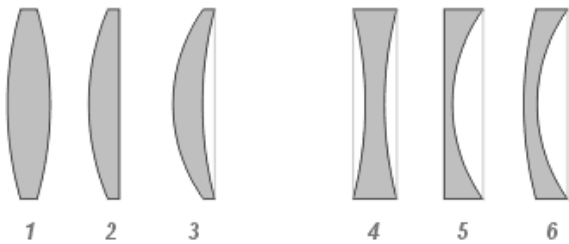
Фокусным расстояниям сферических зеркал приписывают определенные знаки: для вогнутого зеркала  $F > 0$ , для выпуклого  $F < 0$ . В обоих случаях фокусное расстояние сферического зеркала равно по модулю половине радиуса кривизны зеркала:

$$|F| = R / 2.$$

Величина, обратная фокусному расстоянию, называется оптической силой зеркала. Оптическая сила сферических зеркал измеряется в диоптриях.

$$D = \frac{1}{F}$$

15.3 Линза – деталь из оптически прозрачного однородного материала, ограниченная двумя полированными преломляющими поверхностями вращения, например, сферическими или плоской и сферической. В качестве материала линз обычно используются оптические материалы, такие как стекло, оптическое стекло, оптически прозрачные пластмассы и другие материалы.

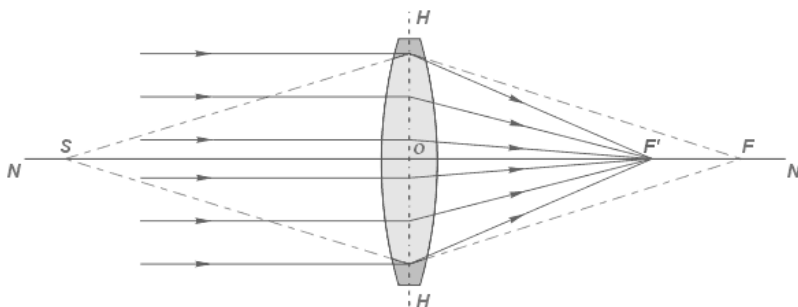


В зависимости от форм различают собирающие (положительные) и рассеивающие (отрицательные) линзы. К группе собирающих линз обычно относят линзы, у которых середина толще их краёв, а к группе рассеивающих – линзы, края которых

толще середины. Следует отметить, что это верно только если показатель преломления у материала линзы больше, чем у окружающей среды. Если показатель преломления линзы меньше, ситуация будет обратной. Например, пузырёк воздуха в воде – двояковыпуклая рассеивающая линза.

Линзы характеризуются, как правило, своей оптической силой (измеряется в диоптриях), или фокусным расстоянием.

15.3.1 Собирающая линза. Отличительным свойством собирающей линзы является способность собирать падающие на её поверхность лучи в одной точке,

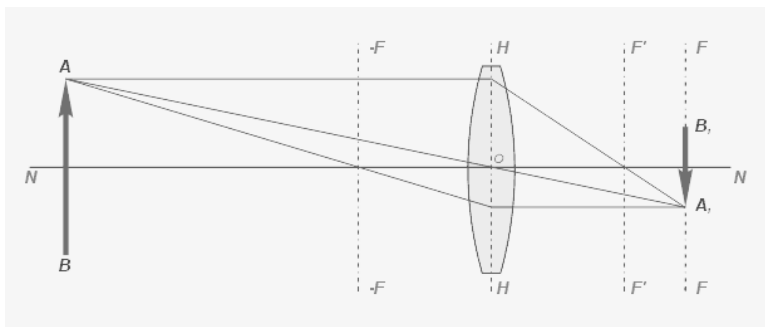


расположенной по другую сторону линзы.

Если на некотором расстоянии перед собирающей линзой поместить светящуюся точку  $S$ , то луч света, направленный по оси, пройдет через линзу не преломившись, а лучи,

проходящие не через центр, будут преломляться в сторону оптической оси и пересекутся на ней в некоторой точке  $F$ , которая и будет изображением точки  $S$ . Эта точка носит название сопряжённого фокуса, или просто фокуса. Если на линзу будет падать свет от очень удалённого источника, лучи которого можно представить идущими параллельным пучком, то по выходе из неё лучи преломятся под бóльшим углом и точка  $F$  переместится на оптической оси ближе к линзе. При данных условиях точка пересечения лучей, вышедших из линзы, называется фокусом  $F'$ , а расстояние от центра линзы до фокуса — фокусным расстоянием.

