ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

«Физика»

Направление подготовки (специальность) 27.03.04 Управление в технических системах

Профиль образовательной программы Интеллектуальные системы обработки информации и управления

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1. 1 Лекция № 2 (2 часа).

Тема: «Кинематика»

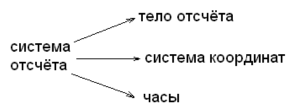
1.1.1 Вопросы лекции:

1. Механическое движение. Система отсчета.
2. Скорость и ускорение.
3. Движение по окружности.
4. Угловая скорость и угловое ускорение.

1.1.2 Краткое содержание вопросов:

Механическое движение. Система отсчета.

Механика изучает движение тел в пространстве и во времени. Механика включает два раздела:
Кинематика – изучает движение тел вне связи с причинами, которые изменяют это движение;
Динамика – изучает движение тел в связи с причинами, которые изменяют это движение;
Статика – является разделом динамики, изучающим равновесие тел.
Механическое движение – перемещение тел относительно какого-либо другого тела или группы тел, принимаемых за неподвижные (тело или группа тел образуют систему отсчета).
Каждое механическое движение рассматривается относительно вполне определенной системы отсчета. Система отсчета выбирается произвольно.
Материальная точка – физическое тело, формами и размерами, которого можно пренебречь в условиях данной задачи.
Рассмотрим движение такой материальной точки в трехмерном пространстве. Выберем систему координат, обозначим наложение в ней точки М.



$\vec{OM} = \vec{r}$ – радиус-вектор точки М.

В векторной форме уравнения движения можно записывать в виде: $\vec{r} = \vec{r}(t)$

Линия, описываемая материальной точкой при её движении, называется *траекторией*. Длина участка траектории, пройденного материальной точкой за время t, есть *путь* S. Путь – величина скалярная.

Прямолинейный участок, соединяющий начальную и конечную точки траектории, называется *вектором перемещения* $\Delta\vec{r}$. Перемещение –величина векторная.
В случае прямолинейного движения перемещение и путь совпадают. В случае криволинейного движения путь и перемещение совпадают лишь при условии малости Δt (т.е. при $\Delta t \to 0$).

Скорость и ускорение.

Для характеристики движения материальной точки вводится векторная величина – скорость. *Скорость* – величина, характеризующая быстроту изменения положения точки в пространстве. Средняя скорость: $\vec{\upsilon}_{ср} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$

где Δr - приращение радиус – вектора.

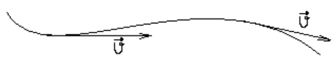
Направление вектора средней скорости совпадает с направлением Δr. Бесконечно уменьшая промежуток времени Δt, получим мгновенную скорость:

$$\upsilon = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

При $\Delta t \to 0$ путь S всё больше будет приближаться к Δr. Модуль мгновенной скорости: $\vec{\upsilon} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{s}}{dt}$

Таким образом, модуль мгновенной скорости равен первой производной пути по времени.
В случае криволинейного движения вектор скорости направлен по касательной в данной точке траектории.

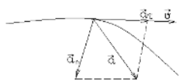
Ускорение – физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости:



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

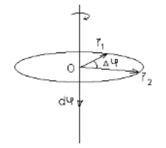
Таким образом, ускорение есть первая производная от скорости по времени или вторая производная от радиус – вектора по времени.

Ускорение характеризует изменение скорости как по направлению a_n – нормальная составляющая ускорения, так и по модулю a_τ – тангенциальная составляющая ускорения.



a_n – направлена в сторону вогнутости кривой и характеризует изменение скорости по направлению: $a_n = a_ц = \frac{\upsilon^2}{r}$

Где $a_ц$ – центростремительное ускорение.



a_τ – характеризует изменение скорости по величине: $a_\tau = \frac{d\upsilon}{dt}$ a – полное ускорение, которое определяется по формуле: $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$

В скалярной форме: $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$

Ускорение в СИ измеряется в м/с^2.

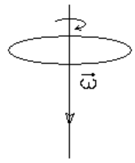
Движение по окружности. Угловая скорость и угловое ускорение.

При *вращательном* движении все точки тела описывают окружности, центры которых лежат на неподвижной прямой, называемой осью вращения.

Пусть некоторая точка М движется по окружности радиуса r. За время Δt совершит поворот на угол $\Delta\varphi$. $\Delta\varphi$ – угол поворота радиус – вектора $\vec{r}$ вокруг точки О.

Элементарные (бесконечно малые) повороты можно рассматривать как векторы (обозначаются $d\varphi$ или $\Delta\varphi$), их называют *псевдовекторами.* Особенности псевдовекторов:

1) не имеют определённой точки приложения;
2) направлены вдоль оси вращения по правилу буравчика (правилу правого винта).



Угловая скорость $\vec{\omega}$ – первая производная угла поворота по времени: $\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$

Вектор $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения, а его направление определяется по правилу правого винта. В СИ единица измерения $\vec{\omega}$ рад/с.

Угол поворота $\Delta\varphi$ и угловую скорость ω можно определить: $\Delta\varphi = 2\pi N$ $\omega = 2\pi n$

Где n – частота вращения, N – число оборотов. *Частота вращения* – это число полных оборотов, совершаемых телом при равномерном его движении по окружности, в единицу времени: $n = \frac{1}{T}$

Время полного оборота тела – период вращения (T). Единица измерения периода T – c, а частоты n – c^{-1}. $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Угловое ускорение – первая производная угловой скорости по времени: $\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$

$\vec{\varepsilon}$ – величина векторная, направлена как и угловая скорость вдоль оси вращения (если ось закреплена):

1) при ускоренном движении $\vec{\varepsilon} \uparrow\uparrow \vec{\omega}$;
2) при замедленном движении $\vec{\varepsilon} \uparrow\downarrow \vec{\omega}$.

В СИ единица измерения $\vec{\varepsilon}$ рад/с^2.

1. 2 Лекция № 2 (2 часа).

Тема: «Динамика вращательного движения»

1. Момент инерции. Теорема Штейнера.
2. Момент силы.
3. Основное уравнение динамики вращательного движения.
4. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса.
5. Кинетическая энергия вращения твердого тела.

1.2.2 Краткое содержание вопросов:

Момент инерции.

Моментом инерции материальной точки относительно оси z называется скалярная физическая величина равная произведению массы точки на квадрат расстояния до данной оси z.

$$J = mr^2$$

Момент инерции системы *n* материальных точек: $J = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2$

Момент инерции твердого тела: $J = \int r^2 dm$

Результат интегрирования зависит от распределения плотности и формы тела. Интегрирование значительно упрощается, если тело однородно по плотности, имеет правильную форму, а ось совпадает с осью симметрии тела[1].

Например, для шара: $J = \frac{2}{5}mR^2$, для диска (сплошной цилиндр) $J = \frac{1}{2}mR^2$.

Если известен момент инерции относительно оси проходящей через его центр масс, то момент инерции относительно другой параллельной оси можно определить по теореме Штейнера.

Теорема Штейнера: Момент инерции тела J относительно произвольной оси равен сумме момента инерции этого тела J_o относительно оси, проходящей через центр масс тела параллельно рассматриваемой оси, и произведения массы тела m на квадрат расстояния a между осями.

$$J = J_o + ma^2$$

Момент силы.

Моментом силы относительно некоторой точки *O*, называется векторная физическая величина, определяемая выражением:

$$\vec{M} = \left[\vec{r} \cdot \vec{F}\right]$$

Модуль момента силы $M = FrSin\alpha = Fl$

$l = rSin\alpha$ - плечо силы (кратчайшее расстояние до линии действия силы).

Момент суммы сил, имеющих общую точку приложения, равен сумме моментов:

$$\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + ... + \vec{M}_n$$

Момент пары сил. Парой сил называются две равные по величине и противоположные по направлению силы, не действующие вдоль одной прямой. Расстояние *l* между прямыми, вдоль которых девствуют силы, называются плечом пары. Можно доказать, что момент пары сил не зависит от выбора точки, а зависит только от модуля силы и плеча пары:

$$M = Fl$$

Момент пары сил перпендикулярен плоскости, в которой лежат силы, а его направление определяется по правилу правого винта.

Моментом силы относительно оси *z* называется параллельная составляющая момента силы относительно произвольной точки *O,* лежащей на данной оси. $\vec{M}_z = \left[\vec{r} \cdot \vec{F}\right]_z$

Аналогично, момент суммы сил относительно данной оси равен сумме моментов:

$$\vec{M}_z = \vec{M}_{1z} + \vec{M}_{2z} + ... + \vec{M}_{nz}$$

Основное уравнение динамики вращательного движения.

Основное уравнение динамики вращательного движения: угловое ускорение твердого тела, вращающегося вокруг оси *z*, прямо пропорционально моменту силы относительно оси *z* и обратно пропорционально моменту инерции тела относительно той же оси. $\vec{\varepsilon} = \frac{\vec{M}}{J}$

Если действуют несколько моментов, то $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + ... + \vec{M}_n$

Основное уравнение динамики вращательного движения является аналогом 2 закона Ньютона для поступательного движения.

Запишем основное уравнение динамики вращательного движения в ином виде.

$$\vec{M} = J\vec{\varepsilon} = J\frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{Jd\vec{\omega}}{dt} = \frac{d\overbrace{\left(J\vec{\omega}\right)}^{\vec{L}}}{dt} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}$$

Таким образом, изменение момента импульса равно моменту силы (либо сумме моментов сил).

Момент импульса. Закон сохранения момента импульса.

Моментом импульса материальной точки относительно точки *O*, называется векторная физическая величина, определяемая выражением:

$$\vec{L} = \left[\vec{r} \cdot \vec{p}\right]$$ [2]

Модуль момента импульса равен $L = rpSin\alpha$.

Момент импульса системы *n* материальных точек относительно точки *O:*

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^{n}\left[\vec{r}_i \vec{p}_i\right]$$

---

[1] Для правильных тел ось симметрии проходит через центр масс твердого тела.

[2] Где r – радиус вектор, проведенный из точки *O* в точку где находится мат. точка, а p=mv.

Моментом импульса материальной точки относительно оси *z* называется параллельная составляющая момента импульса относительно произвольной точки *O,* лежащей на данной оси.

$$\vec{L}_z = [\vec{r} \cdot \vec{p}]_z$$

Рассмотрим вращение твердого тела. Разобьем тело на малые части *dm*. Тогда момент импульса твердого тела равен:

$$\vec{L} = \int \vec{r} d\vec{p} = \int \vec{r} dm \vec{v}$$

Выразим скорость каждой части тела через угловую скорость. Для всех точек тела угловая скорость ω одинакова.

$$\vec{v} = [\vec{\omega}\vec{r}]$$

Подставив скорость в интеграл, получим:

$$\vec{L} = \int \vec{r} dm [\vec{\omega}\vec{r}] = \int r^2 \vec{\omega} dm = \vec{\omega} \underbrace{\int r^2 dm}_{J} = \vec{\omega} J$$

Итак, момент импульса твердого тела равен: $\vec{L} = J\vec{\omega}$

Для момента импульса существует закон сохранения.

Момент импульса замкнутой системы материальных точек остается постоянным. $\vec{L} = \vec{L}'$

Кинетическая энергия вращения твердого тела. Работа внешних сил при вращении.

Кинетическая энергия вращения материальной точки: $T = \dfrac{mv^2}{2}$

Кинетическая энергия вращения системы *n* материальных точек: $T = \sum_{i=1}^{n} \dfrac{m_i v_i^{2}}{2}$

Рассмотрим вращение твердого тела. Разобьем тело на малые части *dm.* Тогда кинетическая энергия твердого тела равна:

$$T = \int \frac{dmv^2}{2}$$

Выразим скорость каждой части тела через угловую скорость. Для всех точек тела угловая скорость одинакова.

$$v = \omega r$$

Подставив в интеграл, получим:

$$T = \int \frac{dmv^2}{2} = \int \frac{dm\omega^2 r^2}{2} = \frac{1}{2}\omega^2 \underbrace{\int r^2 dm}_{J} = \frac{1}{2}\omega^2 J$$

Или $T = \dfrac{J\omega^2}{2}$

Полученное выражение справедливо для неподвижной оси. Если тело участвует во вращательном и поступательном движениях, то кинетическая энергия равна сумме:

$$T = \frac{J\omega^2}{2} + \frac{mv_c^{2}}{2},$$

где *J* – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс; а v_c – скорость центра масс твердого тела.

