

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Саратовский государственный аграрный университет
имени Н.И. Вавилова»

ФИЗИКА

Краткий курс лекций

для студентов I курса

Направление подготовки
35.03.07 ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА
И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Профиль подготовки
ТЕХНОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ В АПК

УДК 53
ББК 22
И21

Рецензенты:

Доцент кафедры «Оптика и биофотоника», кандидат физико-математических наук,

доцент ГОУ ВПО «СГУ им. Чернышевского».

В.Н. Шевцов

Профессор кафедры «Физика», доктор физико-математических наук,
доцент ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ»

В.А. Иванченко

И21 Физика: краткий курс лекций для студентов I курса
направления подготовки 35.03.07 «Технология производства и
переработки сельскохозяйственной продукции» / Сост.: З.И.
Иванова // ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2018. – 89с.

Краткий курс лекций по дисциплине «Физика» составлен в соответствии с рабочей программой дисциплины и предназначен для студентов направления подготовки 35.03.07 «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции». Краткий курс лекций содержит теоретический материал по основным вопросам механики, молекулярной физики, электростатики и электромагнитных явлений, оптики, рассмотрены прикладные аспекты. Направлен на формирование у студентов знаний об основных закономерностях физических явлений, на применение этих знаний для понимания процессов, происходящих в природе, для решения экологических проблем.

УДК 53
ББК 22

© Иванова З.И., 2018
© ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ», 2018

Введение

Краткий курс лекций по дисциплине «Физика» предназначен для студентов по направлению подготовки 35.03.07 «Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции». Он раскрывает основные законы физики, на которых базируются физические дисциплины, включает в себя введение в физико-химические методы исследования, знакомит с основными разделами физики, предполагает освоение теоретических основ методов анализа. Курс нацелен на формирование ключевых компетенций, необходимых для эффективного решения профессиональных задач и организации профессиональной деятельности на основе глубокого понимания физических законов.

Лекция 1

ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

1.1 Связь физики с другими науками

Физика – наука о простейших формах движения материи и соответствующих им наиболее общих законах природы. Изучаемые физикой формы движения материи (механическая, тепловая, электрическая, магнитная и т.д.) являются составляющими более сложных форм движения материи (химических, биологических и др.), поэтому физика является основой для других естественных наук (астрономия, биология, химия, геология и др.). В результате обобщения экспериментальных фактов устанавливаются физические законы – устойчивые повторяющиеся объективные закономерности, существующие в природе, устанавливающие связь между физическими величинами. Для установления количественных соотношений между физическими величинами их необходимо измерять, т.е. сравнивать их с соответствующими эталонами. Для этого вводится **система единиц**, которая постулирует **основные единицы** физических величин и на их базе определяет единицы остальных физических величин, которые называются **производными единицами**.

1.2 Международная Система единиц (СИ) (System International – SI)

Основные единицы: метр (м), килограмм (кг), секунда (с), ампер (А), кельвин (К), моль (моль), кандела (кд). Дополнительные единицы системы СИ: радиан (рад) и стерадиан (ср). Производные единицы устанавливаются на основе физических законов, связывающих их с основными единицами. Например, производная единица скорости (1 м/с) получается из формулы равномерного прямолинейного движения $V = s/t$.

1.3 Элементы теории ошибок

1. Ошибки эксперимента и обработка результатов измерений. Измерение – это операция, в результате которой мы узнаем, во сколько раз измеряемая величина больше или меньше соответствующей величины, принятой за единицу. Сам процесс измерения состоит из двух составных частей – наблюдения и отчета. Некоторые физические величины можно измерить непосредственно. Такие измерения получили название прямых измерений. Очень часто для получения искомой физической величины необходимо измерить несколько разных величин, которые определенным образом связаны друг с другом. Так, например, для определения плотности тела необходимо определить массу m и объем v , а плотность рассчитывается по формуле: $\rho = m/V$. Такой метод определения физической величины получил название косвенного.

При любых, даже самых точных измерениях, при строжайшем соблюдении всех правил обращения с приборами полученная величина не является абсолютно точной, а содержит некоторую ошибку или погрешность измерения. В задачу измерения входит не только нахождение самой величины, но также и оценка допущенной при измерении погрешности. Все ошибки делятся на две большие группы: *систематические* и *случайные* ошибки.

Ошибки, обусловленные точностью измерительного прибора или методикой эксперимента, называются систематическими. Они сохраняют свою величину и знак от опыта к опыту. Случайными называются ошибки, обусловленные экспериментатором или условиями, в которых проводится эксперимент. Эти ошибки непредсказуемым образом изменяют свою величину и знак от опыта к опыту. Случайные и систематические ошибки всегда присутствуют при любом виде измерений. Одной из главных задач эксперимента является умение оценить вклад каждой из ошибок в результат измерения и свести их к минимуму. Влияние случайных ошибок на результат измерений может быть существенно уменьшено при многократном повторении опыта, так как завышенные и заниженные значения будут встречаться одинаково часто и должны скомпенсировать друг друга.

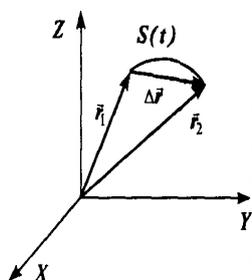
Другое дело – систематические ошибки. Путем простого увеличения числа опытов вклад их уменьшить нельзя, так как она постоянно присутствует с одним и тем же знаком. Для их уменьшения необходимо усовершенствовать прибор, используемые для измерений, или изменить методику эксперимента.

Источников ошибок при любом виде измерений может быть много. Это ошибки любого, даже самого точного прибора, ошибки измерений, ошибки вычислений, т. е. ошибки в процессе математической обработки результатов измерений, включая ошибки округления. Особое место в классификации ошибок занимают промахи или грубые ошибки. Это результаты опыта, которые резко отличаются от остальных измерений. Они возникают из-за невнимания экспериментатора, допустившего, например, неправильное считывание результатов со шкалы измерительного прибора, из-за нарушения нормальной работы измерительной аппаратуры, из-за неправильной записи результатов и т. п. Такие данные следует исключить при обработке результатов или повторить опыт, если это возможно.

1.4 Кинематика материальной точки

Одним из основных понятий механики является понятие материальной точки, что означает тело, обладающее массой, размерами которого можно пренебречь при рассмотрении его движения. Движение материальной точки – простейшая задача механики, которая позволит рассмотреть более сложные типы движений.

Перемещение материальной точки происходит в пространстве и изменяется со временем. Реальное пространство трехмерно, и положение материальной точки в любой момент времени полностью определяется тремя числами – ее координатами в выбранной системе отсчета. Число независимых величин, задание которых необходимо для однозначного определения положения тела, называется числом его степеней свободы. В качестве системы координат выберем прямоугольную, или декартову, систему координат. Для описания движения точки, кроме системы координат, необходимо еще иметь устройство, с помощью которого можно измерять различные отрезки времени. Выбранная система координат и связанные с ней часы образуют систему отсчета.



Декартовы координаты X, Y, Z определяют в пространстве радиус-вектор z , острие которого описывает при его изменении со временем траекторию материальной точки. Длина траектории точки представляет собой величину пройденного пути $S(t)$. Путь $S(t)$ – скалярная величина. Наряду с величиной пройденного пути, перемещение точки характеризуется направлением, в котором она движется. Разность двух радиус-векторов, взятых в различные моменты времени, образует вектор перемещения точки.

Для того чтобы характеризовать, как быстро меняется положение точки в пространстве, пользуются понятием скорости. Под средней скоростью движения по траектории за конечное время Δt понимают отношение пройденного за это время конечного пути ΔS ко времени:

$$v_s = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1}.$$

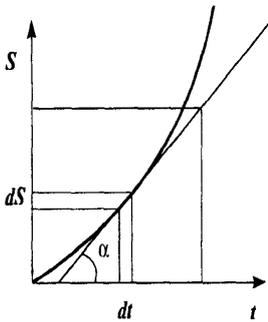
Скорость движения точки по траектории – скалярная величина. Наряду с ней можно говорить о средней скорости перемещения точки. Эта скорость – величина, направленная вдоль вектора перемещения,

$$\vec{v}_r = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{t_2 - t_1}.$$

Если моменты времени t_1 , и t_2 бесконечно близки, то время Δt бесконечно мало и в этом случае обозначается через dt . За время dt точка проходит бесконечно малое расстояние dS . Их отношение образует мгновенную скорость точки

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Производная радиус-вектора r по времени определяет мгновенную скорость перемещения точки.



$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Поскольку перемещение совпадает с бесконечно малым элементом траектории $dr = dS$, то вектор скорости направлен по касательной к траектории, а его величина:

$$v = \frac{dS}{dt} = \frac{dr}{dt}.$$

На рис. показана зависимость пройденного пути S от времени t . Вектор скорости $v(t)$ направлен по касательной к кривой $S(t)$ в момент времени t . Из рис. видно, что угол наклона касательной к оси t равен

$$\frac{dS}{dt} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Интегрируя выражение в интервале времени от t_0 до t , получим формулу, позволяющую вычислить путь, пройденный телом за время $t-t_0$ если известна зависимость от времени скорости $v(t)$

$$S = \int_{t_0}^t v(t) dt.$$

Производную скорости по времени, которая является второй производной по времени от радиус-вектора, называют ускорением точки:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}.$$

Вектор ускорения a направлен вдоль вектора приращения скорости dv . Пусть $a = \text{const}$. Этот важный и часто встречаемый случай носит название равноускоренного или равнозамедленного (в зависимости от знака) движения. Проинтегрируем выражение в пределах от $t = 0$ до t :

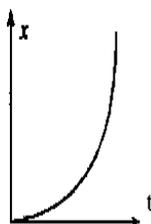
$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}(0) + \vec{a}t,$$

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(0) + \vec{v}(0)t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$$

и используем следующие начальные условия: $\vec{r}(0) = 0; \vec{v}(0) = \vec{v}_0$.

Таким образом, при равноускоренном движении

$$\vec{r}(t) = \vec{v}(0)t + \frac{\vec{a}t^2}{2}.$$

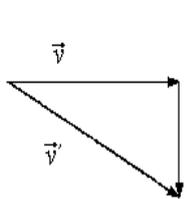


В частности, при одномерном движении, например вдоль оси X , $x = v_0t + \frac{at^2}{2}$. При больших временах зависимость координаты от времени t представляет собой параболу.

В общем случае движение точки может быть криволинейным. Рассмотрим этот тип движения. Если траектория точки произвольная кривая, то скорость и ускорение точки при ее движении по этой кривой меняются по величине и направлению.

Выберем произвольную точку на траектории. Как всякий вектор, вектор ускорения можно представить в виде суммы его составляющих по двум взаимно перпендикулярным осям. В качестве одной из осей возьмем направление касательной в рассматриваемой точке траектории, тогда другой осью окажется направление нормали к кривой в этой же точке. Составляющая ускорения, направленная по касательной к траектории, носит название *тангенциального ускорения* a_t , а направленная ей перпендикулярно – *нормального ускорения* a_n .

Получим формулы, выражающие величины a_t и a_n через характеристики движения. Для простоты рассмотрим вместо произвольной криволинейной траектории плоскую кривую. Окончательные формулы остаются справедливыми и в общем случае неплоской траектории. Благодаря ускорению скорость точки приобретает за время dt малое изменение dv . При этом тангенциальное ускорение, направленное по касательной к траектории, зависит только от величины скорости, но не от ее направления. Это изменение величины скорости равно dv . Поэтому тангенциальное ускорение может быть записано как производная по времени от величины скорости:

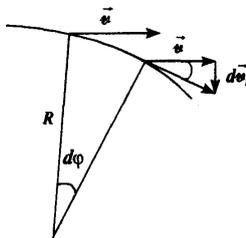


$$a_t = \frac{dv}{dt}.$$

С другой стороны, изменение dv_n , направленное перпендикулярно к v , характеризует только изменение направления вектора скорости, но не его величины.

$v'^2 = v^2 + (dv_n)^2$, С точностью до величины второго порядка малости величина скорости остается неизменной $v=v'$.

Найдем величину a_n . Проще всего это сделать, взяв наиболее простой случай криволинейного движения – равномерное движение по окружности. При этом $a_t=0$. Рассмотрим перемещение точки за время dt по дуге dS окружности радиуса R .



Скорости v и v' , как отмечалось, остаются равными по величине. Изображенные на рис. треугольники оказываются, таким образом, подобными (как равнобедренные с равными углами при вершинах). Из

подобия треугольников следует $\frac{dv_n}{v} = \frac{dS}{R}$, откуда находим выражение для нормального ускорения:

$$a_n = \frac{dv_n}{dt} = \frac{v}{R} \cdot \frac{dS}{dt} = \frac{v^2}{R}.$$

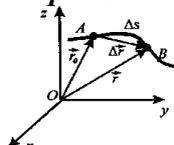
Формула для полного ускорения при криволинейном движении имеет вид:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2}.$$

Подчеркнем, что эти соотношения справедливы для всякого криволинейного движения, а не только для движения по окружности. Это связано с тем, что всякий участок криволинейной траектории в достаточно малой окрестности точки можно приближенно заменить дугой окружности. Радиус этой окружности, называемый радиусом кривизны траектории, будет меняться от точки к точке и требует специального вычисления. Таким образом, последняя формула остается справедливой и в общем случае пространственной кривой.

1.5 Перемещение, траектория, скорость, ускорение

Линия, описываемая движущейся материальной точкой (или телом) относительно выбранной системы отсчета называется **траекторией**. Уравнение траектории можно получить, исключив параметр из кинематических уравнений. В зависимости от формы траектории движение может быть **прямолинейным** или **криволинейным**.



Вектор перемещения $A_r = r - r_0$ – вектор, проведенный из начального положения движущейся точки в положение ее в данный момент времени (приращение радиуса-вектора точки рассматриваемый промежуток времени).

Скорость – это **векторная** величина, которая определяет как быстроту движения, так и его направление в данный момент времени. **Единица скорости** – м/с. **Мгновенная скорость** – векторная величина, равная первой производной по времени от радиуса-вектора рассматриваемой точки. Вектор мгновенной скорости направлен по **касательной** к траектории в сторону движения. Модуль мгновенной скорости (**скалярная** величина) равен первой производной пути по времени. **Ускорение** a (от лат. *acceleratio*) – это векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению.

В общем случае плоского криволинейного движения вектор ускорения удобно представить в виде **суммы двух проекций**: $a = a_n + a_t$

1.6 Инерциальные и неинерциальные системы отсчета

Закон Ньютона. Материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит ее изменить это состояние.

Стремление тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется **инертностью**. Поэтому первый закон Ньютона называют также **законом инерции**. Первый закон Ньютона **постулирует** существование **инерциальных систем отсчета** – таких, относительно которых, материальная точка, не подверженная воздействию других тел, движется равномерно и прямолинейно.

1.7 Поступательное, колебательное, вращательное движения

Поступательное движение – это движение, при котором любая прямая, жестко связанная с телом, остается параллельной своему первоначальному положению.

Колебаниями называются процессы, отличающиеся той или иной степенью повторяемости. В зависимости от физической природы повторяющегося процесса различают колебания: механические, электромагнитные, электромеханические и т. д. На колебательных процессах основана вся радиотехника. В зависимости от характера воздействия, оказываемого на колеблющуюся систему, различают свободные (или собственные) колебания, вынужденные колебания, автоколебания и параметрические колебания.

Свободными или собственными называются такие колебания, которые происходят в системе, предоставленной самой себе после того, как ей был сообщен толчок, либо она была выведена из положения равновесия. **Вынужденными** называются такие колебания, в процессе которых колеблющаяся система подвергается воздействию внешней периодически изменяющейся силы. **Автоколебания**, как и вынужденные колебания, сопровождаются воздействием на колеблющуюся систему внешних сил, однако моменты времени, когда осуществляются эти воздействия, задаются самой колеблющейся системой – система сама управляет внешним воздействием. При **параметрических** колебаниях за счет внешнего воздействия происходит периодическое изменение какого-либо параметра системы, например длины нити, к которой подвешен шарик, совершающий колебания. Простейшими являются

гармонические колебания, т. е. такие колебания, при которых колеблющаяся величина (например, отклонение маятника) изменяется со временем по закону синуса или косинуса. Этот вид колебаний особенно важен по следующим причинам: во-первых, колебания в природе и в технике часто имеют характер, очень близкий к гармоническим, и, во-вторых, периодические процессы иной формы (с другой зависимостью от времени) могут быть представлены как наложение нескольких гармонических колебаний.

Все точки абсолютно твердого тела, вращающегося вокруг некоторой оси OO , движутся по окружностям, центры которых лежат на оси вращения. Радиус-вектор каждой точки (вектор, проведенный из центра соответствующей окружности в данную точку) поворачивается за время Δt на один и тот же угол $\Delta\varphi$ - угол поворота твердого тела.

При рассмотрении таких величин, как скорость v , ускорение w , радиус-вектор r , не возникал вопрос о выборе их направления: оно вытекало естественным образом из природы самих величин. Подобные векторы называются полярными. При равномерном вращении w показывает, на какой угол поворачивается тело за единицу времени. Период обращения T - время, за которое тело делает один оборот, т. е. поворачивается на угол 2π . Поскольку промежутку времени $\Delta t = T$ соответствует угол поворота $\Delta\varphi = 2\pi$. $\omega = 2\pi/T$. Откуда $T = 2\pi/\omega$. Число оборотов в единицу времени ν , $\nu = 1/T = \omega/2\pi$. Угловая скорость $\omega = 2\pi\nu$.

Если под β понимать проекцию вектора β на направление w , то формула запишется следующим образом: $\beta = \lim \Delta w / \Delta t = dw/dt$. β - алгебраическая величина, которая положительна, если w со временем увеличивается (в этом случае векторы β и w имеют одинаковое направление), и отрицательна, если w уменьшается (в этом случае направления β и w противоположны).

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Что изучает физика? Раскройте связь физики с другими науками.
- 2) Назовите основные, дополнительные и производные единицы?
- 3) Дайте формулировку терминам траектория, скорость, ускорение.
- 4) Какие виды движения существуют?
- 5) Что такое инертность?
- 6) Какие колебания называются гармоническими колебаниями?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1.Пронин, В.П. Краткий курс физики / В. П. Пронин. – Саратов: ФГОУ ВПО «СаратовскийГАУ», 2007 г. – 200 с.

Дополнительная

1. Грабовский, Р.И. Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

Лекция 2

ЭЛЕМЕНТЫ ДВИЖЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ

2.1. Основные законы динамики

Первый закон Ньютона. Материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит ее изменить это состояние. Второй закон Ньютона – основной закон динамики поступательного движения – отвечает на вопрос, как изменяется механическое движение материальной точки (тела) под действием приложенных к ней сил.

Ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела): $a = F/m$ или $F = ma$

Более общая формулировка второго закона Ньютона: *скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на нее силе.* Векторная величина Fdt называется элементарным импульсом силы. Основной закон динамики материальной точки выражает принцип причинности в классической механике – однозначная связь между изменением с течением времени состояния движения и положения в пространстве материальной точки и действующими на нее силами, что позволяет, зная начальное состояние материальной точки, вычислить ее состояние в любой последующий момент времени. Всякое действие материальных точек (тел) друг на друга имеет характер взаимодействия; силы с которыми действуют друг на друга материальные точки, всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки. Эти силы приложены к *разным* материальным точкам (телам), всегда действуют *парами* и являются силами *одной природы*. Третий закон Ньютона позволяет перейти от динамики отдельной материальной точки к динамике произвольной системы материальных точек, поскольку позволяет свести любое взаимодействие к силам парного взаимодействия между материальными точками. При вращательном движении: $M = J\beta$. Это уравнение аналогично основному уравнению динамики $F = ma$, однако вместо F фигурирует момент силы M , вместо m – момент инерции J , а вместо a – угловое ускорение β . *Момент количества движения тела относительно оси вращения равен произведению момента инерции на угловую скорость $L = J\omega$.*

В изолированной системе сумма моментов импульса всех тел величина постоянная. Закон сохранения момента количества движения тела относительно оси вращения.

2.2. Закон сохранения импульса

В изолированной системе сумма импульсов всех тел величина постоянная. Закон сохранения импульса является следствием однородности пространства: при параллельном переносе в пространстве замкнутой системы тел ее физические свойства не меняются.

$$\sum_{k=1}^N m_k v_k = \text{Const.}$$

2.3 Закон движения центра масс

В механике Ньютона из-за независимости массы от скорости *импульс системы может быть выражен через скорость ее центра масс.* Центром масс (или центром инерции) системы материальных точек называется воображаемая точка C , положение которой характеризует распределение массы этой системы. *Закон движения центра масс:* центр масс системы движется как материальная точка, в которой сосредоточена масса всей m системы и на которую действует сила, равная геометрической сумме всех внешних сил, действующих на систему. Из

закона сохранения импульса следует, что *центр масс замкнутой системы либо движется прямолинейно и равномерно, либо остается неподвижным.*

2.4 Закон сохранения энергии

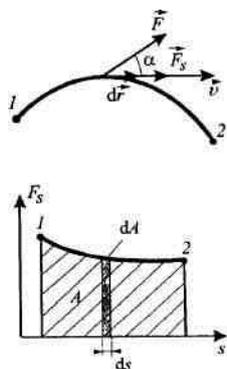
Полная механическая энергия системы—энергия механического движения и взаимодействия $E = K + W$ —равна сумме кинетической и потенциальной энергий. *Закон сохранения энергии:* в системе тел, между которыми действуют только *консервативные силы* полная механическая энергия сохраняется, т.е. не изменяется со временем: $K + W = E = \text{const}$. Это — *фундаментальный закон* природы. Он является следствием *однородности времени*—инвариантности физических законов относительно выбора начала отсчета времени. Механические системы, на тела которых действуют только консервативные силы называются *консервативными системами*, в которых *полная механическая энергия остается постоянной*. Могут лишь происходить превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно в эквивалентных количествах. *Диссипативные системы* — системы, в которых механическая энергия постепенно уменьшается за счет преобразования в другие (немеханические) формы энергии. В системе, в которой действуют также неконсервативные силы, *полная механическая энергия системы не сохраняется*. Однако при "исчезновении" механической энергии всегда возникает эквивалентное количество энергии другого вида. Таким образом, *энергия никогда не исчезает и не появляется вновь, она лишь превращается из одного вида в другой*. В этом заключается *физическая сущность* закона сохранения и превращения энергии — сущность неумиротворимости материи и ее движения.

2.5 Импульс силы импульс тела

Уравнению второго закона Ньютона $m(dv/dt) = f$ можно придать другой вид. Учтя, что масса в классической механике есть величина постоянная, ее можно внести под знак производной и записать следующим образом: $d(mv)/dt = f$. Векторную величину $p = mv$ называют импульсом материальной точки). Воспользовавшись определением импульса, уравнение второго закона можно написать в виде $dp/dt = f$, а сам закон сформулировать так: производная импульса материальной точки по времени равна результирующей всех сил, действующих на точку.

2.6 Работа, мощность, энергия

Энергия—это универсальная мера различных форм движения и взаимодействия. С различными формами движения материи связывают различные формы энергии: механическую, тепловую, электромагнитную, ядерную. Изменение механического движения тела вызывается силами, действующими на него со стороны других тел. *Работа силы*—это количественная характеристика процесса обмена энергией между взаимодействующими телами. При *прямолинейном движении* тела под действием *постоянной* силы F , которая составляет некоторый угол α с направлением перемещения, работа этой силы равна:



$A = Fs = Fscos\alpha$. В общем случае сила может изменяться как по модулю, так и по направлению, поэтому этой формулой пользоваться нельзя. Однако на элементарном (бесконечно малом) перемещении dr можно ввести скалярную величину — *элементарную работу* dA силы F . Тогда *работа силы на участке траектории* от точки 1 до точки 2 равна алгебраической сумме элементарных работ на отдельных бесконечно малых участках пути. Если зависимость F_s от s представлена графически, то работа A определяется площадью заштрихованной фигуры.

Консервативной (потенциальной) называют силу, работа которой определяется только начальными и конечными положениями тела и не зависит от формы пути. Консервативными силами являются силы тяготения, упругости. Все центральные силы консервативны. Примером *неконсервативных сил* являются

силы трения. Чтобы охарактеризовать *скорость совершения работы*, вводят понятие *мощности*. Мощность N равна скалярному произведению вектора силы на вектор скорости, с которой движется точка приложения этой силы. *Единица работы*–джоуль (Дж) – работа совершаемая силой 1Н на пути 1м: 1Дж=1Нм. *Единица мощности*–ватт (Вт): 1Вт – мощность, при которой за время 1с совершается работа 1Дж 1Вт=1Дж/с.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Перечислите основные законы динамики.
- 2) Что такое диссипативные системы?
- 3) Дайте определение понятиям работа, мощность, энергия.
- 4) В чем измеряется работа, мощность, энергия?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Едунов, В.В. Механика: учебное пособие для студентов ВУЗов / В.В. Едунов, А.В. Едунов – М. Издательский центр «Академия», 2010 г. – 352 с.

Дополнительная

1. Грабовский, Р.И. Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

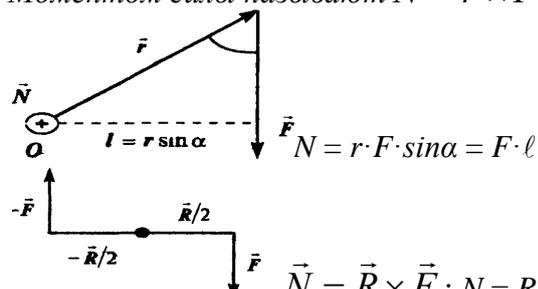
Лекция 3

ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО И КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЙ

Твердое тело – это система материальных точек, расстояние между которыми остается неизменным при взаимодействии системы с другими телами. Движение твердого тела бывает поступательным и вращательным. Всякое движение твердого тела можно представить как сумму движения названных двух типов. Покажем это для случая плоского движения, т. е. такого, при котором все точки тела перемещаются в параллельных плоскостях.

3.1 Момент силы и момент инерции

Моментом силы называют $\vec{N} = \vec{r} \times \vec{F}$



Момент силы. относительно точки O

$$\vec{N} = \vec{R} \times \vec{F}; N = R \cdot F \cdot \sin \alpha.$$

Пара сил. Продифференцируем по

времени: $\frac{d\vec{M}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{p} + \vec{r} \times \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F} = \vec{N}$. Величина $J = \sum m_i R_i^2$ является моментом

инерции тела относительно оси вращения. Момент импульса тела относительно данной оси вращения принимает, таким образом, вид: $M_z = J \cdot \omega$. Полученная формула аналогична формуле $P_z = mV_z$ для поступательного движения. Роль массы играет момент инерции, роль линейной скорости – угловая скорость. Подставив выражение в уравнение для момента

импульса, получим $J \cdot \beta_z = N_z$, где β_z – проекция на ось вращения углового ускорения $\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$. Это уравнение эквивалентно по форме второму закону Ньютона.

Поступательное движение	Вращательное движение	Поступательное движение	Вращательное движение
Основной закон динамики		Работа и мощность	
$F \cdot \Delta t = mv_2 - mv_1$	$M \cdot \Delta t = J \cdot \omega_2 - J \cdot \omega_1$	$A = F \cdot s$	$A = M \cdot \varphi$
$F = m \cdot a$	$M = J \cdot \varepsilon$	$N = F \cdot v$	$N = M \cdot \omega$
Закон сохранения		Кинетическая энергия	
момента импульса	импульса		
$\sum_{i=1}^n m_i v_i = const$	$\sum_{i=1}^n J_i \omega_i = const$	$T = \frac{1}{2} m v^2$	$T = \frac{1}{2} J \omega^2$

3.2. Математический и физический маятники

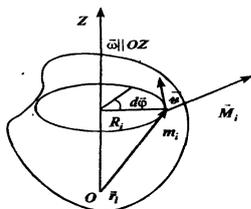
Математическим маятником называют идеализированную систему, состоящую из невесомой и нерастяжимой нити, на которой подвешена масса, сосредоточенная в одной точке. При малых колебаниях угловое отклонение математического маятника изменяется со временем по гармоническому закону. Частота колебаний математического маятника зависит только от длины маятника и от ускорения силы тяжести и не зависит от массы маятника. $T = 2\pi \sqrt{l/g}$.

Физическим маятником называется твердое тело, способное совершать колебания вокруг неподвижной точки, не совпадающей с его центром инерции. При отклонении маятника от

положения равновесия на угол φ возникает вращательный момент, стремящийся вернуть маятник в положение равновесия. Этот момент равен $M = -mgl \sin \varphi$, где m – масса маятника, а l – расстояние между точкой подвеса и центром инерции маятника. При малых отклонениях от положения равновесия физический маятник совершает гармонические колебания, частота которых зависит от массы маятника, момента инерции маятника относительно оси вращения и расстояния между осью вращения и центром инерции маятника. Период колебания физического маятника определяется выражением $T = 2\pi \sqrt{I/mgl}$

3.3 Энергия при вращательном и колебательном движениях

Рассмотрим вращение тела вокруг неподвижной оси, которую назовем осью Z . Линейная скорость точки с массой m_i , равна $v_i = \omega R$, где R , —расстояние точки до оси Z . Для кинетической энергии i -й материальной точки тела получаем выражение:



$$T_i = \frac{mv_i^2}{2} = \frac{1}{2} m_i \omega^2 R_i^2 .$$

Полная кинетическая энергия тела $T = \sum T_i = \omega^2 \frac{1}{2} \sum m_i R_i^2$. Поскольку входящая сюда сумма

представляет собой момент инерции относительно оси Z , получаем: $T = \frac{1}{2} J \omega^2$.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Привести примеры вращательного движения тел?
- 2) Дайте определения моменту силы и моменту инерции тела?
- 3) Физический и математический маятник?
- 4) Чему равна полная кинетическая энергия?
- 5) Чему равна работа совершаемой внешней силой при вращения твердого тела?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1.Пронин, В.П.Краткий курс физики / В.П. Пронин. – Саратов: ФГОУ ВПО «СаратовскийГАУ»,2007 г. – 200с.

Дополнительная

1.Грабовский, Р.И. Курс физики. 6-е изд. / Р.И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

Лекция 4

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

4.1 Волна

Если в каком – либо месте упругой (твёрдой, жидкой или газообразной) среды возбудить колебание её частиц, то вследствие взаимодействия между частицами колебание начнёт распространяться в среде от частицы к частице с некоторой скоростью v . Процесс распространения колебаний в пространстве называется волной. Частицы среды, в которой распространяется волна, не переносятся волной, они лишь совершают колебания около своих положений равновесия. В зависимости от направления колебаний частиц по отношению к направлению, в котором распространяется волна, различают *продольные* и *поперечные* волны. В продольной волне частицы колеблются вдоль направления распространения волны, т.к. в среде возникают упругие деформации сжатия и разрежения. В поперечной – в направлениях, перпендикулярных к направлению распространению волны. Механические поперечные волны могут возникнуть лишь в среде, обладающей сопротивлением сдвигу. Поэтому в жидкой и газообразной средах возможно возникновение только продольных волн.

