

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

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

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

Часть 1

Механика

Молекулярная физика и термодинамика

Электричество

Рассмотрено на заседании кафедры физики

Протокол № 5 от 26 марта 2012 г.

Утверждено учебно-издательским

Советом ДонНТУ

Протокол № 3 от 06.06.2012 г.

УДК 53(071)

Васильев А.Г. Методическое пособие. Конспект лекций по физике для подготовки иностранных студентов подготовительного отделения. Часть 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество.// Донецк: ДонНТУ, 2012. – 50 с.

Методическое пособие «Конспект лекций по физике для подготовки иностранных студентов подготовительного отделения. Часть 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество» является составной частью комплекта учебно-методических пособий по курсу физики для подготовки иностранных студентов подготовительного отделения. В данном методическом пособии приведены определения основных физических понятий и величин, сформулированы физические законы, кратко разъяснена сущность описываемых ими явлений, изучаемых в разделах: механика; молекулярная физика и термодинамика; электричество. В конце каждой лекции приведен словарь физических терминов изучаемой темы в переводе на английский и арабский языки.

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

Составил:

А. Г. Васильев, доц.

Рецензент:

А.Ф. Волков, проф.

Ответственный за выпуск

В.О.Гольцов, проф.

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция №1	
1. Кинематика поступательного движения.....	5
1.1. Скорость	5
1.2. Ускорение	6
1.3. Криволинейное движение.....	6
1.4 Кинематика вращательного движения	7
1.5 Словарь	8
Лекция №2	
2. Динамика.....	9
2.1 Основные законы динамики.....	9
2.2. Пять законов взаимодействия в механике.....	10
2.3. Словарь	11
Лекция №3	
3. Работа, мощность, энергия, КПД, законы сохранения.....	12
3.1 Механическая работа.....	12
3.2 Механическая мощность.....	13
3.3 Коэффициент полезного действия КПД.....	13
3.4 Механическая энергия.....	13
3.5 Закон сохранения механической энергии.....	14
3.6 Импульс тела, импульс системы тел.....	14
3.7 Закон сохранения импульса.....	15
3.8 Словарь.....	15
Лекция №4	
4. Статика, равновесие тел. Динамика жидкости.....	15
4.1 Статика.....	15
4.2 Равновесие тел.....	15
4.3 Момент силы.....	16
4.4 Условия равновесия твердого тела.....	16
4.5 Динамика жидкости.....	17
4.6 Словарь.....	17
Лекция №5	
5. Элементы теории относительности.....	18
5.1 Теория относительности классической механики.....	18
5.2 Элементы специальной теории относительности.....	20
5.3 Словарь.....	24
Лекция №6	
6. Основы молекулярно-кинетической теории газа.....	24
6.1 Идеальный газ.....	24
6.2 Смесь газов.....	25
6.3 Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.....	25
6.4 Молекулярно-кинетическая трактовка абсолютного нуля температур.....	25
6.5 Средняя энергия молекул.....	26
6.6 Словарь.....	26
Лекция №7	

7. Термодинамика.....	27
7.1 Понятие о равновесии термодинамической системы.....	27
7.2 Внутренняя энергия, теплота и работа газа.....	27
7.3 Первое начало термодинамики.....	28
7.4 Теплоемкость.....	28
7.5 Изопроцесс.....	29
7.6 Тепловые машины.....	30
7.7 Тепловые явления.....	31
7.8 Второе начало термодинамики.....	32
7.9 Словарь.....	32
Лекция №8	
8. Электрические взаимодействия. Электростатическое поле.....	33
8.1 Электростатика.....	33
8.2 Электрическое поле.....	33
8.3 Принцип суперпозиции.....	34
8.4 Поле некоторых заряженных тел.....	34
8.5 Диполь.....	35
8.6 Потенциал.....	35
8.7 Электрическая емкость.....	36
8.8 Конденсаторы.....	37
8.9 Энергия электрического поля.....	38
8.10 Вещества в электрическом поле.....	39
8.11 Словарь.....	39
Лекция №9	
9. Законы постоянного тока.....	39
9.1 Электрический ток.....	39
9.2 Электродвижущая сила. Напряжение.....	40
9.3 Закон Ома для участка цепи.....	41
9.4 Проводимость, сопротивление.....	41
9.5 Соединение проводников.....	41
9.6 Закон Ома замкнутой цепи.....	42
9.7 Закон Ома в дифференциальной форме.....	42
9.8 Законы Кирхгофа.....	42
9.9 Мощность электрического тока.....	42
9.10 Тепловое действие тока.....	42
9.11 Электрические измерения.....	42
9.12 Словарь.....	43
Лекция №10	
10. Электрический ток в средах.....	43
10.1 Электрический ток в газах.....	43
10.2 Плазма.....	44
10.3 Электролиты.....	44
10.4 Электрический ток в вакууме.....	45
10.5 Полупроводники.....	46
1.6 Словарь.....	50

Лекция №1

Кинематика поступательного движения.

Кинематика – это раздел механики, изучающий механическое движение тел без рассмотрения причин, вызывающих это движение.

Простейший объект исследования кинематики – материальная точка. Материальная точка – это тело, размерами которого, в условиях данной задачи, можно пренебречь.

Задача кинематики состоит в определении положения тела в пространстве в любой момент времени.

Положение любого тела в пространстве определяется относительно другого тела.

Тело, относительно которого определяется положение любого тела, называется телом отсчета. Как правило, с телом отсчета связывают декартову систему координат. Связанная с телом отсчета система координат и способ измерения времени образуют систему отсчета.

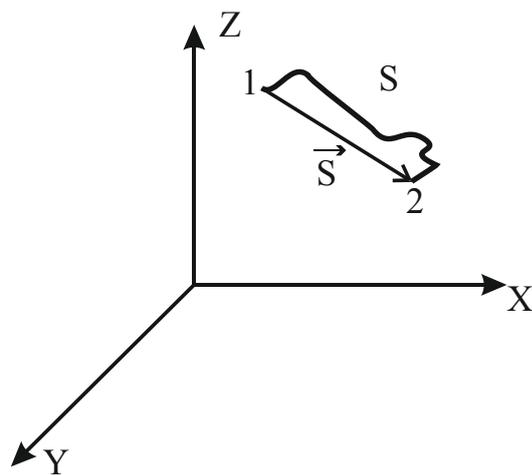
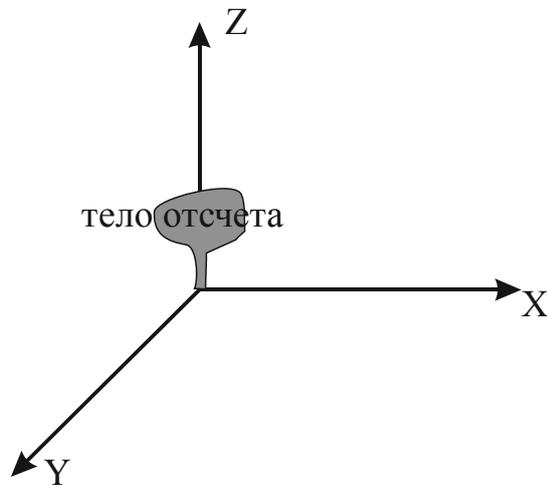
Изменение положения тела в пространстве с течением времени называется механическим движением. Для определения положения тела в системе координат необходимо задать 3 координаты: x , y , z . Уравнения описывающие координаты тела в любой момент времени называют уравнением движения.

Пусть положение тело в момент времени t_1 находилось в положении 1, а в момент времени t_2 – 2. Тогда за время $\Delta t = t_2 - t_1$ оно переместится из положения 1 в положение 2. Линия, вдоль которой движется тело, называют траекторией. Длина линии, вдоль которой двигалось тело S – это пройденный путь. Направленный отрезок (вектор), соединяющий начальное положение тела с последующим положением называется перемещением. В общем случае путь больше либо равен длине вектора перемещения.

1.1. Скорость

Скорость характеристика механического движения – одно из основных понятий в кинематике. Средней скоростью называется отношение пути, пройденного телом, к тому промежутку времени, в течение которого этот путь пройден.

$$v = \frac{S}{t}$$



Истинной (мгновенной) скоростью называется вектор равный пределу отношения вектора перемещения совершенного за малый промежуток времени при условии, что этот промежуток времени стремится к нулю.

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$$

Этот предел называется производной от вектора перемещения по времени. Вектор скорости направлен по касательной к траектории.

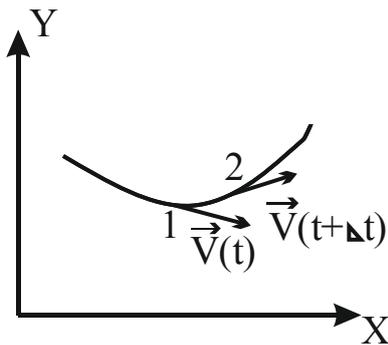
$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt}$$

Скорость – физическая векторная величина, характеристика движения, численно равная производной от перемещения по времени. Движение с постоянной скоростью называют равномерным. Для равномерного и прямолинейного движения справедливо уравнение движения.

$$X(t) = x_0 + vt$$

1.2. Ускорение.

Пусть в положении 1 материальная точка имеет скорость V_1 , а через время Δt в положении 2 – скорость V_2 . Скорость может меняться по величине и по направлению. Ускорение характеризует изменение скорости во времени и равно пределу изменения вектора скорости за малый промежуток времени при условии, что этот промежуток времени стремится к нулю.



$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{s}}{dt^2}$$

Таким образом, ускорение векторная величина, первая производная скорости по времени или вторя производная перемещения по времени.

Если тело движется вдоль прямой линии и ускорение не изменяется с течением времени, такое движение называется прямолинейным равнопеременным движением. В этом случае для описания движения тела достаточно системы координат имеющей одну ось x . Уравнение движения представимо в виде:

$$X(t) = X_0 + V_0 t + \frac{at^2}{2},$$

где: x_0 – начальное положение тела; v_0 – начальная скорость движения тела; a – ускорение; t – время.

При равнопеременном прямолинейном движении скорость тела описывается уравнением:

$$v(t) = v_0 + at$$

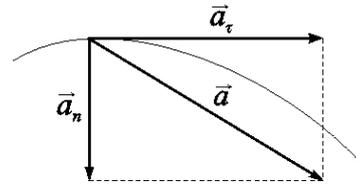
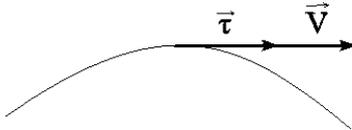
1.3. Криволинейное движение.

Любой участок криволинейной траектории можно представить в виде дуги окружности. Радиус дуги этой окружности называют радиусом кривизны траектории. Скорость при криволинейном движении всегда направлена по касатель-

ной к траектории. Если тело совершает криволинейное движение, то изменяется направление скорости, поэтому при таком движении ускорение отлично от нуля. Вектор ускорения тела принято раскладывать на два: вектор нормального и вектор тангенциального ускорения.

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau, \quad a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$$

Первое слагаемое – нормальное ускорение, второе слагаемое – тангенциальное ускорение. Отметим, что направление полного ускорения совпадает с направлением результирующей силы, действующей на тело.



Тангенциальное ускорение – характеризует изменение скорости по величине. Направлен вектор \vec{a}_τ так же, как и вектор скорости – по касательной к траектории. Величина тангенциального ускорения равна первой производной модуля скорости по времени.

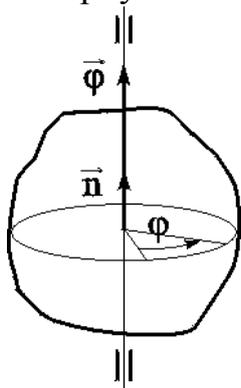
$$a_\tau = \frac{dv}{dt}$$

Нормальное ускорение – характеризует изменение скорости по направлению. Вектор \vec{a}_n направлен так же, как вектор нормали – к центру кривизны траектории.

$$a_n = \frac{v^2}{R}$$

1.4 Кинематика вращательного движения.

Рассмотрим твёрдое тело, которое имеет неподвижную ось вращения. Тело повернулось на угол φ .



1.4.1 Вектор угла поворота

$$\vec{\varphi} = \varphi \vec{n},$$

где \vec{n} – единичный вектор, направленный вдоль оси вращения так, что его направление связано с направлением вращения правилом правого винта (буравчика). Отметим, что вектора типа скорости или ускорения, для которых направление вытекает из самой природы величин, называются полярными.

1.4.2 *Угловая скорость* – первая производная от угла поворота по времени.

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$$

Направлен вектор – вдоль оси вращения. Для равномерного вращения:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}$$

1.4.3 Угловое ускорение – первая производная от угловой скорости по времени.

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

Направлен вектор так же, как и угловая скорость. Для равноускоренного вращательного движения

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \text{const}.$$

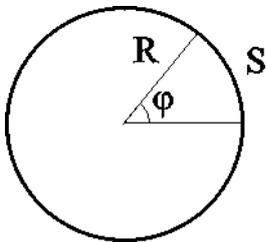
1.4.4 Период обращения T – время, за которое тело делает один оборот, т.е. поворачивается на угол 2π радиан. Поскольку за время $\Delta t = T$ тело поворачивается на угол $\Delta\varphi = 2\pi$, то

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

1.4.5 Частота ν вращения – число оборотов в единицу времени. Связь частоты с угловой скоростью

$$\nu = \frac{1}{T}; \omega = 2\pi\nu.$$

1.4.6. Связь угловых и линейных величин.



Радиус окружности R , длина дуги S и угол поворота φ (в радианах) связаны таким соотношением

$$S = \varphi \cdot R.$$

Дифференцируя это выражение по времени, получим – связь линейной и угловой скорости

$$V = \frac{dS}{dt} = \frac{d(R\varphi)}{dt} = R\omega, V = R \cdot \omega.$$

Повторное дифференцирование по времени приведет к выражению связи тангенциального и углового ускорений

$$a_{\tau} = R \frac{d\omega}{dt} = R\varepsilon.$$

1.5 Словарь

1. Механика– Mechanics – الميكانيك
2. Кинематика– kinematics – الكينماتيكا
3. система координат– system of coordinates – نظام تنسيق
4. механическое движение– mechanical motion – الميكانيكية الحركة
5. уравнение движения– equalization of motion – الحركة معادلة
6. Скорость – speed – معدل
7. Ускорение – acceleration – تسارع
8. прямолинейное движение – rectilinear motion – الحركة مستقيم خط

9. криволинейное движение – curvilinear motion – الحركة المنحنية
10. нормальное ускорение – normal acceleration – التسارع الطبيعي
11. тангенциальное ускорение – tangential acceleration – تسارع عرضية
12. угол поворота – corner of turn – نالدورا زاوية
13. угловая скорость – angular velocity – سرعة الزاوي
14. угловое ускорение – angular acceleration – الزاوي تسارع
15. период обращения – period of appeal – من الفترة
16. частота вращения – frequency of rotation – سرعة
17. радиус кривизны траектории – radius of curvature of trajectory – قطرها نصف دائرة
مسار انحناء من .