Работа сил при вращении может быть найдена по формуле:

$\delta A = (\vec{M}_z d\vec{\varphi})$ - элементарная работа, или $A = \int M_z d\varphi$

Как и в динамике поступательного движения, работа равна изменению кинетической энергии тела (теорема о кинетической энергии):

$$A = T_2 - T_1 = \frac{J\omega_2^{2}}{2} - \frac{J\omega_1^{2}}{2}$$

1. 3 Лекция № 3 (2 часа).

Тема: «Основные законы молекулярно-кинетической теории»

1.3.1 Вопросы лекции:

1. Молекулярно-кинетическая теория строения вещества.
2. Строение газов и газовые законы.

3. Основное уравнение МКТ газов.
4. Среднеквадратичная скорость молекул. Степени свободы.

1.3.2 Краткое содержание вопросов:

Молекулярно-кинетическая теория строения вещества.

Для характеристики масс атомов и молекул используются величины, называемые относительной атомной массой (или просто атомной массой) химического элемента и относительной молекулярной массой (или просто молекулярной массой) вещества.

Относительной атомной массой химического элемента называется отношение массы атома этого элемента к 1/12 массы атома $_{12}C$ (так обозначается изотоп углерода с массовым числом 12).

Относительной молекулярной массой вещества называется отношение массы молекулы этого вещества к 1/12 массы атома $_{12}C$. Из их определения следует, что атомная и молекулярная массы являются безразмерными величинами.

Масса, равная 1/12 массы атома $_{12}C$, называется *атомной единицей массы* (а. е. м.).

Одной из основных единиц СИ является единица количества вещества, называемая *молем*. Моль представляет собой количество вещества, в котором содержится число частиц (атомов, молекул, ионов, электронов или других структурных единиц), равное числу атомов в 0,012 кг изотопа углерода $_{12}C$.

Число частиц, содержащихся в моле вещества, называется постоянной Авогадро. Опытным путем найдено, что эта постоянная равна

$$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \text{моль}^{-1}$$

Количество вещества:

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

Массу моля обозначают буквой μ и называют молярной массой. Она равна произведению постоянной Авогадро на массу молекулы: $\mu = N_A \cdot m_0 \qquad \nu = \dfrac{m}{\mu}$

Понятие о температуре.

В первом приближении температуру можно определить как величину, характеризующую степень нагретости тел. В технике и в быту используется температура, отсчитанная по шкале Цельсия. Единица этой шкалы называется градусом Цельсия (°С). В физике пользуются термодинамической температурой, которая не только более удобна, но, кроме того, имеет глубокий физический смысл (будет показано позднее). Единица термодинамической температуры — кельвин (К) является одной из основных единиц СИ. Числовые значения кельвина и градуса Цельсия одинаковы. Термодинамическая температура Т связана с температурой t по шкале Цельсия соотношением

T = t + 273,15

Температура, равная 0 К, называется абсолютным нулем температуры; ему соответствует *t = —273,15°C.*

Строение газов и газовые законы

Равновесное состояние газа определяется значениями трех параметров: давления *p*, объема *V* и температуры *T* (для данной массы газа).

Опытным путем было установлено, что при обычных условиях (т. е. при комнатной температуре и атмосферном давлении) параметры состояния таких газов, как кислород и азот, довольно хорошо подчиняются уравнению

$$\frac{pV}{T} = b$$

где *b* — константа, пропорциональная массе газа. Оказалось также, что чем разреженнее газ (чем меньше его плотность), тем точнее выполняется это уравнение.

У разреженных газов молекулы практически на взаимодействуют между собой. Они лишь иногда сталкиваются друг с другом. Однако эти столкновения происходят настолько редко, что большую часть времени молекулы движутся свободно. Газ, взаимодействием между молекулами которого можно пренебречь, был назван *идеальным.*

В молекулярно-кинетической теории пользуются идеализированной моделью *идеального газа*, согласно которой:

1) собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда;
2) между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;
3) столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

Согласно закону Авогадро при нормальных условиях, т. е. при температуре 0°С и давлении в одну атмосферу $1{,}013 \cdot 10^5$ Па), объем моля любого газа равен 22,4 л/моль = $22{,}4 \cdot 10^{-3}$ м3/моль. Отсюда следует, что в случае, когда количество газа равно одному молю, константа *b* в уравнении будет одинаковой для всех газов. Обозначив константу для одного моля буквой *R*, напишем уравнение состояния идеального газа следующим образом:

$$pV_M = RT$$

Индекс «м» при *V* указывает на то, что имеется в виду объем одного моля газа (молярный объем).

Константа *R* называется молярной газовой постоянной или просто газовой постоянной. Согласно закону Авогадро *R=8.31 Дж/кг.*

Чтобы получить уравнение состояния для произвольной массы *m* идеального газа, умножим обе части уравнения на отношение $\dfrac{m}{\mu}$, где μ — молярная масса газа (учтем, что $V = \dfrac{m}{\mu}V_M$): $\qquad pV = \dfrac{m}{\mu}RT$ (1)

Это есть уравнение состояния для идеального газа.

Умножим и разделим правую часть уравнения на постоянную Авогадро N_A:

$$pV = \frac{m}{\mu}\frac{N_A}{N_A}RT$$

Здесь $N = \frac{m}{\mu}N_A$ — число молекул, содержащихся в массе *m* газа.

Величина $k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31}{6.022\cdot 10^{23}} = 1.38\cdot 10^{-23}\frac{Дж}{К}$ называется постоянной Больцмана.

$$pV = NkT$$

Разделим обе части этого уравнения на объем газа V. Величина $n = \frac{N}{V}$ есть концентрация молекул газа (число молекул в единице объема газа).

Следовательно,

$$p = nkT \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) представляют собой различные формы записи уравнения состояния идеального газа.

Легко видеть, что из уравнения (1) вытекают газовые законы.

1. Закон Бойля — Мариотта: для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная (изотермический процесс):

$$pV - пост.$$

Кривая, изображающая зависимость между величинами p и V, характеризующими свойства вещества при постоянной температуре, называется изотермой. Изотермы представляют собой гиперболы, расположенные на графике тем выше, чем выше температура, при которой происходит процесс.

2. Закон Гей-Люссака: объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется линейно с температурой (изобарный процесс):

$$V \sim T$$

3. Аналогичная зависимость имеется для давления при постоянном объеме (изохорный процесс):

$$p \sim T$$

Для идеальных газов справедлив *Закон Дальтона*: давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений входящих в нее газов, т. е.

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots p_n$$

где p_1, p_2, . ., p_n—парциальные давления — давления, которые оказывали бы газы смеси, если бы они одни занимали объем, равный объему смеси при той же температуре.

Основное уравнение МКТ.

При своем движении молекулы газа ударяют о стенку сосуда, в котором заключен газ, создавая тем самым давление газа на стенку. Попытаемся вычислить это давление, исходя из молекулярно-кинетических представлений. Чтобы облегчить вычисления, сделаем несколько упрощающих задачу предположений.

- Если газ находится в равновесии, все направления движения молекул равновероятны, ни одному из них нельзя отдать предпочтения перед другими. Для простоты предположим, что молекулы движутся только вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений.
- Второе упрощение состоит в том, что всем молекулам мы припишем одинаковые скорости.

Теперь приступим к вычислению давления. Молекула, летящая к стенке со скоростью v, отражается от нее со скоростью -v Следовательно, изменение импульса, сообщаемое стенкой молекуле, равно m_0v — ($-m_0v$;)=$2m_0v$. По третьему закону Ньютона молекула сообщает стенке при ударе импульс $2m_0v$.

Таким образом, $p = \frac{1}{3}nm_0v^2$

Более строгий расчет, учитывающий, что молекулы движутся не вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений, а с равной вероятностью вдоль любого направления в пространстве, приводит к формуле:

$$p = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2, \qquad (3)$$

где $\bar{v}^2$ - среднеквадратичная скорость молекулы. Уравнение (3) основное уравнение МКТ.

Формулу (3) можно записать в виде:

$$p = \frac{1}{3}n2\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{2}{3}n\bar{E}_0, \qquad (4)$$

где E_0 – средняя энергия поступательного движения молекулы. Произведение nE_0 дает суммарную энергию поступательного движения n молекул. Таким образом, давление равно двум третям энергии поступательного движения молекул, содержащихся в единице объема газа.

Среднеквадратичная скорость молекул. Степени свободы.

Из сравнения выражений (2) и (4) следует, что

$$E_0 = \frac{3}{2}kT. \qquad (5)$$

Таким образом, термодинамическая температура есть величина, пропорциональная средней энергии поступательного движения молекул. Отметим, что поступательно движутся только молекулы газа. Движение молекул в жидких и твердых телах носит иной характер (об этом движении будет идти речь в дальнейшем).
Выразим из формулы (5) среднеквадратичную скорость:

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

Или, если числитель и знаменатель под корнем умножить на N_A, то $v_{кв} = \sqrt{\frac{3kN_AT}{N_Am_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$

Только поступательно движутся лишь одноатомные молекулы. Двух- и многоатомные молекулы, кроме поступательного, могут совершать также вращательное и колебательное движения. Эти виды движения связаны с некоторым запасом энергии, вычислить который позволяет устанавливаемый классической {т. е. основанной на ньютоновских законах) статистической физикой закон равнораспределения энергии по степеням свободы молекулы. Прежде чем сформулировать этот закон, рассмотрим понятие числа степеней свободы механической системы.
Числом степеней свободы механической системы называется количество независимых величин, с помощью которых может быть задано положение системы в пространстве. (см. Савельев И.В. Курс физики, стр.223)
Экспериментально установлено, что при определении числа степеней свободы молекул атомы нужно рассматривать как материальные точки. Соответственно одноатомной молекуле следует приписывать три поступательные степени свободы. Двухатомной молекуле с жесткой связью между атомами нужно приписывать пять степеней свободы — три поступательные и две вращательные. Трехатомной и более молекуле с жесткой связью между атомами нужно приписывать шесть степеней свободы — три поступательные и три вращательные.
При любом числе степеней свободы молекулы три из них поступательные, причем ни одна из них не имеет преимущества перед другими. Поэтому на каждую из поступательных степеней свободы приходится в среднем одинаковая энергия, равная $\frac{1}{2}kT$ на все три поступательные степени свободу приходится энергия, в среднем равная $\frac{3}{2}kT$.
Согласно *закону равнораспределения* на каждую степень свободы (поступательную, вращательную и колебательную) в среднем приходится одинаковая кинетическая энергия, равная $\frac{1}{2}kT$.
Из закона равнораспределения кинетической энергии по степеням свободы вытекает, что средняя энергия молекулы определяется формулой

$$\overline{E}_0 = \frac{i}{2}kT$$

где i — сумма числа поступательных, числа вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы.

1. 4 Лекция № 4 (2 часа).

Тема: «Основы термодинамики»

1.4.1 Вопросы лекции:

1. Термодинамическая система.
2. Внутренняя энергия ТС и способы её изменения.
3. Первое начало термодинамики.
4. Применение I начала термодинамики к идеальному газу.
5. Адиабатический процесс.
6. Второе начало термодинамики.
7. Циклы. КПД тепловой машины. Цикл Карно.
8. Энтропия и её свойства.

1.4.2 Краткое содержание вопросов:

1.Термодинамическая система

Термодинамической системой называется совокупность макроскопических тел, которые могут обмениваться энергией между собой и с внешней средой (т.е. с другими телами). Примером может служить жидкость и находящийся в соприкосновении с ней пар или газ. В частности, система может состоять из одного твердого, жидкого или газообразного тела.