4.2 Уравнение волны. Фронт волны. Принцип Гюйгенса-Френеля

Уравнением волны называется выражение, которое даёт смещение колеблющейся точки как функции координат и времени $\zeta = \zeta(x, y, z, t)$. Уравнение плоской волны записывается в виде $\zeta = A \cos \omega(t - x/v)$. Скорость распространения волны v – есть скорость распространения фазы и называется фазовой скоростью. Уравнению плоской волны можно придать симметричный относительно t и x вид. Для этого вводится так называемое волновое число $k = 2\pi/\lambda$. Тогда $v = \omega/k$ или $\zeta = A \cos(\omega t - kx)$. Функция $\zeta(x, y, z, t)$ является решением волнового уравнения. Если в среде распространяется одновременно несколько волн, то колебания частиц оказываются суммой колебаний, которые совершали бы частицы при распространении каждой из волн в отдельности. Волны накладываются одна на другую, не возмущая друг друга. Эти утверждения носят название принципа суперпозиции (наложения) волн. Поверхность, до которой одновременно доходят волны от источника колебаний называются *фронтом волны*. Форма фронта определяется формой источника колебаний и свойств среды. Точечный источник образует сферические волны, то есть фронтом волны является сфера, все точки которой колеблются в одинаковой фазе. Если фронт волны плоский, то и волна называется плоской. В неоднородной по плотности среде скорость распространения волны различная, поэтому волновой фронт имеет сложную конфигурацию. В случае сферической волны, с удалением от источника колебаний площадь фронта возрастает пропорционально квадрату радиуса сферы R . Уравнение сферической волны может быть представлено в следующем виде
$$\mathbf{x} = \frac{A}{y} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{y}{\lambda} \right)$$
. Распространение волны в пространстве происходит в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля. Каждая точка среды, до которой доходит волна, становится источником вторичных волн. Эти источники когерентны.

4.3 Сложение гармонических колебаний

Пусть на точку действует несколько различных упругих сил. Каждая из этих сил заставляет точку совершать гармоническое колебательное движение.

$$x = x_1 + x_2 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_{10}) + A_2 \cos(\omega t + \varphi_{20})$$

Поскольку x_1 и x_2 периодические функции с периодом T , то и их сумма представляет собой периодическое колебательное движение с тем же самым периодом T .

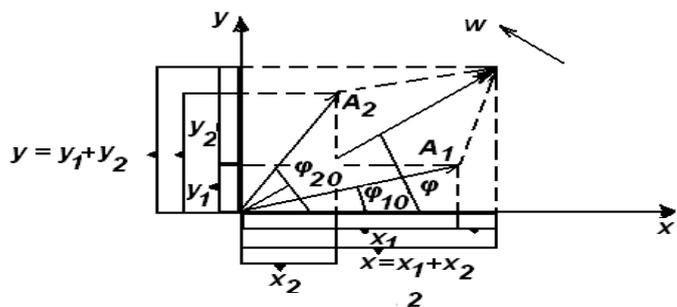


Рисунок 2

$$\text{угол } \varphi_0 = \varphi_2 - \varphi_1 = (\omega t + \varphi_{20}) - (\omega t + \varphi_{10}) = \varphi_{20} - \varphi_{10}$$

$$x = A \cos \varphi = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$\text{tg} \varphi_0 = y_{10} + y_{20} / x_{10} + x_{20} = A_1 \sin \varphi_{10} + A_2 \sin \varphi_{20} / A_1 \cos \varphi_{10} + A_2 \cos \varphi_{20}$$

$$A^2 = |A_1 + A_2|^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})$$

Это условие одновременно является условием сложения интенсивностей двух колебаний, т.е. при определенных φ_{20} и φ_{10} $\cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})$ может достигнуть ± 1 .

При сложении колебаний с разными частотами ω , результирующее колебание имеет более сложный вид. Для примера рассмотрим сложение двух колебаний с измерительными частотами и равными амплитудами.

$$x_1 = A \cos \omega_1 t,$$

$$x_2 = A \cos \omega_2 t, \quad \varphi_{20}, \varphi_{10} = 0$$

$$x = x_1 + x_2 = A[\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t] = 2A \cos((\omega_1 + \omega_2) / 2) t \cos((\omega_1 - \omega_2) / 2)$$

Если периоды и частоты обоих исходных колебаний соизмеримы, т.е. можно найти два таких целых числа n_1 и n_2 , что $T_2 / T_1 = \omega_1 / \omega_2 = n_1 / n_2$

То через промежуток времени $\tau = (n_1 - n_2) 2\pi / \omega_1 - \omega_2 = (n_1 + n_2) 2\pi / \omega_1 + \omega_2$, аргументы обоих сомножителей в изменяется на целое (хотя и различное) число раз 2π и их произведение примет то же значение, что и в начале промежутка. Величина τ тогда является периодом результирующего колебания. Если же частоты обоих колебаний несоизмеримы, то результирующее колебание будет непериодическим.

4.4 Сложение взаимно перпендикулярных колебаний

Рассмотрим $x = A \cos(\omega t + \varphi_{10})$; $y = B \cos(\omega t + \varphi_{20})$, предположим $\varphi_{10}, \varphi_{20} = 0$ и поделим эти уравнения $y / A = (B / A)x$ - уравнение p -прямой.

Если $\varphi_{20} = \varphi_{10} + \pi$ то \cos меняет знак и $y = - (B / A)x$

Пусть $\varphi_{20} = \varphi_{10} + \pi/2$; $x / A = \cos(\omega t + \varphi_{10})$; $y / B = \cos[(\omega t + \varphi_{10}) + \pi/2] = \sin(\omega t + \varphi_{10})$

Возводя полученное в квадрат и складывая $x^2 / A^2 + y^2 / B^2 = \cos^2(\omega t + \varphi_{10}) + \sin^2(\omega t + \varphi_{10})$

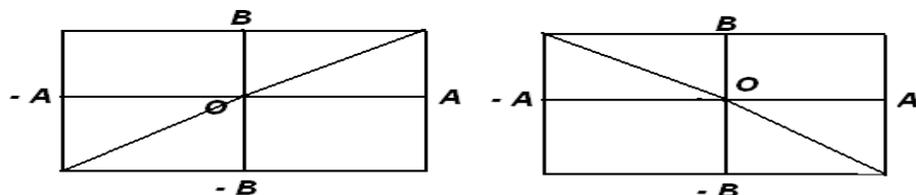


Рисунок 3

Или $x^2 / A^2 + y^2 / B^2 = 1$ - это уравнение эллипса.

При $A = B$ - окружность. При произвольных φ_{10} и φ_{20} будет эллипс, нос наклоном.

4.5 Сложение двух одинаково направленных колебаний одинаковой амплитуды с мало отличающимися частотами

В этом случае разность фаз переменная. Примем за начало отсчета момент времени, когда она равна нулю ($\varphi_{01} - \varphi_{02}$). Уравнения слагаемых колебаний имеют вид:

$$\tilde{o}_1 = A \sin \omega_1 t; \tilde{o}_2 = A \sin \omega_2 t.$$

Смещение результирующего колебания равно

$$x = \tilde{o}_1 + x_2 = A \sin \omega_1 t + A \sin \omega_2 t.$$

Применяя тригонометрическую формулу преобразования суммы синусов получим

$$x = 2A \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right)t \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right)t.$$

Такое колебание не является гармоническим. Амплитуда медленно периодически изменяется во времени (круговая частота амплитуды мала, а период большой). Такие колебания называются биениями. Сначала фазы колебаний одинаковы. Затем одно из колебаний постепенно отстает по фазе от другого, и амплитуда результирующего колебания уменьшается до нуля при разности фаз π .

4.6 Сложение сонаправленных гармонических колебаний одинаковой частоты

Результирующее смещение $x = \tilde{o}_1 + x_2 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_{01}) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_{02})$. Амплитуда результирующего колебания максимальна и равна сумме амплитуд слагаемых колебаний (разность фаз – четное число π) и их разности (разность фаз – нечетное число π).

При одинаковых амплитудах слагаемых результирующая амплитуда либо удваивается, либо колебания компенсируют друг друга.

4.7 Сложение встречных волн одинаковой частоты и амплитуды

Важным практическим случаем является интерференция двух когерентных волн распространяющихся навстречу друг другу, уравнения которых имеют вид $\tilde{o}_1 = A \sin(\omega t - 2\pi y / \lambda)$; $\tilde{o}_2 = A \sin(\omega t + 2\pi y / \lambda)$.

Уравнение результирующей волны будет

$$x = x_1 + x_2 = 2A \sin\left(\frac{\omega t - \frac{2\pi y}{\lambda} + \omega t + \frac{2\pi y}{\lambda}}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega t - \frac{2\pi y}{\lambda} - \omega t - \frac{2\pi y}{\lambda}}{2}\right) =$$

$$= 2A \cos\left(\frac{2\pi y}{\lambda}\right) \sin \omega t.$$

Результирующая волна, которая получается из наложения двух

встречных когерентных волн с одинаковой амплитудой называется стоячей – узлы и пучности все время находятся на одном месте. Стоячая волна неподвижна и не переносит энергии вследствие компенсации энергий переносимых встречными волнами.

4.8 Звук и его восприятие

Звуковыми (акустическими) волнами называются волны в упругой среде, воспринимаемые слуховым органом человека и животных. Скорость распространения звуковых волн зависит от свойств среды (в газах 0,2-1,2 км/с, в жидкостях 1,2-2 км/с, в твердых телах 2-5 км/с). Человек может воспринимать волны в диапазоне 20-20000 Гц. Для того, чтобы звуковая волна была воспринята, необходимо, чтобы она обладала достаточной интенсивностью, превышающей, так называемый *порог слышимости*. Звук, который ниже порога слышимости не воспринимается. Звук слишком большой интенсивности вызывает болевые ощущения. Максимальное значение интенсивности,

превышение которого вызывает болевые ощущения, называется болевым порогом. Значения порогов различны для частот.

Ухо наиболее чувствительно к частотам 1-3 кГц, для которых порог слышимости 10^{-12} Вт/м², а болевой порог составляет 10^{26} Вт/м². Субъективное восприятие характеризуется высотой, тембром и уровнем громкости. Ультразвук широко применяется для диагностики и в физиотерапии, а также химиотерапии и биотехнологии.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Что называется амплитудой колебаний?
- 2) Два гармонических колебания при сложении погасились. Охарактеризуйте их (направления, амплитуды, частоты и фазы).
- 3) Что называется волной и какими параметрами она характеризуется?
- 4) Что называется длиной волны? Разностью хода волн? Что такое фронт волны?
- 5) Каким образом создаются стоячие волны?
- 6) Каков диапазон частот звуковых волн? Может ли звук распространяться в вакууме?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Теоретическая механика: Учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования / С.В. Болотин, [и др.]. – М.: Издательский центр «Академия», 2010 г. - 432 с.

Дополнительная

1. **Грабовский, Р.И.** Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

Лекция 5

СТАТИСТИЧЕСКИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Молекулярная физика и термодинамика – разделы физики, в которых изучаются зависимости свойств тел от их строения, взаимодействия между частицами, из которых состоят тела, и характера движения частиц. Для исследования физических свойств макроскопических систем, связанных с огромным числом содержащихся в них атомов и молекул, применяют два качественно различных и взаимно дополняющих друг друга метода: статистический (или молекулярно-кинетический) и термодинамический.

5.1. Статистический метод

– это метод исследования систем из большого числа частиц, оперирующий статистическими закономерностями и средними (усредненными) значениями физических величин, характеризующих всю систему. Этот метод лежит в основе молекулярной физики – раздела физики, изучающего строение и свойства вещества исходя из молекулярно-кинетических представлений, основывающихся на том, что все тела состоят из атомов, молекул или ионов находящихся в непрерывном хаотическом движении.

5.2 Термодинамический метод

– это метод исследования систем из большого числа частиц, оперирующий величинами, характеризующими систему в целом (например, давление, объем, температура) при различных превращениях энергии, происходящих в системе, не учитывая при этом внутреннего строения изучаемых тел и характера движения отдельных частиц. Этот метод лежит в основе термодинамики – раздела физики, изучающего общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями. Термодинамика имеет дело с термодинамической системой – совокупностью макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами (внешней средой).

Термодинамические системы, не обменивающиеся с внешней средой ни энергией, ни веществом, называются замкнутыми. Основа термодинамического метода – определение состояния термодинамической системы. Состояние системы задается термодинамическими параметрами (параметрами состояния) – совокупностью физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы. Обычно в качестве параметров состояния выбирают температуру, давление и объем. Параметры состояния системы могут изменяться. Любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением хотя бы одного из ее термодинамических параметров, называется термодинамическим процессом. Если для данной системы внешние условия не изменяются и состояние системы с течением времени не меняется, то эта система находится в термодинамическом равновесии.

5.3 Уравнения неразрывности и Бернулли

Движение жидкости называется течением, а совокупность частиц движущейся жидкости – потоком. Графически движение жидкостей изображается с помощью линий тока, которые проводятся так, что касательные к ним совпадают по направлению с вектором скорости жидкости в данный момент времени. Линии тока проводятся так, чтобы густота их была больше там, где больше скорость течения жидкости, и меньше там, где жидкость течет медленнее. Часть жидкости, ограниченная линиями тока, называется трубкой тока. Течение жидкости называется установившимся (или стационарным), если форма и расположение линий тока, а также значения скоростей в каждой ее точке со временем не изменяются.

Рассмотрим трубку тока, выбрав два сечения S_1 и S_2 , перпендикулярны направлению скорости. За время Δt через сечение S проходит объем жидкости $Sv\Delta t$. Если жидкость несжимаема, то через S_2 за 1с пройдет такой же объем жидкости, что и через S_1 :

$S_1v_1 = S_2v_2$ или $Sv = const$ - уравнение неразрывности. Произведение скорости течения несжимаемой жидкости на поперечное сечение трубки тока есть величина постоянная для данной трубки тока. Идеальной жидкостью называется воображаемая жидкость, в которой отсутствуют силы внутреннего трения. В стационарно текущей идеальной жидкости выбираем трубку тока, ограниченную сечениями S_1 и S_2 . По закону сохранения энергии изменение полной энергии жидкости массой m в местах сечений S_1 и S_2 равно работе внешних сил по перемещению этой массы жидкости: $E_2 - E_1 = A$.

$$E_1 = m v_1^2 / 2 + mgh_1, E_2 = m v_2^2 / 2 + mgh_2, A = F_1 l_1 + F_2 l_2, l_1 = v_1 \Delta t, l_2 = v_2 \Delta t,$$

$$F_1 = p_1 S_1, F_2 = -p_2 S_2. \text{ Отсюда } m v_1^2 / 2 + mgh_1 + p_1 S_1 v_1 \Delta t = m v_2^2 / 2 + mgh_2 + p_2 S_2 v_2 \Delta t$$

Согласно уравнению непрерывности, объем, занимаемый жидкостью,

$$\Delta V = S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t. \text{ Используя } m = \rho \Delta V, \text{ где } \rho - \text{плотность жидкости, получим}$$

$pv^2/2 + \rho gh + p = const$ - уравнение Бернулли, где p - статическое давление (давление жидкости обтекаемого тела); ρgh - гидростатическое давление; $pv^2/2$ - динамическое давление. Уравнение Бернулли - выражение закона сохранения энергии применительно к установившемуся течению идеальной жидкости. Из уравнения Бернулли и уравнения неразрывности следует, что при течении жидкости по трубе, имеющей различные сечения, скорость жидкости больше в местах сужения, а статическое давление больше в более широких местах.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Что такое молекулярная физика и термодинамика?
- 2) Термодинамический метод и система?
- 3) Напишите уравнение Бернулли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Пронин, В.П.** Краткий курс физики / В. П. Пронин. – Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2007 г. – 200 с.

Дополнительная

1. Основы физики и биофизики / А.И. Журавлев и др. – М. : Мир. 2005. – 384 с.

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

6.1. Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества

Основы молекулярно-кинетической теории разработаны М.В. Ломоносовым, Л.Больцманом, Дж. Максвеллом и др. Эта теория основана на следующих положениях:

1. *Все вещества состоят из мельчайших частиц – молекул.* Молекулы у сложных веществ состоят из еще более мелких частиц – атомов. Различные комбинации атомов создают виды молекул. Атом состоит из положительно заряженного ядра, окруженного отрицательно заряженной электронной оболочкой. Массу молекул и атомов измеряют в атомных единицах массы (а. е. м.). Диаметр атомов и молекул имеет порядок 10^{-8} - 10^{-7} см. Количество вещества, в котором содержится число частиц (атомов или молекул) равное числу атомов в 0,012 кг изотопа углерода C^{12} называется *молем*.

2. Число частиц, содержащих в моле (киломоле) вещества, называется *числом Авогадро*. $N^A = 6.023 \cdot 10^{26}$ кмоль $^{-1}$. Массу моля называют *молярной массой*. *Между атомами и молекулами действуют силы взаимного притяжения и отталкивания.* По мере увеличения расстояния (r) между молекулами силы отталкивания убывают быстрее, чем силы притяжения. При некотором определенном расстоянии (r^0) наступает равенство сил отталкивания и сил притяжения и молекулы находятся в состоянии устойчивого равновесия. Силы взаимодействия обратно пропорциональны n -й степени расстояния между молекулами (для f^n , $n = 7$; для f^0 , n принимает значение от 9 до 15). Расстояние r^0 между молекулами соответствует минимуму их потенциальной энергии. Для изменения расстояния, отличного от r^0 требуется затратить работу или против сил отталкивания или против сил притяжения; т.о. положение устойчивого равновесия молекул соответствует минимуму их потенциальной энергии. *Молекулы, образующие тело, находятся в состоянии непрерывного беспорядочного движения.*

Молекулы сталкиваются друг с другом, изменяют скорость как по величине, так и по направлению. При этом происходит перераспределение их общей кинетической энергии. Состоящее из молекул тело рассматривается как система движущихся и взаимодействующих частиц. Такая система молекул обладает энергией, состоящей из потенциальной энергии взаимодействия частиц и из кинетической энергии движения частиц. Эту энергию и называют *внутренней энергией тел*. Количество внутренней энергии, передаваемой между телами при теплообмене, называется *количеством теплоты (Джоуль, кал)*. Джоуль – СИ. 1 кал = 4,18 Дж. Атомы и молекулы находятся в непрерывном движении, которое называется *тепловым*. Основным свойством теплового движения является его бесперебойность (хаотичность). Для количественной характеристики интенсивности теплового движения вводится понятие температуры тела. Чем интенсивнее тепловое движение молекул в теле, тем выше его температура. При соприкосновении двух тел энергия переходит от более нагретого тела к менее нагретому и в конце концов устанавливается *состояние теплового равновесия*.

С точки зрения молекулярно-кинетических представлений *температура* есть величина, характеризующая среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул или атомов. За единицу измерения температуры тепла принят *градус*. (Сотая часть разности между температурами кипения и замерзания чистой воды при атмосферном давлении). В физику введена абсолютная температурная шкала Кельвина. Градус Цельсия равен градусу Кельвина. При температуре -273^0 С должно прекратиться поступательное движение молекул газа (абсолютный нуль), т. е. система (тело) обладает наименьшей возможной энергией.

Основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества подтверждаются многочисленными опытами и явлениями (диффузия, броуновское движение,

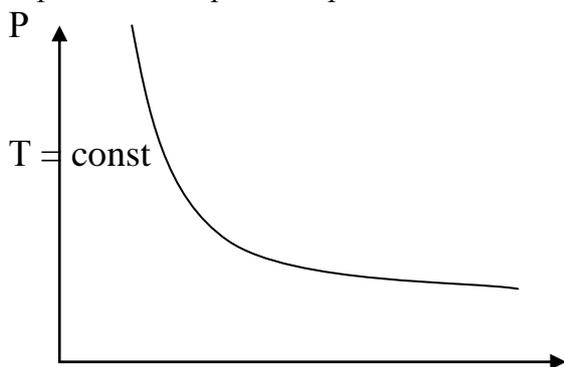
смешивание жидкостей, сжимаемость различных веществ, растворение в жидкостях твердых веществ и т. д.). Современные экспериментальные методы – рентгеноструктурный анализ, наблюдения с помощью электронного микроскопа и другие – обогатили наши представления о строении вещества. В газе между молекулами относительно большие расстояния, силы притяжения ничтожно малы. Молекулы газа стремятся всегда равномерно распределиться по всему занимаемому им объему. Газ оказывает давление на стенки сосуда, в котором он находится. Это давление обусловлено ударами движущихся молекул. При изучении кинетической теории газа рассматривают так называемый *идеальный газ*. Газ, в котором пренебрегаем силами межмолекулярного взаимодействия и объемом молекул газа. Считая, что при соударениях молекулы идеального газа представляют собой как абсолютно упругие шарики.

6.2 Основные газовые законы

Состояние некоторой массы m газа характеризуют основными параметрами: давлением P , температурой T и объемом V . Эти термодинамические параметры тесно связаны. Процессы в газе, при которых меняются его параметры состояния, называются *газовыми процессами*. Газовые процессы, в которых один из параметров остается неизменным называются *изопрцессами*. Для идеальных газов справедливы следующие законы:

Закон Бойля-Мариотта. (Бойль – англ., 1662г.; Мариотт – франц., 1667г.)

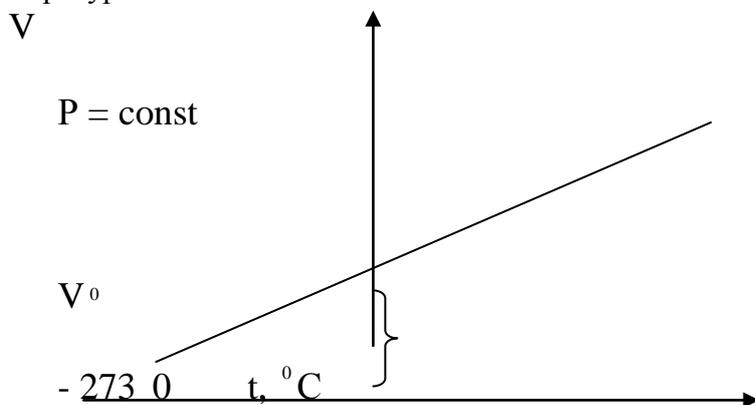
Если $T = \text{const}$ данной массы газа ($m = \text{const}$), а давление P и V – объем изменяются. Процесс называется *изотермическим*. Для данной массы газа при постоянной температуре давление газа изменяется обратно пропорционально объему. $PV = \text{const}$ Для двух состояний газа закон имеет вид: $P_1V_1 = P_2V_2$, где P_1 и V_1 - начальное состояние, P_2 и V_2 - в конечном состоянии. Графически изотермический процесс представляется в виде гиперболы, называемой *изотермой*.



$V, \text{ м}^3$

Законы Гей-Люссака. (1802 г.) Давление $P = \text{const}$ и $m = \text{const}$. Процесс изобарический.

Для данной массы газа при постоянном давлении объем газа изменяется линейно с температурой.



$V^t = V^0 (1 + dt)$, где V^0 - объем при $t = 0$ °C; V^t - объем газа при t ; d - коэффициент объемного расширения; $d = 1/273$ град⁻¹. Графически изобарический процесс представляет прямую. $V/V_0 = T/T_0$ При постоянном давлении объем газа пропорционален абсолютной температуре. Объем $V = \text{const}$. Процесс изохорический. Иногда этот закон называют *закон Шарля*. Для данной массы газа при постоянном объеме давление газа изменяется линейно с температурой. $P^t = P^0 (1 + \gamma t)$, где P^0 - давление при $t = 0$ °C; γ - термический коэффициент давления; $\gamma = 1/273$ град⁻¹. Графически изохорический процесс представляет прямую. $P/P_0 = T/T_0$ «При постоянном объеме давление газа пропорционально абсолютной температуре».

Закон Дальтона (1801 г., англ.) *Парциальным давлением газа*, входящего в газовую смесь, называется давление, которое имел бы этот газ, если бы он один занимал весь объем, представленной смеси. Давление газовой смеси равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов. $P = P^1 + P^2 + P^3 + P^4 + \dots + P^n$

Закон Авогадро (итал., 1811 г.) При одинаковых температуре и давлении моли любых газов занимают одинаковые объемы. При нормальных условиях (температура 273,16 К и давлении 1,0133 Па) этот объем равен 22,41 м³/ моль.

6.3 Уравнение Клапейрона-Менделеева

Для одного моля $PV_m = N_A k T$, где V_m - объем моля газа; $N_A \cdot k = R$; $PV_m = RT$.

В любой массе содержится m/M молей (M - молярная масса). Уравнение Менделеева-Клапейрона $PV_m \frac{m}{M} = \frac{m}{M} RT$; $PV = \frac{m}{M} RT$, где $R = 8,32$ Дж/Кмоль - универсальная газовая постоянная. Это уравнение выражает объединенный закон газового состояния.

6.4. Реальный газ. Уравнение Ван-дер-Ваальса

Молекулы реального газа взаимодействуют друг с другом и имеют конечные размеры, поэтому уравнение состояния для него иное. Это уравнение получено в 1937 году Ван-дер-Ваальсом и имеет вид

$$\left(P + \frac{m^2}{M^2} \frac{a}{V^2} \right) \left(V - \frac{m}{M} V' \right) = \frac{m}{M} RT$$

6.5 Сжижение газов

Практическое подтверждение изотерм Ван-дер-Ваальса выполнено Т. Эндрюсом в 1869г. Он экспериментировал с углекислым газом (CO₂) с помощью термостатированного цилиндра с поршнем, снабженного манометром и шкалой объемов. *Критической называется такая температура, выше которой газ, нельзя превратить в жидкость ни при каком давлении, а ниже которой можно тем при меньшем давлении, чем ниже температура.* Понятие критической температуры сыграло большую роль в физике низких температур и технике сжижения газов. Для сжижения газов применяется машина К. Линде, основанная на положительном эффекте Джоуля-Томсона. *При расширении реального газа в пустоту (то есть без совершения внешней работы) его температура понижается при низкой начальной температуре.* Имеет место (и часто применяется) отрицательный эффект Джоуля-Томсона: при высокой начальной температуре газы, расширяясь, нагреваются.

При некоторой промежуточной температуре газ, расширяясь, не охлаждается и не нагревается. Такая температура называется температурой инверсии.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Какими параметрами характеризуется состояние газа?
- 2) Какими законами описываются изохорические, изобарические и изотермические

- 3) процессы? Как изображаются эти процессы графически?
- 4) Что означает число Авогадро?
- 5) Каким образом связана шкала по Кельвину со шкалой по Цельсию?
- 6) Каков физический смысл давления и температуры?
- 7) Какой газ называется реальным?
- 8) Напишите уравнения Клапейрона-Менделеева для моля и для любой массы газа.
- 9) Какая температура называется критической?
- 10) Какой физический закон используется при сжижении газа?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1.Рогачев, Н.М. Курс физики. Учебное пособие/ Н.М. Рогачев. –С.-Петербург: Издательство «Лань», 2010 г. - 448 с.

Дополнительная

1. Грабовский, Р.И. Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

Жидкость является агрегатным состоянием вещества, промежуточным между газообразным и твердым. В газах нет закономерности во взаимном расположении молекул (хаотическое расположение). В твердых телах наблюдается дальний порядок - молекулы образуют кристаллическую решетку. В жидкостях дальний порядок отсутствует, а имеет место ближний порядок в расположении молекул – их упорядоченное расположение повторяется на расстояниях, сравнимых с межатомными. Тепловое движение молекулы в жидкости это ее колебание около определенного положения равновесия в течение некоторого времени, после чего молекула скачком переходит в новое положение, отстоящее от исходного на расстояние порядка межатомного. Радиус r молекулярного действия – расстояние (порядка 10^{-9} м), при котором можно пренебречь силами притяжения между молекулами жидкости. Сфера радиусом r называется сферой молекулярного действия. Силы, действующие на молекулу внутри объема жидкости со стороны окружающих молекул, в среднем скомпенсированы. Для молекулы, расположенной на поверхности, равнодействующая сил R направлена внутрь жидкости. Результирующие силы всех молекул поверхностного слоя оказывают на жидкость молекулярное (внутреннее) давление.

7.1 Поверхностное натяжение

Жидкости, как и твердые тела, обладают большой объемной упругостью, т.е. сопротивляются изменению своего объема. На поверхности жидкости, действующие на поверхностные молекулы со стороны жидкости и или со стороны газа различны, но т.к. жидкость находится в равновесии, то, следовательно, возникают силы, компенсирующие разницу сил, действующих на поверхностные молекулы. Эти силы называются силами поверхностного натяжения. Сила поверхностного натяжения направлена касательно к поверхности жидкости и перпендикулярна к контуру, ограничивающему поверхность. Установлено, что $F = \alpha l$, где α - коэффициент поверхностного натяжения; l - длина контура.

Коэффициент поверхностного натяжения α численно равен работе, которую необходимо совершить для увеличения поверхности жидкости на единицу площади. Другое определение α . Коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины контура, $[\alpha] = \text{Н/м}$

С ростом температуры α уменьшается и при некоторой температуре, называемой критической t_k , $\alpha = 0$.

$\alpha(t) = \alpha_0(1 - at)$. Отсюда следует, что $\alpha = 0$ при $t = 1/a \rightarrow 1/a = t_k$.

$\alpha(t) = \alpha_0(1 - t/t_k)$, при $t = t_k$ жидкое и газообразное состояние неразличимы. (о силах притяжения и отталкивания). Единица поверхностного натяжения - ньютон на метр (Н/м) или джоуль на квадратный метр (Дж/м²).

7.2 Внутреннее трение (вязкость)

Вследствие хаотического теплового движения молекул происходит обмен молекулами между слоями газа движущимися с различными скоростями, в результате чего импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, а движущегося медленнее – увеличивается (происходит перенос импульса от одного слоя к другому). Это приводит к *торможению* слоя, движущегося быстрее, и *ускорению* слоя, движущегося медленнее.

Сила внутреннего трения, возникающая в плоскости соприкосновения двух скользящих относительно друг друга слоев, пропорциональна площади из соприкосновения ΔS и градиенту скорости $\Delta v/\Delta x$ (закон Ньютона).

Коэффициент внутреннего трения не зависит от давления, так как пропорционален произведению $\langle \lambda \rangle \rho$ ($\langle \lambda \rangle$ - уменьшается, а ρ – увеличивается при возрастании давления).