Лекция №2

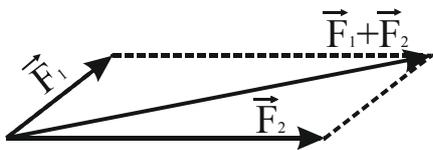
Динамика

Динамика – раздел механики, который выясняет причины вызывающие механическое движение.

2.1 Основные законы динамики.

2.1.1: *1-й закон Ньютона:* Существуют инерциальные системы отсчёта, в которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения пока на него не действуют другие тела (поля) или действия других тел скомпенсировано.

Сила – мера воздействия одного тела на другое. Сила – векторная величина, характеризуется величиной, направлением и точкой приложения. Для поступательного движения точка приложения часто не играет роли. Результат действия сил одинаков. Для сил справедлив принцип независимости действия: действие одной силы на тело не зависит от действия других сил. Поэтому силы можно складывать по правилу сложения векторов. Сумма сил действующих на тело называют результирующей силой.



Учитывая это можно сформулировать так *1-й закон Ньютона* – если результирующая сила, действующая на тело равна нулю, то тело покоится или равномерно и прямолинейно движется.

$$F_{рез} = 0, \quad V = \text{const.}$$

2.1.2 *2-й закон Ньютона:* Результирующая сила, действующая на тело равна скорости изменения импульса этого тела.

$$\vec{F}_{рез} = \frac{d\vec{P}}{dt}$$

Импульс характеризует движение тела и равен произведению массы тела на скорость. *Масса* – это мера гравитационных и инертных свойств тела, мера его энергосодержания. В классической механике масса не зависит от скорости движения тела.

$$\vec{P} = m\vec{v}$$

Направлен вектор импульса так же, как вектор скорости. Учтём, это тогда:

$$\vec{F}_{\text{дв}} = \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{v} \frac{dm}{dt} + m \frac{d\vec{v}}{dt},$$

Если $m = \text{const}$, то:

$$\vec{F}_{\text{дв}} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}.$$

Поэтому для случая, когда масса тела постоянна, закон можно записать так:

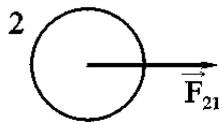
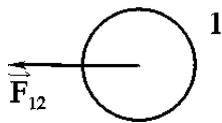
$$\vec{F}_{\text{дв}} = m\vec{a}.$$

Отсюда, в частности, следует, что направление результирующей силы совпадает с направлением ускорения.

Из второго закона следует, что под действием данной силы изменение скорости у тела с большей массой происходит за более длительный промежуток времени. Говорят, что тела обладают инерцией, а масса является мерой инертных свойств. С инерцией тел каждый сталкивался на практике – сообщить данную скорость массивному телу или остановить движущееся массивное тело сложнее, чем проделать то же с менее массивным.

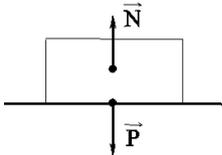
2.1.3 3-й закон Ньютона: Силы взаимодействия двух тел равны по величине и противоположны по направлению.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$



Пусть взаимодействуют два тела. \vec{F}_{12} – сила, с которой второе тело действует на первое. \vec{F}_{21} – сила, с которой первое тело действует на второе.

Из третьего закона Ньютона, в частности, следует, что силы в природе возникают попарно, например:



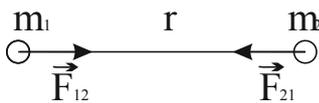
\vec{P} – вес тела

\vec{N} – реакция опоры

$$\vec{P} = -\vec{N}$$

2.2 Пять законов взаимодействия в механике – пять видов сил.

2.2.1 Закон всемирного тяготения. Все тела обладающие массами притягиваются друг к другу. Сила притяжения прямо пропорциональна произведению масс тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами.



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

здесь: $G=6.67 \cdot 10^{-11} \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ – гравитационная постоянная; m_1 и m_2 – массы тел; r – расстояние между телами. Пусть одно из тел Земля. Масса Земли – M , ее радиус R . Другое тело массой m находится на небольшом расстоянии у поверхности Земли. Тогда расстояние между телами R . Из закона всемирного тяготения следует, что сила притяжения тела к Земле (сила тяжести) равна:

$$F = \frac{GM}{R^2} m.$$

Обычно силу тяжести записывают так:

$$F = g \cdot m$$

Ускорение свободного падения g можно записать как:

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

2.2.2 Закон Гука, сила упругости.

Пусть мы имеем стержень длиной l_0 . Один конец стержня жестко закрепим. Ко второму концу приложим усилие и растянем стержень. Его длина станет l . Возникает сила, которую называют силой упругости.

$$F = -kx$$

Величину $x=l-l_0$ называют деформацией тела, k – коэффициент жесткости деформированного тела. Знак минус указывает на то, что сила направлена в сторону противоположную деформации.

Приведенная форма закона Гука во многих случаях неудобна. Например, для двух тел изготовленных из одного материала, но имеющих разные геометрические размеры коэффициенты жесткости будут отличаться. Более удобна такая форма записи:

$$\sigma = -E\varepsilon$$

$$\sigma = \frac{F}{S}, \varepsilon = \frac{x}{l_0}.$$

Величины: S – площадь поперечного сечения тела; σ – механическое напряжение; ε – относительная деформация; E – модуль упругости (модуль Юнга). Модуль упругости, величина, характеризующая упругие свойства материала на растяжение или сжатие.

2.2.3 Закон Архимеда, выталкивающая сила. На тело, погруженное в жидкость или газ действует выталкивающая сила. Величина силы равна:

$$F_A = \rho Vg,$$

ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, V – объём вытесненной жидкости.

2.2.4 Закон сухого трения, сила трения.

$$F_{тр} = \mu N,$$

где μ – коэффициент трения, а N – сила нормального давления. Сила трения направлена вдоль поверхности соприкосновения в сторону противоположную движению.

2.2.5 Закон Стокса, сила сопротивления.

$$F_{мп} = -rV,$$

где r – коэффициент вязкого трения, а V – скорость движения.

2.3 Словарь

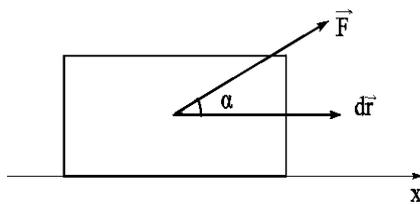
1. Сила – force – قوة
2. Масса – mass – الوزن
3. Импульс – impulse – نبض
4. Площадь – area – مساحة

5. Поперечное сечение – cross-section – مقطع عرضي
6. Жесткость тела – Stiffness of the body – صلابة الجسم
7. Деформация – deformation – تشويه الجسم
8. Длина тела – Body length – طول الجسم
9. Относительное удлинение – Elongation – استطالة
10. Механическое напряжение – Mechanical stress – إجهاد
11. Модуль упругости – The elastic modulus of – عامل المرونة
12. Ньютон – Newton – نيوتن
13. Архимед – Archimedes – أرخميدس
14. Коэффициент трения – The coefficient of friction – عامل الاحتكاك
15. Объём – Volume – حجم .

Лекция №3

Работа, мощность, энергия, КПД, законы сохранения в механике.

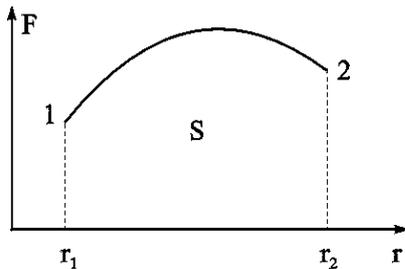
3.1 Механическая работа – скалярная физическая величина равная скалярному перемещению силы на перемещение тела совершенное под действием этой силы. Единица измерения работы – джоуль (Дж).



Пусть тело перемещается под действием силы \vec{F} на величину $d\vec{r}$. Тогда, на участке $d\vec{r}$ сила \vec{F} совершает элементарную работу dA равную :

$$dA = \vec{F} d\vec{r} = F \cdot dr \cdot \cos\varphi$$

Для определения работы на участке конечной длины надо знать, как меняется сила в зависимости от перемещения, и вычислить интеграл



$$A = \int_{r_1}^{r_2} dA = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} d\vec{r}$$

Поскольку геометрический смысл определенного интеграла – площадь фигуры образованной кривой и осью абсцисс. На графике площадь S под кривой 1 – 2 численно равна работе силы на отрезке $r_1 r_2$. Это свойство часто используется при решении задач.

Выполним анализ работы в зависимости от ориентации векторов силы и перемещения:

- а) Направления векторов совпадают – $0 \leq \varphi < \pi/2, \cos\varphi > 0, dA > 0$. В этом случае говорят, что сила совершает работу над телом.
- б) Направления векторов не совпадают, $\pi/2 < \varphi \leq \pi, dA < 0$, так как $\cos\varphi < 0$. В этом случае тело совершает работу против внешних сил. Например, совершается работа против сил трения.
- в) Сила перпендикулярна перемещению $dA = 0$ так как $\cos\varphi = 0$ если $\alpha = \pi/2$. Если сила перпендикулярна перемещению (центростремительная сила), то работа не совершается.

3.1.1 *Потенциальные и консервативные силы.* Силы, которые зависят только от взаимного расположения тел, называются потенциальными (например, сила гравитационного взаимодействия). Если работа таких сил не зависит от пути, а определяется только начальным и конечным положением тела, то силы называются консервативными.

3.1.2 *Диссипативной силой* называется сила, направленная всегда противоположно перемещению. Работа диссипативных сил (сила трения, сила сопротивления среды) всегда отрицательна.

3.2 *Механическая мощность* физическая величина равная скорости выполнения работы.

$$N = \frac{dA}{dt}$$

Можно записать:

$$N = \frac{\vec{F}d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{F}\vec{v} = F \cdot v \cdot \cos\varphi,$$

где φ - угол между векторами \vec{F} и \vec{v} .

3.3 *Коэффициент полезного действия КПД.*

При перемещении тела под действием некоторой силы \vec{F} на тело кроме этой силы зачастую действуют также диссипативные силы, препятствующие выполнению работы. Работа, идущая на совершение перемещения и увеличение скорости тела называется полезной работой – $A_{\text{полезная}}$, а работа силы \vec{F} полной работой $A_{\text{полная}}$. Отношение

$$\eta = \frac{A_{\text{полезная}}}{A_{\text{полная}}}$$

называется коэффициентом полезного действия КПД.

3.4 *Механическая энергия*

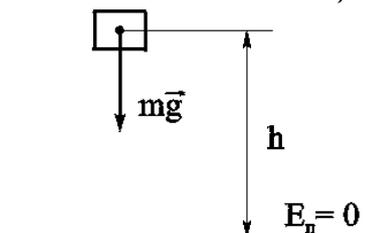
Если тело способно совершить работу, то оно обладает определённой энергией. Механическая энергия тела может быть обусловлена либо движением тела, либо нахождением тела в поле потенциальных сил.

3.4.1 *Кинетическая энергия.* Энергия движения тела называется кинетической энергией W_k .

$$W_k = \frac{mV^2}{2}$$

3.4.2 *Энергия механического взаимодействия тел или положения тела в потенциальном поле* называется потенциальной энергией W_n .

3.4.2.1 *Потенциальная энергия тела, поднятого над Землёй*



На уровне Земли $W_n = 0$, а на высоте h :

$$W_n = mgh$$

3.4.2.2 *Потенциальная энергия сжатой пружины.*

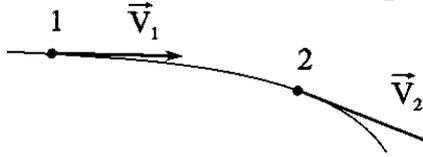
$$W_n = \frac{kx^2}{2}$$

где k - коэффициент жёсткости пружины, x - её деформация.

Тогда механической энергией системы тел назовём энергию движения и взаимодействия тел и энергию их положения в потенциальных полях.

$$W = W_k + W_{\text{п}}$$

Пусть тело массой m перемещается из положения 1 в положение 2 под действием нескольких сил равнодействующая которых, \vec{F} .



$$W_2 - W_1 = A_{12}$$

где A_{12} – работа по перемещению тела из точки 1 в точку 2. Это уравнение имеет следующий смысл: *работа всех сил равна изменению энергии тела*. Действие внешней силы увеличивает или уменьшает скорость тела. Если тело совершает работу против внешних сил ($A < 0$), тогда его энергия уменьшается.

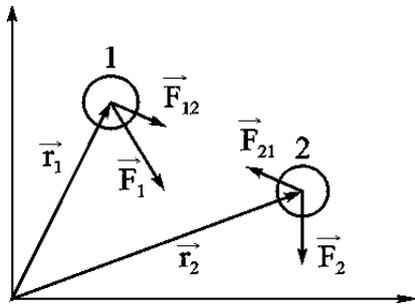
3.5 Закон сохранения механической энергии.

Если в системе тел действует только консервативные силы (внешние и внутренние), то механическая энергия системы сохраняется.

3.6 Импульс тела, импульс системы тел.

Импульс характеризует движение тела и равен произведению массы тела на скорость. В классической механике, для любых скоростей, импульс тела прямо пропорционален его скорости ($\vec{P} = m\vec{v}$). Под импульсом системы тел подразумевают векторную сумму импульсов всех тел системы:

$$\vec{P}_c = \sum m_i \vec{V}_i$$



Система может содержать сколько угодно тел. Вектор направленный из центра системы отсчета к центру тела называют радиус вектором. Для системы тел вводят понятие *центра масс*. Положение центра масс определяется радиус-вектором:

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \text{ где } n - \text{ число тел (м.т.) в системе.}$$

Скорость центра масс равна: $\vec{V}_c = \frac{d\vec{r}_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i} \right) = \frac{\sum m_i \vec{V}_i}{\sum m_i}$

$M_c = \sum m_i$ – масса системы, тогда скорость центра масс будет равна: $\vec{V}_c = \frac{\vec{P}_c}{M_c}$.