Состояние термодинамической системы характеризуют макроскопическими параметрами состояния: давлением, температурой, объемом, плотностью и т.д. Например, для заданной массы идеального газа параметрами состояния являются три величины: P, V, T.
Состояние термодинамической системы будет равновесным, если все параметры состояния имеют определенные значения, не изменяющиеся с течением времени.
Термодинамические системы, которые не обмениваются с внешней средой ни энергией, ни веществом, называются изолированными (или замкнутыми).
Термодинамическим процессом называется переход системы из одного состояния в другое.
Такой переход всегда связан с нарушением равновесия системы. Например, чтобы уменьшить объем газа, заключенного в описанный выше сосуд, нужно вдвинуть поршень. При этом газ будет сжиматься и в первую очередь повысится давление газа вблизи поршня — равновесие будет нарушено. Нарушение равновесия будет тем значительнее, чем быстрее перемещается поршень. Если двигать поршень очень медленно, то равновесие нарушается незначительно и давление в разных точках мало отличается от равновесного значения, отвечающего данному объему газа. В пределе при бесконечно медленном сжатии давление газа будет иметь в каждый момент времени определенное значение. Следовательно, состояние газа все время будет равновесным, так что бесконечно медленный процесс окажется состоящим из последовательности равновесных состояний.
Бесконечно медленный процесс является абстракцией. Практически можно считать равновесный процесс, протекающий настолько медленно, что отклонения значений параметров от равновесных пренебрежимо малы.
Равновесным термодинамическим процессом называют процесс, состоящий из непрерывной последовательности равновесных состояний. Равновесный процесс является обратимым, он может быть осуществлен в обратном направлении через те же промежуточные состояния и без каких-либо изменений в окружающих телах.
Если по координатным осям откладывать значения каких-либо двух параметров (например, p и V или p и T и т. д.), то равновесное состояние системы можно изобразить точкой на координатной плоскости, а обратимый процесс — сплошной линией.
Неравновесные состояния и процессы так изображать нельзя. Необратимые процессы, протекающие между двумя равновесными состояниями, изображаются штриховыми линиями. Процесс, при котором система после ряда изменений возвращается в исходное состояние, называется круговым процессом или циклом. Обратимый цикл изображается на координатной плоскости замкнутой кривой.
Внутренняя энергия какого-либо тела слагается из кинетической и потенциальной энергий его молекул. Кинетическая энергия тела как целого и его потенциальная энергия во внешнем силовом поле во внутреннюю энергию тела не входят.

Внутренняя энергия и способы её изменения

Внутренняя энергия — энергия теплового движения молекул и энергия взаимодействия этих молекул.
Внутренняя энергия *U* является функцией состояния термодинамической системы. Это означает, что независимо от предыстории системы ее энергия в данном состоянии имеет присущее этому состоянию значение.
Условимся работу совершаемую внешними телами над термодинамической системой обозначать буквой ***A'***, а работу самой системы над внешними телами – ***A***.
Очевидно, что ***A*** и ***A'*** равны между собой и отличаются знаком:

$$A = -A'$$

Взаимодействие данного тела с соприкасающимися с ним телами можно охарактеризовать давлением, которое оно на них оказывает. С помощью давления можно описать взаимодействие газа со стенками сосуда, а также твердого или жидкого тела со средой (например, газом), которая его окружает. Перемещение точек приложения сил взаимодействия сопровождается изменением объема тела. Следовательно, работа, совершаемая данным телом над внешними телами, может быть выражена через давление и изменения объема тела. Рассмотрим следующий пример.
Пусть газ заключен в цилиндрический сосуд, закрытый плотно пригнанным легко скользящим поршнем (без трения).
Элементарная работа газа при бесконечно малом перемещении поршня:

$$\delta A = F \cdot dl \cdot \cos\alpha$$

$$F = pS \qquad \alpha = 0^0 \qquad \cos\alpha = 1$$

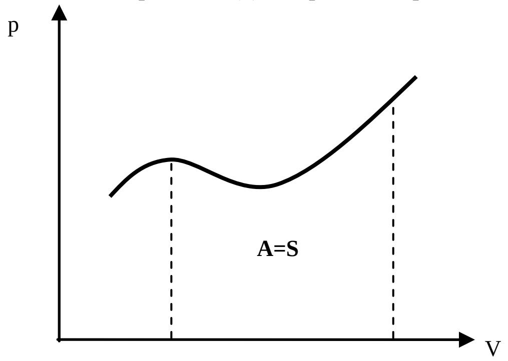
$$\delta A = p \cdot \overbrace{S \cdot dl}^{dV} = pdV$$

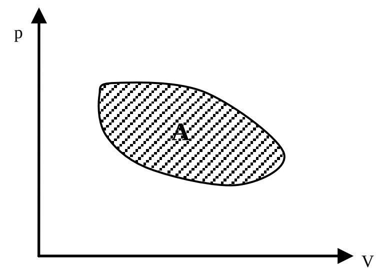
Работа, совершаемая при конечных изменениях объема:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV \qquad (1)$$

Если газ расширяется, то его работа будет положительна $A > 0$, $(\alpha = 0^0)$
Если газ сжимается, то его работа будет отрицательна $A < 0$, $(\alpha = 180^0)$

Найденное выражение (1) для работы справедливо при любых изменениях объема твердых, жидких и газообразных тел.





Процесс изменения объема тела можно изобразить на диаграмме p, V. Тогда работа, совершаемая телом при изменении его объема от значения V_1 до значения V_2 будет численно равна площади фигуры, ограниченной осью V, кривой $p = f(V)$ и прямыми V_1 и V_2.

Работа, совершаемая при обратимом круговом процессе, численно равна площади, охватываемой кривой, изображающей цикл, взятой со знаком плюс, если обход по кривой совершается по часовой стрелке, и со знаком минус, если обход по кривой совершается против часовой стрелки.

Первое начало термодинамики

Изменение внутренней энергии может происходить за счет двух различных процессов: совершения над телом работы A' и передачи ему теплоты Q.

Физическая природа теплопередачи заключается в том, что отдельные молекулы более нагретого тела совершают положительную работу над отдельными молекулами менее нагретого тела. Указанный микроскопический процесс и обусловливает передачу энергии

от тела к телу в виде теплоты. Макроскопическая работа телами при этом не совершается.

Теплота Q определяет количество энергии, переданное от одного тела другому посредством теплопередачи. Отсюда следует, что количество теплоты должно измеряться в тех же единицах (джоулях), что и энергия или работа.

Передача теплоты *Q* - микроскопический способ изменения внутренней энергии.

Работа *A'* – макроскопический способ изменения внутренней энергии.

Первое начало термодинамики: *изменение внутренней энергии термодинамической системы ΔU равно сумме работы A' совершенной над системой и количества теплоты Q переданное системе*:

$$\Delta U = A' + Q \qquad (2)$$

Или, если работу внешних сил заменить на работу системы, то запись первого начала термодинамики (2) примет следующий вид:

$$\boxed{Q = \Delta U + A} \qquad (3)$$

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

Первое начало термодинамики формулируется также следующим образом: невозможен вечный двигатель первого рода, т. е. такой периодически действующий двигатель, который совершал бы работу в большем количестве, чем получаемая им извне энергия.

Применение I начала термодинамики к идеальному газу

Вследствие того, что молекулы идеального газа на расстоянии не взаимодействуют, внутренняя энергия такого газа будет складываться из энергий отдельных молекул. Следовательно, внутренняя энергия одного моля идеального газа будет равна произведению числа Авогадро на среднюю энергию одной молекулы $\overline{E}_0 = \frac{i}{2}kT$ (см. лек МКТ):

$$U_1 = N_A \frac{i}{2}kT = \frac{i}{2}\overbrace{N_A k}^{R}T = \frac{i}{2}RT$$

Где *i*, напомним, – число степеней свободы молекулы газа.

Внутренняя энергия произвольного количества газа будет равна внутренней энергии одного моля, умноженной на число молей газа:

$$\boxed{U = \frac{i}{2}\nu RT} \qquad (4)$$

Таким образом, внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры. Следовательно, в изотермическом процессе внутренняя энергия не изменяется (T – пост.).

Теплоемкостью какого-либо тела называется величина, равная количеству теплоты, которое нужно сообщить телу, чтобы повысить его температуру на один кельвин:

$$C_{тела} = \frac{\delta Q}{dT}$$

Теплоемкость тела измеряется в джоулях на кельвин (Дж/К).

Удельная теплоемкость – теплоемкость единицы массы вещества: $c = \dfrac{\delta Q}{mdT}$

Измеряется удельная теплоемкость в джоулях па килограмм-кельвин (Дж/(кгК)).
Молярная теплоемкость – теплоемкость одного моля вещества:

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT} \qquad (5)$$

Измеряется она в джоулях на моль-кельвин (Дж/(мольК)).
Молярная и удельная теплоемкости связаны соотношением: $\boxed{C = c \cdot \mu}$ (доказать самост-но)
где μ — молярная масса.
Теплоемкость зависит от условий, при которых происходит нагревание тела. Наибольший интерес представляет теплоемкость для случаев, когда нагревание производится при постоянном объеме или при постоянном давлении. В первом случае мы имеем дело с теплоемкостью при постоянном объеме (обозначается C_V), во втором — с теплоемкостью при постоянном давлении (C_p).
Определим молярную теплоемкость C_v идеального газа. Если нагревание производится при постоянном объеме, то тело не совершает работы над внешними телами и, следовательно, вся теплота идет на изменение внутренней энергии тела:
$\delta Q = dU$ (см. формулу (3)).

Из (5) следует, что $\delta Q = C_v \nu dT$, а из (4) – $dU = \dfrac{i}{2}\nu RdT$.

Приравняв, получим:

$$C_v \nu dT = \frac{i}{2}\nu RdT$$

$\boxed{C_v = \dfrac{i}{2}R}$ - молярная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Теплоемкость при постоянном давлении C_p бывает больше, чем C_V, потому что при постоянном давлении нагреваемое тело расширяется и часть подводимой теплоты расходуется на совершение работы над внешними телами.
Определим молярную теплоемкость C_p идеального газа.

$$Q = \Delta U + A$$

$$C_p \nu dT = \frac{i}{2}\nu RdT + pdV$$

$$pV = \nu RT$$

$$pdV = \nu RdT \qquad (*)$$

$$C_p \nu dT = \frac{i}{2}\nu RdT + \nu RdT$$

$$C_p = \frac{i}{2}R + R$$

$\boxed{C_p = \dfrac{i+2}{2}R}$ - молярная теплоемкость газа при постоянном давлении.

В выражении (*) проявляется физический смысл R: R равен работе, совершаемая молем идеального газа при повышении его температуры на один кельвин при постоянном давлении.
Легко видеть что, молярные теплоемкости газов при постоянном давлении и при постоянном объеме связаны соотношением: $\boxed{C_p = C_v + R}$ Данное соотношение называется уравнением Майера.

Работа газа в изопроцессах

1. Изохорный процесс.
V – пост. → dV=0 → A=0

2. Изобарный процесс . p – пост. $A = \int\limits_{V_1}^{V_2} pdV = p\int\limits_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1)$

$$\boxed{A = p(V_2 - V_1)}$$

3. Изотермический процесс. T – пост. $A = \int\limits_{V_1}^{V_2} pdV$

Из уравнения состояния $pV = \nu RT$ выразим давление $p = \dfrac{\nu RT}{V}$ и подставим в интеграл.

$$A=\int_{V_1}^{V_2} pdV=\int_{V_1}^{V_2}\frac{\nu RT}{V}dV=\nu RT\int_{V_1}^{V_2}\frac{dV}{V}=\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$\boxed{A=\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}}$$

В изотермическом процессе внутренняя энергия не меняется, поэтому все количество теплоты идет на совершение работы.

Адиабатический процесс

Адиабатическим называется процесс, протекающий без теплообмена с внешней средой Q=0.

Адиабатический процесс описывается уравнением Пуассона: (вывод см. в учебнике)

$$\boxed{pV^{\gamma}=const.}$$

где $\boxed{\gamma=\frac{C_p}{C_V}}$ - называют показателем адиабаты (или коэффициентом Пуассона).