Если в формуле принять $\Delta S = 1 \text{ л}^2$ и $\frac{\Delta \omega}{\Delta x} = -1 \text{ с}^{-1}$, то $F = \eta$.

То есть вязкость численно равна силе внутреннего трения, действующей на 1 м^2 площади соприкосновения параллельно движущихся слоев газа при градиенте скорости -1 с^{-1} .

Внешнее сходство математических выражений, описывающих явления переноса, обусловлено общностью лежащего в основе явлений теплопроводности, диффузии и внутреннего трения молекулярного механизма перемешивания молекул в процессе их хаотического движения.

7.3 Теплота и температура

Беспорядочное движение микроскопических частиц связано с содержанием в веществе теплоты – особой формы энергии. Эта связь достаточно очевидна на примере зависимости броуновского движения от количества сообщенного телу тепла. Макроскопическая характеристика теплового движения – температура. Температура есть мера содержащегося в теле тепла. Она же определяет направление перехода тепла – от более нагретого тела к менее нагретому. Если температуры тел одинаковы, то передачи тепла от одного тела к другому не происходит. Рассматривая теплоту как форму энергии, необходимо связать ее с кинетической энергией частиц. Чем больше нагрето тело, тем больше и кинетическая энергия его частиц. Таким образом, кинетическую энергию движения частиц так же, как и температуру, можно рассматривать как меру теплового движения. Температура — это макроскопическая характеристика тела, т. е. термодинамическая переменная, в то время как кинетическая энергия характеризует отдельную частицу. Поэтому температура должна быть связана со средней кинетической энергией, приходящейся на одну частицу в системе большого числа частиц. Среднюю кинетическую энергию частиц в системе, состоящей из N частиц, обозначим через $\langle E_k \rangle$ и определим ее следующим образом: $\langle E_k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{m_i v_i^2}{2}$. Если все

частицы одинаковы, массу частицы можно вынести из-под знака суммы: $\langle E_k \rangle = \frac{1}{2} \frac{m}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2 = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$. Будем считать что температура $T \sim 2 \langle E_k \rangle / 3 = m \langle v^2 \rangle / 3$.

Для того чтобы выразить температуру в градусах, нужно ввести коэффициент пропорциональности, показывающий, сколько джоулей соответствует одному градусу. Он называется постоянной Больцмана и, как показывают измерения, равен $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, где К означает градус Кельвина – единицу измерения температуры, используемую в физической шкале. Тогда соотношение между температурой в градусах и энергией в джоулях запишется в виде: $k_B T = \frac{1}{3} m \langle v^2 \rangle$ или $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} k_B T$.

Принятая в физике шкала температур называется абсолютной шкалой, или шкалой Кельвина. В этой шкале температура замерзания воды, то есть 0°C , соответствует $273,15$ градусов Кельвина, что обозначается $273,15 \text{ К}$. При $T = 0$ всякое тепловое движение частиц в веществе прекращается. Эта температура имеет название абсолютного нуля. Подчеркнем статистический характер определения температуры, поскольку она связана со средней энергией частиц. Поэтому можно говорить лишь о температуре системы достаточно большого числа частиц – макроскопической системы, и нельзя говорить о температуре одной или, допустим, десяти частиц. В процессе измерения температуры происходит обмен теплом между частицами – объектом измерения и измерительным прибором – термометром. Понятие температуры тела приобретает смысл в том случае, если обмен теплом между телом и прибором в процессе измерения температуры мало изменяет состояние тела.

7.4 Внутренняя энергия газа

Внутренней энергией тела называют часть его полной энергии за вычетом кинетической энергии движения тела как целого и потенциальной энергии тела во внешнем поле. Таким образом, во внутреннюю энергию входят кинетическая энергия поступательного и вращательного движений молекул, потенциальная энергия их взаимодействия, энергия колебательного движения атомов в молекулах, а также энергия различных видов движения частиц в атомах. В идеальном газе потенциальная энергия взаимодействия молекул пренебрежимо мала и внутренняя энергия равна сумме энергий отдельных молекул $E_{вн} = \sum_i E_i$, где E_i – энергия отдельной молекулы. До сих пор мы пользовались представлением о молекулах как о материальных точках. Кинетическая энергия молекул считалась совпадающей с энергией их поступательного движения, а средняя кинетическая энергия молекулы полагалась равной $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} k_B T$. Эта энергия распределяется между тремя поступательными степенями свободы.

Ввиду полной беспорядочности движения молекул в газе все направления перемещения молекулы равновероятны. Поэтому на каждую степень свободы поступательного движения приходится в среднем энергия $\langle E_i \rangle = \frac{1}{3} \langle E_k \rangle = \frac{1}{2} k_B T$. Представление о молекулах как о материальных точках оправдывается только для одноатомных газов. В случае многоатомных газов нужно рассматривать молекулы как сложные системы, способные вращаться как целое, причем атомы в них могут совершать колебания вблизи своих положений равновесия. Общее число степеней свободы молекулы при этом увеличивается.

Положение абсолютно твердого тела можно определить, задав три координаты его центра инерции и три угла, характеризующие возможные повороты тела в пространстве. Таким образом, абсолютно твердое тело имеет шесть степеней свободы – три поступательных и три вращательных.

N материальных точек, не связанных между собой, имеют $3N$ степеней свободы. Поскольку положение в пространстве системы как целого точно так же, как и положение абсолютно твердого тела определяется шестью параметрами, упомянутыми выше, то число степеней свободы такой системы равно $3 \cdot N - 6$. Это число соответствует возможным смещениям точек относительно друг друга около своих положений равновесия. Такой тип движения называется колебательным. Значит, количество колебательных степеней свободы и есть $3 \cdot N - 6$.

Энергия молекул, состоящих из некоторого числа атомов, не жестко связанных друг с другом, будет теперь складываться из энергии поступательного движения, вращательной энергии и энергии колебаний $E_i = E_{поступ} + E_{вращ} + E_{колеб}$. Средняя энергия молекулы должна равняться: $\langle E_i \rangle = i \cdot k_B T$, где i – сумма числа поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы: $i = i_{поступ} + i_{вращ} + 2 \cdot i_{колеб}$.

Внутренняя энергия на один моль идеального газа $E_M = \frac{i}{2} N_A k_B T = \frac{i}{2} R T$.

7.5 Теплоемкость

Количество тепла, при получении которого температура тела повышается на один градус, называется теплоемкостью. Согласно этому определению $C = \frac{dQ}{dT}$. Теплоемкость различается в зависимости от того, при каких условиях происходит нагревание тела – при постоянном объеме или при постоянном давлении. Если нагревание тела происходит при постоянном объеме, т. е. $dV = 0$, то работа равна нулю. В этом случае передаваемое телу

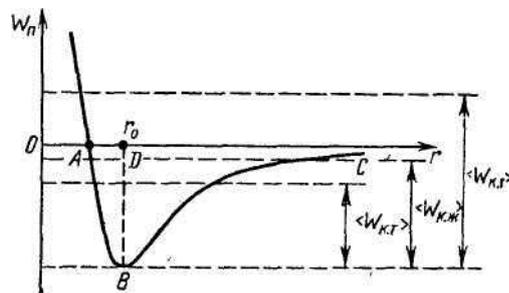
тепло идет только на изменение его внутренней энергии, $dQ = dE$, и в этом случае теплоемкость равна изменению внутренней энергии при изменении температуры на 1 К, т. е. $C_V = \frac{dE}{dT}$. Поскольку для газа $E = \frac{iRT}{2}$, то $C_V = \frac{i}{2}R$. Эта формула определяет теплоемкость 1 моля идеального газа, называемую молярной. При нагревании газа при постоянном давлении его объем меняется, сообщенное телу тепло идет не только на увеличение его внутренней энергии, но и на совершение работы, т.е. $dQ = dE + PdV$. Теплоемкость при постоянном давлении $C_P = \frac{dE}{dT} + P \frac{dV}{dT}$. Для идеального газа $PV = RT$ и поэтому $PdV = RdT$. Учитывая это, найдем $C_P = i \frac{R}{2} + R = C_V + R$. Отношение $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ представляет собой величину, характерную для каждого газа и определяемую числом степеней свободы молекул газа.

7.6 Явления переноса

Явлениями переноса называются необратимые процессы в термодинамически неравновесных системах, в которых происходит пространственный перенос энергии (теплопроводность), массы (диффузия), импульса (внутреннее трение). Для простоты ограничимся одномерными случаями, выбрав ось x так, чтобы она была направлена в направлении переноса. $\Delta(N\gamma) = -\frac{1}{3} \frac{\Delta(n_0\gamma)}{\Delta x} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \Delta S \Delta t$.

7.7 Особенности строения жидкостей и твердых тел

Существенное различие между газом, с одной стороны, и твердым, и жидким телами – с другой, состоит в том, что газ занимает весь предоставленный ему объем сосуда, тогда как жидкость или твердое тело, помещенные в сосуд, занимают в нем лишь вполне определенный объем. Это обусловлено различием в характере теплового движения молекул в газах и в твердых и жидких телах. Молекулы газа практически не связаны между собой межмолекулярными силами. Во всяком случае средняя кинетическая энергия (W_K) теплового движения молекул газа гораздо больше средней потенциальной энергии (W_P), обусловленной силами сцепления между ними. В соответствии с этим диффузия в газах протекает достаточно быстро.



В твердых и жидких телах силы сцепления между молекулами (атомами, ионами) играют уже существенную роль, удерживая их на определенных расстояниях друг от друга. В этих телах средняя потенциальная энергия, обусловленная силами сцепления между молекулами, больше средней кинетической энергии теплового движения молекул ($\langle W_n \rangle > \langle W_K \rangle$). Иначе говоря, в среднем кинетическая энергия молекул недостаточна для преодоления сил притяжения между ними. В твердом теле частицы (молекулы, атомы, ионы) расположены в геометрически строго определенном порядке, образуя кристаллическую решетку. Частицы совершают колебательные движения около своих положений равновесия. Переходы частиц с

места на место в твердом теле возможны, но весьма редки. Поэтому, хотя диффузия существует и в твердых телах, она протекает здесь еще медленнее, чем в жидкостях.

Таким образом, существенное различие между газом, с одной стороны, и твердым и жидким телами – с другой, обусловлено тем, что у молекул газа средняя кинетическая энергия теплового движения больше глубины потенциальной ямы, а у молекул твердого и жидкого тел – меньше глубины потенциальной ямы.

Благодаря тому, что молекулы твердого тела связаны между собой прочнее, чем молекулы жидкости, для твердого тела в отличие от жидкости характерно постоянство не только объема, но и формы. Рассмотрим несколько подробнее вопрос о кристаллическом строении твердого тела.

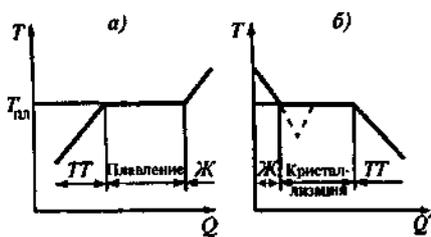
7.8 Изменение агрегатного состояния

И в жидкостях и в твердых телах всегда есть некоторое число молекул, энергия которых достаточна для преодоления притяжения к другим молекулам, и которые способны покинуть поверхность жидкости или твердого тела. Такой процесс для жидкости называется испарением (или парообразованием), для твердых тел – сублимацией (или возгонкой).

Конденсацией называется переход вещества вследствие его охлаждения или сжатия из газообразного состояния в жидкое. Если число молекул, покидающих жидкость за единицу времени через единичную поверхность, 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.

Плавлением называется переход вещества из кристаллического (твердого) состояния в жидкое. Плавление происходит при определенной, возрастающей с увеличением внешнего давления, температуре плавления $T_{пл}$.

В процессе плавления теплота Q , сообщаемая веществу, идет на совершение работы по разрушению кристаллической решетки, и поэтому $T_{пл} = \text{const}$ до расплавления всего кристалла. Количество теплоты L , необходимое для расплавления 1 кг вещества, называется удельной теплотой плавления. Если жидкость охлаждать, то процесс пойдет в обратном направлении, Q' – количество теплоты, отдаваемое телом при кристаллизации): сначала температура жидкости понижается, затем при постоянной температуре, равной $T_{пл}$, начинается кристаллизация. Для кристаллизации вещества необходимо наличие центров кристаллизации – кристаллических зародышей, которыми могут быть как кристаллики образующегося вещества, так и любые инородные включения. Если в чистой жидкости нет центров кристаллизации, то она может быть охлаждена до температуры, меньшей температуры кристаллизации, образуя при этом переохлажденную жидкость. Аморфные тела являются переохлажденными жидкостями.



Вопросы для самоконтроля:

- 1) Какие свойства жидкости вы знаете?
- 2) Как происходит обмен молекулами между слоями газа?
- 3) Какой закон описывает внутреннее трение?
- 4) Что такое температура?
- 5) Как определить среднюю кинетическую энергию?
- 6) Какие величины используются для характеристики средней скорости движения частиц в системе?
- 7) Дать определение внутренней энергии газа?
- 8) Понятие теплоемкости?
- 9) Дать определение явлению переноса?
- 10) Какие агрегатные состояния вы знаете?
- 11) Процессы испарения и сублимации?
- 12) Процесс плавления?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

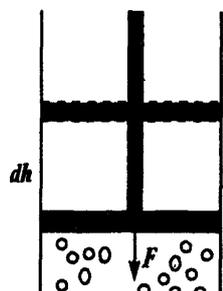
1. Телесин, Р.В. Молекулярная физика: Учебное пособие 3-е издание /Р.В. Телесин. –С. - Петербург: Издательство «Лань», 2009 г. – 368 с.

Дополнительная

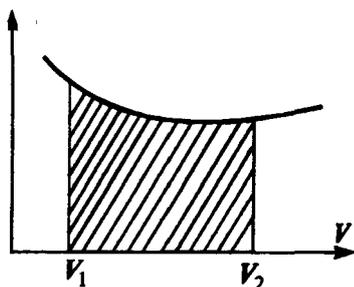
1. Грабовский, Р.И. Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

8.1 Первое начала термодинамики



Внутренняя энергия системы может изменяться за счет энергии, сообщаемой системе извне. Эта энергия может сообщаться системе посредством двух процессов: либо за счет работы, производимой внешними силами над системой, либо за счет передачи ей тепла. Рассмотрим газ, сжимаемый в сосуде поршнем под действием силы F (рис.). Пусть под действием этой силы поршень переместился на расстояние dh , сжав газ. Работа силы на пути dh — $dA = Fdh$.



Разделив величину силы на площадь поршня, получим давление P , а умножив на S , получим изменение объема газа dV . Таким образом, производимая над газом работа $dA = PdV$. Такую же по величине работу совершает газ при расширении, перемещая поршень. При этом dV положительно, если газ расширяется, и отрицательно при сжатии газа. Соответственно работа dA положительна или отрицательна: в первом случае система производит работу сама, во втором — внешние силы производят работу над системой. Графически процесс изменения состояния газа при его расширении или сжатии изображается на кривой P, V участком 1-2 на рис. Полная работа, совершаемая газом, при

расширении от V_1 до V_2 : $A = \int_{V_1}^{V_2} PdV$. Эта работа численно равна заштрихованной площади, заключенной под кривой $P(V)$. Рассмотрим способы передачи телу тепла. При соприкосновении тел либо при взаимодействии тел через излучение, изменение внутренней энергии происходит за счет передачи энергии хаотически движущихся частиц одного тела частицам другого. Энергия, передаваемая от одного тела другому, представляет собой теплоту. Обозначим ее через Q . Теплота измеряется в тех же единицах, что и энергия. Связь между переданным теплом, изменением внутренней энергии системы и произведенной работой выражается уравнением $dQ = dE + dA = dE + PdV$. Это уравнение представляет собой закон сохранения энергии применительно к механической и тепловой энергии макроскопических тел. Он получил название первого начала термодинамики. Важно учесть, что в выражении работа и количество тепла не есть полные дифференциалы каких-либо величин, в то время как внутренняя энергия является таковой. Можно говорить о внутренней энергии в данном состоянии, а не о количестве тепла или работы, которыми обладает тело. Нельзя делить энергию тела на тепловую и механическую, речь идет лишь об изменении внутренней энергии тела за счет количества тепла, переданного ему или отданного им, и количества совершенной работы. Это разделение неоднозначно и зависит от начального и конечного состояний тела и от характера совершаемого процесса. Поэтому, например, в процессе перехода из состояния 1 в состояние 2 изменение внутренней энергии может быть равно нулю, а тело при этом может приобрести или потерять энергию.

8.2 Второе начало термодинамики

Любой необратимый процесс в замкнутой системе происходит так, что энтропия системы при этом возрастает (*закон возрастания энтропии*). Первое начало термодинамики выражает закон сохранения и превращения энергии применительно к термодинамическим процессам. Второе начало термодинамики определяет направление протекания термодинамических процессов, указывая, какие процессы в природе возможны, а какие — нет.

Существуют ещё две формулировки второго начала термодинамики, эквивалентных закону возрастания энтропии:

1) **по Кельвину:** невозможен круговой процесс, *единственным результатом* которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу;

2) **по Клаузиусу:** невозможен круговой процесс, *единственным результатом* которого является передача теплоты от менее нагретого тела к телу более нагретому.

8.3 Тепловая машина. К. п. д. тепловой машины

Термодинамика как наука развилась в начале XIX века из необходимости объяснить работу тепловых машин. Термодинамические расчеты необходимы при конструировании любых машин, способных производить работу. Тепловой машиной называется устройство, использующее тепловую энергию для совершения механической работы. В этом смысле и паровой двигатель, и атомный реактор эквивалентны. Тепловая машина состоит из нагревателя, рабочего тела и охладителя рабочего тела. Охладителем, в конечном счете, служит окружающая среда. Тепловая машина работает по принципу замкнутого цикла, совершая круговой процесс. В ходе прямого цикла рабочее тело, например, пар, получив от нагревателя количество тепла Q_1 , расширяется от объема V_1 до объема V_3 . Согласно первому закону термодинамики, это тепло расходуется на нагревание рабочего тела и на совершение механической работы $Q_1 = E_2 - E_1 + A_{13}$, где $E_2 - E_1$ – изменение внутренней энергии рабочего тела при переходе из состояния 1 в состояние 3. При обратном цикле над газом производится работа: газ сжимается и передает охладителю количество тепла $-Q_2 = E_1 - E_2 + A_{31}$.

Складывая оба уравнения, получим $Q_1 - Q_2 = A_{13} + A_{31} = A$, где A – полная работа, совершенная машиной за один цикл.

Отношение полезной работы, совершенной машиной, к количеству полученного тепла составляет КПД тепловой машины $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1}$. Понятно, что КПД машины всегда меньше единицы, поскольку не все количество полученного тепла переходит в полезную работу. В реальных тепловых машинах КПД, очевидно, еще меньше, так как часть тепла теряется безвозвратно в процессе работы машины. Для получения максимального КПД следует рассмотреть рабочий цикл, образованный обратимыми процессами.

8.4 Понятие об энтропии

Мы убедились, что КПД необратимого кругового процесса всегда меньше, чем КПД при обратимом цикле. Этот результат можно сформулировать в следующем виде:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Знак равенства соответствует случаю обратимых процессов. Отсюда нетрудно получить соотношение, которое играет важную роль в

термодинамике: $\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} \leq 0$. Величина $\frac{Q}{T}$ называется энтропией. Она, как видно из полученного соотношения, остается неизменной при обратимом процессе и возрастает, если термодинамический процесс необратим. Энтропия – важная термодинамическая характеристика системы, такая же, как, например, внутренняя энергия. Утверждение, что при необратимых процессах энтропия замкнутой системы возрастает, составляет содержание *второго начала термодинамики*. Возрастание энтропии системы при необратимом процессе выражает тот факт, что тепло само по себе не может переходить от менее нагретых к более нагретым телам. Последнее утверждение можно рассматривать также как формулировку второго начала термодинамики. Поскольку КПД реальной тепловой машины всегда меньше, чем КПД идеальной машины (работающей по циклу Карно), становится очевидной невозможность создания так называемого вечного двигателя второго рода – устройства, осуществляющего круговорот тепла в природе и одновременно превращающего все полученное тепло в

механическую работу. Поскольку энтропия остается постоянной при обратимом характере процесса и возрастает при необратимых процессах, энтропию рассматривают как меру необратимости термодинамического процесса. В состоянии термодинамического равновесия энтропия системы максимальна. Свойства энтропии: энтропия изолированной системы при протекании необратимого процесса возрастает; энтропия системы, находящейся в равновесном состоянии, максимальна.

Утверждение о том, что энтропия изолированной системы может только возрастать (либо по достижении максимального значения оставаться неизменной), носит название закона возрастания энтропии или второго начала термодинамики. Иначе можно сказать, что энтропия изолированной системы не может убывать. Итак, при протекании в изолированной системе необратимого процесса энтропия возрастает, т. е. выполняется соотношение $dS > 0$. В общем случае $dS \geq 0$.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Что определяет первый и второй законы термодинамики?
- 2) Сформулируйте второй закон термодинамики, эквивалентный закону возрастания энтропии?
- 3) Дать формулировку тепловой машине?
- 4) Из чего состоит Цикл Карно?
- 5) Понятие энтропия?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Рогачев, Н.М. Курс физики. Учебное пособие / Н.М. Рогачев. – С.-Петербург: Издательство «Лань», 2010 г. - 448 с.

Дополнительная

1. Грабовский, Р.И. Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

Лекция 9

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

9.1 Электрический заряд

Электростатика – раздел учения об электричестве, изучающий взаимодействие неподвижных электрических зарядов и свойства постоянного электрического поля.

Электрический заряд – это *внутреннее свойство* тел или частиц, характеризующее их способность к электромагнитным взаимодействиям. Единица электрического заряда – кулон (Кл) – электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 ампер за время 1 секунда. Существует элементарный (минимальный) электрический заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Носитель элементарного отрицательного заряда – электрон. Его масса $m_e = 9,1110 \cdot 10^{-31}$ кг. Носитель элементарного положительного заряда – протон. Его масса $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

Фундаментальные свойства электрического заряда установленные опытным путем: существует в двух видах: *положительный и отрицательный*; одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются; электрический заряд *инвариантен* – его величина не зависит от системы отсчета, т.е. от того, движется он или покоится; электрический заряд *дискретен* – заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда e ; электрический заряд *аддитивен* – заряд любой системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему; электрический заряд подчиняется закону сохранения заряда: алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри данной системы. Под замкнутой системой в данном случае понимают систему, которая не обменивается зарядами с внешними телами. В электростатике используется физическая модель – точечный электрический заряд – заряженное тело, форма и размеры которого несущественны в данной задаче.

Закон сохранения электрических зарядов в замкнутой системе: $Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \text{const}$
Дискретность электрических зарядов: $Q = ne$, где $n = 1, 2, \dots$ $e = \pm 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный электрический заряд
Закон Кулона в векторной форме: $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^3} \vec{r}$, в скалярной форме: $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$, где F_{12} - сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме; r - расстояние между зарядами; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная
Линейная плотность зарядов: $\tau = \frac{dQ}{dl}$ Поверхностная плотность зарядов: $\sigma = \frac{dQ}{ds}$ Объемная плотность зарядов: $\rho = \frac{dQ}{dV}$

9.2 Диэлектрическая проницаемость среды

Вследствие поляризации на поверхности диэлектрика появляются некомпенсированные заряды, которые называются *связанными*. Поле E' внутри диэлектрика, создаваемое связанными зарядами направлено против внешнего поля E_0 , создаваемого свободными зарядами. Результирующее поле внутри диэлектрика $E = E_0 - E'$ В нашем примере поле, создаваемое двумя бесконечно заряженными плоскостями с поверхностной плотностью зарядов σ' : $E' = \sigma' / \epsilon_0$. Поэтому $E = E_0 - \sigma' / \epsilon_0$ Полный дипольный момент диэлектрической пластинки с толщиной di площадью грани S : $p_V = PV = PSd$, с другой стороны $p_V = qd = \sigma'Sd$. Отсюда $\sigma' = P$. Безмерная величина $\epsilon = 1 + \chi = E_0 / E$ называется *диэлектрической проницаемостью среды*. Она характеризует

способность диэлектриков поляризоваться в электрическом поле, показывает во сколько раз поле ослабляется диэлектриком.

9.3 Напряженность и потенциал электрического поля

Электростатическим полем называется поле, создаваемое неподвижными электрическими зарядами. Электростатическое поле описывается двумя величинами: **потенциалом** (энергетическая скалярная характеристика поля) и **напряженностью** (силовая векторная характеристика поля). **Напряженность электростатического поля** – векторная физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд q_0 , помещенный в данную точку поля. **Единица напряженности электростатического поля – ньютон на кулон (Н/Кл):** $1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$, где V (вольт) – единица потенциала электростатического поля. **Направление вектора E совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.** Если поле создается **положительным** зарядом, то вектор E направлен вдоль радиуса-вектора от заряда во внешнее пространство (отталкивание пробного положительного заряда). Если поле создается **отрицательным** зарядом, то вектор E направлен к заряду (притяжение). **Графически электростатическое поле изображают с помощью линий напряженности** – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора E . Линиям напряженности приписывается направление, совпадающее с направлением вектора напряженности. Так как в данной точке пространства вектор напряженности имеет лишь одно направление, то линии напряженности никогда не пересекаются. Для **однородного поля** (когда вектор напряженности в любой точке постоянен по модулю и направлению) линии напряженности параллельны вектору напряженности. Если поле создается точечным зарядом, то линии напряженности – радиальные прямые, выходящие из заряда, если он положителен, и входящие в него, если заряд отрицателен.

Потенциальные поля. Работа любого электростатического поля при перемещении заряженного тела из одной точки в другую также не зависит от формы траектории, как и работа однородного поля. На замкнутой траектории работа электростатического поля всегда равна нулю. Поля, обладающие таким свойством, называют потенциальными. Потенциальный характер электростатического поля, как можно показать, вытекает из закона сохранения энергии. Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле пропорциональна величине заряда. Это справедливо как для однородного поля, так и для любого другого. Следовательно, отношение потенциальной энергии к заряду не зависит от помещенного в поле заряда. Это позволяет ввести новую количественную характеристику поля – потенциал. Потенциалом электростатического поля называют отношение энергии заряда в поле к величине этого заряда. Иными словами, потенциал представляет собой энергию единичного заряда в поле. Согласно данному определению потенциал $\varphi = W/q$.

Напряженность поля E является вектором и представляет собой характеристику поля: определяет силу, действующую на q в данной точке поля. Потенциал φ – скаляр, это энергетическая характеристика поля: определяет потенциальную энергию заряда q в данной точке поля. Подобно потенциальной энергии, значение потенциала в данной точке зависит от выбора нулевого уровня для отсчета потенциала. Практическое значение имеет не сам потенциал в точке, а изменение потенциала, которое не зависит от выбора нулевого уровня отсчета потенциала. Так как потенциальная энергия $W = q\varphi$, то работа

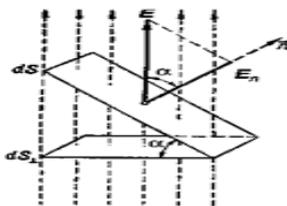
$$A = -(W_2 - W_1) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = -q \Delta \varphi$$

9.4 Связь между напряженностью и потенциалом

Для потенциального поля, между потенциальной (консервативной) силой и потенциальной энергией существует связь: $E = -\frac{\Delta U}{\Delta x} = -\text{grad} \varphi$. Напряженность поля равна по величине и

противоположна по направлению градиенту потенциала. Знак минус показывает, что вектор E направлен в сторону убывания потенциала.

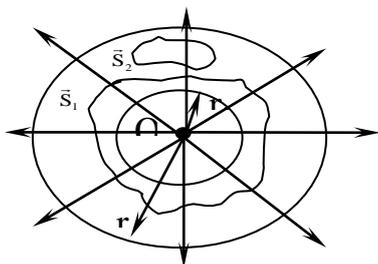
9.5 Поток вектора



Чтобы с помощью линий напряженности можно было характеризовать не только направление, но и значение напряженности электростатического поля, их проводят с определенной густотой: число линий напряженности, пронизывающих единицу площади поверхности, перпендикулярную линиям напряженности, должно быть равно модулю вектора E . Тогда число линий напряженности, пронизывающих элементарную площадку dS , равно $E dS \cos \alpha = E_n dS$, где E_n - проекция вектора E на нормаль n к площадке dS . (Вектор n - единичный вектор, перпендикулярный площадке dS). Величина $d\Phi_E = E \cdot dS \cos \alpha = E_n dS = E_n dS$ называется поток вектора напряженности через площадку dS . Здесь $dS = dS n$ - вектор, модуль которого равен dS , а направление вектора совпадает с направлением n к площадке.

9.6 Теорема Остроградского-Гаусса

Теорема позволяет найти поток вектора электростатической индукции через замкнутую поверхность, внутри которой находятся электрические заряды, частности Q .



1. Рассчитаем поток индукции N через поверхность сферы радиуса r_1 :

$$N = \sum D \Delta \cos \alpha$$

$$\alpha = 0; \cos \alpha = 1; S = 4\pi r_1^2$$

$$N = \sum D \Delta S = D \sum \Delta S = 4\pi r_1^2 D$$

$$\text{учитывая } D_{т.з} = \frac{1Q}{4\pi r_1^2} \text{ (СИ)}$$

$$N = \frac{Q}{4\pi r_1^2} \cdot 4\pi r_1^2 = Q$$

Если поток через замкнутую поверхность создается n зарядами, то на основании имеем:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n Q_i$$

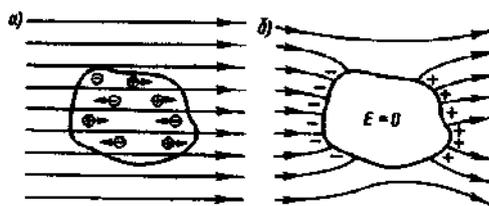
Теорема Гаусса-Остроградского. Поток вектора электростатической индукции через любую замкнутую поверхность численно равен алгебраической сумме находящихся внутри этой поверхности зарядов.

9.7 Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Если поместить проводник во внешнее электростатическое поле или его зарядить, то на заряды проводника будет действовать электростатическое поле, в результате чего они начнут перемещаться до тех пор, пока не установится равновесное распределение зарядов, при котором электростатическое поле внутри проводника обращается в нуль $E = 0$.

Иначе, если бы поле не было равно нулю, то в проводнике возникло бы упорядоченное движение зарядов без затраты энергии от внешнего источника, что противоречит закону сохранения энергии. Следствия этого ($E = -\text{grad} \phi = 0 \Rightarrow \phi = \text{const}$): потенциал во всех точках проводника **одинаков**; поверхность проводника является **эквипотенциальной**; вектор

Енаправлен по **нормали** к каждой точке поверхности. При помещении нейтрального проводника во внешнее поле свободные заряды (электроны и ионы) начнут перемещаться: положительные – по полю, а отрицательные – против поля.