Для простоты рассмотрим систему из 2-х тел (м.т.). Пусть в системе действуют внутренние силы \vec{F}_{12} и \vec{F}_{21} и внешние силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , т.е. наша система не замкнута. Для нашей системы $n = 2$. Запишем второй закон Ньютона для 1 и 2 тела:

$$\frac{d(m_1 \vec{V}_1)}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_{12}, \quad \frac{d(m_2 \vec{V}_2)}{dt} = \vec{F}_2 + \vec{F}_{21}$$

Сложив эти два выражения, получим: $\frac{d(m_1\vec{V}_1 + m_2\vec{V}_2)}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$

поскольку из 3-го закона Ньютона $\vec{F}_{12} + \vec{F}_{21} = 0$. Обобщив закон для любой системы тел, получим 2-й закон Ньютона для системы тел: *Скорость изменения импульса системы равна сумме внешних сил, действующих на тела системы.*

$$\frac{d\vec{P}_c}{dt} = \sum \vec{F}_i$$

3.7 Закон сохранения импульса – импульс замкнутой системы тел остаётся постоянным при любых взаимодействиях внутри системы. $\vec{P}_c = const$

Этот закон можно получить из 2-го закона Ньютона для системы тел. Если система замкнута, то внешние силы отсутствуют ($\sum \vec{F}_i = 0$). Тогда 2-й закон Ньютона для системы тел запишется так $\frac{d\vec{P}_c}{dt} = 0$, или: $\vec{P}_c = const$.

Закон сохранения импульса можно применять и для незамкнутых систем в двух случаях:

1. Система незамкнута, но внешние силы, действующие на тела системы, в сумме дают нуль.
2. Система незамкнута, но сумма проекций внешних сил на некоторое направление равна нулю. В этом случае постоянным остаётся проекция на это направление.

3.8 Словарь

1. Работа – work – عمل
2. Мощность – power – القوة
3. Энергия – energy – طاقة
4. Диссипативные силы – Dissipative forces – المبددة القوات
5. Консервативные силы – Conservative forces – القوى المحافضة
6. Центр масс – Center of mass – الكتلة مركز
7. Система тел – The system of bodies – الهياكل نظام .

Лекция №4

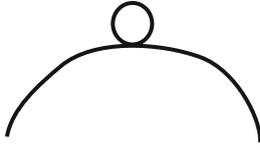
Статика, равновесие тел. Динамика жидкости.

4.1 *Статика* (от греческого слова, которое означает – неподвижный) – раздел механики, в котором изучаются условия равновесия тел под действием приложенных к ним сил и моментов.

4.2 *Равновесие тел.* Про тело говорят, что оно находится в равновесии, если оно покоится или движется равномерно и прямолинейно относительно выбранной инерциальной системы отсчёта.



4.2.1 *Устойчивое равновесие* – тело при малом отклонении от положения равновесия возвращается в это положение. Типичным примером устойчивого равновесия является положение шара в сферической ямке.



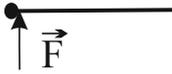
4.2.2 *Неустойчивое равновесие* – тело при малом отклонении от положения равновесия уходит от этого положения. Типичным примером неустойчивого равновесия является положение шара на сферическом бугорке.

4.2.3 *Безразличное равновесие* – тело при малом отклонении от положения равновесия оказывается в новом положении равновесия. Типичным примером безразличного равновесия является положение шара на горизонтальной поверхности.



4.3 Момент силы.

Для равновесия тела часто важна не только величина приложенной к телу силы, но и точка ее приложения. Например, если к двери прикладывать силу близко к петлям ее трудно сдвинуть с места.



Наоборот, если сила приложена у края полотна двери, то она легко поворачивается.



Еще один пример: Положим чертежную линейку на треугольную призму. Если центр линейки окажется на вершине призмы, она примет горизонтальное положение. Если центр линейки будет смещен, то больший конец начнет движение вниз, а меньший вверх. Почему? Потому, что для равновесия твердого тела важно равенство вращающих моментов или моментов сил действующих на тело.

Под моментом силы подразумевают произведение силы на плечо. Плечо силы – кратчайшее расстояние от данной точки (центра) до линии действия силы.

$$M = F \cdot l \cdot \sin \alpha$$

Здесь: M – момент силы; l – расстояние от оси вращения (центра) до точки приложения силы; произведение $l \cdot \sin \alpha$ – плечо; F – сила.

4.4 *Условия равновесия твердого тела.* Для равновесия твердого тела необходимо выполнение пунктов 4.4.1 и 4.4.2 излагаемых ниже.

4.4.1 *Тело находится в равновесии, если сумма всех сил действующих на тело равна нулю.*

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$$

4.4.2 *Правило моментов.* Сумма моментов сил вращающих тело влево равна сумме моментов сил вращающих тело вправо.

$$\sum_{i=1}^n M_{\text{лi}} = \sum_{k=1}^m M_{\text{пk}}$$

4.5 Динамика жидкости.

4.5.1 Давление жидкости на дно и стенки сосуда. Давление это сила, отнесенная к единице площади поверхности на которую действует сила. Давление в системе СИ измеряется в паскалях Па.

$$P = \frac{F}{S}$$

Мы знаем, что с погружением в воду увеличивается давление воды на человека с увеличением глубины погружения. Зависимость давления жидкости описывается простой формулой:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Здесь: ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; h – толщина слоя жидкости.

4.5.2 Уравнение непрерывности. При небольших давлениях жидкость практически несжимаема. Следствием этого является уравнение непрерывности. При движении жидкости в трубе разного поперечного сечения выполняется формула:

$$S \cdot V = const .$$

Где: S – площадь поперечного сечения трубы; V – скорость движения жидкости в трубе.

4.5.3 Уравнение Бернулли является следствием закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной (то есть без внутреннего трения) несжимаемой жидкости.

$$P + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho V^2}{2} = const$$

Полное давление состоит из весового ($\rho \cdot g \cdot h$), статического (P) и динамического давлений $\left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$. Для горизонтальной трубы $h = 0$ и уравнение Бернулли принимает вид:

$$P + \frac{\rho V^2}{2} = const .$$

4.6 Словарь

1. Статика – statics – ساتيكس
2. Равновесие – equilibrium – تحقيق التوازن
3. Устойчивое равновесие – Stable equilibrium – توازن المستقر
4. Неустойчивое равновесие – Unstable equilibrium – غير مستقر (القلق) التوازن
5. Безразличное равновесие – Indifferent equilibrium – التوازن المطلق
6. Момент силы – Force moment – لحظة العزم
7. Плечо силы – Shoulder strength – الكتف قوة
8. Правило моментов – Rule of moments – حكم من لحظات
9. Давление – pressure – الضغط

10. Жидкость – liquid – سائل

11. Плотность – density – كثافة

12. Площадь сечения – Cross-sectional area – منطقة مستعرضة .

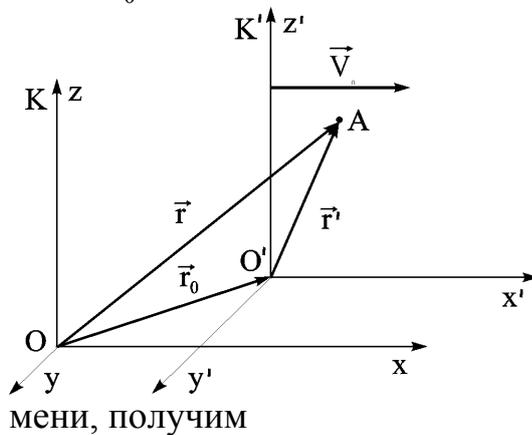
Лекция №5

Элементы теории относительности.

Часто возникает необходимость перехода из одной системы отсчета в другую. Рассмотрим связь координат, скоростей и ускорений тела в различных системах отсчета.

5.1 Теория относительности классической механики

5.1.1 Сложение скоростей. Рассмотрим две системы отсчета: К – инерциальная система условно неподвижна и К' – движется относительно К со скоростью V_0 .



Вектор \vec{r}' определяет положение точки А в К', вектор \vec{r} положение точки А в К, а вектор \vec{r}_0 положение O' относительно О. Из правила сложения векторов следует

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}'$$

Будем считать, что время течет одинаково во всех системах отсчета, т.е. $t=t'$. Тогда продифференцировав данное выражение по времени, получим

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}_0}{dt} + \frac{d\vec{r}'}{dt}$$

или

$$\vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{V}'$$

\vec{V}' - называется относительная скорость - это скорость точки А в системе К';

\vec{V} - абсолютная скорость - скорость точки А в системе К;

\vec{V}_0 - переносная скорость.

Как видим скорость точки будет различной в разных системах отсчета. Очевидно, и кинетическая энергия тела, и импульс будут различны в разных системах отсчета.

Скорость, импульс, кинетическая энергия - *неинвариантные* величины (меняются при переходе из одной системы отсчета в другую).

Продифференцируем уравнение соотношения скоростей в разных системах ещё раз по времени

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d\vec{V}_0}{dt} + \frac{d\vec{V}'}{dt}$$

или

$$\vec{a} = \vec{a}_0 + \vec{a}'$$

Далее рассмотрим два случая:

5.1.2 Инерциальная система отсчета.

В этом случае $\vec{V}_0 = \text{const}$ система отсчета K' так же, как и K является инерциальной и

$$\frac{d\vec{V}_0}{dt} = 0$$

откуда следует

$$\vec{a} = \vec{a}'$$

Это значит, что ускорение не изменяется при переходе из одной инерциальной системы в другую. Умножим обе части этого уравнения на массу материальной точки m

$$m\vec{a} = m\vec{a}'$$

Или, используя 2 закон Ньютона, запишем $\vec{F} = \vec{F}'$

Данное выражение показывает, что величина силы не меняется (является инвариантной) при переходе из одной инерциальной системы в другую. Или, иными словами, по действию силы нельзя определить, в какой инерциальной системе мы находимся.

Эту ситуацию подробно проанализировал Галилей, проведя простейшие механические эксперименты в различных инерциальных системах отсчета: на корабле, который двигался с постоянной скоростью и на берегу. Эксперименты были простыми: измерялось время, за которое шарик скатывался с наклонной плоскости, период колебания маятника и т.д. Оказалось, что в инерциальных системах отсчета механические явления протекают одинаково.

Следовательно, уравнения динамики не изменяются при переходе от одной инерциальной системы к другой. Это утверждение носит название принципа относительности Галилея.

5.1.3 K' – неинерциальна $\vec{V}_0 \neq \text{const}$. В этом случае:

$$m\vec{a} = m\vec{a}_0 + m\vec{a}', \text{ или } \vec{F} = \vec{F}_0 + \vec{F}'.$$

Последнее уравнение показывает, что в неинерциальных системах отсчета возникает дополнительная сила \vec{F}_0 . При описании движения в неинерциальных системах отсчета можно пользоваться законами и уравнениями Ньютона, если вводить дополнительную силу \vec{F}_0 - силу инерции, которая равна:

$$\vec{F}_0 = -\vec{F}_0 = -(\vec{F} - \vec{F}') = -(m\vec{a} - m\vec{a}') = -m\vec{a}_0,$$

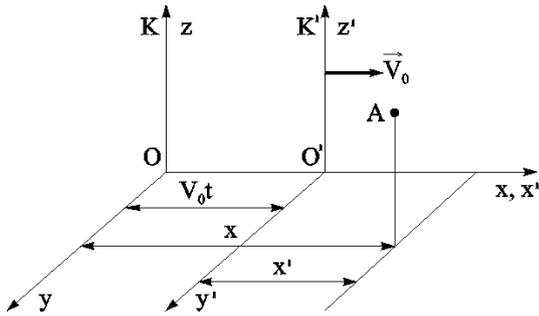
где a - ускорение тела по отношению к инерциальной системе отсчета K ;

a' - ускорение тела по отношению к неинерциальной системе отсчета K' .

5.1.4. Преобразования Галилея

Преобразования Галилея представляют собой связь между координатами (x, y, z) точки A в системе K и координатами (x', y', z') этой же точки в системе K' .

Пусть имеются две системы отсчета K и K' . Система K – неподвижна, а система K' – движется по отношению к K со скоростью V_0 .



В момент времени $t=0$ начала координат O и O' совпадают. Тогда для произвольного момента времени t

$$x = x' + V_0 t$$

Учтем, что для этого случая $y = y'$ и $z = z'$. Приняв во внимание, что время в обеих системах течет одинаково, запишем

$$\begin{cases} x = x' + V_0 t \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad \text{Это прямые преобразования Галилея, для перехода из } K \text{ в } K'$$

$$\begin{cases} x' = x - V_0 t \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad \text{Это обратные преобразования Галилея, для перехода из } K \text{ в } K'$$

5.2 Элементы специальной теории относительности.

5.2.1. Постулаты специальной теории относительности.

В основе специальной теории относительности (СТО), которую также называют релятивистской теорией, лежат постулаты Эйнштейна (1905г.).

1. *Принцип относительности: никакие опыты (механические, электрические и др.) не дают возможности обнаружить покоится ли данная инерциальная система отсчета или движется равномерно и прямолинейно; все физические явления протекают одинаково в инерциальных системах отсчета.*

2. *Принцип постоянства скорости света: скорость света в вакууме является универсальной физической постоянной и не зависит ни от скорости источника света, ни от скорости приемника света.*

Как видно первый постулат является обобщением принципа относительности Галилея на все физические явления. Согласно этому принципу все инерциальные системы отсчета абсолютно равноправны, и проводя любые эксперименты, мы не можем определить, движется или покоится наша система отсчета.

Второй принцип неоднократно проверялся экспериментально. Еще в 1887г. американский физики А. Майкельсон и Е. Морли измерили скорость света при помощи интерферометра (интерферометр Майкельсона) в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Одно направление вдоль – другое поперек обратного направления движения Земли. Майкельсон был уверен, что к свету применим классический принцип сложения скоростей, и скорость света будет различной для выбранных направлений. Он ошибался. Неоднократно проведенные эксперименты, которые затем неоднократно проверялись другими исследователями, показали, что скорость света не зависит от выбора инерциальной системы отсчета.

5.2.2 Преобразования Лоренца.

Преобразования Галилея не удовлетворяют второму постулату специальной теории относительности. Скорости нельзя просто складывать. Эйнштейн показал, что постулатам СТО удовлетворяют преобразования Лоренца (1904г.).

Анализ преобразований Лоренца показывает:

1. При скоростях $V_0 \ll C$ они переходят в классические преобразования Галилея.
2. Время течет неодинаково в различных системах отсчета.