Очевидно, что $\boxed{\gamma=\frac{i+2}{i}}$ (доказать самостоятельно)

Графиком адиабатического процесса в координатах *pV* является гипербола. Кривая адиабаты более крута чем кривая изотермы. Это легко объяснить. При адиабатическом сжатии повышение давления газа происходит не только из-за уменьшения его объема, но и за счет повышения температуры.

Адиабатический процесс, строго говоря, невозможен, поскольку непроводящей теплоту материалов для изготовления адиабатической оболочки не существует. Близкими к адиабатическому могут быть достаточно быстро протекающие процессы, чтобы с окружающее средой не успел произойти теплообмен.

Второе начало термодинамики

Первое начало термодинамики не дает никаких указаний относительно направления, в котором могут происходить процессы в природе. Для изолированной системы, например, первое начало требует только, чтобы при всех процессах энергия системы оставалась постоянной. Если 1 и 2 — два состояния такой системы, то первое начало ничего не может сказать, будет ли система переходить из состояния 1 в состояние 2, или из состояния 2 в состояние 1. Вообще, на основании первого начала нельзя выяснить, будут ли в изолированной системе происходить какие-либо процессы.

Второе начало термодинамики позволяет судить о направлении процессов, которые могут происходить в действительности.

Второе начало термодинамики может быть сформулировано несколькими способами.

- По Клаузиусу:

невозможен процесс, единственным конечным результатом которого был бы переход теплоты от тела менее нагретого к телу более нагретому.

Иными словами, теплота не может самопроизвольно переходить от холодных тел к горячим.

- По Кельвину:

невозможен процесс, единственным конечным результатом которого явилось бы отнятие от какого-то тела теплоты и превращение этой теплоты полностью в работу.

Утверждение, содержащееся в формулировке Кельвина, логически вытекает из утверждения, высказанного в формулировке Клаузиуса. Действительно, работа может быть полностью превращена в теплоту, например при посредстве трения. Поэтому, превратив с помощью процесса, запрещенного формулировкой Кельвина, теплоту, отнятую от какого-либо тела, полностью в работу, а затем превратив эту работу посредством трения в теплоту, сообщаемую другому телу с более высокой температурой, мы осуществили бы процесс, невозможный согласно формулировке Клаузиуса.

Используя процессы, запрещаемые вторым началом термодинамики, можно было бы создать двигатель, совершающий работу за счет теплоты, получаемой от такого, например, практически неисчерпаемого источника энергии, как океан. По сути, такой двигатель был бы равнозначен вечному двигателю. (Охлаждение, например, воды океанов на 1° дало бы огромную энергию. Масса воды в мировом океане составляет примерно 10^{18} т, при охлаждении которой на 1° выделилось бы примерно 10^{24} Дж теплоты, что эквивалентно полному сжиганию 10^{14} т угля. Железнодорожный состав, нагруженный этим количеством угля, растянулся бы на расстояние 10^{10} км, что приблизительно совпадает с размерами Солнечной системы!)

Поэтому второе начало термодинамики иногда формулируют следующим образом: *невозможен вечный двигатель второго рода, т. е. такой двигатель, который получал бы теплоту от одного резервуара и превращал ее полностью в работу.*

Цикл. КПД тепловой машины

Тепловой машиной называется периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет получаемого извне количества теплоты.

Пусть рабочее тело (например, газ) сначала расширяется до объема V_2, а затем снова сжимается до первоначального объема V_1. Для того чтобы работа, совершаемая за цикл, была больше нуля, давление (а следовательно, и температура) при расширении должно быть больше, чем при сжатии. Для этого рабочему телу нужно в ходе расширения сообщать теплоту, а в ходе сжатия отнимать от него теплоту. Следовательно, должно быть два внешних тела, от одного из которых (нагреватель) рабочее тело получает теплоту, а другому (холодильник) рабочее тело отдает теплоту.

По завершении цикла рабочее тело возвращается в исходное состояние. Поэтому изменение его внутренней энергии за цикл $\Delta U=0$ равно нулю. При расширении рабочему телу сообщается теплота Q_1, а при сжатии отнимается теплота Q_2, так что в итоге рабочее тело получает за цикл количество теплоты, равное $Q_2 - Q_1$. Поскольку изменение внутренней энергии рабочего тела равно нулю, вся полученная теплота затрачивается на совершение телом работы:

$$\boxed{A = Q_1 - Q_2} \qquad (1)$$

Из высказанных выше соображений следует, что для того, чтобы машина работала повторными циклами, часть полученной от нагревателя теплоты должна быть отдана холодильнику. Это согласуется с требованием второго начала термодинамики, согласно которому невозможен периодически действующий двигатель, который превращал бы полученную от некоторого резервуара теплоту полностью в работу. Таким образом, теплота Q_2 в формуле (1) в принципе не может равняться нулю.

Очевидно, что чем полнее превращает тепловая машина полученную ею теплоту в работу, тем эта машина выгоднее. Эффективность тепловой машины принято характеризовать коэффициентом полезного действия (сокращенно КПД), который определяется как отношение совершаемой за цикл работы A к получаемому от нагревателя за цикл количеству теплоты Q_1:

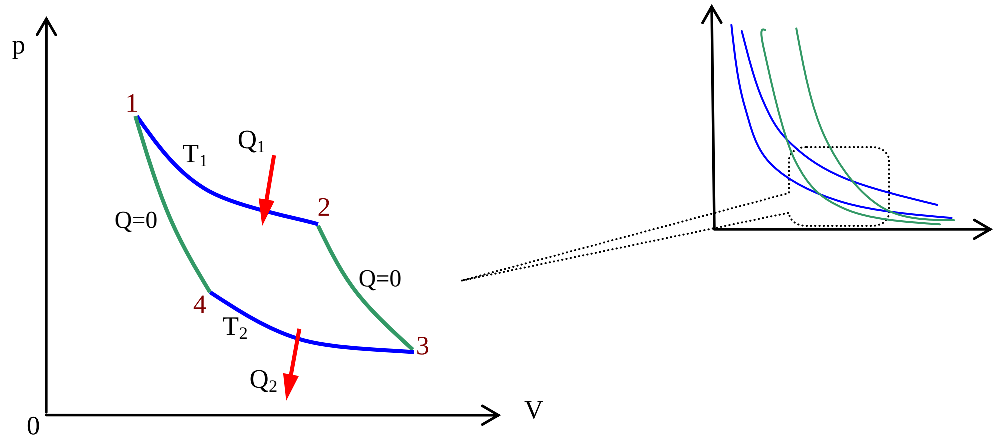
$$\eta = \frac{A}{Q_1}, \qquad \text{или с учетом (1)} \quad \boxed{\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}}. \qquad (2)$$

Из определения КПД следует, что он не может быть больше единицы.

Если обратить цикл, тепловой машины (т. е. совершать его против часовой стрелки), получится цикл холодильной машины. Такая машина отбирает от тела с меньшей температурой количество теплоты Q_2 и отдает телу с более высокой температурой количество теплоты Q_1, больше чем Q_2. Над машиной должна быть совершена за цикл работа A'.

Цикл Карно

Цикл Карно – цикл, состоящий из двух изотерм и двух адиабат. В качестве рабочего тела возьмем идеальный газ.



Участок 1-2: изотермическое расширение, газ получает количество теплоты Q_1 от нагревателя, находящегося при температуре T_1.

Участок 2-3: адиабатическое расширение.

Участок 3-4: изотермическое сжатие, газ отдает количество теплоты Q_2 холодильнику, находящемуся при температуре T_2.

Участок 4-1: адиабатическое сжатие.

Теорема Карно: *коэффициент полезного действия всех обратимых машин, работающих при одной и той же температуре нагревателя и холодильника, одинаков и определяется только температурами нагревателя и холодильника.*

КПД обратимой тепловой машины:

$$\boxed{\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}} \qquad (3)$$

Коэффициент полезного действия необратимой (реальной) тепловой машины всегда меньше, чем обратимой (идеальной) машины, работающей в аналогичных условиях (т. е. с теми же нагревателем и холодильником).

Для идеальной машины можно пользоваться формулой (2) или (3), для реальной – только формулой (2).

7.Энтропия и ее свойства

Понятие энтропии введено в 1865 г. Р. Клаузиусом.

Энтропия – физическая величина являющаяся функцией состояния, дифференциал которой равен:

$$\boxed{dS = \frac{\delta Q}{T}} \qquad (4)$$

Энтропия обозначается буквой S, а единицей измерения является джоуль на кельвин (Дж/К). Энтропия является функцией состояния термодинамической системы как, например, внутренняя энергия. Энтропия может быть представлена в виде функции параметров состояния, таких как p, V, T и т. п.: $S = f(p, V, T)$.

Величину $\dfrac{\delta Q}{T}$ называют приведенным количеством теплоты. Тогда можно сказать, что энтропия есть функция состояния термодинамической системы, дифференциал которой равен приведенному количеству теплоты.

Энтропия аддитивная величина. Это означает, что энтропия системы равна сумме энтропий ее частей.

Свойства энтропии.

В замкнутой системе

- При обратимых процессах: энтропия не изменяется $\Delta S=0$
- При необратимых процессах: энтропия возрастает $\Delta S>0$

Энтропия замкнутой системы, находящейся в равновесном состоянии, максимальна.

Кратко можно сказать, что энтропия замкнутой системы не убывает: $\Delta S \geq 0$

Клаузиус, рассматривая всю Вселенную как замкнутую систему, свел содержание второго закона термодинамики к утверждению: «Энтропия Вселенной стремится к максимуму». Когда этот максимум будет достигнут, во Вселенной прекратятся какие бы то ни было процессы. Действительно, каждый процесс приводил бы к возрастанию энтропии, а это невозможно, так как энтропия уже достигла своего предельного — максимального — значения. Таким образом, согласно Клаузиусу, во Вселенной в конце концов должно наступить абсолютно равновесное состояние, в котором никакие процессы уже невозможны. Такое состояние было названо *тепловой смертью Вселенной*.

В незамкнутой системе энтропия может вести себя как угодно.

Из (4) следует, что:

если системе передается количество теплоты, то ее энтропия возрастает;

если у системы отнимается количество теплоты, то ее энтропия убывает.

Следовательно, адиабатический процесс можно назвать изоэнтропийным.

1. 5 Лекция № 5 (2 часа).

Тема: «Электростатика»

1.5.1 Вопросы лекции:

1. Свойства электрических зарядов. Закон Кулона.
2. Электростатическое поле и его характеристики.
3. Теорема Остроградского – Гаусса для электростатического поля в вакууме.
4. Работа электростатического поля. Потенциал электростатического поля и его связь с напряженностью. Циркуляция вектора напряженности.

1.5.2 Краткое содержание вопросов:

Свойства электрических зарядов. Закон Кулона

Электрический заряд – скалярная физическая величина, характеризующая интенсивность взаимодействия электрически заряженных тел. В СИ заряд обозначается буквами *Q, q* и измеряется в Кулонах (*Кл*).

Опытным путем установлены следующие свойства заряда:

1. Существуют 2 вида заряда: положительный и отрицательный.
2. Электрический заряд дискретен, т.е. существует минимальный, неделимый заряд (*e* – элементарный заряд). Любое значение заряда кратно элементарному заряду: $Q=N*e$.
3. Электрический заряд инвариантен, т.е. не зависит от выбора системы отсчета.
4. Для заряда справедлив закон сохранения: в замкнутой системе алгебраическая сумма зарядов постоянна.

2. Точечный заряд – заряженное тело, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстояниями от этого тела до других заряженных тел.

Закон взаимодействия точечных зарядов отражается в законе Кулона.

$$\boxed{F=\frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{r^2}}$$

Электростатическое поле и его характеристики.

Как показывает опыт, заряженные тела взаимодействуют между собой на расстоянии через пустоту.

Каким же образом заряженное тело «знает» о существовании поблизости другого заряженного тела?

На этот счет существовали различные гипотезы. Впоследствии выяснилось, что заряженные тела «не знают о существовании друг друга» и напрямую между собой не взаимодействуют.

Заряженное тело окружено особой материей – электрическим полем. Если в нём окажется другое заряженное тело, то поле будет действовать на заряд с определенной силой.