Рассмотрим построение хода луча произвольного направления в тонкой собирающей линзе. Для этого воспользуемся двумя свойствами тонкой линзы: Луч, прошедший через оптический центр линзы, не меняет своего направления; Параллельные лучи, проходящие через линзу, сходятся в фокальной плоскости

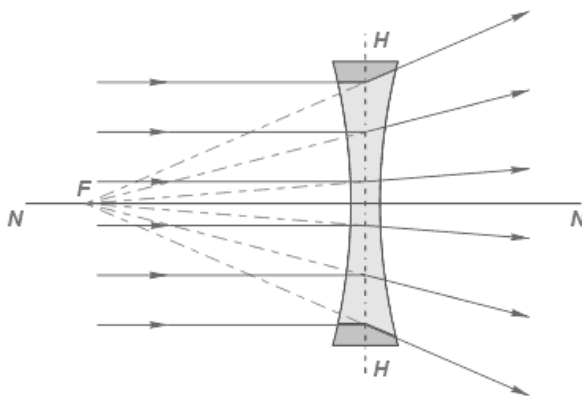


Построение линзой изображения предметов, имеющих определённую форму и размеры, получается следующим образом: допустим, линия  $AB$  представляет собой объект, находящийся на некотором расстоянии от линзы, значительно превышающем её

фокусное расстояние. От каждой точки предмета через линзу пройдёт бесчисленное количество лучей, из которых, для наглядности, на рисунке схематически изображён ход только трёх лучей.

Три луча, исходящие из точки  $A$ , пройдут через линзу и пересекутся в соответствующих точках схода на  $A_1B_1$ , образуя изображение. Полученное изображение является действительным и перевёрнутым.

15.3.2 *Рассеивающая линза.* Лучи, падающие на рассеивающую линзу, по выходе из неё будут преломляться в сторону краёв линзы, то есть рассеиваться.



Если эти лучи продолжить в обратном направлении так, как показано на рисунке пунктирной линией, то они сойдутся в одной точке  $F$ , которая и будет фокусом этой линзы. Этот фокус будет мнимым. Сказанное о фокусе на оптической оси в равной степени относится и к тем случаям, когда изображение точки находится на наклонной линии, проходящей

через центр линзы под углом к оптической оси. Плоскость, перпендикулярная оптической оси, расположенная в фокусе линзы, называется фокальной плоскостью.

15.3.3 *Формула тонкой линзы.* Если расстояние между сферическими поверхностями линзы вдоль оптической оси, также известное как толщина линзы, пренебрежительно мало, относительно её фокусного расстояния, то такая линза называется тонкой, и её фокусное расстояние можно найти по следующей формуле:

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

,где  $n$  – коэффициент преломления материала линзы,  $R_1, R_2$  – радиусы кривизны поверхностей линзы. Знаки при радиусах считаются положительными, если центр сферической поверхности лежит справа от линзы и отрицательными, если слева.

Например, для двояковыпуклой линзы оба слагаемых положительны. Величина фокусного расстояния положительна для собирающих линз. Для рассеивающей линзы слагаемые отрицательны и отрицательна величина фокусного расстояния. Величина  $D$  называется оптической силой линзы. Оптическая сила линзы измеряется в диоптриях. Линзы симметричны, то есть они имеют одинаковое фокусное расстояние независимо от направления света – слева или справа.

15.3.4 *Линейным увеличением называется отношение размеров изображения к соответствующим размерам предмета.*

$$\Gamma = \frac{h'}{h}$$

Это отношение может быть также выражено дробью:

$$\Gamma = \frac{U}{V}$$

,где  $U$  – расстояние от линзы до изображения;  $V$  – расстояние от линзы до предмета.

15.3.5 *Комбинация нескольких линз.* Линзы могут комбинироваться друг с другом для построения сложных оптических систем. Оптическая сила системы из двух линз может быть найдена как простая сумма оптических сил каждой линзы (при условии, что обе линзы можно считать тонкими и они расположены вплотную друг к другу на одной оси):

$$D = D_1 + D_2 .$$

#### 15.4 Словарь

1. Линза – lens-عدسة
2. Собирающая линза – Collection lens-العدسة المجمعّة
3. Рассеивающая линза – Diffuser-عدسة التناثر
4. Зеркало – Mirror-مرآة
5. Плоское зеркало – Flat mirror-مرآة مسطحة
6. Вогнутое зеркало – Concave mirror-مرآة مقعرة
7. Выпуклое зеркало – A convex mirror-مرآة محدبة
8. Оптическая сила – Optical force-قوة البصر
9. Диоптрия – diopter-الديوبتر وحدة قياس قوة العدسة
10. Увеличение – increase-تكبير

## Лекция № 16

*Волновая и квантовая оптика*

16.1 *Интерференция света – это явление наложения когерентных волн, в результате которого происходит перераспределение энергии света, т.е. образуются светлые участки (максимумы) и темные участки (минимумы) интерференционной картины.*

*Когерентные волны – волны, колеблющиеся в одной плоскости, имеющие одинаковую частоту и приходящие в данную точку пространства с не изменяющейся со временем разностью фаз.*

Свет от обычных источников является некогерентным. Причины этого заключены в следующем. При спонтанном излучении атомы излучают независимо друг от друга со случайными начальными фазами, беспорядочно изменяющимися от одного акта излучения к другому. При наложении некогерентных волн результирующая интенсивность световой волны равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в отдельности.