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{v_0}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \end{array} \right. \quad \text{Это прямые преобразования Лоренца из системы } K' \text{ в } K.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v_0}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \end{array} \right. \quad \text{Это обратные преобразования из системы } K \text{ в } K'.$$

5.2.3 Следствия из преобразований Лоренца.

5.2.3.1 Релятивистское сложение скоростей.

Пусть система K' движется со скоростью V_0 относительно системы K (см. рисунок на стр.34. В системе K' скорость движения материальной точки V' . Определим скорость точки V в системе K . Для этого, воспользуемся прямыми преобразованиями Лоренца. Разделив x на t , получаем:

$$V = \frac{x}{t} = \frac{x' + V_0 t'}{t' + \frac{V_0}{C^2} x'}$$

Разделив числитель и знаменатель правой части уравнения на t' получим:

$$V = \frac{V' + V_0}{1 + \frac{V_0}{C^2} V'}$$

Полученная формула используется для сложения скоростей в релятивистском случае. Отметим, что результирующая скорость V , даже если V' и V_0 равны скорости света C , не превысит C , что вполне удовлетворяет второму постулату СТО.

5.2.3.2 Сокращение длины.

Рассмотрим две системы координат K и K' . Система K' движется относи-

тельно К со скоростью V_0 . Отрезок АВ покоится в системе К', и соответственно движется со скоростью V_0 относительно К.

Координаты концов отрезка АВ в системе К' - x'_1 и x'_2 , его длина в этой системе:

$$L_0 = x'_2 - x'_1$$

Координаты концов отрезка АВ в системе К - x_1 и x_2 , его длина в этой системе:

$$L = x_2 - x_1$$

Получим формулу, которая связывает L_0 и L . Для этого воспользуемся обратными преобразованиями Лоренца

$$x_2' = \frac{x_2 - v_0 t_2}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}; \quad \tilde{\delta}_1' = \frac{\tilde{\delta}_1 - v_0 t_1}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}$$

Моменты времени t_2 и t_1 соответствуют моментам измерения координат x_1 и x_2 в покоящейся системе К. Эти измерения должны проводиться одновременно, иначе будет получен неверный результат. Поэтому $t_1 = t_2$. Вычитая из одного уравнения другое, получим:

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, \text{ или } L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}$$

Полученная формула показывает, что размеры тела в направлении движения уменьшаются, если измерение проводит покоящийся наблюдатель.

5.2.3.3 Замедление времени.

Рассмотрим, как связаны между собой промежутки времени в покоящейся К и движущейся со скоростью V_0 К' системах координат.

Пусть наблюдатель, который находится в системе К' измерил промежуток времени $\tau_0 = t'_1 - t'_2$ по своим часам. Определим, чему равен промежуток времени $\tau = t_1 - t_2$, который измерил наблюдатель в системе К. Воспользуемся прямыми преобразованиями Лоренца:

$$t_1 = \frac{t'_1 + \frac{v_0}{c^2} x'_1}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}; \quad t_2 = \frac{t'_2 + \frac{v_0}{c^2} x'_2}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}$$

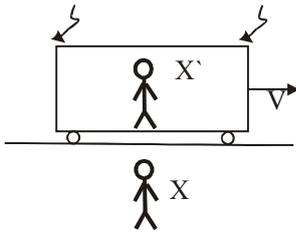
Координаты x'_1 и x'_2 должны быть равны так как часы наблюдателя в К' должны покоиться относительно его. Тогда

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \text{ или } \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}$$

Величина τ всегда будет больше τ_0 .

5.2.3.4 Относительность одновременности.

Рассмотрим вагон, который движется относительно неподвижного наблюдателя Х со скоростью v . В центре вагона находится наблюдатель Х'. Пусть в мо-



мент времени $t=t_0$ в конце вагона ударяют две молнии. Пусть это происходит по наблюдению X одновременно. Что фиксирует наблюдатель X'? По его наблюдениям вначале наблюдается вспышка справа, а затем вспышка слева. Так как расстояние от него до концов вагона одинаково, то он делает вывод, что вспышки происходят не одновременно.

Этот пример иллюстрирует понятие относительной одновременности:

События, разделенные пространственно в разных системах отсчета происходят не одновременно.

5.2.4 Динамика специальной теории относительности.

5.2.4.1 Релятивистский импульс.

В классической механике импульс определяется как произведение массы материальной точки на скорость – $p=mv$. И если импульс сохраняется в одной системе отсчета, то он сохраняется и в других инерциальных системах отсчета. Однако, используя преобразования Лоренца можно показать, что в релятивистской механике импульс будет сохраняться, при условии, что масса тела зависит от скорости его движения.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Величина m_0 называется *массой покоя*.

Тогда релятивистский импульс определяется как:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

5.2.4.2 Второй закон Ньютона.

В релятивистской механике второй закон Ньютона записывается так:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) = \vec{F}$$

5.2.4.3 Связь массы и энергии.

Теория относительности приводит к важному выводу: *энергия покоящейся частицы равна $E_0=m_0c^2$* – E_0 называют *энергией покоя*.

Энергию движущейся частицы можно связать с релятивистской массой соотношением

$$E=mc^2$$

В тоже время эта энергия определяется энергией покоя и кинетической энергией. Это приводит к соотношению для *кинетической энергии в релятивистском случае*:

$$E_k = E - E_0 \text{ или } E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2$$

5.3 Словарь

1. Теория относительности – The theory of relativity- نظرية النسبية
2. Инвариант – invariant - ثابتة
3. Сила инерции – The force of inertia- القصور الذاتي قوة
4. Преобразования Галилея – Galilean transformation – التحول الجليل
5. Преобразования Лоренца – Lorentz transformation- تحول لورنتس
6. Скорость света – The speed of light- سرعة الضوء
7. Вакуум – Vacuum – فراغ

Лекция №6

Основы молекулярно-кинетической теории газа.

Состояние термодинамической системы (жидкости, газа и т.д.) описывают при помощи параметров состояния. В качестве параметров состояния можно выбрать давление (P), объем (V), температуру (T), массу (m), плотность (ρ), и другие величины, так или иначе характеризующие систему.

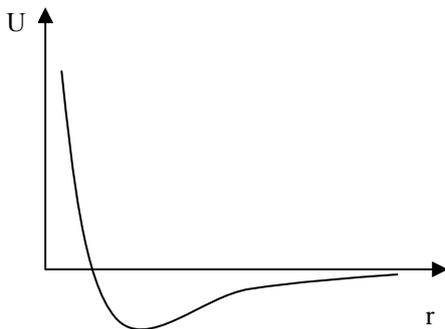
6.1 Идеальный газ.

6.1.1 Уравнение состояния идеального газа.

Выберем следующую модель идеального газа:

- 1) атомы (молекулы) газа – материальные точки (объем атома равен 0);
- 2) атомы находятся в непрерывном хаотическом движении;
- 3) потенциальная энергия взаимодействия атомов равна нулю.

Такая модель хорошо описывает газы с небольшим размером молекул (кислород, водород, азот и др.) при невысоких давлениях. При увеличении давления, средние расстояния между атомами уменьшаются, и пренебрежение потенциальной энергией взаимодействия приводит к увеличению ошибки.



На графике - зависимость потенциальной энергии взаимодействия молекул U от расстояния между молекулами r . Если r достаточно велико, U стремится к нулю. Для идеального газа экспериментально получено уравнение состояния (уравнение Клапейрона – Менделеева).

$$PV = \frac{m}{\mu} RT,$$

где: m - масса газа, $R = 8,31$ Дж/моль*К – универсальная газовая постоянная, M - молярная масса газа (масса одного моля вещества), $\frac{m}{\mu} = \nu$ - количество молей вещества. Модем называется такое количество

вещества, которое содержит число структурных элементов (атомов, молекул) равное числу Авогадро: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль. Такое число частиц содержится в 12г. изотопа углерода C^{12} . Учитывая, что число частиц N с общей массой m равно

$N = \frac{m}{\mu} N_A = \nu N_A$, уравнение состояния идеального газа можно записать в виде уравнение Больцмана:

$$P = nkT,$$

где: $n = \frac{N}{V}$ – концентрация частиц; $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

6.1.2 *Уравнение состояния реального газа уравнение Ван-дер-Ваальса.* Уравнение Ван-дер-Ваальса лучше согласуется с экспериментом, чем уравнение, хотя и оно не абсолютно точно описывает реальные газы.

$$\left(P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = \frac{m}{\mu}$$

Величины a и b – константы Ван-дер-Ваальса, определяются опытным путем для различных газов. Поправка $\frac{a}{V^2}$ характеризует ту добавку к внешнему давлению, которая обусловлена взаимодействием молекул друг с другом. Поправка b характеризует тот факт, что реальные молекулы имеют конечный объем.

6.2 Смесь газов.

Часто приходится иметь дело со смесью газов. Например, воздух это смесь азота, кислорода, углекислого газа, паров воды и других газов. Для смеси газов справедливо соотношение:

$$N = N_1 + N_2 + \dots + N_n$$

где N_n – число молекул n -го компонента, N – общее число молекул смеси. Разделив на объем V , занимаемый смесью газов, получим:

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_n,$$

где n_n – концентрация n -го компонента. Умножив на kT , получим:

$$nkT = n_1 kT + n_2 kT + \dots + n_n kT \text{ или } P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

здесь P – давление смеси газов, парциальное давление n -го компонента. Это уравнение называется *уравнением Дальтона* для смеси газов.

6.3 *Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (Уравнение Клаузиуса)* Рассмотрим газ, молекулы которого упруго взаимодействуют с плоской поверхностью. Газ оказывает давление на эту поверхность. Используя законы механики можно получить уравнение:

$$P = \frac{1}{3} mn V_{\text{ср}}^2$$

Скорости движения молекул не одинаковы. В качестве средней скорости взята среднеквадратичная скорость движения молекул. Уравнение называют *основным уравнением МКТ (уравнением Клаузиуса)*. Это уравнение показывает, что давление, оказываемое газом на стенки, есть результат действия отдельных молекул.

6.4 Молекулярно-кинетическая трактовка абсолютного нуля температур.

Используя эти уравнения ($P = nkT$ – уравнение Больцмана, $P = \frac{1}{3} mn V_{\text{ср}}^2$ – уравне-

ние Клаузиуса) можно получить формулу, зависимости кинетической энергии поступательного движения молекулы идеального газа от температуры:

$$E_k = \frac{mV_{\text{ср}}^2}{2} = \frac{3}{2}kT, \quad E_k = \frac{3}{2}kT.$$

Таким образом, при $T=0$ К скорость молекул идеального газа должна быть равна 0. Однако, поскольку вечное движение молекул вещества уничтожить невозможно, то и достичь абсолютного нуля температуры тоже невозможно.

6.5 Средняя энергия молекул.

Последняя формула определяет только среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул. Однако, наряду с поступательным движением, возможны вращения и колебания атомов, входящих в состав молекулы. Эти виды движения также вносят вклад в кинетическую энергию молекулы.

Число степеней свободы механической системы называется количество независимых величин, с помощью которых может быть задано положение системы в пространстве. Твердое тело имеет шесть степеней свободы: $i=6$. Из этих степеней свободы 3 определяют поступательное движение тела и называются поступательными, а другие 3 определяют вращательное движение тела и называются вращательными.

При определении количества степеней свободы молекул будем рассматривать атомы как материальные точки.

1) *одноатомная молекула* – материальная точка, которая имеет 3 поступательных степени свободы. $i = i_{\text{noc}} = 3$

2) *двухатомная молекула* - две материальных точки с жесткой связью. Такая молекула имеет 3 поступательные степени свободы и 2 вращательные $i = i_{\text{noc}} + i_{\text{вр}} = 3 + 2 = 5$

3) *трехатомная (многоатомная) молекула* - три материальные точки, имеющие три жесткие связи. Такая молекула имеет три поступательные степени свободы и три вращательные. $i = i_{\text{noc}} + i_{\text{вр}} = 3 + 3 = 6$

Можно показать, что на каждую степень свободы молекулы приходится в среднем одинаковая кинетическая энергия равная $\frac{1}{2}kT$. Таким образом, средняя энергия молекулы

$$E = \frac{i}{2}kT,$$

где i - количество степеней свободы молекулы, зависящее от ее конфигурации.

6.6 Словарь

1. Идеальный газ – Ideal gas-الغاز المثالي
2. Моль вещества – Mol of a substance مول من مادة
3. Число Авагадро – Avagadro number-عدد افاكادرو
4. Температура – The temperature-الحرارة
5. Давление – Pressure-ضغط
6. Месь газов – mpurity gases-حجم الغاز

7. Уравнение Клаузиуса – Clausius – Eight- معادلة كلاوز-كلاوز
8. Уравнение Больцмана – The Boltzmann equation- معادلة بولتزمان
9. Уравнение Менделеева-Клапейрона – Mendeleev-Clapeyron equation
معادلة مندليف و كلايرون-

Лекция №7

Термодинамика.

7.1 Понятие о равновесии термодинамической системы.

Термодинамическая система находится в равновесии, если все параметры системы и отдельных её частей имеют постоянную величину. Например, газ, находящийся в сосуде: $P=\text{const}$; $V=\text{const}$; $T=\text{const}$. Эта система (газ) находится в равновесии. Поскольку параметры состояния идеального газа связаны между собой уравнением состояния (уравнение Клапейрона-Менделеева), то для описания состояния газа достаточно двух параметров (например, P и V).

7.2 Внутренняя энергия, теплота и работа газа.

7.2.1 Под внутренней энергией системы понимают сумму кинетической и потенциальной энергии частиц системы. В общем случае сюда включают энергию всех видов взаимодействия частиц системы, вычислить которую достаточно сложно. Ситуацию упрощает то обстоятельство, что для термодинамики важным является не само значение внутренней энергии, а ее изменение ΔU , которое можно рассчитать достаточно точно. Так как идеальный газ состоит из частиц, которые не взаимодействуют между собой, то их потенциальная энергия равна нулю. Внутренняя энергия идеального газа равна кинетической энергии всех его молекул (или атомов). Умножив кинетическую энергию одной молекулы на число молекул N получим формулу для внутренней энергии идеального газа:

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} RT$$

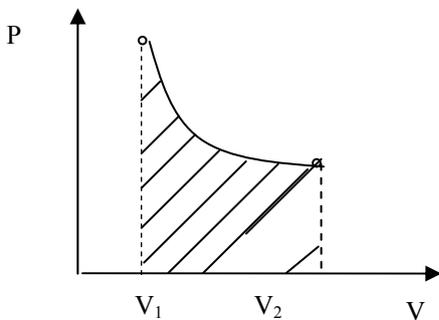
Изменение внутренней энергии есть разность двух значений внутренней энергии, соответствующих конечному и начальному состоянию системы:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

Элементарное изменение внутренней энергии идеального газа:

$$dU = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{\mu} R dT$$

7.2.2 Работа. Найдем выражение для вычисления работы, которую совершает идеальный газ при расширении. Пусть газ под поршнем площадью S изобарно расширяется. Объем газа под действием силы $F = P \cdot S$ увеличивается на $dV = S \cdot dx$. Тогда работа газа может быть по-



считана по формуле:

$$dA = F \cdot dx = P \cdot S \cdot dx = P \cdot dV,$$

Для расчета работы газа при конечном изменении объема газа, надо выражение проинтегрировать:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

Из этого уравнения ясно, что работа газа графически определяется как площадь под кривой в координатах P-V.