Механизм взаимодействия заряженных тел выглядит так: первое тело создаёт вокруг себя электрическое поле, которое действует на второе заряженное тело; второе тело так же создаёт вокруг себя поле и оно действует на первый заряд.

Электрическое поле – особый вид материи, окружающее электрически заряженные тела.

Напряженность – векторная физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд.

$$\boxed{\vec{E}=\frac{\vec{F}}{q}}$$

Единица измерения в СИ вольт на метр (*В/м*).

Напряжённость является силовой характеристикой поля. Она характеризует не всё поле в целом , а только её конкретную точку.

В разных точках поля её напряженность может отличатся и по модулю и по направлению.

Теорема Остроградского – Гаусса для электростатического поля в вакууме.

Одним из задач электростатики является расчет напряжённости поля.

Если электростатическое поле имеет симметрию в пространстве, то можно использовать теорему Остроградского-Гаусса.
Теорема Остроградского-Гаусса: поток вектора напряженности электрического поля в вакууме через любую замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охваченных этой поверхностью, деленной на ε_0.

$$\boxed{\Phi = \frac{\sum q_i}{\varepsilon_0}}$$

Работа электрического поля.
Работу поля при перемещении заряда q можно определить по формуле (1.1б):

$$A = -(W_2 - W_1) = -(q\varphi_2 - q\varphi_1) = -q\underbrace{(\varphi_2 - \varphi_1)}_{\Delta\varphi} = -q\Delta\varphi$$

Таким образом, работа поля по перемещению заряда из т.1 в т.2 равна произведению заряда на разность потенциалов в этих точках со знаком минус: $A = -q\Delta\varphi$ (1.2)

Потенциал электростатического поля и его связь с напряженностью. Циркуляция вектора напряженности
Рассмотрим работу поля при перемещении заряда из данной точки в бесконечность:

$$A = -\left(q\underbrace{\varphi_2}_{0} - q\varphi_1\right) = q\varphi_1$$

Если q=1 Кл, то $A = \varphi$

Отсюда раскрывается физический смысл потенциала: потенциал численно равен работе, которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки в бесконечность.
Рассмотрим поле, создаваемое неподвижным точеным зарядом q. Пусть в этом поле находится заряд q'. Переместим заряд q' из точки 1 в точку 2 по какой-либо траектории и вычислим работу кулоновской силы.

$$A = \int_1^2 \vec{F}d\vec{r} = \int_1^2 k\frac{qq'}{r^2}dr = kqq'\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{r^2} = -kqq'\frac{1}{r}\Big|_{r_1}^{r_2} = k\frac{qq'}{r_1} - k\frac{qq'}{r_2} \qquad (1.1а)$$

Работа кулоновской силы не зависит от формы траектории, а определяется начальным и конечным положением заряда q'. Если траектория движения будет замкнута (заряд вернется в исходную точку), то работа равна нулю (r_1=r_2). Это свойство характерно для потенциальных полей. В таких полях работу по перемещению по какой-либо траектории можно вычислить через разность некоторых скаляров (чисел).
Из курса механики известно, что работу можно представить через изменение потенциальной энергии:

$$A = -(W_2 - W_1) \qquad (1.1б)$$

Из всего сказанного главное в том, что в электрическом поле любой заряд будет обладать определенной потенциальной энергией. Причем разные заряды водной и той же точке поля будут обладать разной энергией. Однако отношение энергии на величину заряда $\frac{W}{q}$ будет для всех зарядов одним и тем же.

Величина $\varphi = \frac{W}{q}$ называется *потенциалом* электрического поля. (1.1в)

Потенциал – скалярная физическая величина равная отношению потенциальной энергии заряда к величине этого заряда.
Потенциал численно равен потенциальной энергии, которой обладал бы в данной точке поля единичный положительный заряд. Потенциал измеряется в вольтах на метр (В/м).
Потенциал является энергетической характеристикой поля.

Электрическое поле можно описать либо с помощью векторной величины E, либо с помощью скалярной величины φ. Очевидно, что между этими величинами должна существовать определенная связь.
Пусть дано однородное электрическое поле напряженностью E. Переместим в нем точечный заряд q на расстояние Δx вдоль линии напряженности (т.е. по прямой).
Вычислим работу поля: $A = F\cdot\Delta x = qE\cdot\Delta x$

Но работу поля можно вычислить так же через разность потенциалов: $A = -q\Delta\varphi$

Приравняв эти выражения, получим: $qE\cdot\Delta x = -q\Delta\varphi$

$$E\cdot\Delta x = -\Delta\varphi \qquad \text{или} \qquad E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$$

1. 6 Лекция № 6 (2 часа).

Тема: «Интерференция света»

1.6.1 Вопросы лекции:

1. Волновая природа света. Принцип Гюйгенса.
2. Интерференция света. Условия максимума и минимума освещенности. Когерентность источников света.
3. Методы наблюдения интерференции. Интерференция в тонких пленках. Кольца Ньютона
4. Применение интерференции

1.6.2 Краткое содержание вопросов:

Волновая природа света. Принцип Гюйгенса

В 17 веке Гюйгенс создал волновую теорию света. Согласно волновой теории, свет представляет собой упругую волну, распространяющуюся в особой среде - эфире.

Волновая теория основывается на *принципе Гюйгенса*: каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн даст положение волнового фронта в следующий момент времени.

Волновым фронтом называется геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени.

Принцип Гюйгенса позволяет анализировать распространение света и вывести законы отражения и преломления.

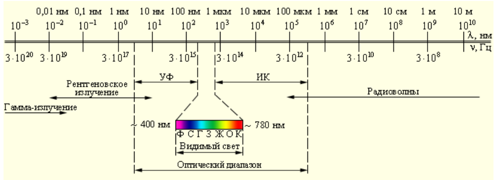
Развитие электродинамики Максвеллом показало, что свет по своей природе является электромагнитной волной.

В оптике под светом понимают не только видимый свет, но и примыкающие к нему широкие диапазоны спектра электромагнитного излучения – *инфракрасный* ИК и *ультрафиолетовый* УФ.

Для измерения длин волн в оптическом диапазоне используются единицы длины 1 нанометр (нм) и 1 микрометр (мкм):

1 нм = 10^{-9} м.

Самая короткая длина волны видимого света принадлежит фиолетовому цвету (400нм), а самая длинная – красному (750нм).



В вакууме свет распространяется со скоростью $c = 3 \cdot 10^8 \, м/c$.

Длина волны связана с частотой простым выражением: $\lambda\nu = c$.

Интерференция света. Условия максимума и минимума освещенности. Когерентность источников света

В электромагнитной волне колеблются вектора напряженности электрического поля ***E*** и вектор магнитной индукции магнитного поля ***B***. Опыт показывает, что в основном действие света определяется вектором напряженности электрического поля *E*.

При наложении световых волн происходит перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности. Это явление называется интерференцией света.

Чтобы усиление или ослабление света было стабильным необходимо, чтобы разность фаз колебаний была постоянна во времени. Волны, поддерживающие постоянную разность фаз в точке сложения, называются *когерентными.*

Обычные источники света не являются когерентными.

Особенно отчетливо проявляется интерференция в том случае, когда интенсивность обеих интерферирующих волн одинакова $I_1=I_2=I_0$. Тогда в максимумах $I=4I_0$, в минимумах же $I=0$. Для некогерентных волн при том же условии получается всюду одинаковая интенсивность $I=2I_0$.

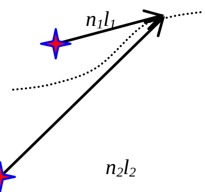
Интерференция света – это усиление или ослабление света при наложении когерентных световых волн.

Когерентные волны – волны, поддерживающие постоянную разность фаз в точке сложения.

<u>Условия максимума и минимума.</u>

Теперь посмотрим, как можно узнать, где свет будет усиливаться, а где ослабляться.

Рассмотрим два источника монохроматических волн.



Свет с определенной длиной волны (постоянной) называется монохроматическим (одноцветным).

Произведение геометрической длины пути *l* световой волны в данной среде на показатель преломления этой среды *n* называется оптической длиной пути nl, а разность оптических длин проходимых волнами путей — называется оптической разностью хода Δ.

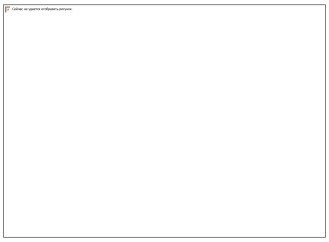
$\Delta=n_2l_2 - n_1l_1$ – оптическая разность хода.

1. Условие максимума.
   Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн
   $$\Delta = m\lambda \qquad (m = 0, \pm1, \pm2, ...)$$
   то в точке сложения произойдет усиление света. Это условие интерференционного максимума.
2. Условие минимума.
   Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн *плюс половина волны*
   $$\Delta = m\lambda + \lambda / 2 \qquad (m = 0, \pm1, \pm2, ...)$$
   то в точке сложения произойдет ослабление света. Это условие интерференционного минимума

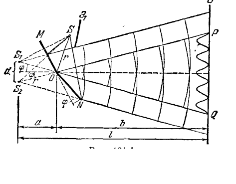
Методы наблюдения интерференции.

Для наблюдения интерференции света когерентные пучки получали разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих из одного и того же источника. Практически это можно осуществить с помощью экранов и щелей, зеркал и преломляющих тел.

1. Метод Юнга.
   Источником света служит ярко освещенная щель S, от которой световая волна падает на две узкие равноудаленные щели S_1 и параллельные щели S_2. Таким образом, щели S_1 и S_2 играют роль когерентных источников.
   Интерференционная картина наблюдается на экране, расположенном на некотором расстоянии параллельно S_1, и S_2. Юнгу принадлежит первое наблюдение явления интерференции.



2. Зеркала Френеля.
   Два плоских зеркала, расположены относительно друг друга под небольшим углом. На расстоянии *r* от линии пересечения зеркал параллельно ей находится прямолинейный источник света *S*. Световые пучки, отразившись от зеркал, являются мнимыми



изображениями S в зеркалах. Мнимые источники S_1 и S_2 взаимно когерентны, и их световые пучки интерферируют в области взаимного перекрытия. От прямого попадания света на экран предохраняет заслонка.

3. Бипризма Френеля.
Она состоит из двух одинаковых с общей гранью призм с малыми преломляющими углами. Свет от прямолинейного источника S преломляется в обеих призмах, в результате чего образуются две когерентные цилиндрические волны, исходящих из мнимых источников S_1 и S_2. На поверхности экрана в некоторой его части происходит наложение этих волн и наблюдается интерференция.

Интерференция света в тонких пленках.

При падении световой волны на тонкую прозрачную пластинку (или пленку) происходит отражение от обеих поверхностей пластинки. В результате возникают две световые волны, которые при определенных условиях могут интерферировать.

Пусть на прозрачную плоскопараллельную пластинку падает плоская световая волна (параллельный пучок света). В результате отражений от поверхностей пластинки, часть света возвращается в исходную среду. Отраженные лучи *1* и *2* когерентны. Оптическая разность хода, возникающая между двумя интерферирующими лучами от точки O до точки P

$$\Delta' = n(OC + CB) - OA$$

Согласно рис. $OC = CB = d/\cos\theta_2$, $OA = OB\sin\theta_1 = 2d\,\mathrm{tg}\,\theta_2\sin\theta_1$. Учитывая закон преломления $\sin\theta_1 = n\sin\theta_2$, получим

$$\Delta' = 2dn\cos\theta_2 = 2dn\sqrt{1-\sin^2\theta_2} = 2d\sqrt{n^2-\sin^2\theta_1}.$$

При вычислении разности колебаний в лучах *1* и *2* нужно, кроме оптической разности хода Δ', учесть возможность изменения фазы волны при отражении. В точке O отражение происходит от оптически более плотной среды. Поэтому фаза отраженной волны изменяется на π (для определенности считаем, что происходит потеря полуволны). В точке C отражение происходит от оптически менее плотной среды, так что скачка фазы не происходит. С учетом потери полуволны для оптической разности хода получим

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

Рассмотрим некоторые следствия.