На одном конце проводника будет *избыток* положительных зарядов, на другом – отрицательных. Эти заряды называются **индуцированными**.

Процесс будет продолжаться до тех пор, пока напряженность поля **внутри проводника** не станет **равной нулю**, а линии напряженности вне проводника – **перпендикулярными** его поверхности. Если проводнику сообщить некоторый заряд q , то **некомпенсированные заряды** располагаются **только на поверхности** проводника, причем $D = \sigma n$ $E = \sigma / \epsilon_0 \epsilon$, где σ – поверхностная плотность зарядов, и ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник.

Нейтральный проводник, внесенный в электростатическое поле, **разрывает** часть линий напряженности; они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных. Индуцированные заряды распределяются на **внешней** поверхности проводника. Явление перераспределения поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле называется **электростатической индукцией**.

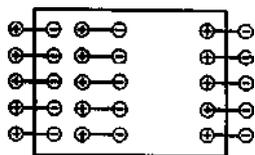
Диэлектриками называются вещества, которые при обычных условиях практически не проводят электрический ток. Диэлектрик, как и всякое другое вещество, состоит из атомов или молекул, каждая из которых в целом электрически нейтральна. Если заменить положительные заряды ядер молекул суммарным зарядом $+q$, находящимся в, так сказать, "центре тяжести" положительных зарядов, а заряд всех электронов – суммарным отрицательным зарядом $-q$, находящимся в "центре тяжести" отрицательных зарядов, то молекулы можно рассматривать как **электрические диполи с электрическим моментом**. Различают три типа диэлектриков. **Диэлектрики с неполярными молекулами**, симметричные молекулы которых в отсутствие внешнего поля имеют нулевой дипольный момент.

Диэлектрики с полярными молекулами, молекулы которых вследствие асимметрии имеют ненулевой дипольный момент. **Ионные диэлектрики**. Ионные кристаллы представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков. Внесение диэлектриков во внешнее электрическое поле приводит к возникновению отличного от нуля результирующего электрического момента диэлектрика.

Поляризацией диэлектрика называется процесс ориентации диполей или появления под воздействием электрического поля ориентированных по полю диполей.

Соответственно трем видам диэлектриков различают три вида поляризации.

1) **Электронная**, или **деформационная**, **поляризация** диэлектрика с неполярными молекулами – за счет деформации электронных орбит возникает индуцированный дипольный момент у атомов или молекул диэлектрика.



2) **Ориентационная**, или **дипольная**, **поляризация** диэлектрика с полярными молекулами – ориентация имеющихся дипольных моментов молекул по полю (эта ориентация тем сильнее, чем больше напряженность электрического поля и чем ниже температура).

3) **Ионная поляризация** диэлектрика с ионными кристаллическими решетками – смещение подрешетки положительных ионов вдоль поля, а отрицательных ионов против поля приводит к возникновению дипольных моментов.

9.8 Электрическая емкость

Рассмотрим **уединенный проводник** –проводник, удаленный от других тел и зарядов. Из опыта следует, что разные проводники, будучи одинаково заряженными, имеют разные потенциалы.

Физическая величина C , равная отношению заряда проводника q к его потенциалу φ , называется электрической емкостью этого проводника. $C = q/\varphi$. *Емкость уединенного проводника численно равна заряду, который нужно сообщить этому проводнику для того, чтобы изменить его потенциал на единицу.* Она зависит от формы и размеров проводника и от диэлектрических свойств окружающей среды. Емкости геометрически подобных проводников пропорциональны их линейным размерам.

Единица емкости –фарад (Ф): 1Ф - емкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1В при сообщении ему заряда 1Кл. Емкостью 1Ф обладает шар с радиусом $R = 9 \cdot 10^6$ км. Емкость Земли 0,7мФ.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Электрический заряд?
- 2) Свойства электрического заряда?
- 3) Понятие диэлектрической проницаемости среды?
- 4) Что такое электростатическое поле?
- 5) Какими величинами описывается электростатическое поле?
- 6) Поток вектора напряженности?
- 7) Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме?
- 8) Какие заряды называются индуцированными?
- 9) Дать формулировку электростатической индукцией?
- 10) Сколько видов поляризации вы знаете, назовите их?
- 11) Уединенный проводник?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Пронин, В.П.** Краткий курс физики / В. П. Пронин. – Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2007 г. – 200 с.

Дополнительная

1. **Грабовский, Р.И.** Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

Лекция 10

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПРОВОДНИКАХ

10.1 Сила тока и плотность тока

Электродинамика –раздел учения об электричестве, в котором рассматриваются явления и процессы, обусловленные движением электрических зарядов. **Электрическим током** называется упорядоченное движение электрических зарядов. За **направление** тока принимают направление движения положительных зарядов. Количественной мерой электрического тока служит **сила тока** I – скалярная физическая величина, равная отношению заряда dq , переносимого сквозь рассматриваемую поверхность за малый промежуток времени, к величине dt этого промежутка: $I = dq/dt$. Для постоянного тока: $I = q/t$, где q – электрический заряд, проходящий за время t через поперечное сечение проводника. **Единица силы тока** – ампер (А). Для характеристики направления электрического тока в разных точках рассматриваемой поверхности и распределения силы тока по этой поверхности служит **вектор плотности тока** j . Сила тока сквозь произвольную поверхность S определяется как поток вектора плотности тока $I = \int j dS$, где $dS = n dS$ (n – единичный вектор нормали (орт) к площадке dS). **Плотностью электрического тока** называется вектор j , совпадающий с направлением электрического тока в рассматриваемой точке и численно равный отношению силы тока dI сквозь малый элемент поверхности, **ортогональной** направлению тока, к площади dS_{\perp} этого элемента: $j = dI/dS_{\perp}$. Для постоянного тока I , текущего перпендикулярно сечению S проводника: $j = I/S$. Если за время dt через поперечное сечение S проводника переносится заряд $dq = ne(v)Sdt$ (где n , e и (v) – концентрация, заряд и средняя скорость упорядоченного движения зарядов), то сила тока $I = dq/dt = ne(v)S$, а плотность тока: $j = ne(v)$. **Единица плотности тока** – А/м²

10.2 Закон Ома для участка цепи

Закон Ома для однородного участка цепи (не содержащего источника тока): сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна напряжению на конце проводника (интегральная форма закона Ома). $I = U/R$

Коэффициент пропорциональности R называется электрическим сопротивлением проводника. Единица электрического сопротивления – ом (Ом): 1 Ом – сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1В течет постоянный ток 1А.

10.3 Сопротивление и удельная проводимости

Величина $G = 1/R$ называется электрической проводимостью проводника. Единица электрической проводимости – сименс (См): 1 См – проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом. Сопротивление проводника зависит от его размеров и формы, а также от материала из которого проводник изготовлен. Например, для однородного линейного проводника длиной l и площадью поперечного сечения S сопротивление рассчитывается по формуле: $R = \rho l / S$, где коэффициент пропорциональности ρ , характеризующий материал проводника, называется удельным электрическим сопротивлением. Единица удельного электрического сопротивления – ом-метр (Ом·м). Величина обратная удельному сопротивлению называется удельной электрической проводимостью вещества проводника:

$\gamma = 1/\rho$. Единица удельной электрической проводимости – сименс на метр (См/м). В проводнике $U/l = E$ – напряженность электрического поля, $R = \rho l/S$, $j = I/S$. Из закона Ома получим соотношение: $I/S = 1/U$, откуда $j = \gamma E$. В векторной форме соотношение $j = \gamma E$ называется **законом Ома в дифференциальной форме**. Этот закон связывает плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в той же точке.

10.4 Зависимость сопротивления от температуры

Опытным путем было установлено, что для большинства случаев изменение удельного сопротивления (а значит и сопротивления) с температурой описывается линейным законом: $\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$ или $R = R_0 (1 + \alpha t)$ где ρ и ρ_0 , R и R_0 — соответственно удельные сопротивления и сопротивления проводника при температурах t и 0°C (шкала Цельсия), α — температурный коэффициент сопротивления. На зависимости электрического сопротивления металлов от температуры основано действие термометров сопротивления. Сопротивление многих металлов при очень низких температурах T_k (0,14–20 К (шкала Кельвина), называемых критическими, характерных для каждого вещества, скачкообразно уменьшается до нуля и металл становится абсолютным проводником. Это явление называется сверхпроводимостью.

10.5 Э. д. с. Закон Ома полной цепи

Рассмотрим *неоднородный* участок цепи 1—2 на котором присутствуют силы неэлектрического происхождения (*сторонние силы*). Обозначим через: Θ_{12} — ЭДС на участке 1—2; $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ — приложенную на концах участка разность потенциалов. Если участок цепи 1—2 *неподвижен*, то (по закону сохранения энергии) *общая работа* A_{12} сторонних и электростатических сил, совершаемая переносителями тока, равна теплоте Q , выделяющейся на участке. Работа сил, совершаемая при перемещении заряда q_0 : $A_{12} = q_0 \Theta_{12} + q_0 \Delta \varphi$

ЭДС Θ_{12} , как и сила тока I , — величина скалярная. Если ЭДС способствует движению положительных зарядов в выбранном направлении, то $\Theta_{12} > 0$, если препятствует, то $\Theta_{12} < 0$.

За время t в проводнике выделится теплота:

$$Q = I^2 R t = IR(I t) = IR q_0$$

Отсюда следует закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме, который является обобщенным законом Ома:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \Theta_{12}$$

Или

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \Theta_{12}}{R}$$

Частные случаи.

1) Если на данном участке цепи источник тока *отсутствует*, то мы получаем закон Ома для однородного участка цепи: $I = U/R$

2) Если цепь *замкнута* ($\Delta \varphi = 0$), то получаем закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\Theta}{R_{\text{внутр}} + R_{\text{внеш}}}$$

где Θ — ЭДС, действующая в цепи, R — суммарное сопротивление всей цепи, $R_{\text{внеш}}$ — сопротивление внешней цепи, $R_{\text{внутр}}$ — внутреннее сопротивление источника тока.

3) Если цепь *разомкнута*, то $I = 0$ и $\Theta_{12} = \varphi_2 - \varphi_1$, т.е. ЭДС, действующая в разомкнутой цепи равна разности потенциалов на ее концах.

4) В случае *короткого замыкания* сопротивление внешней цепи $R_{\text{внеш}} = 0$ и сила тока $I = \Theta/R_{\text{внутр}}$ в этом случае ограничивается только величиной внутреннего сопротивления источника тока.

10.6 Работа и мощность постоянного тока

Кулоновские и сторонние силы при перемещении заряда q вдоль электрической цепи совершают работу A . Рассмотрим однородный проводник с сопротивлением R к концам которого приложено напряжение U . За время dt через сечение проводника переносится заряд $dq = Idt$. Работа по перемещению заряда q_0 между двумя точками поля равна:

$A_{12} = q_0 \Delta \phi$, откуда $dA = Udq = UI dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt$. **Мощность тока:** $P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$. Если размерности $[I] = \text{А}$, $[U] = \text{В}$, $[R] = \text{Ом}$, то $[A] = \text{Дж}$ и $[P] = \text{Вт}$.

Внесистемные единицы работы тока: ватт-час (Вт·ч) и киловатт-час (кВт·ч). 1 Вт·ч – работа тока мощностью 1 Вт в течении 1 ч: 1 Вт·ч = 3600 Вт·с = 3,6 · 10³ Дж. Аналогично: 1 кВт·ч = 1000 Вт·ч = 3,6 · 10⁶ Дж.

10.7 Электрический ток в жидкостях

Жидкости, как и твердые тела, могут быть диэлектриками, полупроводниками и проводниками. К числу диэлектриков относится дистиллированная вода. Жидкими полупроводниками являются, например, расплавленный селен, расплавы сульфидов. Раствор соли в отличие от дистиллированной воды обладает электрической проводимостью. Выясним механизм проводимости водных растворов электролитов на примере раствора бромида калия KBr. Взаимодействие атомов брома и калия в молекуле бромида калия упрощенно можно представить как взаимодействие двух ионов: положительно заряженного иона K^+ и отрицательно заряженного иона Br^- . Объясняется это тем, что единственный валентный электрон у калия слабо связан с атомом. При образовании молекулы KBr этот электрон переходит к атому брома, превращая его в отрицательный ион Br^- ; в соответствии с этим молекулу KBr мы можем схематически изобразить в виде диполя. При растворении соли бромида калия в воде молекулы KBr попадают в окружение молекул воды, которые тоже являются диполями. В электрическом поле, создаваемом молекулой KBr, молекулы воды растягивают молекулу KBr настолько, что незначительная ее встряска при столкновении с другими молекулами разрушает ее. Часть молекул KBr распадается – диссоциирует на ионы K^+ и Br^- . Этот процесс называют электролитической диссоциацией.

Степень диссоциации, т. е. доля молекул растворенного вещества, которые распадаются на ионы, зависит от температуры, концентрации раствора и диэлектрической проницаемости ее растворителя. С увеличением температуры степень диссоциации возрастает и, следовательно, увеличивается концентрация положительно и отрицательно заряженных ионов. Ионы разных знаков при встрече могут снова объединиться в нейтральные молекулы – рекомбинировать. При неизменных условиях в растворе устанавливается динамическое равновесие, при котором число молекул, распадающихся в единицу времени на ионы, равно числу пар ионов, которые за то же время вновь воссоединяются в нейтральные молекулы.

Электролиз широко применяют в технике для различных целей. Электролитическим путем покрывают, например, поверхности одного металла тонким слоем другого (никелирование, хромирование, омеднение и т. п.). Это прочное покрытие защищает поверхность от коррозии. Если принять меры к тому, чтобы электролитическое покрытие хорошо отслаивалось от поверхности, на которую осаждался металл (этого достигают, например, нанося на поверхность графит), можно получить копию с рельефной поверхности. Осаждая металл на длинный цилиндр, получают трубы без шва. При помощи электролиза осуществляют очистку металлов от примесей. Так, полученную из руды неочищенную медь отливают в форме толстых листов, которые затем помещают в ванну в качестве анодов. При электролизе медь на аноде растворяется, примеси, содержащие ценные и редкие металлы, выпадают на дно, а на катоде оседает чистая медь. При помощи электролиза получают алюминий из расплава бокситов. Именно этот способ получения алюминия сделал его дешевым и наряду с железом самым распространенным в технике и быту металлом.

10.8 Электрический ток в вакууме

Самостоятельный газовый разряд в стеклянной трубке с двумя электродами может происходить лишь при условии, что давление газа слишком мало. При уменьшении значений, меньших 0,0001 мм рт. ст., разряд прекращается, т. е. ток становится равным нулю, хотя напряжение на электродах трубки отлично от нуля. Это происходит вследствие того, что атомов становится слишком мало, чтобы поддерживать ток за счет ионизации электронным ударом и выбивания ионами электронов с катода. Отсутствие проводимости разреженного газа наблюдается и при дальнейшем уменьшении давления. Продолжая откачивать газ, можно дойти до такой его концентрации, при которой молекулы успевают пролетать от одной стенки трубки до другой, ни разу не испытав соударений друг с другом. Такое состояние газа в трубке называют *в а к у у м о м*. Разреженный газ превращается в проводник благодаря действию ионизатора. Если же газа так мало, что можно говорить о состоянии вакуума, то проводимость межэлектродного промежутка можно обеспечить только с помощью введенного в трубку источника заряженных частиц. Чаще всего действие такого источника основано на свойстве тел, нагретых до высокой температуры, испускать электроны.

10.9 Электролиз и его применение. Законы Фарадея

При пропускании тока через электролитическую ванну электронные потоки в электродах замыкаются ионными потоками электролита. При этом у анода будет происходить превращение анионов в нейтральные атомы с отдачей электронов аноду; у катода – превращение катионов в нейтральные атомы с получением электронов от катода. У поверхности электродов происходит выделение веществ – это сущность электролиза.

Законы электролиза (Фарадея). Первый закон – масса вещества, выделившегося на электроде, прямопропорциональна заряду, прошедшему через электролит $m = kq = kI \cdot t$, второй закон – электрохимические эквиваленты прямопропорциональны их химическим эквивалентам $K = cx$, где: A – атомный вес вещества, Z – его валентность. Число Фарадея – равно электрическому заряду, который нужно пропустить через электролит для выделения на электроде 1 моля вещества. $F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$. Третий объединенный закон – $M = \frac{1}{F} \frac{A}{Z} I \cdot t$.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Дайте определение электрическому току?
- 2) Что такое направление тока?
- 3) Единица измерения, плотность тока?
- 4) Закон Ома? Что называется работой постоянного тока?
- 5) Мощность постоянного тока?
- 6) Механизм проводимости водных растворов электролитов?
- 7) Какие законы электролиза вы знаете?
- 8) Что называется электролитической диссоциацией?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Рогачев, Н.М.** Курс физики. Учебное пособие/ Н.М. Рогачев. – С.-Петербург: Издательство «Лань», 2010 г. - 448 с.

Дополнительная

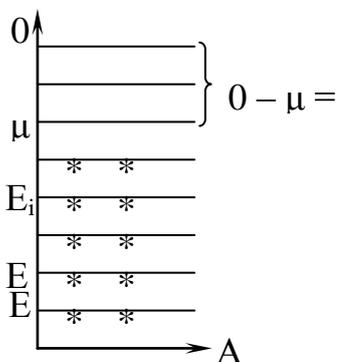
2. **Грабовский, Р.И.** Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

Лекция 11

ТЕРМОЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ

11.1 Контактная разность потенциалов. Термоэлектричество

Электрон находящийся внутри металла и притягивающийся к положительным ионам кристаллической решетки, обладает отрицательной потенциальной энергией (энергия притяжения отрицательна). Вне проводника $W_{\text{пот}}$ равна нулю.



E_1, E_2, \dots, E_i – энергетические уровни, на которых располагаются по два электрона с противоположными спинами.

μ – верхний энергетический уровень (уровень Ферми или химический потенциал, его величина не зависит от температуры металла).

A_0 – нижний энергетический уровень (дно потенциальной ямы).

0 – начало отсчета (энергия электрона вне проводника).

При соприкосновении двух проводников, электроны вследствие теплового движения переходят из одного проводника в другой. Если соприкасающиеся проводники различны и если их температура в разных точках неодинакова, то один из них заряжается положительно, другой отрицательно, т.е. возникает контактная разность потенциалов U . Величина U – не зависит ни от формы, ни от размера проводников; а зависит: какие металлы и каковы температуры в их месте соприкосновения. Внутренняя контактная разность потенциалов – разность между днами потенциальной ямы. Выражение для внутренней контактной разности потенциалов

U_i :
$$U_i = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$
, где k – постоянная Больцмана; $\ln \frac{n_1}{n_2}$ – логарифм отношения

концентраций электронов в металлах. Следствие: 1) чем больше различие n_2 и n_1 , тем больше U_i ; 2) при комнатной температуре $U_i \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$ В.

Внешняя контактная разность потенциалов: $U_{\text{вн}}$ – образуется на внешних сторонах проводников. Между соприкасающимися металлами во внешнем пространстве появится электрическое поле, а на поверхности электрические заряды.



Полная контактная разность потенциалов, обусловленная обеими причинами: 1) разная $A_{\text{вых}}$ электронов из металлов ($U_{\text{вн}}$); разная концентрация свободных электронов (U_i) равна:

$$U = U_i + U_{\text{вн}} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} + \frac{A_2 - A_1}{e}$$

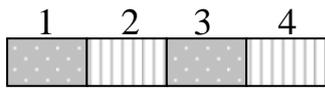
Т.к. $U_i \leq U_{\text{вн}}$, то приближенно можно считать: $U = U_{\text{вн}}$.

11.2 Законы Вольта

1. При соединении двух проводников из разных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов, которая зависит от их химического состава и температуры.

2. Разность потенциалов между концами цепи, состоящей из последовательно соединённых металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, не зависит от

химического состава промежуточных проводников; она равна контактной разности потенциалов, возникающей при непосредственном соединении крайних проводников.

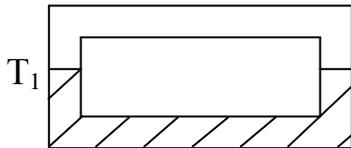


$$U = U_{12} + U_{23} + U_{34} = \phi_1 - \phi_2 + \phi_2 - \phi_3 + \phi_3 - \phi_4 = \phi_1 - \phi_4 = \phi_{14}$$

Если цепочку 1-4 замкнуть, то $U = 0$, причем в замкнутой цепи из разных металлов нулю равна не только $U_{вн}$, но и сумма ($\sum U_i$):

$$\frac{kT}{e} \left(\ln \frac{n_1}{n_2} + \ln \frac{n_2}{n_3} + \ln \frac{n_3}{n_4} + \ln \frac{n_4}{n_1} \right) = \frac{kT}{e} \ln 1 = 0$$

Если температуры спаев различны в замкнутой цепи, то контактные разности потенциалов



$U_1 \neq U_2$. Причем U_1 и U_2 направлены навстречу друг другу, т.е. общая разность потенциалов, эквивалентная ЭДС цепи равна:

$$E_T = U_1 - U_2,$$

где E_T – термоЭДС

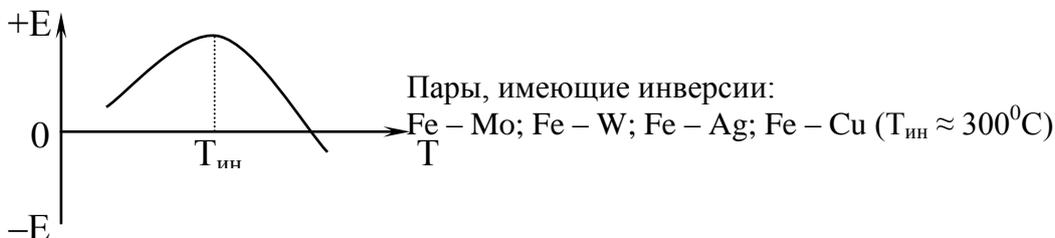
$$E = U_1 - U_2 = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} - \frac{A_2 - A_1}{e} - \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_1 - T_2)$$

$$\frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} = E_0$$

– удельная термоЭДС

Между тепловыми и электрическими процессами в металлах (а также в проводниках) существует определенная взаимосвязь, которая обуславливает ряд явлений:

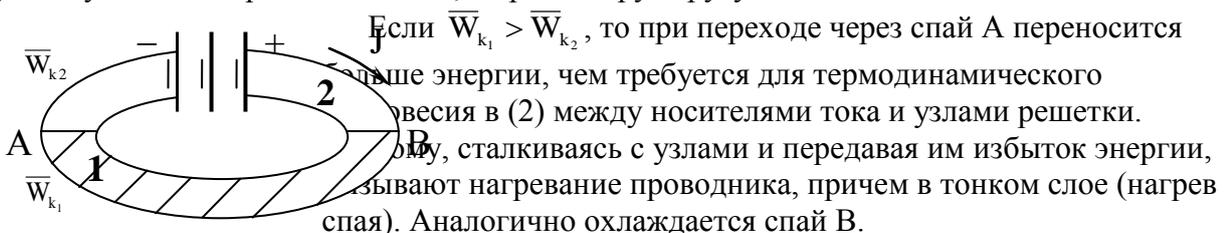
а) **Явление Зеебека** (1821 г.) В замкнутой электрической цепи из разных металлов, возникает термоЭДС, если места контактов поддерживаются при разных температурах: $E = E_0(T_1 - T_2)$. При малых температурах это уравнение хорошо согласуется с экспериментом. При больших ΔT – E изменяется сложным образом, вплоть до того, что меняет знак – инверсия термоЭДС.



б) **Явление Пельтье**.

Обратно явлению Зеебека. Связано с выделением или поглощением (в зависимости от направления тока) теплоты, избыточной над джоулевой и называется теплотой Пельте (Q_P).

Тепло выделяется (поглощается) в спайе при прохождении в последнем тока. Явление обусловлено тем, что в разных проводниках значения \bar{W}_k – средней энергии зарядов, участвующих в образовании тока, не равны друг другу.



$$Q_P = \Pi q = \Pi \cdot It$$

где Π – коэффициент Пельте, зависит от рода проводников $\Pi \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$ В, $\Pi_{12} = -\Pi_{21}$.

Применение: а) в холодильниках;

б) в термостатах;

в) в установках – микроклимат

в) Явление Томсона.

Явлением Томсона называется выделение (или поглощение) тепла, избыточного над джоулевым, при прохождении постоянного тока по неравномерно нагретому проводнику.

$$Q_T = k_T (T_1 - T_2) \cdot It$$

где k_T – коэффициент Томсона, зависит от материала проводника.

Явление связано с тем, что в более нагретой части проводника \bar{W}_k носителей тока больше, чем в менее нагретой. Если носители перемещаются из более нагретой области, то они отдают избыток энергии кристаллической решетке проводника, т.е. теплота Томсона Q_T – выделяется, т.е. $dQ_T > 0$.

11.3 Электрический ток в полупроводниках

Существенным отличием полупроводников от проводников (металлов) является двойственная природа носителей заряда в полупроводниках. Выбрасывание электрона из валентной зоны в зону проводимости означает не только появление электрона обеспечивающего ток в веществе, а также появление в ранее заполненной зоне дырки – вакантного места, на которое могут переходить другие электроны заполненной зоны. При возникновении электрического поля в движение придут электроны и дырки, которые будут перемещаться как положительные заряды. Соответствующие им токи (проводимости) называются электронные и дырочные (n – проводимость и p – проводимость). Отметим, что число дырок равно числу электронов перешедших в зону проводимости.

Время жизни электронов и дырок ограничено, т.к. электроны могут возвращаться из зоны электронной проводимости на вакантные уровни нижней зоны. При этом происходит рекомбинация электрона и дырки. τ_{cp} (время жизни) свободных носителей тока зависит от разных причин. При постоянной концентрации носителей в веществе существует динамическое равновесие. Электропроводность химически чистого полупроводника называют собственной проводимостью. В практическом применении полупроводников большее значение имеют примесные полупроводники. Ничтожные количества примесей резко меняют электрические свойства полупроводников. Под примесями понимают дефекты в полупроводниках: атомы других элементов, нарушающие периодичность кристаллической решетки; наличие атома того же элемента не в узле, а между узлами (междоузлия); отсутствие атома вообще и т.д.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Контактная разность потенциалов?
- 2) Явление Пельтье, Зеебека и Томсона?
- 3) Электронные и дырочные токи?
- 4) Есть ли отличие в перемещении свободного электрона и электрона в периодическом поле решетки?
- 5) Какие дефекты в полупроводниках вы знаете?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Фирганг, Е.В.** Руководство к решению задач по курсу общей физики. Учебное пособие 4-е издание. / С.-Петербург: 2009г.- 352с.

Дополнительная

1. **Грабовский, Р.И.** Курс физики. 6-е изд. / Р.И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

МАГНЕТИЗМ. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

12.1 Постоянное магнитное поле. Рамка с током. Направление магнитного поля. Макротоки и микротоки

В XIX веке опытным путем были исследованы законы взаимодействия постоянных магнитов и проводников, по которым пропускаться электрический ток. опыты показали, что подобно тому, как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электростатическое поле, так и в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, которое называется магнитным. Были установлены два экспериментальных факта: магнитное поле действует на движущиеся заряды, движущиеся заряды создают магнитное поле. Этим магнитное поле существенно отличается от электростатического, которое действует как на движущиеся, так и на неподвижные заряды. Магнитное поле не действует на покоящиеся заряды.

Опыт показывает, что характер воздействия магнитного поля на ток зависит от формы проводника, по которому течет ток; от расположения проводника и от направления тока. За положительное направление нормали принимается направление поступательного движения правого винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке.

Магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие, поворачивая ее определенным образом. Это свойство используется для выбора направления магнитного поля.

За направление магнитного поля в данной точке принимается направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к свободно подвешенной рамке с током, или направление, совпадающее с направлением силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки, помещенный в данную точку поля.

Макроскопические токи - электрические токи, протекающие по проводникам в электрических цепях и **микроскопические токи** - обусловлены движением электронов в атомах и молекулах. Намагниченность постоянных магнитов является следствием существованием в них **микротоков**.

Внешнее магнитное поле оказывает ориентирующее, упорядочивающее действие на эти микротоки. Например, если вблизи какого-то тела поместить проводник с током (**макроток**), то под действием его магнитного поля **микротоки** во всех атомах определенным образом ориентируются, создавая в теле дополнительное магнитное поле. Вектор магнитной индукции \vec{B} характеризует результирующее магнитное поле, создаваемое всеми макро и микротоками. Поэтому, при одном и том же макротоке, вектор \vec{B} в различных средах будет иметь разные значения. Магнитное поле макротока описывается вектором напряженности магнитного поля \vec{H} .

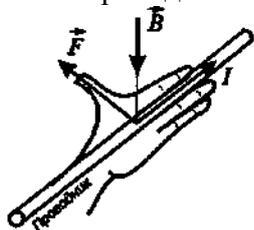
В среде магнитное поле макротоков усиливается за счет поля микротоков среды. Для однородной изотропной среды вектор магнитной индукции: $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, где μ_0 - магнитная постоянная, μ - магнитная проницаемость среды, безразмерная величина, показывающая, во сколько раз магнитное поле макротоков \vec{H} усиливается за счет поля микротоков среды. Подобие векторных характеристик электростатического и магнитного полей.

Вектор магнитной индукции \vec{B} - аналог вектора напряженности электростатического поля \vec{E} . Эти величины определяют силовые действия этих полей и зависят от свойств среды.

Аналогом вектора электрического смещения является вектор напряженности \vec{H} магнитного поля. Для магнитного поля, как и для электрического, справедлив принцип суперпозиции: магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом.

12.2 Закон Ампера. Взаимодействие параллельных токов

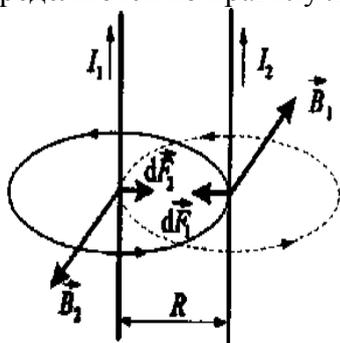
Действие магнитного поля на рамку с током – это пример воздействия магнитного поля на проводник с током. Ампер установил, что сила \vec{dF} с которой магнитное поле действует на элемент проводника $d\vec{l}$ с током, находящегося в магнитном поле, равна:



$$\vec{dF} = I[\vec{dl}, \vec{B}],$$

где \vec{dl} – вектор по модулю равный dl совпадающий по направлению с током, \vec{B} – вектор магнитной индукции. Наглядно направление силы Ампера принято определять по **правилу левой руки**: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор \vec{B} , а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока в проводнике, то отогнутый большой палец покажет направление силы Ампера.