7.2.3 *Количество теплоты или теплота – мера передачи энергии в процессе теплообмена между телами.* Так же как и работа, теплота – функция процесса. Элементарное количество теплоты обозначается Q.

7.3 *Первое начало термодинамики по существу является законом сохранения энергии для случая, когда существенную роль играют процессы теплопередачи. Количество теплоты сообщенное системе расходуется на увеличение внутренней энергии системы и на совершение системой работы.* Математическая запись закона:

$$Q = \Delta U + A .$$

7.3.1 *Коэффициент полезного действия. КПД.*

Рассмотрим круговой процесс, например, процесс. В результате такого процесса изменение внутренней энергии равно нулю, т.е. $\Delta U = 0$. Тогда из первого начала термодинамики :

$$\frac{A}{Q} = 1$$

Это значит что для кругового процесса тепло, сообщенное системе равно совершенной работе. В реальных круговых процессах, а именно такие процессы происходят при работе тепловых двигателей, часть энергии сообщенной системе может рассеиваться, тратиться на преодоление силы трения и др., поэтому $Q > A$. В общем случае:

$$\frac{A}{Q} \leq 1$$

Это выражение также является математическим выражением первого начала термодинамики, которое можно сформулировать так: *Невозможно изготовить вечный двигатель первого рода, т.е. такое периодически действующее устройство, которое совершало работу большую, чем подведенная энергия. Другими словами к.п.д. теплового двигателя не может быть больше 100%.*

7.4 *Теплоемкость и ее трактовка молекулярно-кинетической теорией*

7.4.1. *Теплоемкостью тела называется величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить телу, чтобы повысить его температуру на один кельвин*

$$C_{\text{Тела}} = \frac{dQ}{dT}$$

7.4.2. *Удельной теплоемкостью называется теплоемкость единицы массы вещества, т.е. величина, численно равная количеству тепла, которое необходимо сообщить одному килограмму вещества, чтобы повысить его температуру на один кельвин:*

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT}$$

7.4.3. Молярной теплоемкостью называется теплоемкость 1 моля вещества, т.е. величина, численно равная количеству тепла, которое необходимо сообщить одному молю вещества, чтобы повысить его температуру на один кельвин:

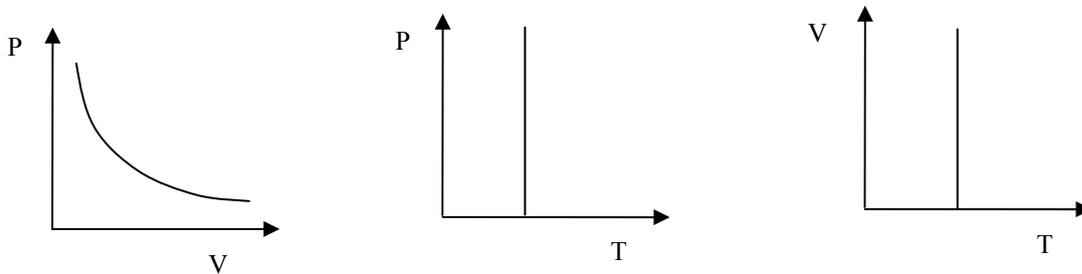
$$C = \frac{1}{\nu} \cdot \frac{dQ}{dT}$$

Теплоемкость тела зависит от массы тела, его химического состава, термодинамического состояния и вида процесса сообщения тепла. Для идеального газа различают молярные теплоемкости C_p изобарного и C_v изохорного процесса.

$$C_p = \frac{i}{2} R + R, \quad C_v = \frac{i}{2} R$$

7.5 Изопроцессами называются термодинамические процессы, протекающие при неизменном значении какого либо параметра.

7.5.1. Изотермический процесс – процесс, протекающий при постоянной температуре $T = \text{const}$.

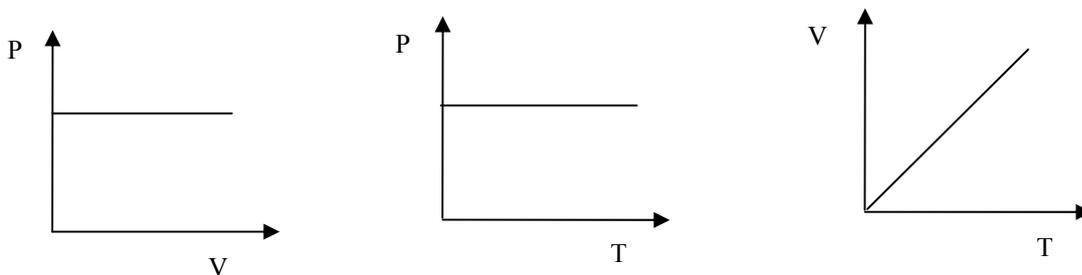


Поскольку при изотермическом процессе температура постоянная, то изменение внутренней энергии газа равно нулю $dU=0$. Тогда $dQ = PdV$. При изотермическом процессе тепло, сообщенное системе, расходуется только на работу против внешних сил. Из определения теплоёмкости следует, что $C_T = \infty$. Формула для расчета работы:

$$A_{12} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Из уравнения Клапейрона-Менделеева следует: $PV = \text{const}$

7.5.2 Изобарный процесс. Это процесс, протекающий при постоянном давлении. $P = \text{const}$.



Первое начало термодинамики для изобарного процесса запишется в виде:

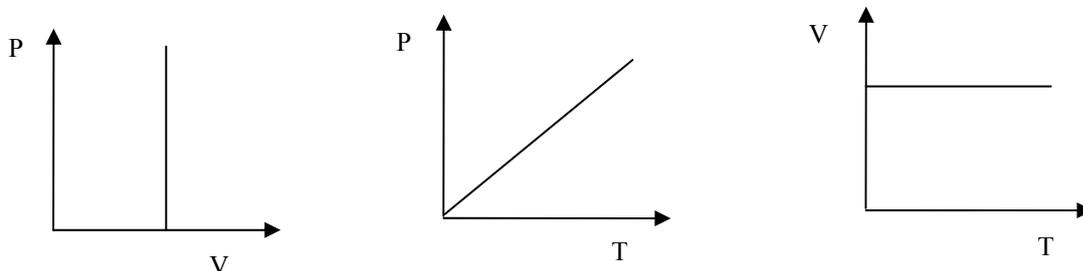
$$dQ = dU + PdV$$

Молярная теплоемкость для процесса $C_p = \frac{i}{2} R + R$

Формула для расчета работы: $A = P(V_2 - V_1)$.

Из уравнения Клапейрона-Менделеева следует: $\frac{V}{T} = \text{const}$

7.5.3 *Изохорный процесс* Это процесс, протекающий при постоянном объеме. $V = \text{const}$.



При постоянном объеме работа газа равна нулю. Тогда $dQ = dU$.

Теплоемкость для процесса $C_v = \frac{i}{2} R$.

Из уравнения Клапейрона-Менделеева следует: $\frac{P}{T} = \text{const}$.

7.5.4 *Адиабатный процесс*: Это процесс, осуществляемый системой без теплообмена с окружающими телами, т.е. $\delta Q = 0$. При адиабатном процессе газ совершает работу за счет уменьшения внутренней энергии:

$$dA = -\delta U$$

Теплоемкость для адиабатного процесса равна 0. Получим формулу для расчета работы газа, воспользовавшись уравнением Менделеева-Клапейрона

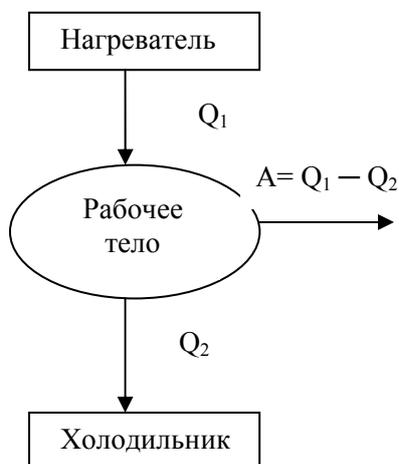
$$A = -\Delta U = \frac{i}{2} \cdot \nu R (T_1 - T_2) = \frac{i}{2} \cdot (P_1 V_1 - P_2 V_2)$$

Уравнение процесса.

$$PV^\gamma = \text{const}, \quad \gamma = \frac{i+2}{i}.$$

Это уравнение называется *уравнением Пуассона* для адиабатного процесса. Величину γ называют *показатель адиабаты*.

7.6 *Тепловые машины*. Тепловая машина – это устройство, которое преобразует внутреннюю энергию одних тел в механическую энергию других.



Q_1 – количество теплоты переданное нагревателем рабочему телу за один цикл.; Q_2 – количество теплоты переданное рабочим телом холодильнику.; A – работа, совершенная за один цикл. В процессе работы двигателя рабочее тело совершает циклический процесс. Изменение его внутренней энергии за один цикл равно нулю. Из первого начала термодинамики следует, что теплота полученная телом за один цикл затрачивается на совершение работы:

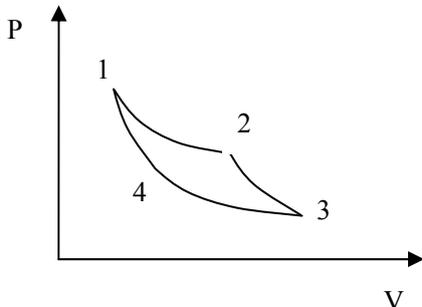
$$A = Q_1 - Q_2.$$

Эффективность работы тепловой машины

характеризуют коэффициентом полезного действия. КПД определяется как отношение совершенной за один цикл работы A к количеству тепла, которое рабочее тело получило от нагревателя Q_1 .

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

7.6.1 Идеальная тепловая машина.



Французский инженер С.Карно показал, что (рабочее тело – идеальный газ) максимальное значение к.п.д. возможно у тепловой машины, которая работает по циклу, состоящему из двух изотерм (1-2 и 3-4) и двух адиабат (2-3 и 4-1). Такой цикл называют *циклом Карно*. На участке 1-2 рабочее тело получает от нагревателя количество тепла Q_1 при температуре T_1 , а на участке 3-4 рабочее тело отдаёт холодильнику количество тепла Q_2 при температуре T_2 . КПД

идеальной тепловой машины – машины работающей по циклу Карно:

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

7.7 Тепловые явления

7.7.1 Нагрев или охлаждение тел. При нагреве тело получает тепло от окружающей среды. При охлаждении тело отдает тепло окружающей среде. Количество тепла, отдаваемое или получаемое телом, рассчитывают по формуле:

$$Q = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1),$$

здесь: c – удельная теплоемкость тела; m – масса тела; T_1 – начальная температура тела; T_2 – конечная температура тела; Q – количество тепла. *Удельная теплоемкость равна количеству тепла которое необходимо сообщить телу массой 1кг, чтобы нагреть его на 1К.*

7.7.2 Плавление или кристаллизация. При плавлении тело получает некоторое количество тепла из окружающей среды. При кристаллизации тело отдает некоторое количество тепла окружающей среде. Количество тепла рассчитывают по формуле:

$$Q = \lambda \cdot m,$$

здесь: λ – удельная теплота плавления (кристаллизации); m – масса тела; Q – количество тепла. *Плавление или кристаллизация происходит при определенной постоянной температуре, которую называют температурой плавления.*

7.7.3 Парообразование (кипение) или конденсация. При парообразовании тело получает некоторое количество тепла из окружающей среды. При конденсации тело отдает некоторое количество тепла окружающей среде. Количество тепла рассчитывают по формуле:

$$Q = r \cdot m,$$

здесь: r – удельная теплота плавления (кристаллизации); m – масса тела; Q – количество тепла. Парообразование обычно происходит с открытой поверхности тела. *Бурное парообразование называют кипением. При кипении образуются пузырьки пара по всему объему жидкости. Температура кипения зависит от давления*

окружающего газа. Если давление постоянно, температура кипения также постоянна.

7.7.4 Горение. Горение это химическая реакция окисления топлива. При горении тепло выделяется в окружающую среду. Количество тепла рассчитывают по формуле:

$$Q = q \cdot m,$$

здесь: q - удельная теплота сгорания топлива; m – масса тела; Q – количество тепла.

7.7.5 Уравнение теплового баланса – закон сохранения энергии в тепловых процессах. Его составляют учитывая все тепловые явления.

7.8 Второе начало термодинамики.

Р. Клаузиус предложил две формулировки. Рассмотрим вторую формулировку. *Теплота не может сама собой переходить от холодного тела к горячему. Вторая формулировка вытекает из того, что при теплопередаче тепло передается от горячего тела к холодному.*

Формулировка М. Планка. *Невозможен периодический процесс, единственным и конечным результатом которого было бы превращение тепла в работу.* Эта формулировка становится понятной, при рассмотрении работы теплового двигателя. Если в результате работы теплового двигателя будет наблюдаться только процесс превращения тепла в работу, то температура всех частей двигателя станет одинаковой и его работа прекратится. Чтобы этого не произошло, и двигатель работал периодически, необходимо ещё отводить тепло. Необходимо наличие холодильника.

В. Оствальд предложил формулировку, которая переключается с формулировкой Планка. *Невозможен вечный двигатель второго рода, т.е. такое периодически действующее устройство, которое бы полностью превращало тепло в работу.* Из этой формулировки следует, что к.п.д. теплового двигателя не может быть равен 100%.