Для получения когерентных световых волн применяют метод деления света от одного источника на две или несколько волн. В каждой из них представлено излучение одних и тех же атомов, так что эти волны когерентны между собой. Деление света можно осуществить путем его отражения или преломления.

16.1.2 *Условия максимума и минимума интерференции*

При наложении когерентных волн возникают максимумы и минимумы интенсивности. Максимум или минимум зависит от *разности хода и длины волны*:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

где  $m=0,1,2,\dots$ , т.е. целое число. Первое соотношение определяет условие максимума интерференции. *Максимум интерференции наблюдается, если оптическая разность хода двух волн  $\Delta$  равна четному числу полуволн.* Второе соотношение определяет условие минимума интерференции. *Минимум интерференции наблюдается, если оптическая разность хода двух волн равна нечетному числу длин волн.*

16.1.3 *Интерференция в тонких пленках.* Интерференцию света можно наблюдать не только в лаборатории с помощью специальных оптических устройств, но и в естественных условиях. Примером может быть радужная окраска тонких пленок (мыльных пузырей, пленок нефти или масла на поверхности воды, прозрачных пленок оксидов на поверхностях закаленных металлических деталей и т.д.). Образование частично когерентных волн при этом происходит из-за отражения падающего на пленку света от верхней и нижней поверхностей пленки.

Рассмотрим плоскопараллельную прозрачную пленку толщиной  $d$ , на которую падает плоская монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda$ . Предположим, что по обе стороны от пленки находится одна и та же среда, например, воздух. Волну можно рассматривать как параллельный лучок лучей. Пленка отбрасывает вверх два параллельных пучка: один образовался за счет отражения от верхней грани, второй – за счет отражения от нижней грани. Лучи приобретают разность хода до того, как они сойдутся. Проведение математических преобразований с использованием законов отражения и преломления света дает следующее выражение:

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}$$

Из формулы следует, что при постоянных  $d$ ,  $n$ ,  $\alpha$  значение  $\Delta$  для всей пленки будет одним и тем же и интенсивность отраженного от нее света одинакова для любой точки поверхности. Интерференционных полос нет. Для возникновения интерференционных полос в отраженном свете необходимо, чтобы толщина пленки  $d$  либо угол падения  $\alpha$  для разных точек поверхности изменялись.

16.2 *Дифракция – это совокупность явлений, которые обусловлены волновой природой света и наблюдаются при его распространении в среде с резко выраженными неоднородностями. В узком смысле дифракция – это способность световой волны огибать препятствия, размеры которых соизмеримы с длиной волны.*

16.2.1 *Дифракционная решетка – это система из большого числа  $N$  одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей, лежащих в одной плоскости и разделенных непрозрачными промежутками, равными по ширине. Такая решетка называется одномерной.* Дифракционные решетки изготавливают из стеклянных пластинок, на которую с помощью делительной машины через строго одинаковые интервалы наносят параллельные штрихи. Промежутки между штрихами прозрачны для световых лучей и играют роль щелей. Штрихи рассеивают лучи и, поэтому, являются непрозрачными. Основным параметром решетки является *расстояние между соседними штрихами, которое называют периодом решетки  $d$  (постоянной решетки):*

$$d = a + b$$

где  $a$  – ширина щели,  $b$  – размер препятствия. На 1 мм может быть нанесено  $10^2$ – $10^3$  штрихов, а период решетки может иметь значение (1–10) мкм.

Рассмотрим дифракцию параллельных лучей. Чтобы получить пучок параллельных лучей обычно используют небольшой источник света. Его помещают в фокусе собирающей линзы. Лучи после линзы идут параллельно друг другу.