Закон Ампера применяется для определения силы взаимодействия двух токов. Два параллельных проводника с токами I_1 и I_2 находятся на расстоянии R друг от друга. Направление сил $d\vec{F}_1$ и $d\vec{F}_2$, с которыми поля \vec{B}_1 и \vec{B}_2 действуют на проводники с токами I_2 и I_1 , определяются по правилу левой руки.



$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu_2 I_1}{4\pi R},$$

$$dF_1 = I_2 B_1 dL.$$

$$\text{Отсюда } dF_1 = \frac{\mu_0 \mu_2 I_1 I_2}{4\pi R} dL.$$

Аналогично

$$B_2 = \frac{\mu_0 \mu_2 I_2}{4\pi R},$$

$$dF_2 = I_1 B_2 dL,$$

$$dF_2 = I_1 B_2 dL,$$

$$dF_2 = \frac{\mu_0 \mu_2 I_1 I_2}{4\pi R} dL.$$

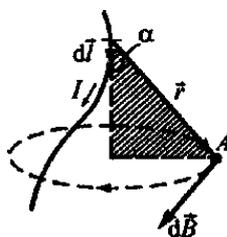
Таким

образом $dF_1 = dF_2 = dF = \frac{\mu_0 \mu_2 I_1 I_2}{4\pi R} dL$. Проводники с токами одинакового направления притягиваются, с токами разного направления – отталкиваются.

12.3 Закон Био-Савара-Лапласа

Элемент проводника $d\vec{l}$ с током I создает в некоторой точке А индукцию поля:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi R^3},$$



где \vec{r} – радиус-вектор, проведенный из элемента $d\vec{l}$ проводника в точку А. Направление $d\vec{B}$ перпендикулярно $d\vec{l}$ и \vec{r} , и совпадает с касательной к линии магнитной индукции. Модуль вектора $d\vec{B}$

определяется выражением: $d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I dl \sin \alpha}{4\pi R^3 R^2}$, где α – угол между

векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} .

12.4 Магнитное поле прямого тока

Ток течет по прямому проводу бесконечной длины. В качестве постоянной интегрирования выберем угол α .

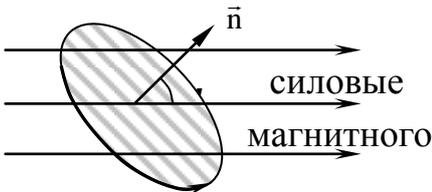
Из рисунка $r = \frac{R}{\sin \alpha}$, $dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha}$. Следовательно $d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I dl \sin \alpha}{4\pi R^3 R^2}$.

Угол α для всех элементов прямого провода изменяется от 0 до π . По принципу суперпозиции.

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \int_0^\pi \sin \lambda d\lambda = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \frac{2I}{R}$$

Если ток течет по отрезку провода, то $B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi} \frac{2I}{R} (\cos \lambda_1 - \cos \lambda_2)$. Данная формула переходит в формулу для бесконечного длинного проводника, при $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = \pi$.

12.5 Магнитный момент контура с током. Магнитная индукция. Напряжённость магнитного поля



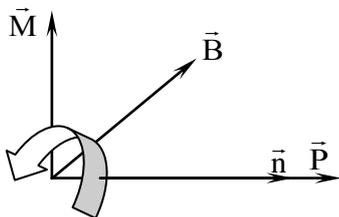
При помещении рамки (контура) с током в однородное магнитное поле, рамка испытывает вращающее действие (ориентирующее).

Опытным путем установлено, что вращающий момент – M , действующий на рамку с током, пропорционален ее площади S , току I и углу между \vec{n} и направлением силовых линий: $M \sim IS \sin \alpha$. Величина $IS = P_m$ – называется магнитным моментом контура, величина векторная: $\vec{P}_m = P_m \vec{n}$. Если помещать в данную точку поля разные контуры (с разными \vec{P}_{mi}),

то $\frac{M_{\max 1}}{P_{\max 1}} = \frac{M_{\max 2}}{P_{\max 2}} = \dots = \frac{M_{\max n}}{P_{\max n}} = \text{const}; \frac{\vec{M}_{\max}}{\vec{P}_{\max}} = \vec{B}$;

Если угол поворота α произвольный, но постоянный для каждой рамки, то имеем:

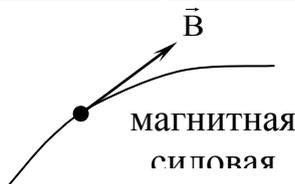
$$\vec{B} = \frac{M}{IS \cdot \sin \alpha}, \text{ где } B \text{ – характеристика магнитного поля, называемая } \underline{\text{магнитная индукция}}.$$



$$M = BIS \sin \alpha \text{ учитывая, что } IS = p_m, \text{ а } \alpha \rightarrow (\vec{p}_m, \vec{B})$$

$$M = p_m B \sin(\vec{p}_m, \vec{B}) \quad M = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$

\vec{B} – вектор, силовая характеристика магнитного поля. Направление совпадает с направлением силовых линий магнитного поля. Введя понятие линий индукции (силовых линий магнитного поля) можно графически изображать поля. Направление силовых линий определяется правилом буравчика. По направлению силовой линии устанавливается северный полюс магнитной стрелки. Линии, по которым располагаются магнитные стрелки, называются магнитными силовыми линиями.



Вектор индукции \vec{B} направлен по касательной к силовой линии. Метод силовых линий – удобный геометрический метод описания поля.

12.6 Вектор магнитной индукции

Вращающий момент сил зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств рамки с током и определяется векторным произведением:



$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}], \text{ где } \vec{p}_m - \text{ вектор магнитного момента рамки с}$$

током, \vec{B} - вектор магнитной индукции – силовая характеристика магнитного поля. По определению векторного произведения скалярная величина момента:

$$M = p_m B \sin \lambda$$

где λ - угол между векторами \vec{p}_m и \vec{B} . Для плоского контура с током I магнитный момент определяется: $\vec{P}_m = IS\vec{n}$, где S – площадь поверхности контура (рамки), \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности рамки. В этом случае вращающий момент $M = IS[n, B]$. Если в данную точку магнитного поля помещать рамки с различными, магнитными моментами, то на них действуют различные вращающие моменты, но отношение $\frac{M_{\max}}{P_m}$ для всех контуров одно и то

же. Аналогично тому, как силовая векторная характеристика электростатического поля – напряженность – определялась как сила, действующая на пробный заряд, силовая характеристика магнитного поля – магнитная индукция \vec{B} – определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с магнитным моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля. Графически магнитное поле, так же как электрическое, изображают с помощью линий магнитной индукции – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} . Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с током, в то время как линии электростатического поля – разомкнуты (они начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах).

12.7 Подобие векторных характеристик электростатического и магнитного полей

Вектор магнитной индукции \vec{B} - аналог вектора напряженности электростатического поля \vec{E} . Эти величины определяют силовые действия этих полей и зависят от свойств среды.

Аналогом вектора электрического смещения \vec{D} является вектор напряженности \vec{H} магнитного поля. Для магнитного поля, как и для электрического, справедлив принцип суперпозиции: магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом.

12.8 Циркуляция вектора напряжённости магнитного поля. Поле соленоида и тороида

Теорема о циркуляции \vec{H} , имеет в учении о магнитном поле такое же значение, как теорема Гаусса в электростатике. В частности, подобно тому, как при симметричном распределении зарядов, теорема Гаусса позволяла вычислить \vec{E} , не прибегая к закону Кулона, и имела вид (в системе СИ: $N = \sum q_i$): теорема о циркуляции \vec{H} позволяет рассчитать напряженность магнитного поля при наличии симметрии токов без применения закона Био-Савара-Лапласа, что облегчает вычисления. Циркуляцией магнитного поля по заданному контуру L называется

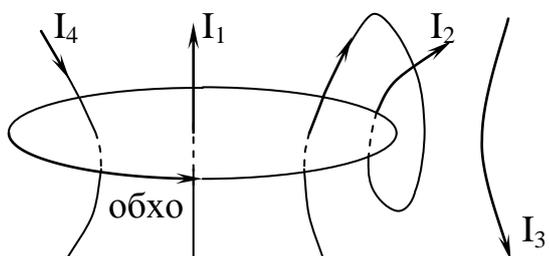
интеграл вида: $\oint_L \vec{H}_e d\ell = I$

Если контур охватывает несколько токов, то:

$$\oint_L \vec{H}_e d\ell = \sum_{n=1}^N I_n$$

Теорема о циркуляции (закон полного тока): циркуляция вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру численно равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром.

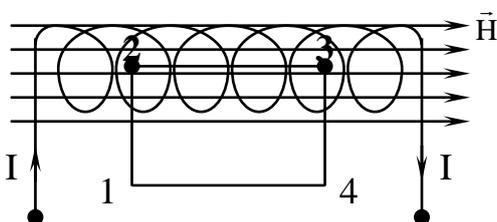
Пример №1



$$\sum_{n=1}^4 I_n = I_1 + I_2 + I_2 + 0 \cdot I_3 - I_4$$

Пример №2

Расчёт напряженности магнитного поля внутри соленоида:



Линии напряженности расположены внутри соленоида и практически равны нулю вне его при условии $\ell \gg D$. Возьмем контур 12341, тогда:

$$\int_1^2 H_e dl + \int_2^3 H_e dl + \int_3^4 H_e dl + \int_4^1 H_e dl = \sum I_n$$

$\sum I_n = In$, где

n – число витков, охватываемых контуром.

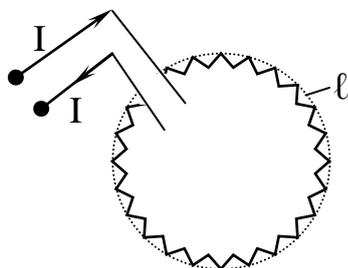
$$\int_1^2 H_e dl = \int_3^4 H_e dl = 0, \text{ т.к. лучи контура } \perp \text{ к линиям поля (} H_e = 0 \text{);}$$

$$\int_4^1 H_e dl = 0 \text{ т.к. } H \text{ вне контура (} H = 0 \text{)}$$

Значит: $\int_2^3 H_e dl = H\ell$, тогда $H\ell = In$

$$H_{\text{сол}} = \frac{In}{\ell} = In_0, \text{ где } n_0 = \frac{n}{\ell} \text{ – число витков на единицу длины.}$$

Пример №3



Напряженность поля внутри тороида. $H_{\text{тор}} = In_0$; справедлива при $\ell \gg D$. ℓ – средняя линия тороида (линии по оси витков).

$$n_0 = \frac{n}{\ell}$$

12.9 Принцип действия электрогенераторов и электродвигателей

Потоком вектора магнитной индукции (магнитным потоком) через площадку dS называется скалярная физическая величина, равная $d\Phi_B = \vec{B}d\vec{S} = B_n dS$, где $B_n = B \sin \lambda$ – проекция вектора

\vec{B} на направление нормали \vec{n} к площадке dS , λ – угол между векторами \vec{n} и \vec{B} , $d\vec{S}$ – вектор, модуль которого равен dS , а направление совпадает с направлением нормали к площадке.

Поток вектора \vec{B} может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от знака $\cos \lambda$. Поток вектора \vec{B} связывают с контуром, по которому течет ток. Положительное направление нормали к контуру связано с направлением тока по правилу правого винта. Поэтому магнитный поток, создаваемый контуром с током через поверхность, ограниченную им самим, всегда положителен. Поток вектора магнитной индукции через произвольную поверхность S :

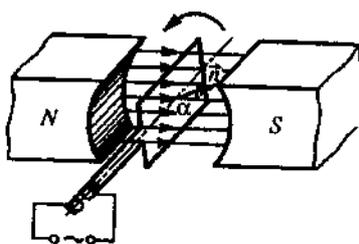
$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS$$

Если поле однородно и перпендикулярно ему расположена плоская поверхность с площадью S , то $\Phi_B = BS$. Единица магнитного потока – вебер (Вб): 1 Вб – магнитный поток, проходящий сквозь плоскую поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна 1 Тл (1 Вб = 1 Тл \cdot м 2)

12.10 Вращение рамки в магнитном поле.

Явление электромагнитной индукции применяется для преобразования механической энергии в энергию электрического тока. Для этой цели используются генераторы, принцип действия которых рассмотрим на примере плоской рамки, вращающейся в однородном ($B = \text{const}$) магнитном поле.

Пусть рамка вращается равномерно с угловой скоростью $\omega = \text{const}$.



Магнитный момент, сцепленный с рамкой площадью S , в любой момент времени равен $\Phi = B_n S = BS \cos \lambda = BS \cos \omega t$,

где $\lambda = \omega t$ – угол поворота рамки в момент времени t .

При вращении рамки в ней возникает переменная ЭДС

$$\text{индукции: } \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t$$

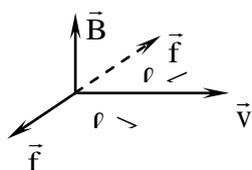
Максимальное значение ЭДС индукции $\mathcal{E}_{\text{max}} = B\omega S$.

Тогда $\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{\text{max}} \sin \omega t$ При равномерном вращении рамки в однородном магнитном поле в ней возникает переменная ЭДС, изменяющаяся по гармоническому закону.

Процесс превращения механической энергии в электрическую обратим. Если по рамке, помещенной в магнитное поле, пропускать электрический ток, тогда на нее будет действовать вращающий момент $\vec{M} = IS[\vec{n}, \vec{B}]$ и рамка начнет вращаться. На этом принципе основана работа электродвигателей.

12.11 Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в однородных электрическом и магнитном полях

Сила Лоренца – это сила, действующая на одиночный движущийся заряд в магнитном поле. Взаимная ориентация векторов \vec{f}_L , \vec{v} и \vec{B} имеет вид:



Следствия:

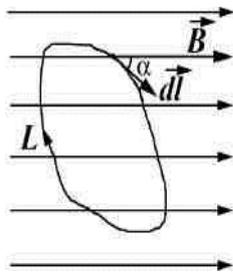
а) магнитное поле не действует на заряженную частицу, если: $v = 0$ – частица неподвижна; $v \parallel B$ ($\sin \alpha = 0$) – частица движется вдоль линий поля;

б) при движении частицы в постоянном магнитном поле скорость ее движения изменяется лишь по направлению, абсолютная величина скорости остается неизменной, то есть сила Лоренца является центростремительной силой, вызывающей отклонение частицы в магнитном поле и частица движется по окружности;

в) отношение $\frac{e}{m}$ – называется удельным зарядом; г) полная сила, действующая на движущийся заряд при одновременном наличии электрического \vec{E} и магнитного \vec{B} полей, равна: Си: $\vec{f}_n = \vec{f}_{эл} + \vec{f}_m$

$$\vec{f}_n = q[\vec{v} \cdot \vec{B}] + q\vec{E}$$

12.12. Движение частиц в магнитных и электромагнитных полях



Циркуляцией вектора \vec{B} по заданному замкнутому контуру L называется следующий интеграл по этому контуру: $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl$ где $d\vec{l}$ – элемент длины контура, направленный вдоль обхода контура; $B_l = B \cos \alpha$ – составляющая вектора \vec{B} в направлении касательной к контуру, с учетом выбранного направления обхода; α – угол между векторами \vec{B} и $d\vec{l}$.

Теорема о циркуляции вектора \vec{B} (закон полного магнитного поля в вакууме): циркуляция вектора \vec{B} по произвольному замкнутому контуру равна произведению магнитной постоянной μ_0 на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром: $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k$, где n – число проводников с токами, охватываемых контуром произвольной формы.

Эта теорема справедлива только для поля в вакууме, поскольку для поля в веществе надо учитывать молекулярные токи. Каждый ток учитывается столько раз, сколько он охватывается контуром. Положительным считается ток, направление которого связано с направлением обхода по контуру правилом правого винта.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Как взаимодействуют между собой параллельные токи? Чем вызывается их взаимодействие?
- 2) В каких единицах измеряется магнитная индукция в СИ? Сформулируйте определение этой единицы. Что называют магнитным полем? Каковы его основные свойства?
- 3) Перечислите правила, определяющие направление магнитного поля (линий магнитной индукции)? Поясните, как пользоваться каждым из правил.
- 4) Что представляет собой вектор магнитной индукции и физической интерпретации?
- 5) Как определяют модуль вектора магнитной индукции? Какой формулой его выражают?
- 6) На что действует сила Лоренца, относительно магнитного поля?
- 7) В чем заключается подобие векторных характеристик электростатического и магнитного полей?
- 8) Контактная разность потенциалов? Явление Пельтье, Зеебека и Томсона?
- 9) Электронные и дырочные токи? Есть ли отличие в перемещении свободного электрона и электрона в периодическом поле решетки?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Пронин, В.П.** Краткий курс физики / В. П. Пронин. – Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2007 г. – 200 с.

Дополнительная

1. **Грабовский, Р.И.** Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

Лекция 13

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

13.1 Электромагнитная индукция

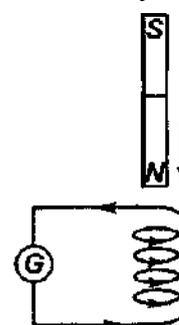
В опытах Фарадея было открыто явление электромагнитной индукции. Оно заключается в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток, получивший название индукционного. **Основные свойства индукционного тока:**

Индукционный ток возникает всегда, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции.

Сила индукционного тока не зависит от способа изменения потока магнитной индукции, а определяется лишь скоростью его изменения.

Открытие явления электромагнитной индукции:

1) показало взаимосвязь между электрическим и магнитным полем; предложило способ получения электрического тока с помощью магнитного поля.



А. Основываясь на законе сохранения энергии Ленц установил закон (иногда его называют правилом Ленца). Полная работа источника dA_u будет складываться из работы на лэнц-джоулево тепло $i^2 R dt$ и работы перемещения проводника в магнитном поле $i \cdot d\Phi$, тогда: $dA_u = i^2 \cdot R \cdot dt + I \cdot d\Phi = I \cdot E \cdot dt$

$$i = \frac{E dt - d\Phi}{R dt} = \frac{E - \frac{d\Phi}{dt}}{R} \quad \text{Величина} \quad \frac{d\Phi}{dt} = E_{\text{инд}} \quad \text{— ЭДС индукции, которая направлена}$$

противоположно той ЭДС E , которая вызвала движение проводника, процесс индукции.

13.2 Закон Фарадея

Обобщая результаты опытов, Фарадей показал, что всякий раз, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции, в контуре возникает индукционный ток. Возникновение индукционного тока указывает на наличие в цепи электродвижущей силы. Эта ЭДС называется электродвижущей силой электромагнитной индукции. Закон Фарадея: ЭДС электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром: $\mathcal{E}_i = \frac{d\Phi}{dt}$ Для замкнутого контура магнитный поток Φ есть не что иное, как

потокосцепление Ψ этого контура. Поэтому в электротехнике закон Фарадея часто записывают в форме: $\mathcal{E}_i = \frac{d\Psi}{dt}$ Направление индукционного тока определяется по правилу Ленца: при

всяком изменении магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на замкнутый проводящий контур, в последнем возникает индукционный ток такого направления, что его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока.

ЭДС электромагнитной индукции выражается в вольтах.

$$\left[\frac{d\Phi}{dt} \right] = \frac{B\delta}{c} = \frac{T\lambda m^2}{c} = \frac{Hm^2}{Amc} = \frac{Джс}{Ac} = \frac{ABc}{Ac} = B$$

13.3 Вихревые токи (токи Фуко)

Индукционный ток возникает не только в линейных проводниках, но и в массивных сплошных проводниках, помещенных в переменное магнитное поле. Эти токи замкнуты в толще проводника и называются вихревыми или токами Фуко. Токи Фуко также подчиняются правилу Ленца: их магнитное поле направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующему вихревые токи. Поэтому массивные проводники тормозятся в магнитном поле. Кроме того, вихревые токи вызывают сильное нагревание проводников. В электрических машинах, для того чтобы минимизировать влияние токов Фуко, сердечники трансформаторов и магнитные цепи электрических машин собирают из тонких пластин, изолированных друг от друга специальным лаком или оксидом.

Джоулево тепло, выделяемое токами Фуко, используется в индукционных металлургических печах. Взаимодействие вихревых токов с высокочастотным магнитным полем приводит к неравномерному распределению магнитного потока по сечению магнитопроводов – вытеснение магнитного потока из объема в приповерхностные области проводника. Это явление называется магнитным скин-эффектом.

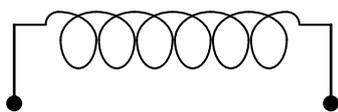
Индукционные токи, возбуждаемые в сплошных массивных проводниках, называются токами Фуко или вихревыми токами. Так как сопротивление массивных сплошных тел мало, токи в них достигают больших величин и они подчиняются правилу Ленца.

13.4 Самоиндукция

При изменении силы тока в контуре будет изменяться и сцепленный с ним магнитный поток, а это, в свою очередь будет индуцировать ЭДС в этом контуре. Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока называется самоиндукцией. Единица индуктивности – генри (Гн): 1 Гн – индуктивность такого контура, магнитный поток самоиндукции которого при токе в 1 А равен 1 Вб (1 Гн = 1 Вб/А = 1 В·с/А).

Из закона Фарадея ЭДС самоиндукции $\Theta_i = \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI)$. Если контур не деформируется и магнитная проницаемость среды не изменяется, то $L = \text{const}$ ЭДС самоиндукции: $\Theta_s = -L \frac{dI}{dt}$, где знак минус, обусловленный правилом Ленца, показывает, что наличие индуктивности в контуре приводит к замедлению изменения тока в нем.

Если ток со временем возрастает, то $\Theta_s < 0$, т.е. ток самоиндукции направлен навстречу току, обусловленному внешним источником, и замедляет его возрастание. Если ток со временем убывает, то $\Theta_s > 0$, т.е. ток самоиндукции имеет такое же направление, как и убывающий ток в контуре, и замедляет его убывание. Таким образом, контур, обладая определенной индуктивностью, приобретает электрическую "инертность".



При изменении тока i в контуре (или катушке) будет также изменяться и магнитный поток Φ , который будет пересекать свои же собственные витки и в контуре будет индуцироваться ЭДС. Это явление называется **самоиндукцией**.

По закону Био-Савара-Лапласа магнитная индукция $B \sim i$, с другой стороны $B \sim \Phi$, знаем также, что $\Phi \cdot N = \psi$. Объединяя все зависимости вместе, получим:

$$\psi = Li$$

где L – индуктивность контура, которая зависит от геометрии контура (от

его формы и размеров); от магнитных свойств среды. $[L] = \left[\frac{\Phi}{i} \right] = \frac{B\delta}{A} = \text{Гн}$

$$\text{Закон самоиндукции} \quad \boxed{E_c = -L \frac{di}{dt}}$$

Знак «-» указывает, что наличие индуктивности L ($L \neq 0$) приводит к замедлению изменения силы тока в контуре, то есть, если:

$\frac{di}{dt} > 0$, то $E_c < 0$ – ток возрастает, э.д.с. направлена против тока;

$\frac{di}{dt} < 0$, то $E_c > 0$ – ток возрастает э.д.с. направлена по току.

13.5 Индуктивность контура

Электрический ток, текущий в замкнутом контуре, создает вокруг себя магнитное поле, индукция которого, по закону Био-Савара-Лапласа пропорциональна току. Поэтому сцепленный с контуром магнитный поток пропорционален току в контуре: $\boxed{\Phi = LI}$

где коэффициент пропорциональности L называется индуктивностью контура.

Пример: индуктивность длинного соленоида.

Потокосцепление соленоида (полный магнитный поток сквозь соленоид):

$$\boxed{\Psi = BSN = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l} S}, \text{ откуда } \boxed{L = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l}}, \text{ где } N - \text{ число витков соленоида, } l - \text{ его длина, } S -$$

площадь, μ – магнитная проницаемость сердечника.

Индуктивность контура в общем случае зависит только от геометрической формы контура, его размеров и магнитной проницаемости той среды, в которой он находится.

В этом смысле индуктивность контура – аналог электрической емкости уединенного проводника, которая также зависит только от формы проводника, его размеров и диэлектрической проницаемости среды.

13.6 Трансформаторы

Принцип действия трансформаторов, применяемых для повышения или понижения напряжения переменного тока, основан на явлении взаимной индукции. Переменный ток I_1 создает в первичной обмотке переменное магнитное поле. Это вызывает во вторичной обмотке

появление ЭДС взаимной индукции. При этом: $\boxed{\Theta_2 = -\frac{N_2}{N_1} \Theta_1}$, где N_1 и N_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках, соответственно.

Отношение $\boxed{k = \frac{N_2}{N_1}}$, показывающее, во сколько раз ЭДС во вторичной обмотке трансформатора больше (или меньше), чем в первичной, называется коэффициентом трансформации. Если $k > 1$, то трансформатор – повышающий, если $k < 1$ – понижающий.

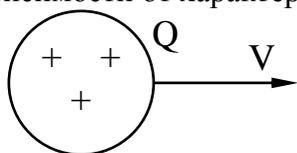
13.7 Энергия магнитного поля

Проводник, по которому протекает электрический ток, всегда окружен магнитным полем. Магнитное поле появляется и исчезает вместе с появлением и исчезновением тока. Магнитное поле, подобно электрическому, является носителем энергии. Энергия магнитного поля равна работе, которую затрачивает ток на создание этого поля. Выражение для объемной плотности энергии магнитного поля аналогично соответствующему выражению для объемной плотности

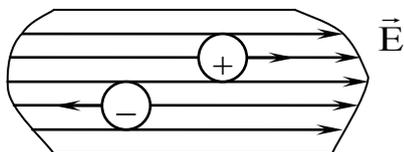
энергии электрического поля $\boxed{w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}}$, с той разницей, что электрические величины заменены в нем магнитными.

13.8 Электрический ток и его получение

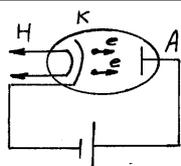
Электрическим током называется направленное движение электрических зарядов. Токи, в зависимости от характера движения электрических зарядов, подразделяются на виды:



а) *конвекционный ток* – ток при котором заряды перемещаются вместе с макроскопическими телами, на которых они находятся (проводники и диэлектрики);



б) *ток проводимости* – движение свободных электрических зарядов внутри проводника под действием внешнего поля (проводники);



в) *ток в вакууме* – электрические заряды движутся в пустоте, независимо от макроскопических тел.

Электрический ток измеряется величиной тока или силой тока (I, i).

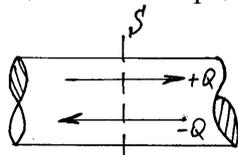
Величина тока i численно равна заряду dQ , проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени dt . $i = \frac{dQ}{dt}$ – выражение для мгновенного значения тока. Если

ток постоянен, то $I = \frac{Q}{t}$ выражение для постоянного тока.

СИ:

$$[I] = \left[\frac{Q}{t} \right] = \frac{Кл}{с} = А$$

Электрический ток вызывается движением как положительных, так и отрицательных зарядов. В связи с этим понятие о направлении электрического тока является условным. Исторически сложилось за направление электрического тока считать направление движения положительных зарядов, или, что то же самое, направление, обратное движению отрицательных зарядов.



Если движутся одновременно заряды обоих знаков, то общий ток равен:

$$i = \frac{dQ_{\rightarrow} + dQ_{\leftarrow}}{dt}$$

Ток характеризуется плотностью тока. Плотность j определяется током, приходящимся на единицу сечения проводника. Плотность тока – величина векторная \vec{j} , направление совпадает с

направлением движения положительных зарядов. $\vec{j} = \frac{\vec{i}}{S}$. Токи в зависимости от их величины и направленности движения делятся на:

- а) постоянный ток – величина и направление с течением времени не меняются;
- б) переменный ток;
- в) пульсирующий ток – меняется по величине в течение времени;
- г) квазистационарный ток – медленно меняющиеся токи в цепях ограниченной протяженности (пример: промышленные токи в линиях передач с частотой 50 Гц).

Направленное движение зарядов в проводнике непосредственно не поддается наблюдению. Однако электрический ток вызывает различные явления (действия тока), по которым можно судить о его наличии в проводнике, а по интенсивности их проявления судить о величине тока. Наиболее важные действия тока: магнитное, химическое, тепловое.

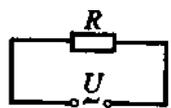
13.9. Переменный ток. Принципы получения переменного тока

Наиболее простой способ получения переменного тока – использовать явление ЭМИ. ЭДС индукции возникает в том случае, если меняется поток вектора магнитной индукции (количество "дырок", которые создаются линиями магнитной индукции в поверхности натянутой на контур). Магнитной поток может измениться, если меняться будут: магнитное поле B , площадь контура S ; угол между нормалью и магнитным полем. Переменным током называются вынужденные колебания тока в цепи, совпадающие с частотой вынуждающей ЭДС. Пусть переменная ЭДС (или переменное напряжение) имеет вид $U = U_m \cos \omega t$, где U_m – амплитуда напряжения. Тогда на участке цепи, имеющей сопротивление R , емкость C и индуктивность L , закон Ома будет иметь вид

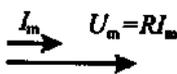
$$\left\| q + \frac{R}{L} q' + \frac{1}{LC} q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t \right\|, \text{ или } \left\| L \frac{dI}{dt} q' + IR \frac{q}{C} q = U_m \cos \omega t \right\|$$

Рассмотрим частные случаи цепи.

$R \neq 0, C \rightarrow 0, L \rightarrow 0$: переменное напряжение приложено к сопротивлению R . Закон Ома:



$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t$$

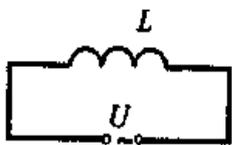


Амплитуда силы тока $I_m = \frac{U_m}{R}$. Колебания тока происходят одной фазе с напряжением.

Для наглядности воспользуемся методом векторных диаграмм и будем изображать векторами, угол между которыми равен разности фаз. $R \rightarrow 0, C \rightarrow 0, L \neq 0$: переменное напряжение приложено к катушке индуктивности.