7.9 Словарь

1. Термодинамика – Thermodynamics- تيرموديناميك
2. Теплоемкость тела – The specific heat of the body- حرارة جسم معين
3. Удельная теплоемкость - specific heat- حرارة معينة
4. Молярная теплоемкость – Molar heat capacity of- السعة الحرارية
5. Внутренняя энергия – Internal energy- الحرارة الكامنة
6. Количество теплоты – The amount of heat- كمية الحرارة
7. Изохорный процесс – Isochoric process- عملية ايزاهور
8. Изобарный процесс – Isobaric process- عملية يتساوى فيها الضغط
9. Изотермический процесс – Isothermal process- عملية تتساوى فيها الحرارة
10. Адиабатный процесс – Adiabatic process- ثابت الحرارة
11. Тепловая машина – Heat engine- الحرارة المحركة
12. Рабочее тело – The working body- الجسم العامل (المتحرك)
13. Холодильник – refrigerator- براد
14. Нагреватель – heater- تسخين

15. Цикл Карно – Carnot cycle - دورة كارنو
 16. Первое начало термодинамики – The first law of thermodynamics- القانون الاول للديناميك الحرارية
 17. Второе начало термодинамики – The second law of thermodynamics القانون الثاني للديناميك الحرارية
 18. Уравнение теплового баланса – The equation of heat balance معادلة الحرارة المتوازنة

Лекция №8

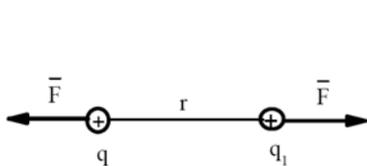
Электрические взаимодействия. Электростатическое поле.

8.1 Электростатика изучает взаимодействие неподвижных и не меняющихся с течением времени зарядов. Заряды бывают положительными и отрицательными и могут принимать дискретные значения кратные элементарному заряду. Элементарный заряд это заряд равный заряду электрона ($e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

8.1.1 Закон сохранения электрического заряда. В замкнутой системе суммарный электрический заряд не изменяется с течением времени.

$$\sum_{i=1}^n q_i = const$$

8.1.2 Закон Кулона. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные заряды притягиваются. Сила, с которой взаимодействуют два точечных заряда, прямо пропорциональна величинам зарядов, обратно пропорциональна расстоянию между ними, зависит от среды и направлена вдоль линии, соединяющей эти заряды:



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} :$$

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость среды. Она (ϵ) показывает во сколько раз сила взаимодействия двух точечных

зарядов в вакууме превосходит силу взаимодействия этих зарядов в среде.

8.2 Электрическое поле. Вокруг электрических зарядов существует электрическое поле – форма существования материи. Инструментом для изучения электрического поля является пробный точечный положительный заряд. Чем больше заряд q , тем больше сила F действующая на заряд, а их отношение напряженность электрического поля:

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

8.2.1 Напряженность \vec{E} – векторная физическая величина силовая характеристика электрического поля, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку пространства (поля). Единица измерения напряженности Н/Кл или В/м.

8.2.1.1 Напряженность электрического поля точечного заряда. В поле точечного заряда q помещается пробный заряд q_1 . Согласно закону Кулона на заряд q_1 действует сила:

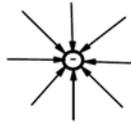
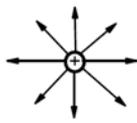
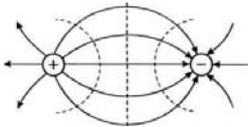
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q q_1}{r^2}.$$

Из определения напряженности электрического поля следует, что напряженность равна:

$$E = \frac{F}{q_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2}. \quad (5)$$

8.2.1.2 Однородным считается поле, в каждой точке которого напряженность принимает постоянное значение. Поле точечного заряда неоднородно.

8.2.1.3 Силовые линии электрического поля – это линии, касательные к которым, в каждой точке, совпадают с направлениями векторов напряженности. Заметим такие особенности: Силовые линии начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных зарядах или уходят на бесконечность. Силовые линии поля точечного заряда лучи выходящие из точки расположения заряда. Силовые



линии не пересекаются. По густоте силовых линий можно судить о величине напряженности электрического поля. Чем больше плотность линий, тем больше величина напряженности.

8.2.1.4 Вектор электрического смещения. При переходе из одной среды в другую вектор напряженности электрического поля, вследствие изменения диэлектрической проницаемости, терпит скачек. Характеристика поля не изменяющаяся при переходе из одной среды в другую называется электрическим смещением. Вектор электрического смещения и вектор напряженности электрического поля связаны соотношением:

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}$$

Электрическое смещение, создаваемое точечным зарядом, равно:

$$D = \frac{q}{4\pi r^2}.$$

8.3 Принцип суперпозиции. Напряженность результирующего поля в некоторой точке равно векторной сумме напряженностей полей создаваемых системой зарядов.

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$

\vec{E}_i – напряженность поля, созданного i – зарядом

8.4 Поле некоторых заряженных тел.

8.4.1 Поле равномерно заряженной сферы радиуса R :

$$E = 0, r < R; E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2}, r \geq R.$$

8.4.2 Поле равномерно заряженной бесконечно протяженной плоскости с поверхностной плотностью зарядов σ :

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$$

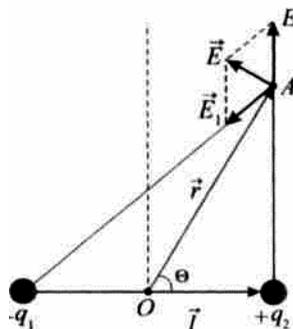
8.4.3 Поле равномерно заряженной бесконечно протяженной тонкой нити с линейной плотностью зарядов τ

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0}$$

8.5 Диполь в электрическом поле. Диполь – два одинаковых разноименных заряда q расположенных на небольшом расстоянии l друг от друга. Диполь характеризуется электрическим дипольным моментом \vec{p} :

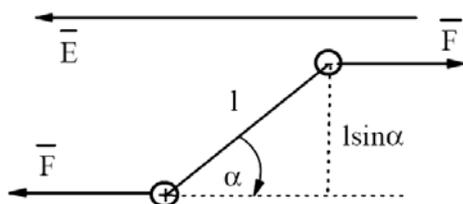
$$\vec{p} = q\vec{l}$$

Если размеры диполя значительно меньше расстояния от диполя до точки наблюдения ($l \ll r$), то диполь называется точечным. Пусть положение произвольной точки A относительно центра диполя (точка O) задается радиус-вектором \vec{r} . Радиус-вектор \vec{r} образует с осью диполя угол Θ (рис. 6.2). Используя принцип суперпозиции полей, можно получить формулу для расчета напряженности E электрического поля точечного диполя в произвольной точке: $E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2 \Theta}$, где p - дипольный момент.



Если $\Theta = 0$ (точка лежит на оси диполя), то:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}.$$



Поместим диполь во внешнее электрическое поле напряженностью E . Образующие диполь заряды $+q$ и $-q$ окажутся под действием равных по величине, но противоположных по направлению сил F_1 и F_2 . Модуль каждой силы $F = qE$. Плечо этой пары сил равно $l \sin \alpha$. Вращающий момент сил F_1 и F_2 стремится развернуть диполь вдоль

поля.

$$M = Fl \sin \alpha = qEl \sin \alpha = pE \sin \alpha.$$

8.6 Потенциал. Работа по перемещению точечного заряда q' зависит от начального и конечного положения заряда и не зависит от формы пути. Следовательно, электростатическое поле – потенциально. Работа электростатических сил по замкнутому контуру равна нулю. Потенциал электрического поля φ равен работе по перемещению единичного положительного заряда из данной точки поля на бесконечность. Потенциал скалярная физическая величина, является энергетической характеристикой поля и численно равна потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в данную точку поля.

$$\varphi = \frac{E_l}{q'}, \quad \varphi_1 = \frac{A_1}{q'}, \quad \varphi_2 = \frac{A_2}{q'}$$

Единица измерения потенциала 1В – это потенциал такой точки поля, в которой, заряд в 1Кл обладает энергией в 1Дж. Свойства потенциала: φ – скалярная величина; φ – аддитивная величина:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i$$

Здесь φ_i – потенциал поля i -го источника.

8.6.1 Потенциал поля точечного заряда.

$$\varphi = \frac{E_r}{q'} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

8.6.2 Разность потенциалов. Работа по перемещению заряда из точки поля 1 в точку 2 равна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_1 - A_2}{q'} = \frac{A_{12}}{q'}$$

$$A_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2)q', dA = -q'd\varphi$$

Величина $d\varphi$ называется разностью потенциалов:

$$d\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

8.6.3 Эквипотенциальные поверхности – это геометрическое место точек, в каждой из которых потенциал поля одинаков. Рассмотрим такую поверхность. Будем перемещать по ней из точки 1 в точку 2 заряд q' . Работа поля по перемещению заряда в этом случае равна нулю т.к. разность потенциалов равна нулю. Расписывая работу, исходя из силовых соображений, получаем:

$$A = \vec{F}d\vec{r} = Fdr \cos \alpha = q'Edr \cos \alpha = 0 \Rightarrow \cos \alpha = 0 \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{2}.$$

Вывод – силовые линии электрического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

8.7 Емкость.

8.7.1 Емкость уединенного проводника. Если уединенному проводнику сообщить заряд dq , то потенциал этого проводника изменится. Изменение потенциала $d\varphi$ пропорционально сообщенному заряду: $dq = Cd\varphi$, где C – коэффициент пропорциональности, называемый электрической емкостью. Электрическая емкость – это скалярная физическая величина, характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд и численно равная заряду, сообщение которого проводнику изменяет его потенциал на один вольт:

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

Единица измерения ёмкости – фарад (Ф). Фарад – это очень большая величина. Такой емкостью обладал бы шар радиуса $9 \cdot 10^9$ м, т.е. радиуса в 1500 раз больше радиуса Земли.

8.7.1.1 Емкость уединенной проводящей сферы. R – радиус сферы

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R.$$

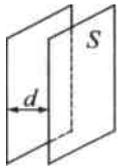
8.8 Конденсаторы. Уединенные проводники имеют небольшую емкость. На практике необходимы устройства, способные накапливать на себе большие заряды. Их называют конденсаторами. Конденсатор – это система из двух проводников, расположенных близко друг к другу и разделенных диэлектриком. Условное обозначение на схемах: —11—. Образующие конденсатор проводники называют об-

кладками. Основной характеристикой конденсатора, является емкость C . Емкость равна отношению заряда на конденсаторе к разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U},$$

где $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ – напряжение между обкладками; q – заряд положительной обкладки. Величина емкости конденсатора определяется формой и размерами обкладок и величиной зазора между ними, а также диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками.

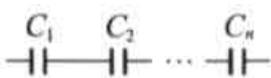
8.8.1 Плоский конденсатор.



$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$$

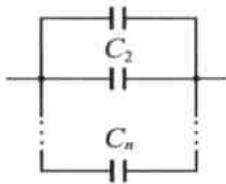
где: S – площадь обкладки; d – расстояние между обкладками; ε – диэлектрическая проницаемость среды (диэлектрика), которая находится между обкладками. Конденсаторы можно соединять в батареи различными способами.

8.8.1.1 При последовательном соединении конденсаторов выполняются следующие соотношения:



$$q_{\text{общ}} = q_1 = q_2 = \dots = q_n; U = U_1 + U_2 + \dots + U_n; \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

8.8.1.2 При параллельном соединении конденсаторов выполняются соотношения:



$$q_{\text{общ}} = q_1 + q_2 + \dots + q_n; U = U_1 = U_2 = \dots = U_n; C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

8.9 Энергия электрического поля.

8.9.1 Энергия заряженного уединенного проводника. Пусть имеется уединенный проводник. Обозначим: q – заряд проводника, C – емкость, φ – потенциал.

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2}.$$

8.9.2 Энергия заряженного конденсатора. Как всякий заряженный проводник, конденсатор обладает энергией. Т.к. $\Delta\varphi = U$, то:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

8.9.3 Объемная плотность энергии поля.

Формулу для энергии поля конденсатора можно преобразовать, используя величины, характеризующие электрическое поле. Используем следующие соотношения:

$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}$ и $U = Ed$. Подстановка в формулу для энергии поля конденсатора дает:

$$W = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} V,$$

где $V = Sd$ – объем конденсатора. Величина, равная отношению энергии поля к занимаемому объему, называется *объемной плотностью энергии*.

$$w = \frac{W}{V}$$

Для электрического поля объемная плотностью энергии равна:

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2}$$

где E – напряженность электрического поля, а D – электрическое смещение.

8.10 Вещества в электрическом поле.

В зависимости от электропроводности все вещества делятся на: проводники; полупроводники; диэлектрики. Величина обратная удельному сопротивлению ρ – удельная проводимость:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

8.10.1 Диэлектрики в электрическом поле. Удельная проводимость проводников на 15-20 порядков выше, чем у диэлектриков. Диэлектрики могут образованы двумя типами молекул:

1. Молекула называется неполярной, если при отсутствии внешнего электрического поля она не обладает дипольным моментом. Во внешнем электрическом поле в каждой из таких молекул наводятся дипольные моменты. Чем больше \vec{E} , тем больше дипольный момент каждой молекулы \vec{p} .
2. Молекула называется полярной, если она при отсутствии внешнего электрического поля обладает дипольным моментом. Во втором типе диэлектриков происходит поворот уже имеющихся дипольных моментов, и кристалл также поляризуется. Для количественного описания поляризации диэлектрика вводят векторную величину, которую называют поляризованностью. *Поляризованность (\vec{P}_V) - векторная физическая величина, численно равная дипольному моменту единицы объема диэлектрика:*

$$\vec{P}_V = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_i$$

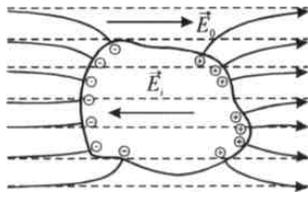
Суммарный дипольный момент кристаллов при отсутствии электрического поля равен нулю. В слабых полях поляризованность изотропных диэлектриков, пропорциональна напряженности электрического поля:

$$\vec{P}_V = \chi\varepsilon_0 \vec{E}$$

χ – восприимчивость диэлектрика. *Заряды, которые входят в состав диэлектрика, называются связанными.* Под действием поля связанные заряды могут немного смещаться относительно положений равновесия. Покинуть пределы молекулы связанные заряды не могут. Уменьшение поля в диэлектрике связано с его поляризацией. Чем лучше поляризуется диэлектрик (больше χ), тем значительно ослабляется поле в нем.

$$\varepsilon = 1 + \chi$$

8.10.2 Проводники в электрическом поле. Проводники - это вещества, в которых имеются свободные заряды. В электрическом поле свободные заряды в проводнике начинают двигаться (положительные – в направлении вектора \vec{E} , отрицательные – в противоположном). На концах проводника возникают индуцированные за-



ряды противоположного знака. Возникает поле индуцированных зарядов E_1 противоположно направлению внешнего поля E_0 . Перераспределение зарядов заканчивается, когда напряженность поля внутри проводника станет равной нулю. Если внутри проводника есть полость, то напряженность поля в этой полости равна нулю. На этом принципе основано явление электростатической защиты.