Пусть световая волна падает на решетку нормально (т.е. перпендикулярно ее поверхности). Из каждой щели выходят лучи по всем направлениям. Выберем из множества лучей те, которые отклонились на угол  $\varphi$  от первоначального направления. Угол  $\varphi$  называется *углом дифракции*. Для того, чтобы наблюдался максимум, должно выполняться условие:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$$

где  $\Delta$  – разность хода лучей,  $\lambda$  – длина волны,  $m=1,2,3 \dots$  – порядок максимума. Разность хода лучей:

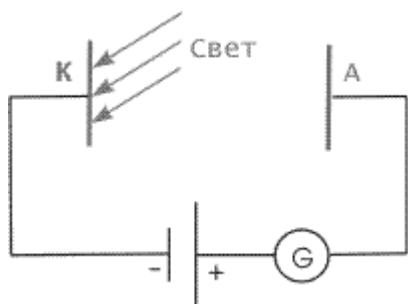
$$\Delta = d \sin \varphi$$

Приравняв выражения, получим условие главных максимумов для дифракционной решетки:

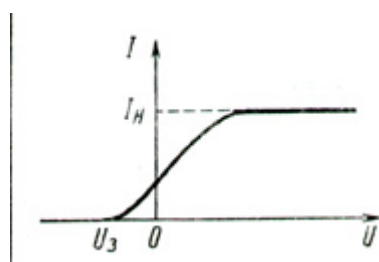
$$d \sin \varphi = m\lambda$$

Дифракционная картина будет иметь вид узких светлых полос, разделенных темными промежутками. Центральный максимум ( $m=0$ ) имеет наибольшую интенсивность. Все другие располагаются симметрично относительно центрального максимума справа и слева. По мере удаления от центра их интенсивность уменьшается.

16.3 Внешним фотоэффектом называется явление вырывания электронов с поверхности вещества под действием света. Электроны, вылетающие из вещества, называются *фотоэлектронами*, а электрический ток, образуемый ими при движении во внешнем электрическом поле, называется *фототоком*. Открыто явление Г. Герцем в 1887 году, основные закономерности установлены в 1888-1889 гг. А. Н. Столетовым.



Исследование закономерностей фотоэффекта можно провести с помощью установки, изображенной на рисунке. Свет, проникающий через кварцевое окошко, освещает катод К, изготовленный из исследуемого материала. Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, перемещаются под действием электрического поля к аноду А. В результате в цепи прибора течет фототок, измеряемый гальванометром G. Напряжение между анодом и катодом можно изменять. Полученная зависимость фототока  $I$  от напряжения между электродами  $G$  (вольтамперная характеристика) представлена на рисунке. Характеристика снималась при неизменном световом потоке  $\Phi$ .



16.3.1 На основании экспериментов были установлены следующие законы фотоэффекта.

1. Фототок насыщения пропорционален световому потоку при неизменном спектральном составе света, падающего на анод.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов прямо пропорциональна частоте падающего света и не зависит от его интенсивности.
3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота света  $\nu_0$  (максимальная длина волны  $\lambda_0$ ), при которой еще возможен фотоэффект.
4. При  $\nu < \nu_0$  (или при  $\lambda > \lambda_0$ ) фотоэффекта нет. Частота  $\nu_0$ , зависит от материала фотокатода и состояния его поверхности.
5. Фотоэффект без инерционен, т.е. испускание электронов начинается сразу же, после попадания света частотой  $\nu > \nu_0$  на фотокатод.



16.3.2 Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. С точки зрения волновых представлений о свете фотоэффект объяснить не удалось. А. Эйнштейн высказал гипотезу о том, что свет не только излучается, но также распространяется в пространстве и поглощается веществом в виде отдельных квантов электромагнитного излучения – фотонов. Все фотоны монохроматического света частоты  $\nu$  имеют одинаковую энергию

$$\varepsilon = h\nu$$

где  $h$  – постоянная Планка. В случае поглощения света веществом каждый поглощенный фотон передает всю свою энергию электрону. Часть этой энергии электрон затрачивает на совершение работы выхода  $A_{\text{вых}}$  из вещества. Остаток энергии образует кинетическую энергию электрона, покинувшего вещество. В этом случае по закону сохранения энергии должно выполняться соотношение,

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV_{\text{max}}^2}{2}$$

которое называется уравнением Эйнштейна для фотоэффекта. Из уравнения Эйнштейна непосредственно вытекает второй закон фотоэффекта:

$$h\nu - A_{\text{вых}} = \frac{mV_{\text{max}}^2}{2}$$

Максимальная кинетическая энергия линейно зависит от частоты, так как работа выхода для данного вещества величина постоянная. При  $\nu = \nu_0$  энергия обращается в нуль. При этом

$$h\nu_0 = A_{\text{вых}}$$

т.е. красная граница фотоэффекта будет определяться веществом.