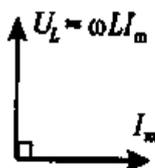
ЭДС самоиндукции в катушке:

$$\Theta_s = -L \frac{dI}{dt}$$



Закон Ома: $L \frac{dI}{dt} = U_L = U_m \cos \omega t$, откуда после

интегрирования получим $I = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t = I_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$,

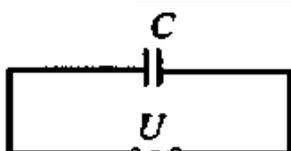


где $I_m = \frac{U}{\omega L}$

Таким образом, падение напряжения U_L опережает по фазе ток I , текущий через катушку, на $\frac{\pi}{2}$. Величина $R_L = \omega L$ называется

реактивным индуктивным сопротивлением. Для постоянного тока ($\omega = 0$) катушка индуктивности не имеет сопротивления. $R \rightarrow 0, C \neq 0, L \rightarrow 0$: переменное напряжение приложено к

конденсатору. $\frac{q}{C} = U_c = U_m \cos \omega t$

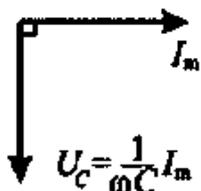


Сила тока

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega C U_m \sin \omega t = I_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \text{ где}$$

$$I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}$$

Таким образом, падение напряжения

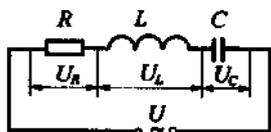


U_c отстает по фазе от текущего через конденсатор тока I на $\frac{\pi}{2}$.

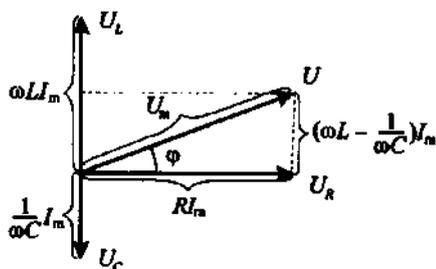
Величина $R_c = \frac{1}{\omega C}$ называется реактивным емкостным

сопротивлением. Для постоянного тока ($\omega = 0$) $R_c = \infty$, т.е. постоянный ток через конденсатор течь не может.

В общем случае $R \neq 0, C \neq 0, L \neq 0$. Если напряжение в цепи изменяется по закону $U = U_m \cos \omega t$ в цепи течет ток $I = I_m \cos(\omega t - \varphi)$, где I_m и φ определяются формулами:



$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$



$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

Величина $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}$

называется полным сопротивлением цепи.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) В чем заключается сущность явления электромагнитной индукции?
- 2) Какое поле называют индукционным или вихревым электрическим полем?
- 3) Почему для создания тока в проводнике должна быть совершена работа? За счет какой энергии она совершается?
- 4) Почему при колебаниях металлического маятника между полюсами электромагнита маятник сильно тормозится?
- 5) Что такое токи Фуко? Приведите примеры их использования в технике. В каких случаях с ними приходится бороться?
- 6) Опишите наиболее простой способ получения электричества?
- 7) Как устроен генератор гидроэлектростанции?
- 8) Что такое электрический ток?
- 9) Какие существуют три вида токов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1.Рогачев, Н.М. Курс физики. Учебное пособие/ Н.М. Рогачев. – С.-Петербург: Издательство «Лань», 2010 г. - 448 с.

Дополнительная

Грабовский, Р.И. Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

Лекция 14

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

14.1 Законы Ома и их обобщение

При прохождении тока через проводники 2-го класса на электродах происходит выделение вещества (химические процессы) – электролиз. Прохождение тока в растворах объясняется появлением ионов. Распад молекул на ионы называется электролитической диссоциацией, он происходит при растворении вещества. Теория электролитической диссоциации разработана Р. Клаузиусом (1857 г.) и разработана С. Аррениусом (1887 г.). Большое значение имеют также работы русского ученого И.А. Каблукова.

Наряду с диссоциацией при соударениях возможны обратные процессы воссоединения разноименных ионов в нейтральные молекулы – рекомбинация или молизация.

Способность диссоциировать у различных жидкостей – различна. Для количественной характеристики степени диссоциации вводится коэффициент степень диссоциации α .

α – определяется соотношением числа диссоциированных молекул, т.е. он показывает – какая доля молекул растворенного вещества распалась на ионы.

α зависит: от природы растворителя; от природы растворяемого вещества; от концентрации раствора; от температуры. Электрический ток в жидкостях обусловлен упорядоченным движением ионов. При отсутствии внешнего поля ионы в электролите совершают тепловое движение. При перемещении иона возникает сила трения, пропорциональная средней скорости

движения иона:
$$F_{\text{тр}} = kv \quad \left| \begin{array}{l} F_+ = k_+ v_+ \\ F_- = k_- v_- \end{array} \right. \text{ где } k - \text{ коэффициент трения.}$$

С другой стороны движение иона происходит под действием электрической силы:

$$F_3 = qE \quad \left| \begin{array}{l} F_+ = q_+ E \\ F_- = q_- E \end{array} \right.$$

Для установившегося режима:

$$F_{\text{тр}} = F_3 \quad \left| \begin{array}{l} k_+ v_+ = q_+ E \rightarrow v_+ = \frac{q_+}{k_+} E = b_+ E \\ k_- v_- = q_- E \rightarrow v_- = \frac{q_-}{k_-} E = b_- E \end{array} \right.,$$

где b – подвижность ионов.

Подвижность – скорость ионов при $E=1$ $[b] = \frac{M^2}{B \cdot c}$

Плотность тока в электролите равна:

$$j = j_+ + j_- \quad \left| \begin{array}{l} j_+ = n_+ q_+ v_+ \\ j_- = n_- q_- v_- \end{array} \right.,$$

где n – концентрация ионов. Для бинарных электролитов справедливо: $n_+ = n_- = \alpha n$, где α – коэффициент диссоциации; n – число молекул растворенного вещества в единице объема электролита. Полагая также $q_+ = q_- = q$, имеем: $j = \alpha n q v_+ + \alpha n q v_- = \alpha n q (v_+ + v_-)$

Учитывая, что $v_+ = b_+ E$; $v_- = b_- E$ $j = \alpha n q (b_+ + b_-) E$ – закон Ома для электролитов. Сравнивая эту формулу с дифференциальной формой закона Ома $j = \gamma E$, получим: $\gamma = \alpha n q (b_+ + b_-)$.

Плотность тока в металле под действием поля E : $j = ne\bar{V}$, где \bar{V} – средняя скорость упорядоченного движения. Сила, действующая на электрон: $f = eE = ma = m \frac{V_T - V_0}{\bar{\tau}}$,

где V_T – максимальная скорость в конце λ , следовательно, средняя скорость: $\bar{V} = \frac{1}{2} \bar{V}_T$

$\bar{\tau}$ – среднее время между соударениями,

Итак, имеем: $\bar{V} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} E \bar{\tau}$ Подставляя τ из уравнения, получим: $\bar{V} = \frac{1}{2} \frac{e \bar{\lambda}}{m \bar{V}_T} E$. Зная

что $\bar{V} = bE$, где b – подвижность, имеем: $b = \frac{1}{2} \frac{e \bar{\lambda}}{m \bar{V}_T}$ Подставляя в уравнение получим:

$$j = ne \frac{1}{2} \frac{e \bar{\lambda}}{m \bar{V}_T} E = \frac{1}{2} \frac{ne^2 \bar{\lambda}}{m \bar{V}_T} E, \text{ откуда: } \gamma = \frac{1}{2} \frac{ne^2 \bar{\lambda}}{m \bar{V}_T} \text{ (закон Ома)}$$

$j = \gamma E$, где j – удельная электропроводность.

Вывод: 1) γ тем больше, чем больше n и $\bar{\lambda}$; при увеличении T , а, следовательно, и \bar{V}_T , сопротивление R увеличивается.

14.2. Резонанс

Резонансом называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы (или, в случае электрических колебаний, частоты вынуждающего переменного напряжения) к частоте, равной или близкой собственной частоте колебательной системы. Амплитуда вынужденных колебаний

$$A = \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} \text{ имеет}$$

максимум при частоте $\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$, которая называется резонансной частотой.

14.3. Основы электромагнитной теории Максвелла

С введением тока смещения макроскопическая теория электромагнитного поля была завершена. Открытие тока смещения $(j_{см} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t})$ позволило Максвеллу создать единую теорию

электрических и магнитных явлений. Теория Максвелла не только объясняла все разрозненные явления электричества и магнетизма (причём с единой точки зрения), но и предсказала ряд новых явлений, существование которых подтвердилось впоследствии. Основу теории Максвелла составляют уравнения, названные уравнениям Максвелла.

Из уравнений Максвелла следует, что электрические и магнитные поля нельзя рассматривать как независимые: изменение во времени одного из этих полей приводит к появлению второго. Если же поля стационарные ($E = \text{const}$ и $I = \text{const}$), то уравнения Максвелла становятся независимыми и имеют вид:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{\ell} = 0$$

$$\oint \vec{D} d\vec{S} = \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{\ell} = \sum_{i=1}^n I_i$$

$$\int \vec{B} d\vec{S} \equiv 0$$

В этом случае поля (электрические и магнитные) независимы друг от друга, что и позволяет изучить сначала постоянное электрическое поле, а затем независимо от него и постоянное магнитное поле. Уравнение Максвелла в дифференциальной форме. Обобщённый закон полного тока. Циркуляция вектора по любому замкнутому контуру равна полному току (току проводимости и току смещения) через произвольную поверхность, ограниченную данным контуром.

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{пр}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\text{div} \vec{B} \equiv 0$$

Уравнения Максвелла ещё не составляют полной системы уравнений электромагнитного поля. Этих уравнений недостаточно для нахождения полей по заданным распределениям зарядов и токов. Для этого необходимо дополнить соотношения, в которые входили бы величины, характеризующие индивидуальные свойства среды. Для случая изотропных сред (не содержащих сегнетоэлектриков и ферромагнетиков) они имеют следующий вид:

$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$; $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$; $\vec{j} = \gamma \vec{E}$. С учётом соотношений система уравнений является полной и позволяет описывать все электромагнитные процессы в вакууме и веществе.

14.4 Свойства уравнений Максвелла

Уравнения Максвелла линейны. Они содержат только первые производные полей \vec{E} и \vec{B} по времени и пространственным координатам, а так же первые степени плотности электрических зарядов ρ и токов γ . Свойство линейности уравнений непосредственно связано с принципом суперпозиции. Уравнения Максвелла содержат уравнение непрерывности, выражающее закон сохранения электрического заряда:

$$\int_V \rho dV = \text{const}$$

Уравнения Максвелла выполняются во всех инерциальных системах отсчёта. Они являются релятивистски-инвариантными, что подтверждается опытными данными. О симметрии уравнений Максвелла. Уравнения не симметричны относительно электрического и магнитного полей. Это обусловлено тем, что в природе существуют электрические заряды, но нет магнитных зарядов. Вместе с тем в нейтральной однородной среде, где $\rho = 0$ и $\vec{j} = 0$, уравнения Максвелла приобретают симметричный вид, т.е. \vec{E} так связано с $(\partial \vec{B} / \partial t)$, как \vec{B} с $(\partial \vec{E} / \partial t)$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \text{div} \vec{D} = 0 \\ \text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \text{div} \vec{B} = 0 \end{array} \right.$$

Из уравнений Максвелла следует важный вывод о существовании принципиально нового физического явления: электромагнитное поле способно существовать самостоятельно без

электрических зарядов и токов. При этом изменение его состояния обязательно имеет волновой характер. Всякое изменение во времени магнитного поля возбуждает поле электрическое, изменение электрического поля, в свою очередь, возбуждает магнитное поле. За счёт непрерывного взаимопревращения они и должны сохраняться. Поля такого рода называются электромагнитными волнами. Выяснилось также, что ток смещения $(\partial \vec{D} / \partial t)$ играет в этом явлении первостепенную роль.

14.5 Роль уравнений Максвелла и границы их применимости

Уравнения Максвелла являются фундаментальными уравнениями классической оптики. Так, например, все законы распространения света (переменного электромагнитного поля) могут быть получены из уравнений Максвелла. Наряду с уравнениями Ньютона и законом всемирного тяготения они являются фундаментальными уравнениями классической физики. Уравнения Максвелла связывают друг с другом пространственные и временные производные напряжённостей \vec{B} и \vec{E} . Это означает, что меняющийся во времени электромагнитный процесс, возникший в некоторый момент в данном месте, вызовет изменение в другом месте с запаздыванием, т.е. утверждается конечная скорость передачи электромагнитных взаимодействий, которая равна: $V = C = 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ (в вакууме). Теория Максвелла имеет границы применения (как и всякая физическая теория). Она применима:

- а) для расстояний R между зарядами, превышающих внутриатомные расстояния $R > 10^{-10} m$;
- б) для частот изменения поля, не более $10^{13} \div 10^{14}$ Гц (это ограничение связано с проявлением на высоких частотах квантовых свойств излучения);
- в) для полей, напряжённость \vec{E} которых менее $10^5 \frac{B}{M}$ (это ограничение связано с тем, чтобы энергия, получаемая заряженными частицами, была меньше по сравнению со средней энергией беспорядочного движения частиц среды. В вакууме эти ограничения отпадают).

14.6 Резонанс напряжений

Если $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, то $\delta = 0$ — изменения тока и напряжения происходят синфазно. В случае $Z = R$ ток определяется только активным сопротивлением и достигает максимально возможного значения. Падение напряжения на конденсаторе U_C на катушке индуктивности U_L одинаковы по амплитуде и противоположны по фазе. Это явление называется резонансом напряжений. Частота $\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ называется резонансной.

14.7. Резонанс токов

К цепи переменного тока, содержащей параллельно включенные конденсатор емкостью C и катушку индуктивностью L , приложено напряжение $U = U_m \cos \omega t$.

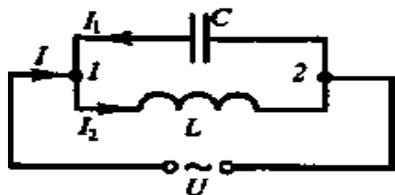
Токи в ветвях 1C2 ($R = 0, L = 0$) и 1L2 ($R = 0, C = \infty$) равны $I_{m1} = \frac{U_m}{\omega C}$ и $I_{m2} = \frac{U_m}{\omega L}$ и

противоположны по фазам. Амплитуда силы тока во внешней (неразветвленной) цепи

$$I_m = |I_{m1} - I_{m2}| = U_m \left| \omega C - \frac{1}{\omega L} \right|.$$

Если $\omega = \omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то $I_{m1} = I_{m2}$ и $I_{m1} = 0$. Явление резкого уменьшения амплитуды силы

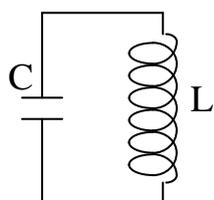
тока во внешней цепи, питающей параллельно включенные конденсатор и катушку индуктивности, при приближении



частоты ω приложенного напряжения к резонансной частоте $\omega_{рез}$ называется резонансом токов (параллельным резонансом).

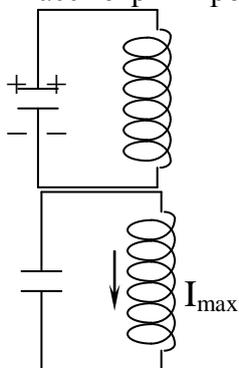
В реальных цепях $R \neq 0$, поэтому сила тока $I_m > 0$, но принимает наименьшее возможное значение.

14.8. Колебательные процессы в электрическом контуре



Электрическим колебательным контуром называется замкнутая электрическая цепь, состоящая из емкости C и индуктивности L.

Рассмотрим процессы, происходящие в идеальном контуре $R \rightarrow 0$.



$$W_3 = \frac{CU^2}{2};$$

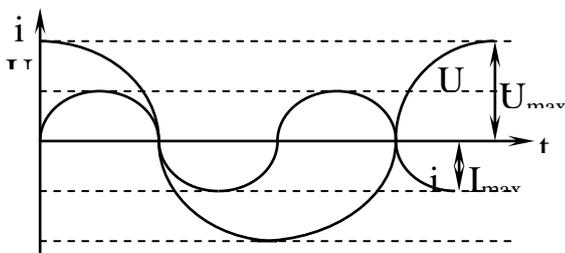
$W_m = \frac{LI^2}{2} \rightarrow$ далее следует перезарядка конденсатора, и процесс повторяется снова.

В таком контуре будут совершаться строго периодические колебания (периодически изменяются заряд на обкладках конденсатора, напряжение на нем и ток через катушку). Колебания сопровождаются взаимными превращениями энергии электрических и магнитных полей. Для идеального контура $R = 0$ имеем: $W_3 \Rightarrow W_m \Rightarrow \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{L \cdot I^2}{2}$ Колебания,

происходящие в идеальном контуре (в который энергия извне не поступает) называются свободными и собственными. Во время колебаний внешнее напряжение к контуру не приложено. Поэтому падение напряжения на емкости $U_c = \frac{Q}{C}$ и на индуктивности $U_L = L \cdot \frac{di}{dt}$ в

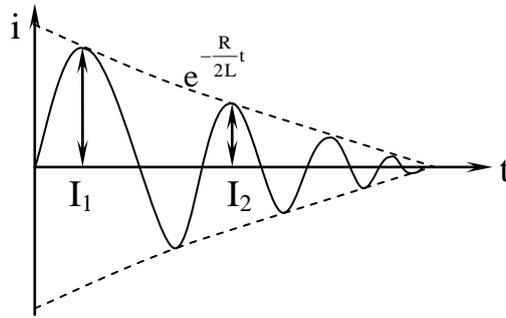
сумме должны дать нуль:
$$\begin{cases} U = \frac{Q_{max}}{C} \cos(\omega t + \varphi_0) = U_{max} \cos(\omega t + \varphi_0) \\ i = -\omega \cdot Q_{max} \sin(\omega t + \varphi_0) = I_{max} \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}$$

Из системы видно, что ток I опережает по фазе напряжение на контуре на $\frac{\pi}{2}$.



- В реальных контурах всегда имеются потери энергии:
- 1) тепловые, т.к. R не равно нулю;
 - 2) потери в диэлектрике конденсатора (диэлектрическая потеря);
 - 3) гистерезисные потери в сердечнике катушки;
 - 4) потери на излучение и другое.

Поэтому энергия в контуре с каждым колебанием будет убывать, амплитуды напряжения и тока в контуре будут уменьшаться, т.е. колебания будут затухать. График изменения токов в контуре представлен на рисунке.



$$i = \frac{U}{\omega \cdot L} \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t + \varphi_0) \text{ — закон изменения тока в контуре}$$

где $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ — частота затухающих колебаний, $I_{\max} = \frac{U}{\omega \cdot L} \cdot e^{-\frac{R}{2L}t}$

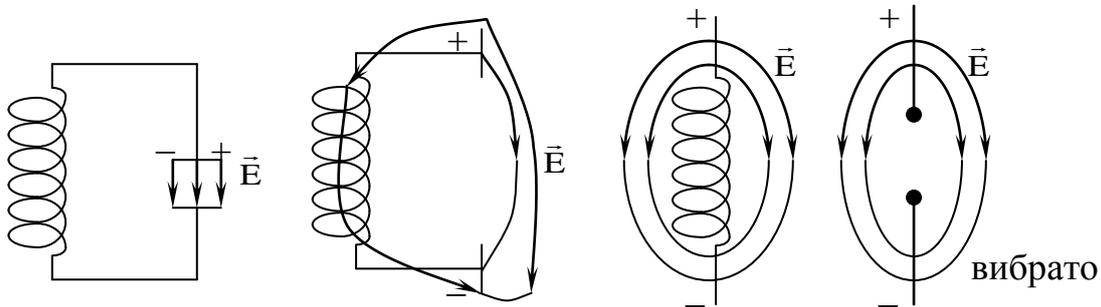
Для характеристики затухания колебаний, т.е. скорости убывания амплитуды, вводят:

а) отношение двух последующих амплитуд I_1 и I_2 .

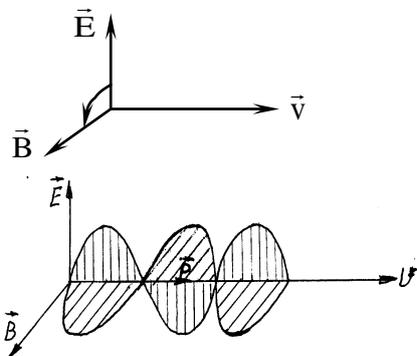
$$\Theta = \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} = \frac{e^{\frac{R}{2L}t} \frac{U}{\omega L}}{e^{\frac{R}{2L}(t+T)} \frac{U}{\omega L}} = e^{\frac{R}{2L}T}$$

14.9. Электромагнитные волны и их свойства

Источником электромагнитных волн, например, является колебательный контур. Но излучение такого контура мало. Для излучения довольно большой энергии контур надо сделать открытым.



Так как поле \vec{E} переменное, то оно создает переменное поле, что приводит согласно теории Максвелла к образованию электромагнитной волны. Из теории Максвелла следует не только возможность существования электромагнитных волн, но она позволяет установить и все их основные свойства:



1. Векторы \vec{E} , \vec{B} и \vec{V} (скорость волны) взаимно перпендикулярны и образуют правовинтовую систему, не зависящую ни от какой координатной системы.

2. Векторы \vec{E} и \vec{B} всегда колеблются в одинаковых фазах, причем между мгновенными значениями $|\vec{E}|$ и $|\vec{B}|$ в любой точке существует определенная связь:

$$|\vec{E}| = V|\vec{B}| \rightarrow \text{одновременность max, 0 и min.}$$

3. Длина волны (расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися в одинаковой фазе) определяется уравнением: $\lambda = V \cdot T$, где T — период колебания, зависящий от

параметров источника, можно определить по формуле Томсона: $T = 2\pi\sqrt{LC}$ $\lambda = v \cdot 2\pi\sqrt{LC}$ 4.

Скорость распространения зависит от среды и равна: $V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}}$, где C – скорость света в

вакууме; ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Так как $\frac{C}{V} = n$ – показатель

преломления среды, то закон Максвелла: $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ 5. Уравнение плоской электромагнитной

волны описывает закон изменения \vec{E} или \vec{H} :
$$\begin{cases} E = E_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} \mp \frac{x}{\lambda} \right) = E_0 \sin(\omega t \mp \kappa x) \\ H = H_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} \mp \frac{x}{\lambda} \right) = H_0 \sin(\omega t \mp \kappa x) \end{cases}$$
, где

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ – волновое число;}$$

«−» – волна распространяется вдоль оси $\vec{V}(x)$; «+» – волна распространяется в противоположном направлении от оси $\vec{V}(x)$; 6. Распространение электромагнитных волн сопровождается переносом энергии, характеризующей электромагнитное поле. Плотность энергии для:

1) электрического поля:
$$\omega_3 = \frac{\epsilon\epsilon_0 \vec{E}^2}{2} = \frac{\vec{E}\vec{D}}{2}$$

2) магнитного поля:
$$\omega_m = \frac{\mu\mu_0 \vec{H}^2}{2} = \frac{\vec{B}\vec{H}}{2}$$

Следовательно, в единице объема электромагнитного поля должна содержаться энергия, равная сумме этих объемных плотностей:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_3 + \omega_m = \frac{\epsilon\epsilon_0 \vec{E}^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 \vec{H}^2}{2} \\ W &= W_3 + W_m = \frac{\vec{E}\vec{D}}{2} + \frac{\vec{B}\vec{H}}{2} \end{aligned}$$

Умножив $\omega \cdot \vec{V} = \vec{P}$ – поток энергии через единицу площади в единицу времени (вектор плотности энергии):
$$\vec{P} = \omega \cdot \vec{V} = \frac{1}{2} (\epsilon\epsilon_0 E^2 + \mu\mu_0 H^2) \cdot \vec{V}$$
 Учитывая, что $V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ можно

получить:
$$\vec{P} = W \cdot \vec{V} = [\vec{E} \cdot \vec{H}]$$
 Вектор \vec{P} был впервые введен в 1874 году русским физиком Николаем Алексеевичем Умовым. В 1884 году понятие о потоке электромагнитной энергии ввел английский физик Дж.Пойтинг, поэтому его называют вектором Умова-Пойтинга (направлен в сторону распространения волны).

14.10 Электромагнитные волны, их шкала и классификация

Электромагнитные волны классифицируются по длине волны λ или связанной с ней частотой волны f . Отметим также, что эти параметры характеризуют не только волновые, но и квантовые свойства электромагнитного поля. Соответственно в первом случае электромагнитная волна описывается классическими законами, но и квантовыми.

Спектром электромагнитных волн называется полоса частот электромагнитных волн, существующих в природе. Спектр электромагнитного излучения в порядке увеличения частоты составляют: радиоволны; инфракрасное излучение; световое излучение; рентгеновское излучение; гамма излучение. Различные участки электромагнитного спектра отличаются по способу излучения и приёма волн, принадлежащих тому или иному участку спектра. По этой причине, между различными участками электромагнитного спектра нет резких границ. Радиоволны изучает классическая электродинамика. Инфракрасное световое и ультрафиолетовое излучение изучает как классическая оптика, так и квантовая физика. Рентгеновское и гамма излучение изучается в квантовой и ядерной физике.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Почему в контуре, состоящем из катушки индуктивностью L и конденсатора емкостью C , колебания не прекращаются в тот момент, когда конденсатор разряжается полностью?
- 2) Чем определяется частота колебаний и амплитуда напряжения в контуре, состоящем из индуктивности и емкости, а активное сопротивление пренебрежимо мало?
- 3) Что называют электромагнитным полем? Могут ли электрические и магнитные поля существовать обособленно друг от друга?
- 4) Что такое электрический резонанс и при каком условии он возможен?
- 5) Как связано направление индукции магнитного поля, порожденного переменным электрическим полем, с характером его изменения?
- 6) По какому принципу распространяются короткие и ультракороткие волны?
- 7) Что такое радиоволны?
- 8) С какой скоростью распространяющиеся в пространстве радиоволны?
- 9) Как возникает рентгеновское излучение?
- 10) Что составляет оптическую область спектра электромагнитных волн?
- 11) Как распространяются в природе длинные и короткие волны?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1.Рогачев, Н.М. Курс физики. Учебное пособие/ Н.М. Рогачев. – С.-Петербург: Издательство «Лань», 2010 г. - 448 с.

Дополнительная

Грабовский, Р.И. Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

Лекция 15

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

15.1 Природа света

Оптика - раздел физики, который изучает природу света, световые явления и взаимодействие света с веществом. Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны, и поэтому оптика является *частью общего учения об электромагнитном поле*.

В зависимости от круга рассматриваемых явлений оптику делят на *геометрическую* (лучевую), *волновую* (физическую), *квантовую* (корпускулярную).

15.2 Основные законы геометрической оптики

Еще до установления природы света были известны следующие законы: закон прямолинейного распространения света - свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

Световой луч - линия, вдоль которой переносится световая энергия. В однородной среде лучи света представляют собой прямые линии. Закон независимости световых пучков - эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены.

Закон отражения - отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения; угол отражения i_1' равен углу падения i_1 : $i_1' = i_1$. Закон преломления - луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред, где n_{21} - **относительный показатель преломления** второй среды относительно первой, который равен отношению абсолютных показателей преломления двух сред. Следовательно, закон преломления будет иметь вид: **абсолютным показателем преломления** среды называется величина n , равная отношению скорости электромагнитных волн в вакууме c к их фазовой скорости v в среде. Поскольку $v = c/\epsilon\mu$, то $n = \epsilon\mu$, где ϵ и μ - соответственно электрическая и магнитная проницаемость среды.

Если свет распространяется из среды с **большим** показателем преломления n_1 (оптически более плотной) в среду с **меньшим** показателем преломления n_2 (оптически менее плотную) ($n_1 > n_2$) (например, из стекла в воздух или из воды в воздух), то

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{n_1}{n_2} > 1.$$

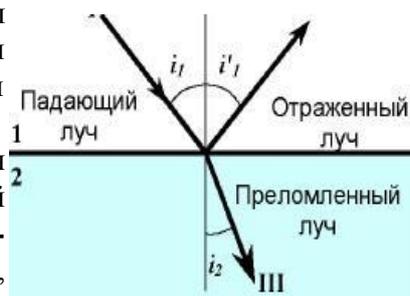
Следовательно, угол преломления i_2 больше угла падения i_1 . Увеличивая угол падения, при некотором **предельном угле** $i_{пр}$ угол преломления окажется равным $\pi/2$. При углах падения $i_1 > i_{пр}$ весь падающий свет **полностью отражается**.

При углах падения $i_{пр} > i_1 > \pi/2$ луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы. Это явление называется **полным внутренним отражением света**.

Предельный угол определяется соотношением:

$$\sin i_{пр} = \frac{n_2}{n_1} \sin \frac{\pi}{2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$
 Явление

полного отражения используется в призмах полного отражения и световодах. Дисперсия света - зависимость $n = f(\lambda)$ Следствие дисперсии - разложение белого света на простые цвета.



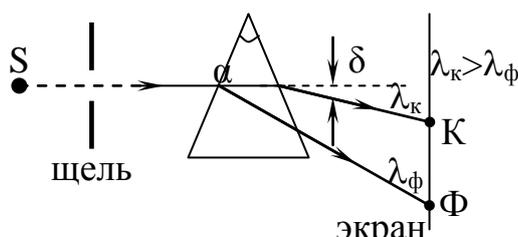
15.3 Физическое объяснение явления

Свет распространяется в прозрачной среде – **первичная электромагнитная волна**. Под действием энергии электромагнитной волны электроны атомов, молекул и ионов среды начинают совершать гармонические колебания и становятся источником **вторичных электромагнитных волн**. Электроны атомов, молекул и ионов – это внешние, слабосвязанные электроны называются **оптическими электронами**. Частота колебаний вторичных волн равна частоте колебаний первичных волн, т.е.: $\nu_1 = \nu_2$. Между первичной и вторичной волнами образуется разность фаз, которая зависит от ν или λ волны, а следовательно, волны с различной λ должны иметь различную скорость v в среде, а следовательно и различные показатели преломления, т.к.: $n = \frac{c}{v}$, а $v = f(\lambda)$. Общая дисперсионная формула:

$$n^2 \approx 1 + \frac{k\lambda^2}{\lambda^2\lambda_0^2}, \text{ где } \lambda - \text{длина первичной волны; } \lambda_0 - \text{длина волны, соответствующая}$$

собственной частоте колебания электронов вещества; k – постоянная (характеристика среды). Чем больше λ , тем меньше n (при $\lambda > \lambda_0$), т.е.: волны с большой λ имеют меньший n и меньше отклоняются; чем больше λ , тем меньше v . Опытное изучение явления дисперсии осуществил Ньютон в 1666г., пропуская белый свет через стеклянную призму.

Угол отклонения δ равен: $\delta = (n - 1) \cdot \alpha$



Таким образом, можно определить частоты собственных колебаний электронов вещества (впервые экспериментально доказал в 1912г. Рождественский).