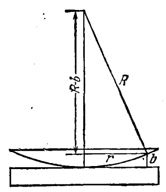
1. лучи света падающие под определенным углом на пленку образуют полосы равного наклона ($\theta - перем, \quad d - пост.$).
2. лучи света отраженные от участков пленки одинаковой толщины образуют полосы равной толщины ($d - перем, \quad \theta - пост.$).

В результате интерференции света в пленке мыльного пузыря или в масляной пленке на воде наблюдаются разноцветные линии. Цветные линии соответствуют усилению света определенной волны (красный, зеленый, голубой и т.д.) в пленке при условии равной толщины или равного наклона.

Кольца Ньютона.

Классическим примером полос равной толщины являются кольца Ньютона. Они наблюдаются при отражении света от соприкасающихся друг с другом толстой плоскопараллельной стеклянной пластинки и плоско-выпуклой линзы с большим радиусом кривизны. Роль тонкой пленки, от поверхностей которой отражаются когерентные волны, играет воздушный зазор между пластинками и линзой (вследствие большой толщины пластинки и линзы, отраженные от других поверхностей лучи в образовании интерференционной картины не участвуют). При нормальном падении света полосы равной толщины имеют вид концентрических окружностей, при наклонном падении – эллипсов. Найдем радиусы колец Ньютона, получающихся при падении света по нормали к пластинке. Из рис. следует, что

$$R^2 = (R-d)^2 + r^2 \approx R^2 - 2Rd + r^2,$$



где R – радиус кривизны линзы, r – радиус окружности, которой соответствует зазор толщины d. Таким образом,

$$d = r^2/2R.$$

С учетом потери полуволны, возникающей при отражении от пластинки, оптическая разность хода лучей *1′* и *1″* равна

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda_0}{2}.$$

Используя условия максимума и минимума, получим выражения для радиусов m-го светлого и m-го темного кольца соответственно

$$r_m = \sqrt{(m-½)\lambda_0 R} \quad (m = 1, 2, 3, ...),$$

$$r_m^* = \sqrt{m\lambda_0 R} \quad (m = 0, 1, 2, ...).$$

Применение интерференции.

Просветление оптики.

Явление интерференции применяется для улучшения качества оптических приборов и получения высокоотражающих покрытий. Прохождение света через каждую преломляющую поверхность линзы сопровождается отражением ≈4 % падающего потока (при показателе преломления стекла ≈1,5). Так как современные объективы состоят из большого количества линз, то число отражений в них велико, а поэтому велики и потери светового потока. Для устранения этого и других недостатков осуществляют так называемое *просветление оптики*. Для этого на свободные поверхности линз наносят тонкие пленки с показателем преломления, меньшим, чем у материала линзы. При отражении света от границ раздела воздух–пленка и пленка–стекло возникает интерференция отраженных лучей. Толщину пленки d и показатели преломления стекла n_c и пленки n подбираются так, чтобы отраженные волны гасили друг друга. Для этого их амплитуды должны быть равны, а оптическая разность хода равна

$(m+1/2)\lambda_0$. Расчет показывает, что амплитуды отраженных лучей равны, если $n=\sqrt{n_c}$. Так как $n_c > n > 1$, то потеря полуволны происходит на обеих поверхностях; следовательно, условие минимума (свет падает нормально)

$$2nd = (m+1/2)\lambda_0 .$$

Обычно принимают $m = 0$, тогда

$$nd = \lambda_0/4 \qquad d = \frac{\lambda}{4n} .$$

Так как добиться одновременного гашения для всех длин волн невозможно (показатель преломления зависит от длины волны), то это делается для цвета с $\lambda_0 \approx 0.55$ мкм (к нему наиболее чувствителен глаз). Поэтому объективы с просветленной оптикой имеют синевато-красный оттенок.

Интерференционные светофильтры.

Многолучевую интерференцию можно осуществить в многослойной системе чередующихся пленок с разными показателями преломления (но одинаковой оптической толщиной, равной $\lambda_0/4$). При прохождении света возникает большое число отраженных интерферирующих лучей, которые при оптической толщине пленок $\lambda_0/4$ будут взаимно усиливаться, т.е. коэффициент отражения возрастает. Подобные отражатели применяются в лазерной технике, а также используются для создания интерференционных светофильтров.

Интерферометры.

Явление интерференции применяется в очень точных измерительных приборах – интерферометрах.

Применение интерферометров весьма многообразно. Они применяются для точного (порядка 10^{-7} м) измерения длин, измерения углов, определения качества оптических деталей, исследования быстропротекающих процессов и др.

1. 7 Лекция № 7 (2 часа).

Тема: «Тепловое излучение»

1.7.1 Вопросы лекции:

1. Излучение абсолютно чёрного тела и его характеристики.
2. Законы теплового излучения. Квантовая гипотеза Планка. Оптическая пирометрия.
3. Внешний фотоэффект. Законы внешнего фотоэффекта. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
4. Фотоны и их свойства. Энергия, масса и импульс фотонов. Давление света.
5. Эффект Комптона.

1.7.2 Краткое содержание вопросов:

Излучение абсолютно чёрного тела и его характеристики

Излучение электромагнитных волн может осуществляться за счет различных видов энергии. Самым распространенным является тепловое излучение.

Тепловое излучение – это излучение электромагнитных волн за счет внутренней энергии тела.

Тепловое излучение обусловлено тепловым движением молекул и поэтому имеет место при любой температуре тела. Тепловое излучение имеет непрерывный спектр. Это означает, что нагретое тело испускает некоторое количество энергии излучения в любом диапазоне частот или длин волн.

Тепловое излучение может быть равновесным. Если несколько нагретых излучающих тел окружить идеально отражающей, непроницаемой для излучения оболочкой, то по истечении некоторого промежутка времени в системе "излучающие тела + излучение в полости" установится термодинамическое равновесие. Это означает, что температуры всех тел станут равными, а распределение энергии между телами и излучением не будет изменяться со временем. Такое равновесное состояние системы устойчиво, т. е. после всякого его нарушения состояние равновесия вновь восстанавливается. Термодинамическое равновесие установится и в полости, стенки которой выполнены из любого реального материала и имеют одинаковую температуру.

Способность теплового излучения находиться в равновесии с излучающим телом отличает тепловое излучение от других видов излучения тел. Поэтому такое излучение будем называть равновесным.

1. Спектральная плотность энергетической светимости.

   Спектральная плотность энергетической светимости – мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале частот единичной ширины. Опыт показывает, что для каждого тела является определенной функцией частоты, вид которой изменяется при изменении температуры тела Т: $r(\nu,T)$

2. Интегральная энергетическая светимость.

   Интегральная энергетическая светимость – мощность излучения с единицы площади поверхности тела во всем диапазоне частот: $R(T)$.

   $R(T)$ показывает, сколько всего энергии излучается с единицы площади в виде э/м волн.

   Зная спектральную плотность энергетической светимости, можно вычислить интегральную энергетическую светимость (ее называют просто энергетической светимостью тела), просуммировав по всем частотам:

$$R(T)=\int_0^\infty r(\nu,T)d\nu$$

3. Спектральная поглощательная способность.

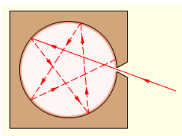
Пусть на элементарную площадку поверхности тела падает поток излучения энергии $d\Phi_\nu$, приходящийся на интервал частот $d\nu$. Часть этого потока $d\Phi'_\nu$ будет поглощена телом. Безразмерная величина

$$A(\nu,T)=\frac{d\Phi'_\nu}{d\Phi_\nu}$$ называется спектральной поглощательной способностью тела.

По определению поглощательная способность тела не может быть больше единицы: $A(\nu,T)\le 1$

Абсолютно черное тело.

Тело, способное поглощать полностью при любой температуре все падающее на него излучение любой частоты, называется *абсолютно черным телом*. Следовательно, спектральная поглощательная способность абсолютно черного тела для всех частот и температур тождественно равна единице $A(\nu,T)\equiv 1$.



Абсолютно черных тел (АЧТ) в природе не существует. И все же реализовать модель АЧТ возможно. Для этого используют полость с небольшим отверстием. При этом полость может иметь практически любую форму и быть изготовленной из любого непрозрачного материала. Излучение, проникнув через отверстие, попадает на стенки полости, частично поглощаясь ими. При малых размерах отверстия луч должен претерпеть множество отражений, прежде чем он сможет выйти из отверстия. При многократных отражениях на стенках полости излучение, попавшее в полость, практически полностью поглотится. Малое отверстие полости будет вести себя как АЧТ. Отметим, что если стенки полости поддерживать при некоторой температуре Т, то отверстие будет излучать, и это излучение с большой степенью точности можно считать излучением абсолютно черного тела, имеющего температуру Т.

Законы теплового излучения. Квантовая гипотеза Планка. Оптическая пирометрия

Между испускательными и поглощательными свойствами любого тела должна существовать связь. Ведь равновесие в системе может установиться только в том случае, если каждое тело будет излучать в единицу времени столько же энергии, сколько оно поглощает. Это означает, что тела, интенсивнее поглощающие излучение какой-либо частоты, будут это излучение интенсивнее и испускать.

Закон Кирхгофа: отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральной поглощательной способности не зависит от природы тела и является для всех тел универсальной функцией частоты волны и температуры:

$$\frac{r(\nu,T)}{A(\nu,T)}=r_0(\nu,T)$$

$r_0(\nu,T)$ - универсальная функция Кирхгофа.

Для абсолютно черного тела $A(\nu,T)\equiv 1$, поэтому из закона Кирхгофа вытекает, что $r(\nu,T)$ для черного тела равна $r_0(\nu,T)$.

Таким образом, универсальная функция Кирхгофа $r_0(\nu,T)$ есть не что иное, как спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела. Поэтому важно знать характер излучения АЧТ.

Излучение абсолютно черного тела имеет универсальный характер в теории теплового излучения. Реальное тело излучает при любой температуре всегда меньше энергии, чем абсолютно черное тело. Зная спектральную плотность энергетическую светимость абсолютно черного тела (универсальную функцию Кирхгофа) и поглощательную способность реального тела, из закона Кирхгофа можно определить энергию, излучаемую этим телом в любом диапазоне частот или длин волн.

Закон Стефана-Больцмана.

Экспериментальные (Й. Стефан, 1879) и теоретические (Л. Больцман, 1884) исследования позволили доказать важный закон теплового излучения абсолютно черного тела.

Этот закон утверждает, что интегральная энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R(T)=\sigma T^4$$

Где константа σ=5,67•10^{-8} Вт/$м^2К^4$ – постоянная Стефана-Больцмана.

Закон Вина.

В 1893 г. немецкий физик В. Вин сформулировал закон теплового излучения, согласно которому длина волны λ_m, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_m=\frac{b}{T}$$

Где константа b=2,9•10^{-3} м*К – постоянная Вина. Закон Вина еще называют законом смещения Вина, потому что он показывает смещение положения максимума функции $r(\nu,T)$ по мере возрастания температуры в область коротких длин волн.

Совокупность методов измерения высоких температур, основан-ных на использовании зависимости спектральной плотности энергети-ческой светимости, или энергетической светимости исследуемого те-ла от температуры, называется оптической пирометрией, а приборы, применяемые для этой цели, называются оптическими пирометрами.

Квантовая теория излучения.

Впервые строгую попытку теоретического вывода зависимости $r(\nu,T)$ осуществили Д. Рэлей (1900) и Д. Джинс (1905). Была получена формула: $r(\nu,T)=\dfrac{2\pi\nu^2}{c^2}kT$ (*), которую называют формулой Релея-Джинса. Она дает достаточно хорошее согласие с экспериментом при малых частотах ν. Однако при больших частотах ν спектральная плотность энергетической светимости значительно превосходит наблюдаемую. Кроме того, интегрируя (*) по всем частотам, мы получаем бесконечные значения для интегральной энергетической светимости абсолютно черного тела: $R(T)=\int_0^\infty \frac{2\pi\nu^2}{c^2}kTd\nu=\frac{2\pi}{c^2}kT\int_0^\infty \nu^2 d\nu=\infty$.

Таким образом, из классической теории теплового излучения следует вывод о том, что при конечных значениях энергии излучения равновесие между веществом и излучением невозможно. Но он противоречит опыту.