Работа электрического поля по задержанию электронов равна максимальной кинетической энергии электронов:

$$eU_s = \frac{mV_{\text{max}}^2}{2}$$

$m$  – масса электрона;  $e$  – заряд электрона. Сделав замену в уравнении, можно получить еще одну форму записи уравнения Эйнштейна:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + eU_s$$

16.4 Фотон. Свойства фотона. Фотон – это элементарная частица, не имеющая массы покоя и движущаяся со скоростью света. Фотон движется со скоростью света, т.е.  $V=c$ . Масса покоя фотона  $m_0 = 0$ . Это означает, что фотон существует только в движении. Массу фотона найдем из формулы взаимосвязи массы и энергии. По формуле Эйнштейна  $\varepsilon = mc^2$ . С другой стороны энергия фотона  $\varepsilon = h\nu$ . Приравняв эти соотношения, найдем массу фотона

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

Импульс фотона

$$p = mc = \frac{h\nu}{c}$$

Используя соотношение, связывающее скорость, длину волны и частоту  $c = \lambda\nu$ , импульс фотона можно выразить формулой

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

где  $\lambda$ - длина волны в вакууме.

### 16.5 Словарь

1. Фотон – Photon-فوتون
2. Работа выхода – Work out-النتيجة او عمل الاخراج
3. Масса покоя – The rest mass-بقية الوزن او الشامل
4. Фотоэффект – The photoelectric effect-التأثير الكهروضوئي
5. Дифракция – Diffraction-الحيود
6. Дифракционная решетка – Diffraction grating-حزيز الانعراج
7. Угол дифракции – The angle of diffraction-زاوية الحيود
8. Интерференция – Interference-تدخل

## Лекция №17

### Атомная физика

17.1 *Противоречия классической физики.* Открытие строения атомов в конце 19 столетия поставило перед физиками немало вопросов, которые не удавалось разрешить в рамках классической физики. Согласно теории Максвелла заряд, движущийся ускоренно, должен испускать электромагнитные волны. Электромагнитные волны «уносят с собой энергию». Электроны в атомах движутся по криволинейным траекториям, а следовательно, ускоренно и должны терять энергию. Таким образом, с позиции классической физики электрон при движении вокруг ядра потеряет энергию и упадет на ядро. Время жизни любого атома (с позиции классической физики) ограничено. Очевидно это серьезное противоречие, которое предстояло разрешить.

Первым, кто совершил попытку разрешить глобальное противоречие, был Бор. Ему удалось создать модель самого простого атома – атома водорода. Он сформулировал постулаты, на которых построил свою модель.

### 17.2 Постулаты Бора

17.2.1 *Первый постулат Бора* – движение электрона вокруг ядра возможно только по определенным орбитам, радиусы которых удовлетворяют условию:

$$mv_i r_i = i \frac{h}{2\pi}$$

Где  $m$  – масса электрона,  $i$  – номер орбиты электрона  $v_i$  – скорость электрона,  $r_i$  – радиус орбиты,  $h$  – постоянная Планка. Обычно в квантовой физике отношение  $\frac{h}{2\pi} = \hbar$  ( $\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с) – считают постоянной Планка.

17.2.2 *Второй постулат Бора* – каждой разрешенной электронной орбите соответствует определенный энергетический уровень. Переход с более

отдаленной от ядра орбиты на более близкую орбиту происходит скачкообразно и осуществляется испускание кванта излучения.

$$h\nu = W_k - W_i$$

Где  $W_k, W_i$  – энергии электрона в соответствующих состояниях,  $k, i$  – номера орбит электрона ( $k > i$ ).

17.3 *Атом водорода.* Стационарная электронная орбита представляет собой устойчивое состояние и определяется тем, что центростремительная сила равна силе электростатического взаимодействия электрона и ядра.

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Используя первый постулат Бора получаем скорость электрона на  $i$  орбите в атоме:

$$v_i = \frac{1}{i} \frac{e^2}{2\epsilon_0 h}$$

*Вывод* – скорость электрона на разных орбитах обратно пропорциональна номеру орбиты.

Полученная скорость и условие квантования (первый постулат) позволяют получить соотношение для радиусов орбит атома:

$$r_i = i^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}$$

*Вывод:* радиус допустимой орбиты пропорционален квадрату номера орбиты.

Энергетические уровни атома водорода по Бору получаются при учете постулатов и кулоновского взаимодействия ядра и электрона. Полная энергия электрона складывается из потенциальной и кинетической:

$$W_{\text{П}} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \text{ и } W_{\text{К}} = \frac{mv^2}{2}$$

Учитывая соотношения для скорости и радиуса орбиты получаем для энергий:

$$W_{\text{П}} = -\frac{me^4}{4i^2 \epsilon_0^2 h^2} \text{ и } W_{\text{К}} = \frac{me^4}{8i^2 \epsilon_0^2 h^2}$$

Полная энергия электрона в атоме равна:

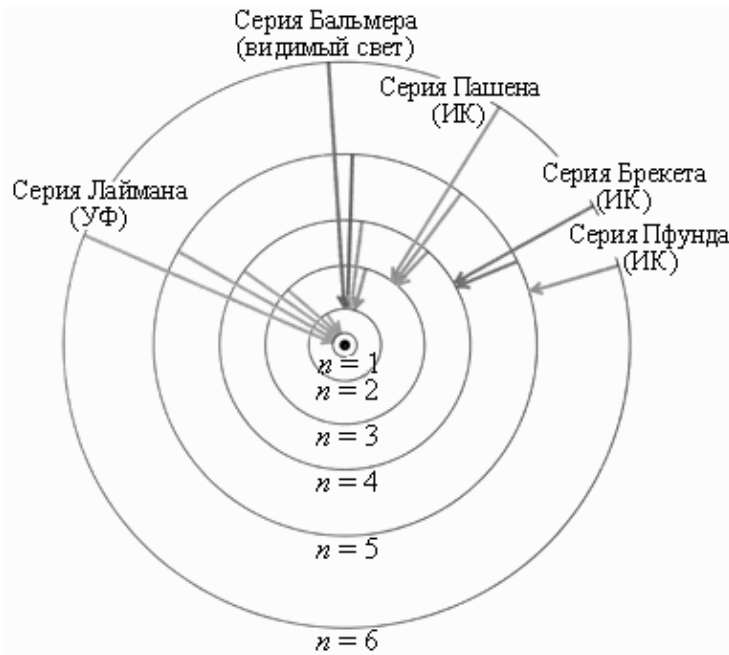
$$W = W_{\text{П}} + W_{\text{К}} = -\frac{me^4}{8i^2 \epsilon_0^2 h^2}$$

*Вывод* – энергии электрона в атоме возрастает при увеличении номера орбиты пропорционально обратному квадрату номера орбиты.

17.4 *Спектр излучений атома водорода.*

В соответствии со вторым постулатом Бора электрон испускает фотон при переходе с более высокой орбиты на ниже расположенную:

$$h\nu = W_k - W_i \Rightarrow h\nu = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right) \Rightarrow \nu = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right) \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda} = Rc \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$



где  $R = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  —

постоянная Ридберга. Постулаты Бора позволили получить формулу для определения частот или длин волн спектра атома водорода:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = Rc \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

Это соотношение подтверждается опытными исследованиями.

## 17.5 Словарь

1. Атом водорода – The hydrogen atom-ذرة الهيدروجين
2. Спектр излучений – The spectrum of radiation-طيف من الاشعاع
3. Постулаты Бора – Bohr's postulates-مسلمات بور

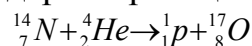
## Лекция №18

### Ядерная физика

18. 1 Ядерная физика – это раздел физики, изучающий структуру и свойства атомных ядер и их превращения: процессы радиоактивного распада и ядерные реакции.

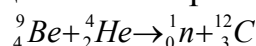
18.2 Состав ядра. Ядро – это центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный электрический заряд. В состав ядра входит два вида частиц: протоны ( $p$ ); нейтроны ( $n$ ).

Протон имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона:  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Масса протона  $m_p = 1,00728$  а.е.м.  $= 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг Протон впервые получен Резерфордом в результате ядерной реакции:



Протон – стабильная частица, тенденции к распаду не имеет (период полураспада  $T_{1/2} = 10^{30}$  с).

Нейтрон не имеет заряда, т.е.  $q = 0$ . Масса  $m = 1,00866$  а.е.м.  $= 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Открыт Чедвиком (1932 г.) при осуществлении реакции:



В свободном состоянии нейтрон испытывает радиоактивный распад с периодом полураспада  $T_{1/2}=12,6$  мин.

18.3 *Характеристики ядра. Основными характеристиками ядра являются его заряд и масса.*

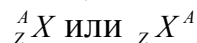
*Зарядом ядра называется величина  $Ze$ , где  $e$  величина заряда протона,  $Z$  – порядковый номер химического элемента в периодической системе элементов Менделеева. Порядковый номер  $Z$  равен числу протонов в ядре. В настоящее время известны ядра с  $Z$  от 1 до 107. Элементы с  $Z$  от 1 до 92, кроме Tc (технеция) с  $Z=43$  и Pm (прометия) с  $Z=61$ , встречаются в природе, элементы с  $Z$  от 93 до 107 получены искусственным путем. Их называют трансурановыми элементами. Pб (плутоний),  $Z=94$ , обнаружен в природе в очень незначительных количествах в природном минерале – смоляная обманка.*

*Масса атомного ядра практически совпадает с массой всего атома, та как масса электронов очень маленькая. Напомним, что масса электрона в 1836 раз меньше массы протона. Массы атомов измеряют в атомных единицах массы (обозначается а.е.м.):  $1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27}$  кг.*

*$A$  – массовое число ядра – целое число, ближайшее к атомной массе, выраженной в а.е.м. Оно определяет число нуклонов, т.е. общее число протонов и нейтронов в ядре  $A = N + Z$ , тогда число нейтронов*

$$N = (A - Z)$$

*Ядра обозначаются тем же символом, что и нейтральный атом:*



где  $X$  – символ химического элемента.