Мерой дисперсии является увеличение показателя преломления на определенном интервале частот $\Delta\nu$ или его уменьшение ($-\Delta n$) в интервале длин волн $\Delta\lambda$, т.е.:

$$\left(-\frac{\Delta n}{\Delta \lambda} > 0 \right) - \text{нормальная дисперсия} \left(\frac{dn}{d\nu} > 0 \right)$$

$$\left(-\frac{\Delta n}{\Delta \lambda} < 0 \right) - \text{аномальная дисперсия} \left(\frac{dn}{d\nu} < 0 \right)$$

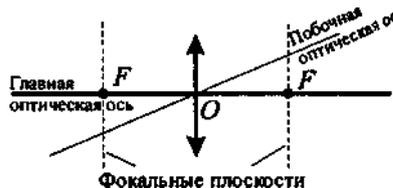
Когда $\nu = \nu_0$, то амплитуда вынужденных колебаний электронов становится большой и в результате их взаимных столкновений часть поглощённой световой энергии не излучается обратно, а переходит в тепловую. Поэтому в области аномальной дисперсии происходит сильное поглощение и понижение прозрачности тел.

Для рентгеновских лучей ($\nu_p = 10^{18}$ Гц), $\nu_p \gg \nu_0$ и для них нет аномальной дисперсии, а следовательно, они почти не поглощаются веществом и проходят большие толщи вещества. Для рентгеновских лучей $\nu = c/\lambda$, а следовательно, $n_{р.л.} \approx 1$.

15.4 Линзы

Линзой называется прозрачное тело, ограниченное с двух сторон криволинейной поверхностью.

Линза называется **тонкой**, если ее толщина значительно меньше, чем радиусы кривизны R_1 и R_2 обеих поверхностей. На оптических схемах линзы обычно обозначают двунаправленной стрелкой. Радиус кривизны $R > 0$ для *выпуклой* поверхности; $R < 0$ для *вогнутой*.



Прямая проходящая через центры кривизны поверхностей линзы называется **главной оптической осью**. **Оптическим центром линзы** (обычно обозначается O) называется точка, лежащая на главной оптической оси и

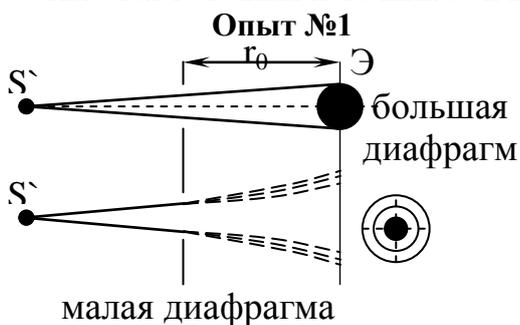
обладающая тем свойством, что лучи проходят сквозь нее не преломляясь. **Побочными оптическими осями** называются прямые, проходящие через оптический центр линзы и не совпадающие с главной оптической осью. **Фокусом** линзы F называется точка, лежащая на главной оптической оси, в которой пересекаются лучи **параксиального** (приосевого) светового пучка, распространяющиеся параллельно главной оптической оси. **Фокальной плоскостью** называется плоскость, проходящая через фокус линзы перпендикулярно ее главной оптической оси. **Фокусным расстоянием** f называется расстояние между оптическим центром линзы O и ее

фокусом F : $f = \frac{1}{(n_{21} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$ **Формула тонкой линзы:** $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, где a и b - расстояния от

линзы до предмета и его изображения. Если $a = \infty$, т.е. лучи падают на линзу параллельным пучком (a), то $b = f$. Если $b = \infty$, т.е. изображение находится в бесконечности (b), и, следовательно, лучи выходят из линзы параллельным пучком, то $a = f$. Фокусные расстояния линзы, окруженной с обеих сторон одинаковой средой, равны. Величина $\Phi = 1/f$ называется **оптической силой линзы**. Ее единица - **диоптрия** (дптр) - оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м. Линзы с **положительной** оптической силой являются **собирающими**, с **отрицательной** - **рассеивающими**. В отличие от собирающей линзы, рассеивающая линза имеет мнимые фокусы. В мнимом фокусе сходятся (после преломления) воображаемые продолжения лучей, падающих на рассеивающую линзу параллельно главной оптической оси.

15.5 Принцип Гюйгенса – Френеля

Имеется точечный источник S' и на пути ставим диафрагму и экран.



Дифракция – отклонение света от прямолинейного распространения в однородной среде, когда свет, огибая препятствие, заходит в область геометрической тени. Дифракция подтверждает волновую природу света. Анализ дифракции света ведётся на основе принципа Гюйгенса и законов интерференции. Принцип Гюйгенса – каждая точка, среды, до которой доходит световое возбуждение, является центром вторичных волн. Поверхность, огибающая в некоторый момент

времени эти вторичные волны, даёт фронт действительно распространяющейся волны в этот момент времени. Согласно принципу Гюйгенса, каждую точку фронта можно рассматривать как самостоятельный источник колебаний. Считается, что в однородной среде вторичные волны излучаются только вперёд, т.е. в направлениях, составляющих острые углы с внешней нормалью к фронту волны.

Принцип Гюйгенса является чисто геометрическим, он не указывает способа расчёта амплитуды волны, огибающей вторичные волны. Принцип Френеля – волновое возмущение в любой точке пространства можно рассматривать как результат интерференции вторичных волн от фиктивных источников, на которые разбивается волновой фронт. Объединение положений Гюйгенса и Френеля называется **принципом Гюйгенса – Френеля**, который позволяет рассматривать случаи дифракции света.

15.6 Глаз как оптическая система. Аккомодация

Поток излучения, отраженный от наблюдаемого предмета, проходит через оптическую систему глаза и фокусируется на внутренней поверхности глаза – сетчатой оболочке, образуя на ней обратное и уменьшенное изображение (мозг «переворачивает» обратное изображение, и оно воспринимается как прямое). Оптическую систему глаза составляют роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело. Особенностью этой системы является то, что последняя среда, проходимая светом непосредственно перед образованием изображения на сетчатке, обладает показателем преломления, отличным от единицы. Вследствие этого фокусные расстояния оптической системы глаза во внешнем пространстве (переднее фокусное расстояние) и внутри глаза (заднее фокусное расстояние) неодинаковы. Преломление света в глазу происходит главным образом на его внешней поверхности – роговой оболочке, или роговице, а также на поверхностях хрусталика. Радужная оболочка определяет диаметр зрачка, величина которого может изменяться произвольным мышечным усилием от 1 до 8 мм. Оптическая система глаза чрезвычайно сложна, поэтому при расчетах хода лучей обычно пользуются упрощенными, эквивалентными истинному глазу «схематическими глазами». Аккомодация – это способность глаза приспосабливаться к четкому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза. Аккомодация происходит путем изменения кривизны поверхностей хрусталика при помощи натяжения или расслабления ресничного тела. Когда ресничное тело натянуто, хрусталик растягивается и его радиусы кривизны увеличиваются. При уменьшении натяжения мышцы хрусталик под действием упругих сил увеличивает свою кривизну. В свободном, ненапряженном состоянии нормального глаза на сетчатке получают ясные изображения бесконечно удаленных предметов, а при наибольшей аккомодации видны самые близкие предметы. Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке для ненапряженного глаза, называют дальней точкой глаза. Положение предмета, при котором создается резкое изображение на сетчатке при наибольшем возможном напряжении глаза, называют ближней точкой глаза. При аккомодации глаза на бесконечность задний фокус совпадает с сетчаткой. При наибольшем напряжении на сетчатке получается изображение предмета, находящегося на расстоянии около 9 см. В среднем расстояние наилучшего зрения составляет около 25-30 см, хотя для каждого человека оно может быть индивидуальным.

15.7. Основные фотометрические характеристики, световые величины в фотометрии

Фотометрия – раздел оптики, в котором рассматриваются энергетические характеристики оптического излучения в процессах его испускания, распространения и взаимодействия с веществом. При этом значительное внимание уделяется вопросам измерения интенсивности света и его источников. **Энергетические величины в фотометрии** – характеризуют энергетические параметры оптического излучения без учета особенностей его воздействия на тот или иной приемник излучения.

Поток излучения Φ_e – величина, равная отношению энергии $W_{\text{излучения}}$ к времени t , за которое излучение произошло (мощность излучения). **Единица потока излучения – ватт (Вт)**. **Энергетическая светимость (излучательность)** R_e – величина, равная отношению потока излучения Φ_e , испускаемого поверхностью, к площади $S_{\text{сечения}}$, сквозь которое этот поток проходит (поверхностная плотность потока излучения). **Единица энергетической светимости – (Вт/м²)**. **Энергетическая сила света (сила излучения)** I_e – величина, равная отношению потока излучения Φ точечного источника к телесному углу ω , в пределах которого это излучение распространяется. **Единица энергетической силы света – (Вт/ср)**. **Энергетическая освещенность (облученность)** E_e – характеризует величину потока излучения, падающего на единицу освещаемой поверхности. **Единица энергетической освещенности – (Вт/м²)**. **Энергетическая яркость (лучистость)** V_e – величина, равная отношению энергетической силы света I_e элемента излучающей поверхности к площади A проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения. **Единица энергетической**

яркости $-(Вт/(ср \cdot м^2))$. Различные приемники, используемые при оптических измерениях, обладают **селективностью (избирательностью)**. Для каждого из них характерна своя кривая чувствительности к энергии различных длин волн. Световые измерения, являясь субъективными, отличаются от объективных, энергетических, и для них вводятся световые единицы, используемые только для видимого света. Основной световой единицей в СИ является единица **силы света I – (кд)**. Единица **светового потока Φ** (мощности оптического излучения) – **(лм)**: 1лм - световой поток, испускаемый точечным источником силой света в 1кд внутри телесного угла в 1ср (**1лм=1кд·ср**). **Светимость R** – суммарный поток, посылаемый светящейся площадкой с площадью S . Единица светимости - **(лм/м²)**. **Яркость** светящейся поверхности в некотором направлении ϕ есть величина, равная отношению силы света I в этом направлении к площади S проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению. Единица яркости $-(кд/м^2)$. **Освещенность E** - величина, равная отношению светового потока Φ , падающего на поверхность, к площади S этой поверхности. Единица освещенности $-(лк)$.

15.8 Поглощение света

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. Существуют непрерывные, линейчатые и полосатые спектры излучения и столько же видов спектров поглощения. Линейчатые спектры играют особо важную роль, потому что их структура прямо связана со строением атома. Ведь эти спектры создаются атомами, не испытывающими внешних воздействий. Поэтому, знакомясь с линейчатыми спектрами, мы тем самым делаем первый шаг к изучению строения атомов. Наблюдая эти спектры, ученые получили возможность "заглянуть" внутрь атома. Здесь оптика вплотную соприкасается с атомной физикой. 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 имеется возможность определить химический состав тела. С помощью спектрального анализа можно обнаружить данный элемент в составе сложного вещества. Это очень чувствительный метод.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Какое явление называют дифракцией света и при каких условиях оно наблюдается?
- 2) В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля? Как объяснить прямолинейность распространения света с точки зрения волновой теории?
- 3) Какое явление называют интерференцией света?
- 4) На каком принципе основана работа микроскопа?
- 5) Что называется оптической силой линзы?
- 6) Что такое светимость и чем она отличается от яркости?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Пронин, В.П.** Краткий курс физики / В. П. Пронин. – Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2007 г. – 200 с.

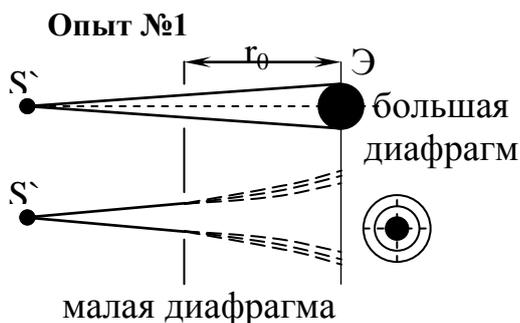
Дополнительная

1. **Грабовский, Р.И.** Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

источником. В этом случае положения **max** и **min** быстро меняют своё положение в пространстве, и мы будем видеть некоторую среднюю освещённость с интенсивностью $2A_1$. Эти источники – **некогерентные**. Любые два независимых источника света – некогерентны. Когерентные волны можно получить от одного источника, путём разбиения пучка света на несколько пучков, имеющих постоянную разность фаз.

16.2 Дифракция света. Принцип Гюйгенса – Френеля

Имеется точечный источник S' и на пути ставим диафрагму и экран. Отклонение света от прямолинейного распространения в однородной среде, когда свет, огибая препятствие, заходит в область геометрической тени называется дифракцией.



Дифракция подтверждает волновую природу света. Дифракция света всегда сопровождается интерференцией дифрагированных лучей.

Анализ дифракции света ведётся на основе принципа Гюйгенса и законов интерференции. Принцип Гюйгенса - каждая точка, среды, до которой доходит световое возмущение, является центром вторичных волн.

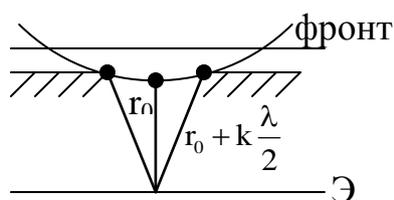
Поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, даёт фронт действительно распространяющейся волны в этот момент времени.

Принцип Френеля. Волновое возмущение в любой точке пространства можно рассматривать как результат интерференции вторичных волн от фиктивных источников, на которые разбивается волновой фронт. Эти фиктивные источники когерентны.

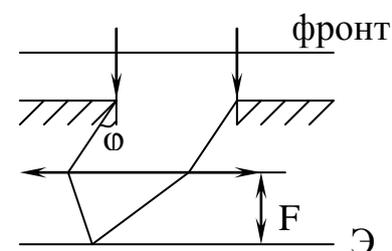
Объединение положений Гюйгенса и Френеля называется **принципом Гюйгенса – Френеля**, который позволяет рассматривать случаи дифракции света.

Различают два случая дифракции света – **дифракцию Френеля**, или дифракцию в сходящихся лучах и **дифракцию Фраунгофера**, или дифракцию в параллельных лучах.

Дифракция Френеля:



Дифракция Фраунгофера:



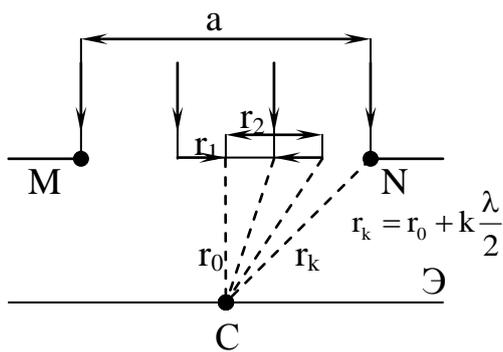
Виды дифракции.

В этом случае на препятствие падает сферическая или плоская волна, а дифракционная картина, наблюдаемая на экране, находящемся позади препятствия, на конечном расстоянии него.

При этой дифракции на экране наблюдается «дифракционное от изображение» препятствия. Расчёт дифракционной картины ведётся по методу зон Френеля.

В этом случае на препятствие падает плоская волна, а дифракционная картина, наблюдаемая на экране, который находится в фокальной плоскости собирающей линзы, установленной на пути прошедшего через препятствие света. При этой дифракции на экране наблюдается «дифракционное изображение» удалённого источника света.

А. Дифракция на круглом отверстии (дифракция Френеля).



MN – фронт волны.
 r_0 – расстояние от Э до отверстия.
 В точке С волны будут интерферировать.
 Разбиваем площадь отверстия на зоны и проводим радиусы:

$$r_1 \rightarrow r_0 + \frac{\lambda}{2}$$

$$r_2 \rightarrow r_0 + 2 \frac{\lambda}{2}$$

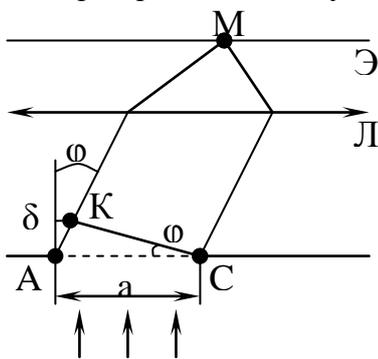
Крайние точки зон имеют разность хода $\frac{\lambda}{2}$, поэтому точки в соседних зонах колеблются в противофазах и гасят друг друга. Итак: Если число зон, которое укладывается в отверстии чётное, то в точке С будет тёмное пятно, если нечётное, то светлое. Максимум освещения, когда размер отверстия а равен одной зоне. Число зон Френеля зависит от удалённости точки С (т.е. от r_0) от фронта MN. Можно показать, если $r_k^2 = r_0^2 + \frac{a^2}{4}$,

где $r_k = r_0 + k \frac{\lambda}{2}$, то $k = \frac{a^2}{4r_0\lambda}$, т.е. $k = f(r_0)$.

По мере удаления Э в точке С наблюдаются то тёмное, то светлое пятно.

Б. Дифракция от щели (дифракция Фраунгофера).

При прохождении лучей через узкую щель АС наблюдается дифракция.



Пути лучей КМ и СМ таухронны, т.е. равны. На их прохождении свет затрачивает одинаковое время.

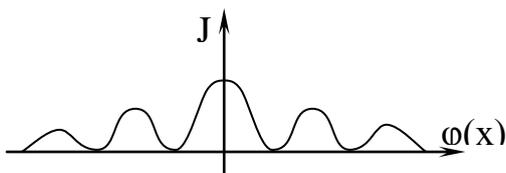
АС – щель.
 δ – разность хода лучей, от которого зависит результат интерференции:
 $\delta = a \sin \varphi$

Если $\delta = 2k \frac{\lambda}{2}$ (чётное число зон) – **min**.

Условие min $\boxed{a \sin \varphi = \pm k \lambda}$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ – порядок дифракционного минимума.

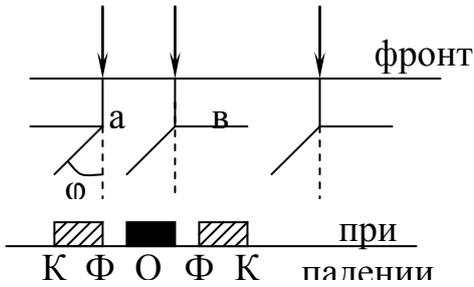
аналогично: $\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ (нечётное число зон) – **max**.

Условие max $\boxed{a \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}}$, при $\varphi = 0$ – центральный max.



С ростом k ширина зон Френеля и интенсивность J максимумов быстро уменьшается. Если свет не монохроматический, то наблюдаются цветные полосы, т.к. φ зависит от λ .

Система из большого числа одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей а, разделённых одинаковыми по ширине непрозрачными промежутками b, называется **дифракционной решёткой**.



$a + b = c$ – постоянная решётки.

Условие min: $a \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$,

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Условие max (главного): $a \sin \varphi = \pm k \lambda$, где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Условие min (главного): $a \sin \varphi = \pm n \lambda$, где $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Примечание:

1. Если некоторые значения φ одновременно удовлетворяют условиям и для главных максимумов и для главных минимумов, то главные максимумы, соответствующие этим значениям φ , не наблюдаются (например, если $d = 2a$, то все главные максимумы $k = 2, 4, 6, \dots$ отсутствуют).

2. Между каждыми двумя главными максимумами находится $(N-1)$ дополнительных минимумов, удовлетворяющих условию:

$$a \sin \varphi = \pm n \frac{\lambda}{N},$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$, кроме $n = N, 2N, 3N, \dots$ и $(N-2)$ дополнительных максимумов, но их интенсивность мала, по сравнению с главными максимумами и поэтому их не учитывают.

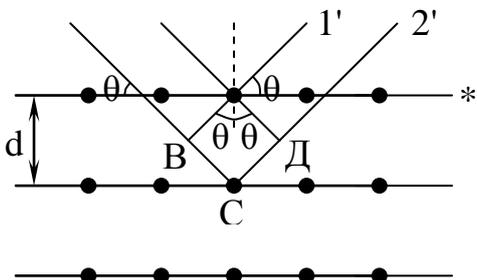
3. При наклонном падении света на дифракционную решётку условие для главных максимумов:

$$A(\sin \varphi - \sin i) = \pm k \lambda$$

С. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах

В 1912г. немецкий физик – теоретик Лауэ с сотрудниками предположил и экспериментально доказал явление дифракции у рентгеновских лучей, доказав тем самым, что и они представляют собой электромагнитные волны ($\lambda_{\text{рентгеновских лучей}} \approx 10^{-10} \text{ м}$). Обычные дифракционные решётки здесь неприменимы ($d \gg \lambda_{\text{р.л.}}$). Для этих целей используют пространственную дифракционную решётку, примером которой служит кристаллическая решётка твёрдого тела. В решётке атомы расположены упорядоченно, образуя трёхмерную периодическую последовательность или **трёхмерную решётку**.

Рентгеновские лучи возбуждают атомы кристаллической решётки и вызывают появление вторичных волн, которые интерферируют подобно вторичным волнам от щелей дифракционной решётки (зеркальное отражение лучей от систем параллельных плоскостей).



* – атомная плоскость кристалла

d – межплоскостное расстояние

θ – угол скольжения

Разность хода рассеянных лучей 1' и 2' равна:

$$\delta = BC + CD = 2d \sin \theta$$

максимум будет для них, если $\delta = \pm k \lambda$,

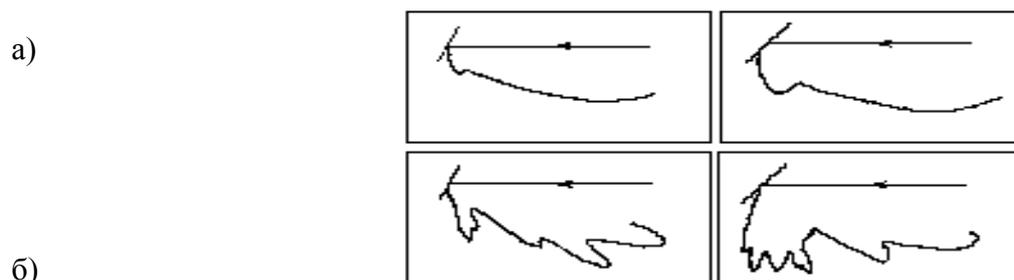
где $k = 1, 2, \dots$ – порядок дифракционного максимума.

Условие дифракционного максимума или условие Вульфа-Брэгга. $2d \sin \theta = \pm k \lambda$

Изучая дифракцию рентгеновских лучей, можно установить межатомные расстояния, т.е. изучить кристаллическую структуру (рентгеноструктурный анализ), или зная структуру – состав рентгеновских лучей.

16.3 Экспериментальное обнаружение волн де Бройля

Интерференция электронов при отражении от кристаллов была обнаружена, но не понята еще до появления гипотезы де Бройля. Производя опыты по рассеянию электронов тонкими металлическими пленками в 1921-1923 гг., Дэвиссон и Кэнсман наблюдали определенно выраженную зависимость интенсивности рассеянного пучка от угла рассеяния. Положение и величина получающихся максимумов на кривой рассеяния существенно зависели от скорости электронов. В одном из опытов, в котором электроны рассеивались никелевой пластинкой, стеклянный прибор лопнул и пластинка окислилась. После длительного прокаливания пластинки в вакууме и атмосфере водорода произошла перекристаллизация с образованием некоторого количества крупных кристаллов. При повторении опыта по рассеянию электронов с этой пластинкой кривая рассеяния резко изменилась: количество максимумов сильно возросло, а сами максимумы сделались значительно более отчетливыми. На рис. приведены полярные диаграммы рассеяния электронов до прокаливания пластинки (а) и после прокаливания (б).

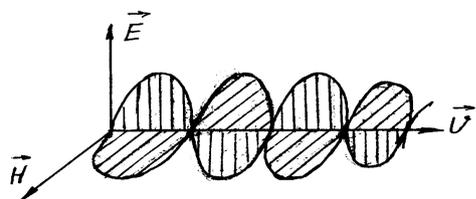


На этих диаграммах вдоль радиусов-векторов отложены отрезки, пропорциональные интенсивности рассеяния электронов в соответствующих направлениях. Происхождение максимумов и минимумов на кривых рассеяния долгое время оставалось непонятным, пока их не истолковали как результат интерференционного отражения волн де Бройля от соответствующих атомных плоскостей крупных кристаллов, образовавшихся в результате перекристаллизации. Это истолкование было подтверждено в 1927 г. опытами Дэвиссона и Джермера. Таким образом, была открыта дифракция электронов. С них началось систематическое исследование этого явления.

16.4 Поляризация света.

Поляризация света. – физическая характеристика оптического измерения, описывающая поперечную анизотропию световых волн, т.е. неэквивалентность различных направлений в плоскости, перпендикулярной световому лучу.

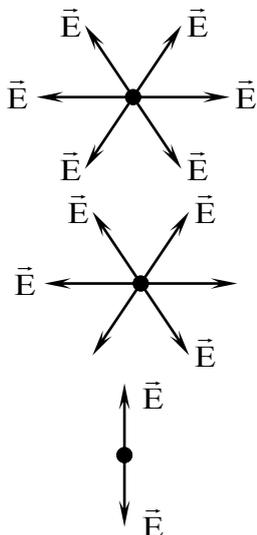
Свет – суммарное электромагнитное излучение множества атомов, если из множества выбрать одну, то её можно представить в виде двух взаимно перпендикулярных векторов \vec{E} и \vec{H} .



Электромагнитная волна – волна поперечная

Все законы изменения \vec{E} аналогичны законам изменения \vec{H} , поэтому, для простоты рассуждений, будем говорить лишь о \vec{E} .

Т.к. источниками света являются атомы, а их количество в источнике N , то пространственную ориентацию для произвольно выбранного момента расположение векторов \vec{E} источника можно дать в виде



Все направления \vec{E} равновероятны (ориентации различны) – естественный свет

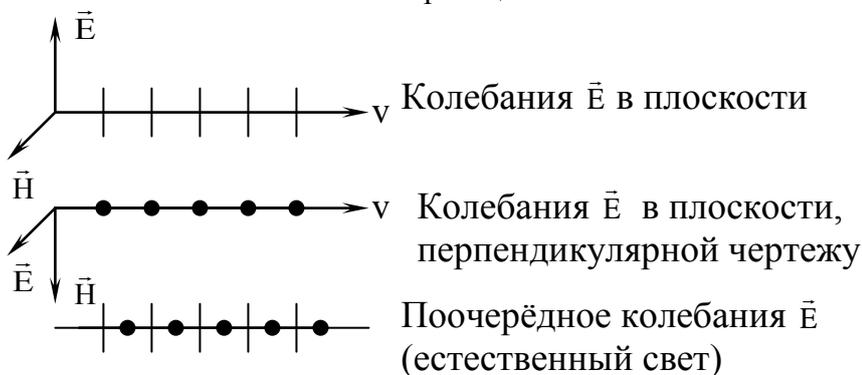
Если под действием внешних влияний на свет (или особенностей источника), появляется преимущественное направление колебаний \vec{E} , то свет – **частично поляризован**.

Если колебания \vec{E} происходят только в одном определённом направлении – **полностью поляризованный свет**.

Плоскость колебаний \vec{E} называется плоскостью колебаний.

Плоскость колебаний \vec{H} называется плоскостью поляризации.

Схематическое обозначение плоскостей колебаний естественного и поляризованного света



Вопросы для самоконтроля:

- 1) Какое явление называют интерференцией света?
- 2) Какой свет называют естественным, плоско поляризованным, частично поляризованным? Поляризованным по кругу или по эллипсу?
- 3) Что называется плоскостью колебаний и плоскостью поляризации?
- 4) Какое явление называют дифракцией света и при каких условиях оно наблюдается?
- 5) В чем заключается принцип Гюйгенса – Френеля?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Рогачев, Н.М. Курс физики. Учебное пособие/ Н.М. Рогачев. – С.-Петербург: Издательство «Лань», 2010 г. - 448 с.

Дополнительная

1. Грабовский, Р.И. Курс физики. 6-е изд. / Р. И. Грабовский. – СПб. : Издательство «Лань», 2002. – 608 с

АТОМНАЯ, ЯДЕРНАЯ, КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

17.1 Виды оптических излучений. Квантовый характер излучения

Квантовая оптика –раздел оптики, занимающийся изучением явлений, в которых проявляются квантовые свойства света. Колебания электрических зарядов, входящих в состав вещества, обуславливают электромагнитное излучение, которое сопровождается потерей энергии веществом. При рассеянии и отражении света формирование вторичных световых волн и продолжительность излучения веществом происходит за время, сравнимое с периодом световых колебаний. Если излучение продолжается в течение времени, значительно превышающем период световых колебаний, то возможны два типа излучения: **тепловое излучение** и **люминесценция**.

Равновесным состоянием системы тело-излучение является состояние, при котором распределение энергии между телом и излучением остается неизменным для каждой длины волны. Единственным видом излучения, которое может находиться в равновесии с излучающим телом, является **тепловое излучение** – свечение тел, обусловленное нагреванием.

Люминесценцией называется неравновесное излучение, избыточное при данной температуре над тепловым излучением тела и имеющее длительность, большую периода световых колебаний. **Тепловое излучение** совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества (*внутренней энергии*) и свойственно всем телам при температурах выше 0К. **Тепловое излучение равновесно** –тело в единицу времени поглощает столько же энергии, сколько и излучает.

Количественной характеристикой теплового излучения служит **спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) тела** $R_{\nu,T}$ – мощность R излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины. $X (dW_{\nu? \nu+dv}^{изл}$ – энергия электромагнитного излучения, испускаемого за 1с (мощность излучения) с площади 1м^2 поверхности тела в интервале частот от ν до $\nu + dv$). Её единица - **джоуль на метр в квадрате**. Испускательную способность можно представить в виде функции длины волны: т.к.

Интегральная по ν **энергетическая светимость**: Способность тел поглощать падающее на них излучение характеризуется **спектральной поглощательной способностью** $A_{\nu,T}$ –показывающей, какая доля энергии приносимой за единицу времени на единицу площади тела падающими на нее электромагнитными волнами с частотами от ν до $\nu + dv$, поглощается телом.

Электромагнитная волна несёт с собой энергию, плотность потока которой, даётся вектором Умова-Пойтинга: $\vec{P} = [\vec{E}\vec{H}]$, где \vec{P} – показывает мгновенную плотность потока энергии.

Исходя из гипотезы о квантах, М.Планк предложил формулу для спектральной излучательной способности абсолютно чёрного тела в виде: $f(\lambda, T) = r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T} - 1}}$, которая

очень хорошо согласуется с опытом.