Этот противоречивый результат, содержащийся в формуле Рэлея — Джинса, вывод которой с точки зрения классической теории не вызывал сомнений, П. Эренфест назвал "ультрафиолетовой катастрофой".

"Ультрафиолетовая катастрофа" показала, что классическая физика содержит ряд принципиальных внутренних противоречий, которые проявились в теории теплового излучения и разрешить которые можно только с помощью принципиально новых физических идей.

Такая физическая идея была сформулирована в 1900 г. М. Планком в виде *гипотезы о квантах*. Согласно этой гипотезе, излучение испускается веществом не непрерывно, а конечными порциями энергии, которые Планк назвал квантами. Энергия кванта зависит от частоты излучения и определяется по формуле

$$E=h\nu$$

Здесь $h=6{,}63\cdot10^{34}\,Дж\cdot c$ — новая фундаментальная физическая константа, которую называют *постоянной Планка*.

Полученная Планком формула

$$r(\nu,T)=\frac{2\pi h\nu^2}{c^2}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}$$

блестяще согласуется с экспериментальными данными по распределению энергии в спектрах излучения черного тела во всем интервале частот и температур. Теоретический вывод этой формулы М. Планк изложил 14 декабря 1900 г. на заседании Немецкого физического общества. Этот день стал датой рождения квантовой физики.

Внешний фотоэффект. Законы внешнего фотоэффекта.

Фотоэффект – это испускание электронов из вещества под действием падающего на него излучения.

Детальное экспериментальное исследование закономерностей фотоэффекта для металлов было выполнено в 1888 г. А.Г. Столетовым.

Экспериментально были установлены следующие основные *законы фотоэффекта*:

1. При фиксированной частоте падающего света число фотоэлектронов, вырываемых из катода в единицу времени, пропорционально интенсивности света.
2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты и не зависит от интенсивности падающего света.
3. Для каждого вещества существует «красная граница» фотоэффекта, т. е. минимальная частота ν_0 света, при которой свет любой интенсивности фотоэффекта не вызывает.

Качественное объяснение фотоэффекта с волновой точки зрения на первый взгляд не должно было бы представлять трудностей. Действительно, под действием поля световой волны в металле возникают вынужденные колебания электронов, амплитуда которых (например, при резонансе) может быть достаточной для того, чтобы электроны покинули металл; тогда и наблюдается фотоэффект. Кинетическая энергия, с которой электрон вырывается из металла, должна была бы зависеть от интенсивности падающего света, так как с увеличением последней электрону передавалась бы большая энергия. Однако этот вывод противоречит II закону фото-

фотоэффекта. Так как, по волновой теории, энергия, передаваемая электронам, пропорциональна интенсивности света, то свет любой частоты, но достаточно большой интенсивности должен был бы вырывать электроны из металла; иными словами, «красной границы» фотоэффекта не должно быть, что противоречит III закону фотоэффекта. Кроме того, волновая теория не смогла объяснить безынерционность фотоэффекта, установленную опытами. Таким образом, фотоэффект необъясним с точки зрения волновой теории света.

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.

А. Эйнштейн в 1905 г. показал, что явление фотоэффекта и его закономерности могут быть объяснены на основе предложенной им квантовой теории фотоэффекта. Согласно Эйнштейну, свет частотой ν *не только испускается, как это предполагал Планк, но и распространяется в пространстве и поглощается веществом отдельными порциями* (квантами), энергия которых $E=h\nu$. Таким образом, распространение света нужно рассматривать не как непрерывный волновой процесс, а как поток локализованных в пространстве дискретных световых квантов, движущихся со скоростью распространения света в вакууме. Эти кванты электромагнитного излучения получили название *фотонов*.

Каждый квант поглощается только одним электроном. Поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально интенсивности света (I закон фотоэффекта). Безынерционность фотоэффекта объясняется тем, что передача энергии при столкновении фотона с электроном происходит почти мгновенно.

Энергия падающего фотона расходуется на совершение электроном работы выхода A из металла и на сообщение вылетевшему фотоэлектрону кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$. По закону сохранения энергии:

$$h\nu=A+\frac{mv^2}{2}$$ *уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.*

С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности фотоэффекта.

Фотоны и их свойства. Энергия, масса и импульс фотонов. Давление света

Согласно гипотезе световых квантов Эйнштейна, свет испускается, поглощается и распространяется дискретными порциями (квантами), названными фотонами. Энергия фотона $E=h\nu$.

Свойства фотона могут быть описаны только с использованием основных соотношений специальной теории относительности. В частности, из этой теории следует, что фотон является уникальной элементарной частицей, имеющей нулевую массу покоя. Это означает, что фотон всегда движется со скоростью света и не может находиться в состоянии покоя. Если при неупругом столкновении с другой элементарной частицей фотон "останавливается", то он исчезает, передавая всю свою энергию этой частице.

Определим массу фотона из взаимосвязи энергии и массы (см. лек СТО):

$$m=\frac{h\nu}{c^2}$$ *масса фотона.*

Движущийся со скоростью *c* фотон обладает импульсом, величина которого связана с его энергией релятивистским соотношением $p = \frac{E}{c}$. Отсюда следует, что

$$p = \frac{h\nu}{c}$$ *импульс фотона.*

Если фотоны обладают импульсом, то свет, падающий на тело, должен оказывать на него давление. Так с квантовой точки зрения объясняется давление света.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1 Лабораторная работа № 1 (2 часа).

Тема: «Определение момента инерции шатуна»

2.1.1 Цель работы: Определить момент инерции шатуна

2.1.2 Задачи работы:

1. Опытным путем определить момент инерции, применяя уравнения и формулы физики колебаний

2.1.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. штатив с отвесом и горизонтальной осью,
2. секундомер,
3. шатун,
4. крючки с нитями,
5. масштабная линейка

2.1.4 Описание (ход) работы:

1. Значение массы шатуна выбито на шатуне в граммах. По этому значению вычислить вес шатуна в Ньютонах в положении равновесия.
2. Отметить на шатуне центр тяжести О. Для этого шатун подвесить на крючках так, как показано на рис. 1 а. Положение центра тяжести определится как точка пересечения отвесной линии с осью симметрии шатуна.

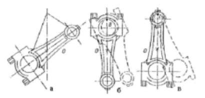


Рис. 1

3. Подвесить шатун так, как показано на рис. 1 б (ось вращения шатуна проходит через точку В) и, определив время десяти колебаний, найти период колебания шатуна T_B относительно оси, проходящей через точку В (шатун отклоняется от положения равновесия на 3-5°) $\left(T_B = \frac{t}{10}\right)$.
4. Измерить масштабной линейкой расстояние $r_{BO} = BO$.
5. Вычислить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через точку В (J_B) по формуле (2).
6. Подвесить шатун так, как это показано на рис. 1 в (ось вращения шатуна проходит через точку А), и аналогично описанному выше определить период колебаний шатуна (T_A), расстояние $r_{AO} = AO$ и вычислить момент инерции шатуна относительно оси, проходящей через точку А (J_A).
7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

	m	p	n	t	T	r	J	J_O
Относительно оси, проходящей через точку В.								
Относительно оси, проходящей через точку А.								

6. Вычислить J_O шатуна: $J_O = J_A - r_{AO}^2 m$; $J_O = J_B - r_{BO}^2 m$ для двух положений шатуна и его среднее значение.
7. Найти абсолютную и относительную погрешности вычислений момента инерции шатуна J_O относительно оси, проходящей через центр масс.

2.2 Лабораторная работа № 2 (2 часа).

Тема: «Исследование распределения Максвелла. Определение наиболее вероятной скорости движения молекул азота»

2.2.1 Цель работы: Исследование распределения молекул газа по скоростям

2.2.2 Задачи работы:

1. Изучить распределение молекул по скоростям

2. Определить наиболее вероятную скорость молекул

2.2.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер

2. ПО Виртуальный практикум по физике в 2 частях– 000 «Физикон».

2.2.4 Описание (ход) работы:

1. Запустите программу "Молекулярная физика"
2. Ознакомьтесь с описанием компьютерной модели «Распределение Максвелла». Выберите в меню кнопку *Один газ*.
3. С помощью кнопки *Изменение Т* установите температуру 450 К, считая T_0 = 600 К.
4. Дождитесь, пока кривая распределения не станет максимально приближена к вершинам каждого из столбиков. Приостановите модель нажатием клавиши PAUSE (BREAK) на клавиатуре. (Для продолжения работы модели необходимо нажать ENTER)
5. Одно деление на оси абсцисс соответствует 90 м/с. (Рис.1) Измерьте:
   - число частиц n_1, скорости которых попали в интервал от 90 м/с до 180 м/с,
   - число частиц n_2, скорости которых попали в интервал от 270 м/с до 360 м/с,
   - число частиц n_3, скорости которых попали в интервал от 450 м/с до 540 м/с,
   - число частиц n_4, скорости которых попали в интервал от 630 м/с до 720 м/с
   - число частиц n_5, скорости которых попали в интервал от 810 м/с до 900 м/с
   - число частиц n_6, скорости которых попали в интервал от 1080 м/с до 1170 м/с
6. Постройте кривую распределения молекул по скоростям $n_i(\upsilon)$. Определите по графику наиболее вероятную скорость молекул. Таким образом, вы получите её экспериментальное значение.
7. Вычислите теоретическое значение наиболее вероятной скорости молекул азота (μ =0,028 кг/моль) для заданной температуры по формуле (3) и сравните с экспериментальным.
8. Выполните пункты № 3 ÷ №7 лабораторной работы для температуры Т = 600 К. (Замечание: графики распределения первого и второго опыта необходимо строить в одних осях)
9. Сделайте вывод о проделанной работе и запишите его в тетрадь.

Завершите работу программы

2.3 Лабораторная работа № 3 (2 часа).

Тема: «Определение постоянной Больцмана»

2.3.1 Цель работы: определить постоянную Больцмана.

2.3.2 Задачи работы:

1. Измерить постоянную Больцмана, пользуясь основным уравнением МКТ.

2.3.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. стеклянный баллон объемом не менее 20 л., манометр, медицинский шприц,

эфир

2.3.4 Описание (ход) работы:

1. Через иглу, вставленную в пробку баллона, с помощью шприца впрыскивают эфир в баллон. По истечении 1-2 минут необходимо быстро измерить разность уровней Δh. Температуру Т определяют по термометру.
2. Опыт проводят три раза, впрыскивая следующие объемы эфира: 0,2 мл, 0,3 мл, 0,4 мл. (1 кубик шприца – 1 мл.)
3. Пользуясь формулой (9) рассчитывают значение постоянной Больцмана k.
4. Результаты измерений и вычислений заносят таблицу.

№ опыта	Δh, м	Т, К	В, $кг \cdot м^4/с^2$	$V_э$, $м^3$	V, $м^3$	k, $Дж/К$	k_{CP}, $Дж/К$
1							

2							

5. Среднее значение k_{CP}, полученное опытным путем, сравнивают с теоретическим значением постоянной Больцмана.
6. Оцените погрешность измерения k, поясните причины отличия от теоретического значения.
7. Сформулируйте вывод по данной работе.

2.4 Лабораторная работа № 4 (2 часа).

Тема: «Движение заряженной частицы в однородном электростатическом поле»

2.4.1 Цель работы: Изучение действия электрического поля на аряженную частуцу

2.4.2 Задачи работы:

1. Изучить траекторию движения заряженной частицы в электрическом поле
2. Определить удельный заряд частицы

2.4.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Компьютер
2. ПО Виртуальный практикум по физике в 2 частях– 000 «Физикон».