8.11 Словарь

1. Проводник – Explorer- ناقل
2. Диэлектрик – Dielectric - عازل
3. Заряд – charge- شحنة
4. Закон Кулона – Coulomb's law- قانون كولون
5. Напряженность электрического поля – Tensions ezhlektricheskogo field حقل كهربائي-
6. Потенциал – Potential جهد
7. Разность потенциалов – The potential difference- فرق الجهد
8. Поверхностная плотность зарядов – The surface charge density- كثافة السطح
9. Электрическое смещение – Electric displacement- النزوح الكهربائي-
10. Силовая линия – Force Line خط القوة
11. Эквипотенциальная поверхность – Equipotential surface
12. Конденсатор – Condenser- مكثف
13. Электрическая ёмкость – Capacitance- القدرة الكهربائية
14. Элементарный заряд – Elementary charge- الشحنة البسيطة-
15. Объёмная плотность энергии – Volumetric energy density- كثافة الطاقة-
16. Линейная плотность зарядов – The linear charge density- كثافة الشحنة-
17. Диэлектрическая проницаемость – dielectric permittivity- السماحية-

Лекция №9

Законы постоянного тока.

9.1 *Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.* Для протекания тока необходимо наличие в проводнике заряженных частиц, которые могут перемещаться в пределах всего проводника и электрического поля. Количественной характеристикой электрического тока является сила тока.

9.1.1 *Сила тока I – скалярная физическая величина, численно равная заряду, переносимому через поперечное сечение проводника за единицу времени. Единица измерения силы тока – ампер A .* За направление тока принимается направление перемещения положительных зарядов.

$$I = \frac{dq}{dt}$$

9.1.2 Плотность тока \vec{j} – векторная физическая величина, численно равная электрическому заряду, переносимому за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению движения носителей тока.

$$j = \frac{dq}{dt dS_{\perp}} = \frac{di}{dS_{\perp}}, \quad I = \int_S \vec{j} d\vec{S}$$

При исследовании электрического тока в проводнике на микроуровне не трудно показать, что плотность тока описывается соотношением:

$$\vec{j} = e n \vec{v}$$

Где: e – величина заряда; n – плотность носителей заряда; \vec{v} – скорость направленного движения носителей заряда.

9.2 Электродвижущая сила. Напряжение. Причиной упорядоченного движения зарядов могут быть:

1. Электростатические силы, под действием которых положительные заряды движутся вдоль поля, отрицательные – против поля. Поле этих сил называют кулоновским, напряженность поля обозначают $E_{\text{кул}}$.
2. Силы не электростатического происхождения. Их называют *сторонними*, а поле этих сил – полем сторонних сил. Напряженность этого поля обозначают $\vec{E}_{\text{н\o i \delta}}$. Сторонние силы могут быть обусловлены химическими процессами, диффузией носителей тока в неоднородной среде и др.

9.2.1 Напряжение. Величина, равная отношению суммарной работы, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении заряда, к величине заряда называется напряжением на данном участке.

$$U = \frac{A}{q}$$

9.2.2 Электродвижущая сила ЭДС. Величина, равная отношению работы, совершаемой сторонними силами при перемещении заряда, к величине заряда называется электродвижущей силой ЭДС:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{н\o i \delta}}}{q}$$

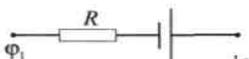
9.2.3 Разность потенциалов это отношение работы кулоновских сил по перемещению заряда к величине зарядов.

$$\Delta\varphi = \frac{A_{\text{кул}}}{q}$$

9.2.4 Напряжение на участке цепи равно сумме разности потенциалов и электродвижущей силы.

$$U_{12} = \Delta\varphi + \mathcal{E}$$

9.2.5 Однородный и неоднородный участок цепи. Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называют однородным. Участок, на котором на носители тока действуют сторонние силы, называют неоднородным. Для однородного участка



$$\mathcal{E} = 0, \text{ а } U = \Delta\varphi.$$

Напряжение на однородном участке совпадает с разностью потенциалов.

9.3 Закон Ома для однородного участка цепи. Ом экспериментально установил закон, согласно которому сила тока, текущего по однородному металлическому проводнику, пропорциональна напряжению на этом проводнике:

$$I = \frac{U}{R}$$

9.3.1 Электрическое сопротивление (R) – скалярная физическая величина, характеризующая свойство проводника противодействовать пропусканию электрического тока и равная отношению напряжения U на концах проводника к силе тока I , протекающего по нему. Единица измерения сопротивления Ом. Сопротивление проводников, наличие электрического тока в которых приводит к выделению тепла, называется активным.

9.3.1.1 Сопротивление однородного проводника зависит от материала проводника и его геометрических размеров и может быть рассчитано по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

где: l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения проводника; ρ – удельное электрическое сопротивление, характеризующее материал проводника.

9.3.1.2 Электрическое сопротивление металлов связано с рассеянием электронов проводимости на тепловых колебаниях кристаллической решетки и структурных неоднородностях. Поэтому сопротивление металлов зависит от температуры.

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

где: R – сопротивление при температуре $t = 0^\circ\text{C}$, R_0 – сопротивление при 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления.

9.4 Проводимость. Величина обратная сопротивлению называется проводимостью G . Единица измерения проводимости См (Сименс).

$$G = \frac{1}{R}$$

Величина обратная удельному сопротивлению называется удельной проводимостью.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

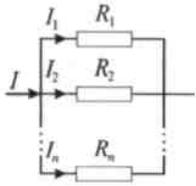
9.5 Соединение проводников.

9.5.1 При последовательном соединении проводников конец предыдущего проводника соединяется с началом последующего. Если соединяют n проводников с сопротивлениями R_1, R_2, \dots, R_n соединены между собой последовательно, то выполняются соотношения:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n, \quad U = U_1 + U_2 + \dots + U_n, \quad R = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \dots + \frac{1}{G_n}$$

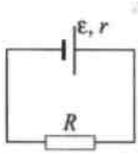
9.5.2 Если начала проводников соединены в одной точке (узле), а концы в другой, то соединение называют **параллельным** (рис. 12.3). При параллельном соединении проводников выполняются следующие соотношения:



$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n, \quad U = U_1 = U_2 = \dots = U_n, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n},$$

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

9.6 Закон Ома замкнутой цепи имеет вид:



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

где r – сопротивление источника тока; R – сопротивление нагрузки; $(R+r)$ – полное сопротивление цепи.

9.7 Закон Ома в дифференциальной форме. Плотность тока пропорциональна напряженности поля в данной точке проводника.

$$j = \frac{E}{\rho} \text{ т.к. } \frac{1}{\rho} = \sigma \Rightarrow \vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Это выражение называется законом Ома в дифференциальной форме.

9.8 Законы Кирхгофа.

9.8.1 Первый закон Кирхгофа. В каждом узле цепи сумма втекающих токов равна сумме вытекающих токов.

$$\sum_{i=1}^n I_{ion} = \sum_{k=1}^m I_{kof}$$

9.8.2 Второй закон Кирхгофа. В неразветвленной цепи или в каждом контуре разветвленной цепи алгебраическая сумма ЭДС всех источников равна сумме всех падений напряжения во внутренней и внешней цепи.

$$\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i = \sum_{k=1}^m U_k$$

9.9 Мощность электрического тока. При протекании электрического тока в цепи выполняется работа. Мощность электрического тока выделяющаяся на участке цепи равна произведению силы тока на напряжение.

$$P = UI$$

9.10 Тепловое действие тока. При протекании электрического тока на участке цепи обладающим активным сопротивлением выделяется тепло. Количество теплоты равно:

$$Q = I^2 R t.$$

Здесь t – время действия тока.

9.11 Электрические измерения.

9.11.1 Измерения напряжений. При измерении напряжений используют прибор, который называют *вольтметр*. *Вольтметр* включают в цепь параллельно. Сопротивление вольтметра должно значительно превосходить сопротивление участка цепи на котором выполняют измерения.

9.11.2 *Измерения силы тока.* При измерении силы тока используют прибор, который называют *амперметр*. *Амперметр включают в цепь последовательно. Сопротивление амперметра должно быть значительно меньше сопротивления участка цепи, на котором выполняют измерения.*

9.12 Словарь

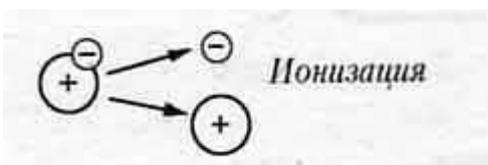
1. Электрический ток – Electric current-تيار كهربائي
2. Сила тока – Current قوة الكهربائية
3. Плотность тока – The current density-كثافة القوة الكهربائية
4. Закон Ома – Ohm's Law-قانون اوم
5. Электрическое сопротивление – Electrical resistance-المقاومة الكهربائية
6. Проводимость – Conductivity-العابورية او ناقل للتيار الكهربائي
7. Удельное сопротивление – Resistivity-المقاومة
8. Электродвижущая сила – The electromotive force-القوة المحركة الكهربائية
9. Напряжение – voltage الجهد
10. Вольтметр – voltmeter الفولتميتر
11. Амперметр – Ammeter مقياس التيار الكهربائي
12. Последовательное соединение – Series connection-سلسلة الاتصال
13. Параллельное соединение – Parallel Connection-الاتصال بالتوازي
14. Электрическая цепь – Electrical circuit-الدائرة الكهربائية

Лекция №10

Электрический ток в средах.

10.1 *Электрический ток в газах.* В обычных условиях газ – это диэлектрик, т.е. состоит из нейтральных атомов и молекул и не содержит свободных носителей заряда. Газ-проводник – это ионизированный газ. Ионизированный газ обладает электронно-ионной проводимостью.

10.1.1 *Ионизация газа – это распад нейтральных атомов или молекул на положительные ионы и электроны путем отрыва электронов от атомов.* Ионизация происходит при нагревании газа или воздействия излучений (ультрафиолет, рентген, радиоактивное) и объясняется распадом атомов и молекул при столкновениях на высоких скоростях.



9.1.2 *Газовый разряд – это электрический ток в ионизированных газах.* Носителями зарядов являются положительные ионы и электроны. Существует самостоятельный и несамостоятельный газовый разряд.

10.1.2.1 *Несамостоятельный газовый разряд – если действие ионизатора прекратить, то прекратится и разряд.* Несамостоятельный газовый разряд может переходить в самостоятельный газовый разряд при $U=U_{\text{зажигания}}$.

10.1.2.2 *Самостоятельный газовый разряд – в этом случае газовый разряд продолжается и после прекращения действия внешнего ионизатора за счет*

ионов и электронов, возникших в результате ударной ионизации. Ударная ионизация возникает при ударе электронов о нейтральные атомы. Благодаря увеличению разности потенциалов между электродами наступает *электрический пробой газа* – процесс перехода несамостоятельного газового разряда в самостоятельный.

Самостоятельный газовый разряд бывает 4-х типов:

1. тлеющий – при низких давлениях (до нескольких Тор) наблюдается в лампах дневного света и газовых лазерах.
2. искровой – при нормальном давлении и высокой напряженности электрического поля (молния сила тока до 100000 А). Наблюдается в молниях
3. коронный – при нормальном давлении в неоднородном электрическом поле. Наблюдается на острие в электрофильтрах, при утечке энергии.
4. дуговой – большая плотность тока, малое напряжение между электродами (температура газа в канале дуги 5000–6000 °С); наблюдается в прожекторах, проекционной киноаппаратуре, при сварке.



9.1.2 *Рекомбинация заряженных частиц* – газ перестает быть проводником, если ионизация прекращается, это происходит в следствие рекомбинации (воссоединения противоположно заряженных частиц).

10.2 *Плазма* – это четвертое агрегатное состояние вещества с высокой степенью ионизации за счет столкновения молекул на большой скорости при высокой температуре; встречается в природе: ионосфера - слабо ионизированная плазма, Солнце – полностью ионизированная плазма; искусственная плазма - в газоразрядных лампах.

Плазма бывает:

1. Низкотемпературная - при температурах меньше 10000К;
2. Высокотемпературная - при температурах больше 10000К.

Основные свойства плазмы:

1. Высокая электропроводность
2. Сильное взаимодействие с внешними электрическими и магнитными полями.

10.3 *Электролиты* – вещества, расплавы или растворы, которые проводят электрический ток вследствие диссоциации на ионы, однако сами вещества не проводят электрический ток. Примерами электролитов могут служить растворы кислот, солей и оснований.

При растворении солей и кислот в воде или в каком-либо ином растворителе (этиловый спирт, бензин, бензол и др.) часть молекул распадается на две части, называемые ионами, причем одна часть имеет положительный заряд, другая – отрицательный заряд. *Распад химических соединений на ионы под действием растворителя называется электролитической диссоциацией.*

10.3.1 *Прохождение тока через электролит сопровождается химическим процессом, называемым электролизом.* Находящиеся в электролите ионы, притягиваясь к электродам, двигаются в противоположных направлениях: положительные ионы – к катоду, а отрицательные ионы – к аноду. Подойдя к катоду, положительные ионы получают от него недостающие им электроны и образуют электрически нейтральные атомы. На аноде происходит обратный процесс: отрицатель-

ные ионы отдают аноду свои избыточные электроны. Например, при электролизе раствора поваренной соли на катоде отлагаются положительные ионы натрия, а на аноде – отрицательные ионы хлора.

При прохождении электрического тока через электролит на электродах выделяются определенные количества веществ, содержащихся в виде химического соединения в электролите. Зависимость выделенного вещества от силы тока устанавливается двумя законами Фарадея.

10.3.1.1 *Первый закон Фарадея сформулирован так: количество вещества, выделившегося на электродах при прохождении тока через электролит, прямо пропорционально количеству электричества, прошедшему через электролит.*

$$m = k \cdot q = k \cdot I \cdot t$$

При прохождении одного кулона электричества из электролита выделяется определенное весовое количество вещества, которое называется электрохимическим эквивалентом данного вещества – k .