Австрийский физик Йозеф Стефан, в 1879г., анализируя экспериментальные данные, пришёл к выводу, что **энергетическая светимость R_{Σ} абсолютно чёрного тела пропорционально четвёртой степени его температуры.**

$$R_{\Sigma} \sim T^4$$

Австрийский физик Людвиг Больцман в 1884г., исходя из термодинамических соображений, получил теоретически для R_{Σ} абсолютно чёрного тела значение: $R_{\Sigma \text{ а.ч.т.}} = \int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega = \sigma T^4$

Закон Стефана-Больцмана следует из формулы Планка: $R_{\Sigma} = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4$, где

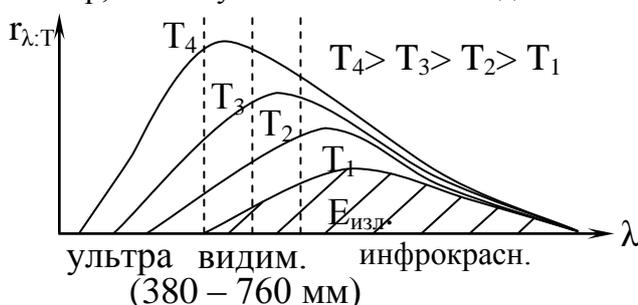
σ – постоянная Стефана-Больцмана. $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

Суммарная энергия излучения по всем длинам волн, испускаемая площадкой S абсолютно чёрного тела за время τ равна:

$$E = \sigma T^4 S \tau \quad \text{или} \quad E = R_s S \tau$$

Распределение энергии в спектре теплового излучения. **Квантовые постулаты Бора**

Тепловое излучение тел, находящихся в термодинамическом равновесии, имеет сплошной спектр, т.е. излучаются волны всех длин волн. Представим график излучательной способности.



- 1) площадь, ограниченная кривой и осью λ , равна энергии излучения ($E_{\text{изл}}$);
- 2) при низких T излучение преимущественно инфракрасное;
- 3) спектр излучения сплошной;
- 4) распределение энергии зависит от λ и имеет максимум при λ_m ;
- 5) при повышении T максимум $r_{\lambda,T}$ смещается в коротковолновую часть спектра. Смещение резкое.

Немецкий физик Вильгельм Вин, в 1893г. и 1896г., исследуя распределение энергии в спектре теплового излучения абсолютно чёрного тела, установил законы:

$$\lambda_m = \frac{C'}{T} \quad r_{\lambda,T \text{ max}} = C'' T^5$$

$C' = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ мК}$; $C'' = 1,3 \cdot 10^{-14} \text{ Вт/мК}^5$ – постоянные законов Вина.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний) гласит: атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает.

Второй постулат Бора (правило частот) формулируется следующим образом: при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

17.2 Спектры. Спектральный анализ

Переход с более удаленной орбиты на более близкую связан с испусканием одного фотона – такова причина возникновения линейчатого спектра испускания, а переход электрона на более дальнюю орбиту при поглощении фотона соответствует возникновению линейчатого спектра поглощения. Атомные спектры обладают ярко выраженной индивидуальностью, причем их вид определяется не только атомом данного элемента, но и его строением, внешними факторами: температурой, давлением, электрическими и магнитными полями и др.

Получение и анализ спектров играют огромную роль в теоретической и прикладной физике и технике. Изучение спектров испускания и поглощения веществ позволяет установить энергетические уровни и тончайшие детали строения атомов. Знание же спектров атомов и молекул различных химических соединений позволяет проводить спектральный анализ, т.е. устанавливать состав исследуемых тел. В зависимости от вида переходасерии имеют свои наименования:

n	n ₂	Серия	Область спектра
1	2,3,4...	Лаймана	Ультрафиолетовая
2	3,4,5...	Бальмера	Видимая
3	4,5,6...	Пашена	Инфракрасная
4	5,6,7...	Брэкетта	Инфракрасная
5	6,7,8...	Пфунда	Инфракрасная

Названия серий соответствуют именам ученых, экспериментально нашедших эти серии спектральных линий.

17.3 Люминесценция твердых тел. Фотолюминесценция. Правило Стокса

Люминесценцией называется излучение, избыточное при данной температуре над тепловым излучением тела и имеющее длительность, большую периода световых колебаний.

Вещества, способные под действием различного рода возбуждений светиться, называются **люминофорами**. В зависимости от способов возбуждения различают: **фотолюминесценцию** (под действием света), **рентгенолюминесценцию** (под действием рентгеновского излучения), **катодолюминесценцию** (под действием электронов), **радиолюминесценцию** (при возбуждении ядерным излучением, например γ -излучением, нейтронами, протонами), **хемилюминесценцию** (при химических превращениях), **триболлюминесценцию** (при растирании или раскалывании некоторых кристаллов).

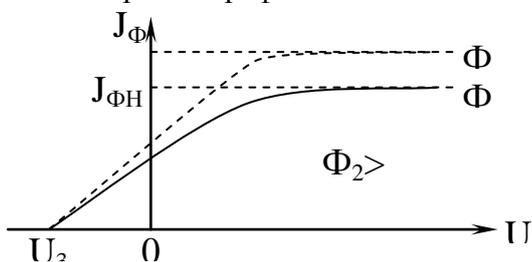
По длительности свечения условно различают: **флуоресценцию** ($t \leq 10^{-8}$ с) и **фосфоресценцию** - свечение, продолжающееся заметный промежуток времени после прекращения возбуждения. Уже в первых количественных исследованиях люминесценции было сформулировано **правило Стокса**: длина волны люминесцентного излучения всегда больше длины волны света, возбуждившего его. Некоторые тела при освещении не только отражают часть падающего на них света, но и начинают светиться. Такое свечение, или **люминесценция**, отличается важной особенностью: свет люминесценции имеет иной спектральный состав, чем свет, вызвавший свечение.

Примером легко наблюдаемой люминесценции может служить синевато-молочное свечение керосина, рассматриваемого на дневном свете. Очень большое число растворов красок и других веществ обнаруживают люминесценцию, особенно под действием источников, испускающих ультрафиолетовый свет (например, электрической дуги или ртутной лампы). Свечение такого рода называют **фотолюминесценцией**, желая подчеркнуть, что оно возникает под действием света. Изменение цвета свечения по сравнению с цветом возбуждающего света нередко заметно на глаз. Еще лучше наблюдается указанная особенность, если сравнить спектр света люминесценции со спектром возбуждающего света. Все эти наблюдения показывают, что: свет люминесценции характеризуется большей длиной волны, чем свет возбуждающий.

17.4 Фотоэффект. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия излучения передается электронам вещества

Электроны, вылетающие из вещества под действием излучения, называются фотоэлектронами, а само явление – **внешним фотоэффектом**.

Изобразим график зависимости тока через гальванометр от приложенного напряжения.



Если посмотреть вольтамперную характеристику, представленную на графике, то видно, что величина электрического тока, который называют **фототок**, нелинейно зависит от напряжения. Горизонтальная часть графика называется **фототоком насыщения** $J_{\text{ФН}}$, величина которого зависит от светового потока Φ . При увеличении Φ величина $J_{\text{ФН}}$ увеличивается и математически может быть выражена:

$$J_{\text{ФН}} = C\Phi,$$

где C – постоянная, зависящая от условий опыта. При $U = 0$ величина $J_{\text{Ф}} \neq 0$, что объясняется наличием кинетической энергии вылетевших из катода электронов. Приложив обратное напряжение U_3 (запирающее), можно прекратить фототок.

Эйнштейн постулировал, что:

1) любое монохроматическое излучение частоты ν всегда состоит из целого числа фотонов, энергия каждого из которых равна $h\nu$. Такое излучение испускается и поглощается только порциями энергии $h\nu$;

2) при поглощении излучения веществом частоты ν , каждый из электронов может поглотить только один фотон, приобретая при этом только энергию $h\nu$. Используя закон сохранения энергии, Эйнштейн предложил уравнение для внешнего

фотоэффекта: $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$

Из квантовой теории фотоэффекта следует: каждый акт

поглощения фотона электроном происходит не зависимо от других. Увеличение интенсивности излучения означает увеличение числа подающих и поглощенных фотонов. Условия вырывания электронов и распределение фотоэлектронов по скоростям при этом не меняется. Число фотоэлектронов, вырываемых с катода за единицу времени, пропорционально интенсивности света. Фототок насыщения пропорционален энергетической освещенности катода: $I_n \sim \Phi(E)$. Число фотоэлектронов ежесекундно покидающих катод, пропорционально числу фотонов, поглощаемых веществом за единицу времени. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов зависит от частоты падающего света и не зависит от его интенсивности. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта – минимальная частота $\nu_{кр} = \frac{A}{h}$,

при которой еще возможен внешний фотоэффект $\left(\nu_{кр} = \frac{c}{\lambda_{кр}} \right)$.

$\nu_{кр}$ зависит: от химической природы вещества и состояния поверхности.

17.5 Естественная радиоактивность

Ключом к изучению атомного ядра послужило открытие французского ученого А. Беккереля явления *естественной радиоактивности*, которое заключается в непрерывном испускании радиоактивными веществами (типа уран, радий, плутоний) α , β и γ -лучей. Исследования этих лучей в магнитном и электрическом полях показали, что α – лучи поток положительно заряженных частиц, β -лучи – поток отрицательно заряженных частиц, γ -лучи – излучение нейтральное. Дальнейшие исследования показали, что радиоактивные излучения способны вызывать биологические и химические действия, ионизировать, вызывать люминесценцию твердых и жидких тел, обладать большой проникающей способностью (γ -лучи наибольшей). Температура радиоактивных веществ всегда выше температуры окружающей среды. Это говорит о том, что процесс радиоактивного распада сопровождается непрерывным выделением энергии.

В 1908 году Резерфордом было обнаружено, что в запаянной ампуле, содержащей небольшое количество соли радия ($RaCl_2$) появляются два новых, ранее там не находившихся газа – гелий и неизвестный в то время элемент – радон. Эти наблюдения привели к *объяснению радиоактивности как самопроизвольно протекающего независимого от внешних факторов процесса распада атомных ядер*.

В данном случае Ra (радий) распадается на Rn (радон) и He (гелий) (He образуется в результате нейтрализации α -частицы с электронами воздуха). Энергии α -, β - и γ -частиц – порядка $1 \div 10$ МэВ. Энергии связи внешних электронов в атоме $\sim 6 \div 10$ эВ. Энергии химических превращений $\sim 2 \div 5$ эВ. Энергии, выделяемые радиоактивными элементами, обязаны не превращениям электронных оболочек, а связаны с перестройкой ядер этих элементов. Поскольку α - и β -частицы заряжены, то при этом должны меняться заряд и атомный номер ядра, т.е. оно превращается в ядро другого химического элемента. Этот распад – статистический и для отдельно взятого ядра можно лишь указать вероятность распада за данное время. Закономерность распада большого числа ядер вскрывается через случайность распада каждого из них. Найдем вид основного уравнения радиоактивного распада. Пусть N – наличное количество атомов радиоактивного вещества. За время dt количество распавшихся атомов – dN – величина, на которую уменьшилось N . Причем $dN \sim -dt$ и N ,

т.е. $dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$, где λ – постоянная радиоактивного распада, – указывает на уменьшение N в процессе распада.

17.6 Состав и строение атомных ядер

В 1931 году И. Кюри и Ф. Жолио-Кюри при бомбардировке α -частицами легких элементов Li, Be, B обнаружили интенсивное испускание сильного проникающего излучения, которое хорошо задерживается парафином и другими веществами, содержащими водород. Английский физик Чадвик выдвинул предположение, что это излучение представляет собой поток новых частиц – **нейтронов**, масса которых равна массе протона ($m_n = m_p$) и лишенных электрического заряда.

Открытие нейтрона Чадвиком (1932 год) послужило толчком к созданию модели атомного ядра, которая в том же году была предложена советскими физиками Д.Д. Иваненко и Е.Н. Гапоном. Согласно их гипотезы ядра атомов состоят только из протонов и нейтронов.

Представление о протонно-нейтронном составе атомных ядер подтверждено экспериментально и является общепризнанным. Согласно протонно-нейтронной модели атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Заряд ядра Z соответствует числу протонов, а число нейтронов находится по массовому числу M : $N = M - Z$

Таким образом $M = N + Z$ – дает число нуклонов – частиц, входящих в состав ядра. Такое строение атомного ядра дает простое отличие изотопов – разное число нейтронов.

Изучение взаимодействия быстрых частиц (α) с атомными ядрами (по их отклонению при прохождении сквозь тонкие слои металлов) позволило оценить размеры ядер, величина которых зависит от порядкового номера элемента. Эмпирическая формула $R_{\text{ядра}}$:

$$R_{\text{я}} = 1,4 \cdot 10^{-13} \cdot M^{1/3} \text{ см} ,$$

т. е. объем ядра \sim числу нуклонов. Средняя плотность ядер равна: $\rho \approx 1,45 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$. Можно считать, что нуклоны практически плотно прижаты друг к другу.

Свойства ядерных сил: являются силами притяжения; наличие ядерных сил обусловлено существованием материального ядерного поля; источником ядерного поля являются нуклоны. Эти частицы обладают «ядерным зарядом», одинаковым по величине и знаку у всех нуклонов (независимо от электрического заряда). Ядерные силы короткодействующие (не более 10-13 см). Потенциальная энергия взаимодействия нуклонов; a и $r_0 = \text{const}$, r – расстояние между нуклонами. Ядерные силы обладают свойством насыщения (подобно химическим силам: если есть еще атом кислорода, то взаимодействия не будет) по другому: нуклоны могут взаимодействовать только со строго определенным количеством соседей. Не являются центральными силами: их нельзя представить в виде сил, действующих от одного центра сил. Это обусловлено наличием спина взаимодействующих частиц.

17.7. Методы регистрации элементарных частиц и радиоактивных излучений

Частицы больших энергий, возникающие при радиоактивных превращениях, наблюдаемые в космических лучах и создаваемые на специальных мощных ускорителях, могут воздействовать на фотопластину, ионизировать молекулы, вызывать свечение и т.д. По этим проявлениям можно наблюдать пролетающие частицы, считать их, отличать друг от друга и измерять их энергию. Остановимся на основных методах наблюдения этих частиц:

а) метод *сцинтиляций*

Самый простой. Он основан на том, что люминесцирующее вещество (сернистый цинк) испускает свет под ударами частиц. Этот свет можно воспринимать глазом, адаптированным в темноте, через лупу или микроскоп (вместо глаза можно использовать фотоэлемент)

б) метод *конденсации паров вокруг заряженных частиц (камера Вильсона)*

Этот метод позволяет визуально наблюдать и фотографировать следы, оставленные пролетающими частицами (используется в основном для α -частиц). Действие метода основано на том, что ионы в воздухе, насыщенном парами, могут являться центрами конденсации этих паров.

α -частица при движении в воздухе образует около 200000 пар ионов, каждый из которых служит центром конденсации паров. В камере возникает след частицы в виде траектории, состоящей из капелек (“нить тумана”).

17.8. Энергия связи

Для того чтобы атомные ядра были устойчивыми, протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядер огромными силами, во много раз превосходящими силы кулоновского отталкивания протонов. Силы, удерживающие нуклоны в ядре, называются **ядерными**. Они представляют собой проявление самого интенсивного из всех известных в физике видов взаимодействия – так называемого **сильного взаимодействия**. Ядерные силы примерно в 100 раз превосходят электростатические силы и на десятки порядков превосходят силы гравитационного взаимодействия нуклонов. Важной особенностью ядерных сил является их короткодействующий характер. Ядерные силы заметно проявляются, как показали опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц, лишь на расстояниях порядка размеров ядра (10^{-12} – 10^{-13} см). На больших расстояниях проявляется действие сравнительно медленно убывающих кулоновских сил.

На основании опытных данных можно заключить, что протоны и нейтроны в ядре ведут себя одинаково в отношении сильного взаимодействия, то есть ядерные силы не зависят от наличия или отсутствия у частиц электрического заряда.

Важнейшую роль в ядерной физике играет понятие **энергии связи ядра**. Энергия связи ядра равна минимальной энергии, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы. Из закона сохранения энергии следует, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц. Энергию связи любого ядра можно определить с помощью точного измерения его массы. В настоящее время физики научились измерять массы частиц – электронов, протонов, нейтронов, ядер и др. – с очень высокой точностью. Эти измерения показывают, что масса любого ядра M всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов.

17.9 Элементарные частицы

В настоящее время известно около 400 субъядерных частиц, которые принято называть элементарными. Подавляющее большинство этих частиц **являются нестабильными**. Исключение составляют лишь фотон, электрон, протон и нейтрино. Все остальные частицы через определенные промежутки времени испытывают **самопроизвольные** превращения в другие частицы. Нестабильные элементарные частицы сильно отличаются друг от друга по временам жизни. Наиболее долгоживущей частицей является нейтрон. Время жизни нейтрона порядка 15 мин. Другие частицы «живут» гораздо меньшее время. Например, среднее время жизни μ -мезона равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с, нейтрального π -мезона – $0,87 \cdot 10^{-16}$ с. Многие массивные частицы – гипероны имеют среднее время жизни порядка 10^{-10} с.

Существует несколько десятков частиц со временем жизни, превосходящим 10^{-17} с. По масштабам микромира это значительное время. Такие частицы называют **относительно стабильными**. Большинство **короткоживущих** элементарных частиц имеют времена жизни порядка 10^{-22} – 10^{-23} с.

Способность к взаимным превращениям – это наиболее важное свойство всех элементарных частиц. Элементарные частицы способны рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться). Это относится также и к стабильным частицам с той только разницей, что превращения стабильных частиц происходят не самопроизвольно, а при взаимодействии с другими частицами. Примером может служить **аннигиляция** (то есть **исчезновение**) электрона

и позитрона, сопровождающаяся рождением фотонов большой энергии. Может протекать и обратный процесс – **рождение** электронно-позитронной пары, например, при столкновении фотона с достаточно большой энергией с ядром. Такой опасный двойник, каким для электрона является позитрон, есть и у протона. Он называется **антипротоном**. Электрический заряд антипротона отрицателен. В настоящее время **античастицы** найдены у всех частиц. Античастицы противопоставляются частицам потому, что при встрече любой частицы со своей античастицей происходит их аннигиляция, то есть обе частицы исчезают, превращаясь в кванты излучения или другие частицы.

Вопросы для самоконтроля:

- 1) Что называют потоком излучения, энергетической светимостью, спектральной плотностью энергетической светимости, коэффициентом поглощения,
- 3) Что такое спектральный анализ? О чем гласят постулаты Бора?
- 4) Какие из элементарных частиц можно считать стабильными?
- 5) В чем сущность гипотезы о квантовой природе света?
- 6) Как объясняется световое давление по электромагнитной и квантовой теориям?
- 7) Что такое фотолюминесценция? Что называют радиоактивностью?
- 8) Какие из известных вам законов сохранения выполняются при радиоактивных превращениях?
- 9) Что называют периодом полураспада радиоактивного вещества? Что он характеризует?
- 10) Благодаря чему оказалось возможным существование цепной ядерной реакции деления?
- 11) Что называют энергетическим выводом ядерной реакции? В каких случаях реакция идет с поглощением энергии, а в каких – с выделением?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- а) основная литература (библиотека СГАУ):
1. Грабовский, Р.И. Курс физики [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 608 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3178>
 2. Никеров, В.А. Физика для вузов: Механика и молекулярная физика / Никеров В.А. - М.: Дашков и К, 2017. - 136 с.: ISBN 978-5-394-00691-3. – Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/415061>
 3. Крамаров, С.О. Физика. Теория и практика: Учебное пособие / Под ред. проф. С.О. Крамарова. - 2-е изд., доп. и перераб. - М.: ИЦ РИОР, НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 380 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование) (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-369-01522-3. — Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/522108>
- б) дополнительная литература
1. Дмитриева, В. Ф. Физика : программа, метод. указ. и контрольные задания для студ.-заочников инженерно-технических и технологических спец. вузов / В. Д. Дмитриева, В. А. Рябов, В. М. Гладской. - 4-е изд., стер. - М.: Высш. шк., 2007. - 126 с. - ISBN 5-06-004352-5
 2. Основы физики и биофизики: Учеб. пособие : учебное пособие / ред. : А. И. Журавлев. - М. : Мир, 2005. - 383 с. : ил. - (Учеб. и учеб. пособия для студ. высш. учеб. заведений).
 3. Охрименко, О. В./ Лабораторный практикум по химии и физике молока : учебное пособие / О. В. Охрименко, К. К. Горбатова, А. В. Охрименко. - СПб. : ГИОРД, 2005. - 50 с. : ил. - ISBN 5-901065-66-2
 4. Курашвили, Е. И./ Английский язык для студентов физиков. Второй этап обучения : учебное пособие / Е. И. Курашвили, И. И. Кондратьева, В. С. Штрунова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : АСТ ; М. : Астрель, 2005. - 191 с. - ISBN 5-17-09110-3. - ISBN 5-271-06611-8.
 5. Пронин, В. П. / Практикум по физике : учебное пособие / В. П. Пронин. - 2-е изд., стер. - СПб. : Лань, 2005. - 256 с. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 5-8114-0659-2
 6. Седов, Н. В. / Прикладная физика. [Текст] : учеб. пособ. / Ю.Н.Захаров; Н.В.Фёдоров. -

Саратов : [б. и.], 2006. - 517 с. - ISBN 5-91272-079-9

7. Пронин, В. П. / Краткий курс физики : учебное пособие / В. П. Пронин. - Саратов : ФГОУ ВПО "Саратовский ГАУ", 2009. - 296 с. - ISBN 978-5-7011-0533-9
8. Трофимова, Т. И. / Физика. 500 основных законов и формул : справочник / Т. И. Трофимова. - 6-е изд., стер. - М. : Высш. шк., 2007. - 63 с. - ISBN 978-5-06-003741-8 :
9. Чернов, И. П. / Сборник задач по физике. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие / И. П. Чернов, В. В. Ларионов, Ю. И. Тюрин. - М. : Высш. шк., 2007. - 405 с. : ил. - ISBN 978-5-06-005741-6

в) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы, поисковые системы Rambler, Yandex, Google:

1. Виртуальный фонд естественнонаучных и научно-технических эффектов «Эффективная физика» - <http://www.effects.ru/index.html>

2. Комарова, Н.В./ Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «Капель» / Н.В. Комарова, Я.С. Каменцев / : [Электронный ресурс]- http://www.lumex.ru/files/kniga_capel_08-repaging.pdf

3. Электронная библиотека СГАУ - <http://library.sgau.ru>
НЕБ - <http://elibrary.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лекция 1. Основы кинематики движения материальной точки	4
1.1. Связь физики с другими науками.....	4
1.2.Международная Система единиц (СИ) (SystemInternational– SI).....	4
1.3 Элементы теории ошибок.....	4
1.4Кинематика материальной точки.....	5
1.5.Перемещение, траектория, скорость, ускорение.....	8
1.6 Инерциальные и неинерциальные системы отсчета.....	8
1.7 Поступательное, колебательное, вращательное движения.....	8
Вопросы для самоконтроля.....	9
Список литературы.....	9
Лекция 2. Элементы движения. Основные законы	10
2.1 Основные законы динамики.....	10
2.2 Закон сохранения импульса.....	10
2.3 Закон движения центра масс.....	10
2.4 Закон сохранения энергии.....	11
2.5 Импульс силы импульс тела.....	11
2.6 Работа, мощность, энергия.....	11
Вопросы для самоконтроля.....	12
Список литературы.....	12
Лекция 3. Динамика вращательного и колебательного движений	13
3.1 Момент силы и момент инерции.....	13
3.2 Математический и физический маятники.....	13
3.3 Энергия при вращательном и колебательном движениях.....	14
Вопросы для самоконтроля.....	14
Список литературы.....	14
Лекция 4. Волновые процессы	15
4.1 Волна.....	15
4.2 Уравнение волны. Фронт волны. Принцип Гюйгенса-Френеля.....	15
4.3 Сложение гармонических колебаний.....	15

4.4.Сложение взаимно перпендикулярных колебаний.....	16
4.5 Сложение двух одинаково направленных колебаний одинаковой амплитуды с мало отличающимися частотами.....	16
4.6 Сложение сонаправленных гармонических колебаний одинаковой частоты... ..	17
4.7 Сложение встречных волн одинаковой частоты и амплитуды.....	17
4.8 Звук и его восприятие.....	17
Вопросы для самоконтроля.....	18
Список литературы.....	18
Лекция 5.Статистический и термодинамический методы исследования.....	19
5.1 Статистический метод	19
5.2 Термодинамический метод.....	19
5.3 Уравнения неразрывности и Бернулли.....	19
Вопросы для самоконтроля.....	20
Список литературы.....	20
Лекция 6. Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов.....	21
6.1 Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества.....	21
6.2 Основные газовые законы.....	22
6.3 Уравнение Клапейрона-Менделеева.....	23
6.4. Реальный газ. Уравнение Ван-дер-Ваальса.....	23
6.5 Сжижение газов.....	23
Вопросы для самоконтроля.....	23
Список литературы.....	23
Лекция 7.Свойства жидкости.....	25
7.1 Поверхностное натяжение.....	25
7.2 Внутреннее трение (вязкость).....	25
7.3 Теплота и температура.....	26
7.4 Внутренняя энергия газа.....	27
7.5 Теплоемкость.....	27
7.6 Явления переноса.....	28
7.7 Особенности строения жидкостей и твердых тел.....	28
7.8 Изменение агрегатного состояния.....	29
Вопросы для самоконтроля.....	29
Список литературы.....	29
Лекция 8 Основы термодинамики.....	31
8.1 Первое начала термодинамики.....	31
8.2 Второе начало термодинамики.....	31
8.3 Тепловая машина. К. п. д. тепловой машины.....	32
8.4 Понятие об энтропии.....	32
Вопросы для самоконтроля.....	33
Список литературы.....	33
Лекция 9 Электрические явления.....	34
9.1 Электрический заряд.....	34
9.2 Диэлектрическая проницаемость среды.....	34
9.3 Напряженность и потенциал электрического поля.....	35
9.4 Связь между напряженностью и потенциалом.....	35
9.5 Поток вектора.....	36
9.6 Теорема Остроградского-Гаусса.....	36
9.7 Проводники и диэлектрики в электрическом поле.....	36
9.8 Электрическая емкость.....	38
Вопросы для самоконтроля.....	38
Список литературы.....	38
Лекция 10 Постоянный электрический ток в проводниках.....	39
10.1 Сила тока и плотность тока.....	39

10.2 Закон Ома для участка цепи.....	39
10.3 Сопротивление и удельная проводимости.....	39
10.4 Зависимость сопротивления от температуры.....	40
10.5 Э. д. с. Закон Ома полной цепи.....	40
10.6 Работа и мощность постоянного тока.....	41
10.7 Электрический ток в жидкостях.....	41
10.8 Электрический ток в вакууме.....	42
10.9 Электролиз и его применение. Законы Фарадея.....	42
Вопросы для самоконтроля.....	42
Список литературы.....	42
Лекция 11 Термоэлектронные явления.....	43
11.1 Контактная разность потенциалов. Термоэлектричество.....	43
11.2. Законы Вольта.....	43
11.3 Электрический ток в полупроводниках.....	45
Вопросы для самоконтроля.....	45
Список литературы.....	45
Лекция 12 Магнетизм. Электромагнетизм.....	46
12.1 Постоянное магнитное поле. Рамка с током. Направление магнитного поля... 46	46
12.2 Макротоки и микротоки.....	47
12.2 Закон Ампера. Взаимодействие параллельных токов.....	47
12.3 Закон Био-Савара-Лапласа.....	47
12.4 Магнитное поле прямого тока.....	47
12.5 Магнитный момент контура с током. Магнитная индукция. Напряжённость магнитного поля.....	48
12.6 Вектор магнитной индукции.....	48
12.7 Подобие векторных характеристик электростатического и магнитного полей.....	49
12.8 Циркуляция вектора напряжённости магнитного поля. Поле соленоида и тороида.....	49
12.9 Принцип действия электрогенераторов и электродвигателей.....	50
12.10 Вращение рамки в магнитном поле.....	51
12.11 Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в однородных электрическом и магнитном полях.....	51
12.12. Движение частиц в магнитных и электромагнитных полях.....	52
Вопросы для самоконтроля.....	52
Список литературы.....	52
Лекция 13 Электромагнитные явления.....	53
13.1 Электромагнитная индукция.....	53
13.2 Закон Фарадея.....	53
13.3 Вихревые токи (токи Фуко).....	53
13.4 Самоиндукция.....	54
13.5 Индуктивность контура.....	55
13.6 Трансформаторы.....	55
13.7 Энергия магнитного поля.....	55
13.8. Электрический ток и его получение.....	55
13.9. Переменный ток. Принципы получения переменного тока.....	56
Вопросы для самоконтроля.....	58
Список литературы.....	58
Лекция 14 Электрические колебания и волны.....	59
14.1 Законы Ома и их обобщение.....	59
14.2. Резонанс.....	60
14.3. Основы электромагнитной теории Максвелла.....	60
14.4 Свойства уравнений Максвелла.....	61

14.5 Роль уравнений Максвелла и границы их применимости.....	62
14.6 Резонанс напряжений.....	62
14.7. Резонанс токов.....	62
14.8. Колебательные процессы в электрическом контуре.....	63
14.9. Электромагнитные волны и их свойства.....	64
14.10 Электромагнитные волны, их шкала и классификация.....	65
Вопросы для самоконтроля.....	66
Список литературы.....	66
Лекция 15 Геометрическая оптика.....	67
15.1 Природа света.....	67
15.2 Основные законы геометрической оптики.....	67
15.3 Физическое объяснение явления.....	68
15.4 Линзы.....	68
15.5 Принцип Гюйгенса – Френеля.....	69
15.6 Глаз как оптическая система. Аккомодация.....	70
15.7. Основные фотометрические характеристики, световые величины в фотометрии.....	70
15.8. Поглощение света.....	71
Вопросы для самоконтроля.....	71
Список литературы.....	71
Лекция 16 Волновая оптика.....	72
16.1 Интерференция света.....	72
16.2 Дифракция света. Принцип Гюйгенса – Френеля.....	73
16.3 Экспериментальное обнаружение волн де Бройля.....	76
16.4. Поляризация света.....	76
Вопросы для самоконтроля.....	77
Список литературы.....	77
Лекция 17 Атомная, ядерная и квантовая физика.....	78
17.1 Виды оптических излучений. Квантовый характер излучения.	78
17.2 Спектры. Спектральный анализ.....	79
17.3 Люминесценция твердых тел. Фотолюминесценция. Правило Стокса.....	80
17.4 Фотоэффект. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия излучения передается электронам вещества.....	80
17.5 Естественная радиоактивность.....	81
17.6 Состав и строение атомных ядер.....	82
17.7. Методы регистрации элементарных частиц и радиоактивных излучений.....	82
17.8. Энергия связи.....	83
17.9 Элементарные частицы.....	83
Вопросы для самоконтроля.....	84
Список литературы.....	84
Библиографический список.....	84
Содержание.....	85

Разработчик: доцент, Иванова З.И.



(подпись)

Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Инженерная физика, электрооборудование и электротехнологии»

«22» мая 2018 года (протокол №12).