*Изотопы – это ядра с одинаковыми  $Z$ , но разными  $A$ . Водород имеет 3 изотопа:  ${}^1_1 H$  – протий,  ${}^2_1 H$  – дейтерий, которые являются стабильными и  ${}^3_1 H$  – тритий, являющийся радиоактивным. Кислород имеет 3 изотопа:  ${}^{16}_8 O$ ,  ${}^{17}_8 O$ ,  ${}^{18}_8 O$ . В большинстве случаев изотопы обладают одинаковыми физическими свойствами (исключение водород H), т.к. они определяются в основном структурой электронных оболочек, а она у изотопов одинакова.*

18.4 *Дефект массы.* Масс-спектрометрические измерения показали, что масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов.

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}$$

*Величина  $\Delta m$  называется дефектом массы.* Всякому изменению массы должно соответствовать изменение энергии, т.е. при образовании ядра должна выделяться определенная энергия. И наоборот – для разделения ядра необходимо затратить такое же количество энергии, которое выделяется при его образовании.

18.5 *Энергия связи ядра* – энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны. Энергия связи:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}) \cdot c^2$$

Если массы выразить в а.е.м., то энергия связи вычисляется по формуле:

$$E_{\text{св}} = 931,5 \Delta m \text{ (МэВ)},$$

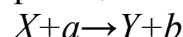
так как одной атомной единице массы соответствует атомная единица энергии

$$1 \text{ а.е.э.} = 931,5 \text{ МэВ.}$$

Удельная энергия связи – энергия связи, приходящаяся на один нуклон. Она характеризует устойчивость (прочность) атомных ядер. Чем больше удельная энергия связи, тем устойчивее ядро.

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$

18.6 Ядерные реакции – это превращения атомных ядер при их взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с  $\gamma$ -квантами) или друг с другом. Символически ядерные реакции записываются в следующем виде:



где  $X$  и  $Y$  – исходное и конечное ядра;  $a$  и  $b$  – бомбардирующая и испускаемая в ядерной реакции частица. В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел:

Сумма зарядов ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию равна сумме зарядов продуктов реакции (ядер и частиц).

Сумма массовых чисел ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию равна сумме массовых чисел продуктов реакции (ядер и частиц).

Ядерная реакция характеризуется энергией ядерной реакции, равной разности энергий конечной и исходной пар в реакции:

$$Q = \left( \sum m_i - \sum m_k \right) \cdot c^2$$

где  $\sum m_i$ , – сумма масс частиц до реакции;  $\sum m_k$  – сумма масс частиц после реакции.

Ядерные реакции могут быть:

а) экзотермическими (с выделением тепла), при этом  $\sum m_i > \sum m_k$ ,  $Q > 0$ ;

б) эндотермическими (с поглощением тепла), при этом  $\sum m_i < \sum m_k$ ,  $Q < 0$ .

Если массы выразить в а.е.м., то энергия ядерной реакции вычисляется по формуле:

$$Q = 931,5 \left( \sum m_i - \sum m_k \right)$$

18.7 Радиоактивность – явление самопроизвольного (спонтанного) распада ядер, при котором образуется новое ядро и испускаются частицы. Ядро, испытывающее распад, называется материнским, возникающее ядро называется дочерним.

Естественная радиоактивность наблюдается в основном у тяжелых ядер, которые располагаются в периодической системе Менделеева за свинцом. Открыто явление Анри Беккерелем в 1896 г. В зависимости от того, какая частица испускается, различают следующие виды распада:

1.  $\alpha$ -распад – испускание  $\alpha$ -частицы, т.е. ядер гелия - He:  ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{86}^{222}\text{Rn}$

2.  $\beta$ -распад испускание:

а) электронов –  $e^-$  ( $\beta$ -распад)  ${}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He} + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$

б) позитронов –  $e^+$  ( $\beta$ -распад)  ${}_{11}^{22}\text{Na} \rightarrow {}_{+1}^0e + {}_{10}^{22}\text{Ne} + \nu$

в)  $K$ -захват (электронный захват). Превращение протона в нейтрон идет по схеме  ${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n + \nu$

Электронный захват заключается в том, что один из электронов на ближайшем к ядру К-слое атома захватывается ядром. Здесь  $\bar{\nu}$  и  $\nu$  – электронные нейтрино и антинейтрино.

3. *Гамма-излучение ( $\gamma$ -излучение)* – это жесткое электромагнитное излучение с  $\lambda < 10^{-11}$  м. Обладает большой проникающей способностью, т.к. энергия квантов  $\epsilon > 10^4$  эВ.