2.4.4 Описание (ход) работы:

1. Выберите раздел «Электричество». Нажмите кнопку с названием данной работы.
2. Нажмите «мышью» кнопку «Выбор». Подведите курсор «мыши» к вектору E и установите напряженность $E \ge 2 \,{}^{\text{кВ}}\!/_{\text{m}}$.
3. Аналогичным способом установите $v_{ox} = 5 \cdot 10^6 \,{}^{i}\!/_{c}$, $v_{oy} = 0 \,{}^{i}\!/_{c}$. Нажав «Старт», пронаблюдайте движение частицы. Изменяя V_{ox}, подберите <u>минимальное</u> значение, при котором частица вылетает из конденсатора. Запишите значение длины пластины конденсатора $L(x)$.
4. Зарисуйте движение частицы и укажите вектор начальной скорости и ускорение движения частицы.
5. Верните модель в исходные начальные условия (E, v_{ox}, v_{oy}).
6. Нажмите «Старт» и проследите, чтобы электрон не вылетел из конденсатора. Если электрон «приземлился» на одной из пластин, то запишите в таблицу значения скорости V_{ox}, V_y и времени полета электрона t, полученные в ходе эксперимента. Если электрон вылетел из конденсатора, то измените величину начальной скорости, уменьшите или увеличьте напряженность поля и повторите опыт.
7. Используя формулу (4) рассчитайте ускорение электрона.
8. Вычислите величину удельного заряда q/m, выразив ее из формулы (2).
9. Повторите пункты $6 \div 8$ не менее пяти раз, изменяя каждый раз значение скорости V_{ox}. Данные занесите в таблицу.
10. Вычислите среднее арифметическое значение величины удельного заряда и сравните с табличным значением удельного заряда электрона ($q = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг), рассчитайте ε_1.
11. Постройте график зависимости составляющей скорости V_y на вылете из конденсатора от обратной начальной скорости ($v_y = f(1/v_{ox})$).
12. Определите по наклону графика экспериментальное значение удельного заряда частицы, используя формулу:

$$\frac{q}{m} = \frac{1}{EL} \cdot \frac{\Delta(v_y)}{\Delta(1/v_{ox})}$$

13. Определите относительную погрешность результатов измерения ε_2.

$$\varepsilon = \frac{|N_{\text{тбл}} - N_{\text{эксп}}|}{N_{\text{тбл}}} \cdot 100\%$$

14. Сформулируйте вывод по работе.

2.5 Лабораторная работа № 5 (2 часа).

Тема: «Построение графика сопротивления лампы накаливания в зависимости от тока накала »

2.5.1 Цель работы: Выявить зависимость сопротивления нити накала лампы от температуры

2.5.2 Задачи работы:

1. Построить график зависимости сопротивления лампы от силы тока

2.5.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. Электрическая лампочка
2. Потенциометр
3. Амперметр
4. Вольтметр

2.5.4 Описание (ход) работы:

1. Собрать схему (рис.1), включить в нее лампу накаливания с вольфрамовой нитью.

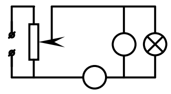


Рис.1

2. Поставить ползунок (подвижной контакт) потенциометра в положение 1, чтобы при включении схемы ток через лампу накаливания был бы минимальным.
3. После проверки схемы преподавателем подключить ее к источнику напряжения.
4. Постепенно увеличивая ток в лампе накаливания, снять показания вольтметра и амперметра для 6-8 точек.
5. По формуле (2) определить сопротивление нити.
6. Результаты измерения занести в таблицу.

№ п/п	Напряжение на лампе (В)	Ток через лампу (А)	Сопротивление лампы (Ом)
1.			
2.			

7. Построить графики зависимости тока от напряжения и сопротивления нити накаливания от тока (I = f(U) и R= f(I))
8. Сделать выводы.
9. Проделать то же самое для другой лампы.

2.6 Лабораторная работа № 6 (2 часа).

Тема: «Определение длины волны света с помощью дифракционной решетки»

2.6.1 Цель работы: Определение длины волны видимого света

2.6.2 Задачи работы:

1. Собрать установку

2. Вычислить длину волны света и сравнить с табличным значением

2.6.3 Перечень приборов, материалов, используемых в лабораторной работе:

1. дифракционная решетка, деревянная линейка со шкалой, щиток с миллиметровой шкалой, полупроводниковый лазер.

2.6.4 Описание (ход) работы:

Поместив дифракционную решетку в рамку, включите свет (напряжение 220в) и установив щиток с миллиметровой шкалой на 200-300мм.

В зависимости от числа штрихов на дифракционной решетке, на щитке можно видеть 2 или 3 пары дифракционных спектров.

Если спектры располагаются не параллельно шкале, то следует слегка повернуть рамку с решеткой. В данной работе определяют длину световых волн красных лучей. Для этого отсчитывают по шкале расстояние от середины до красных лучей. Затем, по шкале на рейке определяют расстояние от щитка до дифракционной решетки, которая расположена на нулевом делении шкалы. Разделив расстояние *a* от середины шкалы щитка до наблюдаемого спектра на расстоянии *l*. от щитка до дифракционной решетки, получают $tg\varphi = \frac{a}{l}$ угла. Но $tg\varphi \approx Sin\varphi$ при малых углах.

Значит $Sin\varphi = \frac{a}{l}$ (5).

По уравнению дифракционной решетки $Sin\varphi = K\lambda$ (6), где λ - длина искомой волны, K - порядок спектра и d - постоянная дифракционной решетки, равная 0,01мм (или 0,02мм), (см. надпись на дифракционной решетке), определяет $\lambda = \frac{d}{K} Sin\varphi$ или $\lambda = \frac{d \cdot a}{K \cdot l}$ Для получения более точных результатов необходимо брать возможно больше k.

Рассчитывают λ. По результатам наблюдений составляют таблицу:

Сравнить полученную длину волны с табличным значением.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

3.1 Практическое занятие № 1 (2 часа).

Тема: «Кинематика»

3.1.1 Задание для работы:

1. подготовится к занятию по вопросам лекции 1,2
2. дать определение основным понятиям кинематики, динамикираскрыть их физический смысл
3. установить связи между величинами, сформулировать основные законы
4. решить типовые задачи по данной теме

3.1.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия проверяется уровень подготовки студентов по данной теме в виде выборочного устного опроса либо тотального письменного опроса по вопросам лекции 1 и 2. Затем студентами решаются типовые задачи: самостоятельно, у доски или совместно с преподавателем. Подобные задачи даются для самостоятельно решения.

3.1.3 Результаты и выводы:

При решении задач раскрывается сущность физических законов. Развиваются навыки теоретического мышления. Формируются умения применять теоретические знания на практике; грамотно и эффективно проводить численные расчеты (с применением инженерного калькулятора).

3.2 Практическое занятие № 2 (2 часа).

Тема: «Основы МКТ»

3.2.1 Задание для работы:

1. подготовится к занятиям по вопросам первой и второй частей лекции 3
2. дать определение основным понятиям молекулярной физики
3. установить связи между величинами, сформулировать основные законы
4. решить типовые задачи по данной теме

3.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия проверяется уровень подготовки студентов по данной теме в виде выборочного устного опроса либо тотального письменного опроса по вопросам лекции 3. Затем студентами решаются типовые задачи: самостоятельно, у доски или совместно с преподавателем. Подобные задачи даются для самостоятельно решения.

3.2.3 Результаты и выводы:

При решении задач раскрывается сущность физических законов. Развиваются навыки теоретического мышления. Формируются умения применять теоретические знания на практике; грамотно и эффективно проводить численные расчеты (с применением инженерного калькулятора).

3.3 Практическое занятие № 3 (2 часа).

Тема: «Первое начало термодинамики»

3.3.1 Задание для работы:

1. подготовится к занятию по вопросам лекции 4

2. дать определение основным понятиям термодинамики
3. установить связи между величинами, сформулировать основные законы
4. решить типовые задачи по данной теме

3.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия проверяется уровень подготовки студентов по данной теме в виде выборочного устного опроса либо тотального письменного опроса по вопросам лекции 14. Затем студентами решаются типовые задачи: самостоятельно, у доски или совместно с преподавателем. Подобные задачи даются для самостоятельно решения.

3.3.3 Результаты и выводы:

При решении задач раскрывается сущность физических законов. Развиваются навыки теоретического мышления. Формируются умения применять теоретические знания на практике; грамотно и эффективно проводить численные расчеты (с применением инженерного калькулятора).

3.4 Практическое занятие № 4 (2 часа).

Тема: «Магнитное поле постоянного тока»

3.4.1 Задание для работы:

1. подготовится к занятиям по вопросам
2. дать определение основным понятиям
3. установить связи между величинами, сформулировать основные законы
4. решить типовые задачи по данной теме

3.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия проверяется уровень подготовки студентов по данной теме в виде выборочного устного опроса либо тотального письменного опроса по вопросам. Затем студентами решаются типовые задачи: самостоятельно, у доски или совместно с преподавателем. Подобные задачи даются для самостоятельно решения.

3.4.3 Результаты и выводы:

При решении задач раскрывается сущность физических законов. Развиваются навыки теоретического мышления. Формируются умения применять теоретические знания на практике; грамотно и эффективно проводить численные расчеты (с применением инженерного калькулятора).

3.5 Практическое занятие № 5 (2 часа).

Тема: «Электромагнитные колебания»

3.5.1 Задание для работы:

1. подготовится к занятию по вопросам
2. дать определение основным понятиям
3. установить связи между величинами, сформулировать основные законы
4. решить типовые задачи по данной теме

3.5.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия проверяется уровень подготовки студентов по данной теме в виде выборочного устного опроса либо тотального письменного опроса по вопросам. Затем студентами решаются типовые задачи: самостоятельно, у доски или совместно с преподавателем. Подобные задачи даются для самостоятельно решения.

3.5.3 Результаты и выводы:

При решении задач раскрывается сущность физических законов. Развиваются навыки теоретического мышления. Формируются умения применять теоретические знания на практике; грамотно и эффективно проводить численные расчеты (с применением инженерного калькулятора).

3.6 Практическое занятие № 6 (2 часа).

Тема: «Геометрическая оптика»

3.6.1 Задание для работы:

1. подготовится к занятию по вопросам
2. дать определение основным понятиям геометрической оптики
3. установить связи между величинами, сформулировать основные законы
4. решить типовые задачи по данной теме

3.6.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия проверяется уровень подготовки студентов по данной теме в виде выборочного устного опроса либо тотального письменного опроса по вопросам. Затем студентами решаются типовые задачи: самостоятельно, у доски или совместно с преподавателем. Подобные задачи даются для самостоятельно решения.

3.6.3 Результаты и выводы:

При решении задач раскрывается сущность физических законов. Развиваются навыки теоретического мышления. Формируются умения применять теоретические знания на практике; грамотно и эффективно проводить численные расчеты (с применением инженерного калькулятора).

3.7 Практическое занятие № 7 (2 часа).

Тема: «Тепловое излучение»

3.7.1 Задание для работы:

1. подготовится к занятию по вопросам первой части лекции 7
2. дать определение основным понятиям
3. установить связи между величинами, сформулировать основные законы
4. решить типовые задачи по данной теме

3.7.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия проверяется уровень подготовки студентов по данной теме в виде выборочного устного опроса либо тотального письменного опроса по вопросам первой части лекции 7. Затем студентами решаются типовые задачи: самостоятельно, у доски или совместно с преподавателем. Подобные задачи даются для самостоятельно решения.

3.7.3 Результаты и выводы:

При решении задач раскрывается сущность физических законов. Развиваются навыки теоретического мышления. Формируются умения применять теоретические знания на практике; грамотно и эффективно проводить численные расчеты (с применением инженерного калькулятора).

3.8 Практическое занятие № 8 (2 часа).

Тема: «Квантовая механика»

3.8.1 Задание для работы:

1. подготовится к занятию по вопросам
2. дать определение основным понятиям
3. сформулировать основные законы
4. решить типовые задачи по данной теме

3.8.2 Краткое описание проводимого занятия:

В начале занятия проверяется уровень подготовки студентов по данной теме в виде выборочного устного опроса либо тотального письменного опроса по вопросам. Затем студентами решаются типовые задачи: самостоятельно, у доски или совместно с преподавателем. Подобные задачи даются для самостоятельно решения.

3.8.3 Результаты и выводы:

При решении задач раскрывается сущность физических законов. Развиваются навыки теоретического мышления. Формируются умения применять теоретические знания на практике; грамотно и эффективно проводить численные расчеты (с применением инженерного калькулятора).