10.3.1.2 *Второй закон Фарадея – при одинаковом количестве электричества масса вещества, выделившегося в результате электролиза различных электролитов, пропорциональна отношению молярной массы к валентности:*

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{M_1}{z_1} \cdot \frac{M_2}{z_2}$$

Исходя из современных представлений о строении и свойствах атомов, следует несложное соотношение для электрохимического эквивалента:

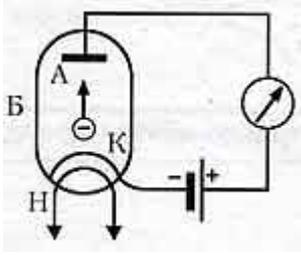
$$k = \frac{M}{zeN_A}$$

Здесь: M – молярная масса вещества; z – валентность; e – элементарный заряд; N_A – число Авагадро.

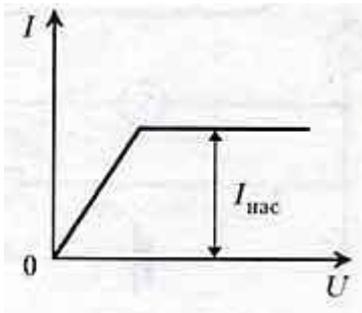
10.4 *Электрический ток в вакууме. Электронные вакуумные приборы.*

10.4.1 *Термоэлектронная эмиссия. Вакуум – это такая степень разрежения газа, при которой соударений молекул практически нет.* При таких условиях электрический ток невозможен, т.к. возможное количество ионизированных молекул не может обеспечить электропроводность. Создать электрический ток в вакууме можно, если использовать источник заряженных частиц. Действие источника заряженных частиц может быть основано на явлении термоэлектронной эмиссии. *Термоэлектронная эмиссия – это испускание электронов твердыми или жидкими телами при их нагревании до высоких температур.* Нагретый металлический электрод непрерывно испускает электроны, образуя вокруг себя электронное облако. В равновесном состоянии число электронов, покинувших электрод, равно числу электронов, возвратившихся на него (т.к. электрод при потере электронов заряжается положительно). Чем выше температура металла, тем выше плотность электронного облака.

10.4.2 *Вакуумный диод.* Электрический ток в вакууме возможен в электронных лампах. *Электронная лампа – это устройство, в котором применяется явление термоэлектронной эмиссии. Вакуумный диод – это двухэлектродная (А-анод и К - катод) электронная лампа.*

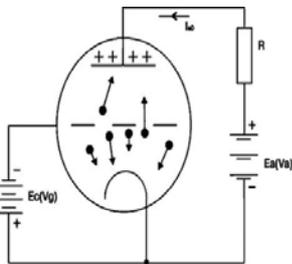


Внутри стеклянного баллона создается очень низкое давление. Н - нить накала, помещенная внутри катода для его нагревания. Поверхность нагретого катода испускает электроны. Если анод соединен с положительным полюсом источника тока, а катод с отрицательным, то в цепи протекает постоянный термоэлектронный ток. Вакуумный диод обладает односторонней проводимостью. Ток в аноде возможен, если потенциал анода выше потенциала катода. В этом случае электроны из электронного облака притягиваются к аноду, создавая электрический ток в вакууме. Зависимость силы анодного тока от напряжения на аноде называют вольт-амперной характеристикой прибора.



Вольт-амперная характеристика вакуумного диода объяснима. При малых напряжениях на аноде не все электроны, испускаемые катодом, достигают анода, и ток небольшой. Увеличение напряжения на аноде приводит к увеличению силы тока. При больших напряжениях все электроны, полученные термоэлектронной эмиссией долетают до анода и ток достигает насыщения, то есть максимально возможного значения. Свойство вакуумного диода проводить ток в одном направлении используется для выпрямления переменного тока.

10.4.3 *Электровáкуумный триод, или просто триод, – электронная лампа, имеющая 3 электрода: термоэлектрический катод, анод и одну управляющую сетку.* Обычно сетка представляет собой спиральную проволочку С, окружающую прямолинейный катод. Ось цилиндрического анода совпадает с осью катода и сетки.



Условное изображение триода и принцип его включения для усиления анодного тока показаны на рисунке. Сетка расположена ближе к катоду, чем анод, и на пути катод – сетка на электроны действует суммарное поле: созданное между анодом и катодом и создаваемое между сеткой и катодом. Во время работы лампы лишь часть электронов попадает на сетку и движется к катоду по внешней цепи, образуя сеточный ток. Если потенциал сетки положителен по отношению к катоду, то движение электронов от катода к аноду убыстряется, и анодный ток растет. Если же потенциал сетки отрицателен по отношению к катоду, то движение электронов к аноду замедляется, и анодный ток уменьшается. При достаточно большом по абсолютному значению отрицательном потенциале сетки анодный ток полностью прекращается – в этом случае говорят, что «лампа заперта». Вольт-амперная характеристика вакуумного триода более сложная и зависит от напряжений на сетке и аноде. Вакуумный триод используют для усиления слабых (сеточных) токов.

10.5 *Полупроводники. Полупроводники – материалы, которые по своей удельной проводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками* и отличаются от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и различных видов облу-

чения. Основным свойством этих материалов является увеличение электрической проводимости с ростом температуры.

Различают полупроводники с собственной и примесной проводимостью. Собственной проводимостью обладают химически чистые полупроводники. Электрические свойства примесных полупроводников определяются искусственно вводимыми в них примесями.

10.5.1 Собственная проводимость полупроводников

Типичными полупроводниками являются элементы четвертой группы периодической системы Менделеева – германий и кремний. Они образуют решетку типа алмаза, в которой каждый атом связан ковалентными (парно–электронными) связями с четырьмя равноотстоящими от него соседями.

При температуре порядка $T = 250-300$ К тепловое движение может разрывать отдельные пары, освободив один электрон. *Покинутое электроном место перестает быть нейтральным, в его окрестности возникает избыточный положительный заряд $+e$ – образуется дырка.* На это место может перескочить соседний электрон. В результате дырка начинает также странствовать по кристаллу, как и освободившийся электрон.

Если внешнее электрическое поле отсутствует, то электроны проводимости и дырки движутся хаотически. При включении поля на хаотическое движение накладывается упорядоченное движение: электронов против поля и дырок – в направлении поля. Оба движения – и дырок, и электронов – приводят к переносу заряда вдоль кристалла. Следовательно, *собственная электропроводность обуславливается носителями заряда двух знаков – отрицательными электронами и положительными дырками.*

У собственных полупроводников плотность свободных электронов будет равна плотности образовавшихся дырок. Поэтому плотность тока будет зависеть от обоих носителей зарядов:

$$j = e(n_n v_n + n_p v_p)$$

где n_n и n_p – концентрации электронов и дырок соответственно; v_n – скорость направленного движения электронов проводимости, v_p – скорость дырок.

Электропроводность собственных полупроводников быстро растет с температурой T , изменяясь по закону

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right)$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны; $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; σ_0 – величина, определяемая свойствами конкретного материала, слабо изменяющаяся с температурой. Её можно считать константой для данного полупроводника. Сопротивление полупроводников в широком интервале температур изменяется по закону:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)$$

где R_0 – величина, определяемая свойствами конкретного материала, слабо изменяющаяся с температурой. Её можно считать константой для данного полупро-

водника (нельзя говорить, что это начальное сопротивление или сопротивление при нуле температуры).

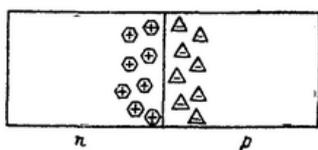
10.5.2 Примесная проводимость полупроводников. Примесная проводимость возникает, если некоторые атомы данного полупроводника заменить в узлах кристаллической решетки атомами, валентность которых отличается на единицу от валентности основных атомов. Для образования ковалентных связей с соседями, например атому фосфора, достаточно четырех электронов. Следовательно, пятый валентный электрон оказывается как бы лишним и легко отщепляется от атома за счет энергии теплового движения, образуя странствующий свободный электрон.

В отличие от собственного в примесном полупроводнике образование свободного электрона не сопровождается нарушением ковалентных связей, т. е. образованием дырки. В окрестности атома примеси возникает избыточный положительный заряд, но он связан с этим атомом и не может перемещаться по решетке. Благодаря этому заряду атом примеси может захватить приблизившийся к нему электрон, но связь захваченного электрона с атомом будет непрочной и легко нарушается вновь за счет тепловых колебаний решетки.

Таким образом, в полупроводнике с примесью, валентность которой на единицу больше валентности основных атомов, имеется только один вид носителей тока – электроны. Соответственно говорят, что такой полупроводник обладает электронной проводимостью или является полупроводником n-типа. Атомы примеси, поставляющие электроны проводимости, называются донорами.

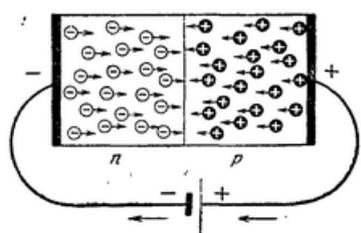
Рассмотрим случай, когда валентность примеси на единицу меньше валентности основных атомов. Трех валентных электронов атома недостаточно для образования связей со всеми четырьмя соседями. Поэтому одна из связей окажется не укомплектованной, и будет представлять собой место, способное захватить электрон. При переходе на это место электрона в одной из соседних пар возникает дырка, которая будет кочевать по кристаллу. Вблизи атома примеси возникает избыточный отрицательный заряд, но он будет связан с данным атомом и не может стать носителем тока. Таким образом, *в полупроводнике с примесью, валентность которой на единицу меньше валентности основных атомов, возникают носители только одного вида – дырки. Проводимость в этом случае называется дырочной, а о полупроводнике говорят, что он относится к p-типу. Примеси, вызывающие возникновение дырок, называются акцепторными.*

10.5.3 Электронно-дырочный переход. Полупроводниковый диод. Область монокристаллического полупроводника, в которой происходит смена проводимости с электронной на дырочную (или наоборот), называется электронно-дырочным переходом (p-n-переходом). Такой p-n-переход образуется в кристалле полупроводника, если в нем с помощью соответствующих примесей будут созданы участки с различной (n и p) проводимостью.

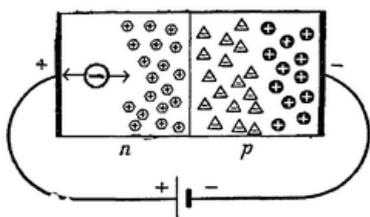


При контакте двух полупроводников с различными типами проводимости образуется контактный двойной слой. Электроны из n полупроводника будут диффундировать в дырочный полупроводник p. Это приводит к обеднению электронами n-полупроводника вблизи гра-

ницы и к образованию избыточного положительного заряда в n -кристалле, связанного с атомами донорной примеси. Диффузия дырок из p -полупроводника будет происходить в противоположном направлении и усилит образование избыточных отрицательных электрических зарядов на границе электронно-дырочного перехода. Таким образом, создается двойной электрический слой, который препятствует переходу электронов и дырок через границу раздела двух полупроводников и, поэтому, называется запирающим.

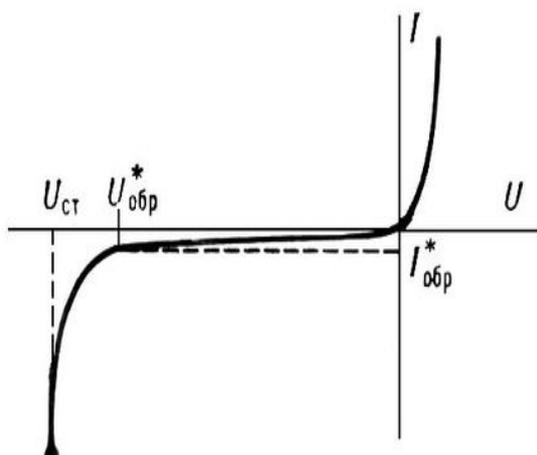


Действие внешнего электрического поля существенным образом влияет на сопротивление запирающего слоя. Подадим на p - n -переход внешнее напряжение такого направления чтобы плюс был подключен к p области, а минус – к n -области. Такое включение называется *прямым*. Тогда под действием электрического поля электрон в n -полупроводнике будут перемещаться к границе раздела полупроводников. Дырки в p -полупроводнике под действием того же поля будут двигаться навстречу электронам также к этой границе. При увеличении приложенного напряжения в полупроводнике толщина запирающего слоя будет непрерывно уменьшаться. При некотором значении граница p - n -перехода не будет представлять сопротивления для тока, вызываемого внешним напряжением.



Изменим полярность подключения полупроводникового диода. Дырки в p -полупроводнике и электроны в n -полупроводнике будут перемещаться от границы раздела в противоположные стороны. В этом случае около границы раздела будет увеличиваться размер запирающего слоя, в котором концентрация подвижных носителей тока – электронов и дырок – будет значительно меньше, чем в остальном объеме полупроводника. В области, обедненной подвижными зарядами, возрастает двойной электрический слой неподвижных зарядов противоположного знака.

10.5.3.1 На рисунке представлена *вольт-амперная характеристика полупроводникового диода*. Небольшой обратный ток обусловлен неосновными носителями.



Заметим, что диод может выдерживать обратное напряжение до определенного предела, после чего наступает пробой, аналогичный пробоем диэлектрика. Из сказанного выше следует, что полупроводниковый диод обладает свойством односторонней проводимости. Это свойство диода характеризуется коэффициентом выпрямления:

$$\alpha = \frac{I_{np}}{I_{обр}}$$

то есть отношением прямого и обратного токов, измеренных при одинаковых по величине прямом и обратном напряжении.

Обычно коэффициент выпрямления составляет величину в несколько сотен единиц, но может достигать и больших значений (10^5 – 10^6). Достоинством полупроводникового диода являются малые размеры и масса, длительный срок службы, высокая механическая прочность, высокий КПД, а недостатком – зависимость их параметров от температуры.

10.6 Словарь

1. Вакуумный диод – The vacuum diode- فراغ الصمام الثنائي
2. Вакуумный триод – Vacuum Triode- فراغ الصمام الثلاثي
3. Полупроводник – semiconductor- نصف ناقل
4. Рекомбинация – Recombination - اعادة التركيب-
5. Ионизация – ionization- التأين-
6. Самостоятельный газовый разряд – Independent gas discharge غاز التفريغ المستقل
7. Несамостоятельный газовый разряд – Gas discharge غاز التفريغ الغير المستقل
8. Плазма – Plasma- بلازما-
9. Электролит – Electrolyte- الالكتروليت-
10. Электролитическая диссоциация – Electrolytic dissociation- التفارق الكهربائي-
11. Вольт-амперная характеристика – The current-voltage characteristic السمة الحالية للجهد-
12. Электролиз – Electrolysis الالكتروليز
13. Первый закон Фарадея – Faraday's first law- اول قانون فاراد-
14. Второй закон Фарадея – The second law of Faraday ثاني قانون فاراد