При анализе результатов радиоактивных распадов опытным путем были открыты правила смещения (правила Фаянса и Содди).

1) при  $\alpha$ -распаде  ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He$

$\alpha$ -распад уменьшает массовое число на 4, а зарядовое на 2, т.е. дочерний элемент смещается на две клетки влево в таблице д. И. Менделеева.

2) при  $\beta$ -распаде:  ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + {}_{-1}^0 e$

$\beta$ -распад не изменяет массового числа; зарядовое число увеличивается на единицу, т.е. дочерний элемент смещается на 1 клетку вправо.

### 18.8 Закон радиоактивного распада

Радиоактивный распад уменьшает с течением времени число не распавшихся ядер. Самопроизвольный распад ядер подчиняется закону радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

где  $N_0$  – число ядер в данном объеме вещества в момент времени  $t = 0$ ;  $N$  – число ядер в том же объеме к моменту времени  $t$ ;  $\lambda$  – постоянная распада.

$$\lambda = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$$

Таким образом, постоянная распада определяет скорость радиоактивного распада.

Для оценки устойчивости ядер обычно используют период полураспада. *Период полураспада* ( $T_{1/2}$ ) – это время, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества распадается наполовину. Период полураспада и постоянная распада связаны следующим соотношением:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Для исследования радиоактивных изотопов обычно используют препараты. *Препарат* – это определенное количество радиоактивного вещества, специально приготовленного для эксперимента, например, нанесенного на подложку или заключенного в оболочку. *Активность  $a$  препарата (радиоактивного источника)* – число распадов, происходящих за единицу времени:

$$a = \frac{dN}{dt}$$

$[a] = \text{расп/с} = \text{Бк}$  (беккерель). Активность препарата равна произведению постоянной распада на число не распавшихся атомов, содержащихся в этом препарате:

$$a = -\lambda N$$

Знак «-» означает, что активность с течением времени уменьшается. Заменяв  $N$  по формуле (2.4), получим закон изменения активности:

$$a = a_0 e^{-\lambda t}$$

где  $a_0$  – активность в начальный момент времени .

*Удельная активность* – активность, отнесенная к единице массы вещества.

$$a = \frac{2}{m}$$

18.9 *Использование явления радиоактивности для измерения времени в геологии и археологии.* Явление радиоактивности может выполнять роль часов. Используя закон радиоактивного распада можно получить формулу для определения времени существования ядер

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N}$$

Для определения возраста минералов, содержащихся в земной коре, нужно брать “геологические” часы, т.е. использовать процессы с периодом полураспада изотопов урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 4,46 \cdot 10^9$  лет) и  ${}_{92}^{235}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 7,04 \cdot 10^9$  лет). Продуктом распада изотопов урана являются изотопы свинца. По соотношению свинца и урана можно рассчитать промежуток времени, в течение которого накопилось данное количество свинца вследствие распада урана. В археологии для определения возраста предметов, найденных при раскопках, используют радиоактивный распад углерода  ${}_{6}^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5570$  лет). В живом растении или животном процентное содержание радиоактивного углерода остается постоянным, так как потери углерода восполняются питанием. С момента гибели организма содержание радиоактивного углерода в организме начинает убывать в соответствии с законом радиоактивного распада.

18.10 *Гамма-излучение*  $\gamma$ -излучение ядер не является, как правило, самостоятельным видом излучения. Оно сопровождает  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады. Различают: мягкое  $\gamma$ -излучение ( $\epsilon \sim \text{кэВ}$ ); жесткое  $\gamma$ -излучение ( $\epsilon \sim \text{МэВ}$ ).  $\gamma$ -излучение может взаимодействовать с электронной оболочкой атомов и молекул, вызывая их ионизацию, а также с ядрами. При прохождении  $\gamma$ -лучей через вещество происходит их ослабление. Закон изменения интенсивности  $\gamma$ -излучения подчиняется закону:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

где  $I_0$  — интенсивность  $\gamma$ -излучения, падающего на поверхность вещества;  $\mu$  – коэффициент линейного ослабления  $\gamma$ -лучей в веществе, зависящий от природы вещества и спектрального состава потока  $\gamma$ -излучения.  $x$  – толщина поглощающего слоя.

### 18.11 *Словарь.*

1. Ядро – nucleus - نواة
2. Протон – Proton - بروتون
3. Нейтрон – neutron - نيوترون
4.  $\alpha$ -частица –  $\alpha$ -particle - الجزيء  $\alpha$
5.  $\gamma$ -частица –  $\gamma$ -particle
6.  $\beta$ -частица –  $\beta$ -particle
7. Период полураспада – The half-life - نصف عمر التفكك
8. Дефект массы – The mass defect - نقص في كمية المادة