

Механика

1. Кинематика – одномерное равноускоренное движение

Кинематикой называется раздел механики, изучающий движение тела, без исследования причин его действия. Одномерным равноускоренным движением называется движение, при котором за время t пройдено расстояние S со средней скоростью v . Так как скорость на всём промежутке менялась, введём понятие ускорения:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}.$$

При равноускоренном движении, $v = at$, а, значит, так как S является по сути площадью под графиком, то $S = \frac{vt}{2}$, (подставляя $v = at$ в $S = \frac{vt}{2}$ получаем формулы $S = \frac{at^2}{2} = \frac{vt}{2} = \frac{v^2}{2a}$) а, если старт движения приходился не из нулевой точки на плоскости, то можно ввести координаты и в таком случае движение будет описываться уравнением $S = S_0 + v_0t + \frac{at^2}{2}$.

2. Движение материальной точки по окружности. Скорость, ускорение

Для движения по заданой траектории введём понятие материальной точки: материальная точка - пренебрежение размерами, формой, по отношению к пройденному пути.

Рассмотрим простейшую модель: диск радиуса r вращается по окружности (путь точки за один оборот равен $l = 2\pi r$), тогда путь за часть оборота равен $l = \phi r$, где угол ϕ соответствует углу 2π . Тогда период, время оборота, обозначим за T , а частота $f = 1/T$, тогда $v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi fr$.

По второму закону Ньютона: сила направлена по центральной оси вращения (по радиусу) в центр, поэтому ускорение описывается как: $\frac{dv}{v} = \frac{dl}{r} = \frac{vdt}{r} \Rightarrow a = \frac{dv}{dt} = \frac{v^2}{r}$, а - называется центростремительным.

3. Сила. Масса. Вес.

Сила - причина изменения тела: изменение движения, траектории, скорости, но так же сила может деформировать тело. Имеет векторную природу, то есть, изменение в точке приложения может не быть эквивалентно первичному виду.

Масса - мера инертности тела, проявляется в воздействии на тело. А так же можно назвать мерой гравитации, проявляющейся в гравитационном взаимодействии.

Вес - воздействие тела на поверхность, в отсутствии иных сил, кроме сил притяжения между телом и природой поверхности (в примере - гирица стоит на весах и весит (оказывает воздействие на поверхность) с силой один ньютон (мера силы) на поверхность стола)

4. Законы Ньютона.

Фундаментальные законы, проверка которых возможна из всяческих следствий из них.

Первый закон: существуют системы отсчёта, в которых тело движется равномерно прямолинейно или находится в покое при отсутствии внешних сил (или действия этих сил скомпенсировано), называемые инерциальными.

Второй закон: в инерциальной системе отсчёта сила, воздействующая на тело, равна ускорению данного тела (мера изменения скорости) на массу (меру инертности тела). Равноценная форма записи $\Delta p = F\Delta t$

Третий закон: материальные точки взаимодействуют друг с другом по силе, по прямой, соединяющие эти точки с силами $F_{12} = -F_{21}$.

5. Импульс. Закон сохранения импульса. Реактивное движение.

1) для одной точки - взаимодействия нет, $F=0$, $p=0$ - в отсутствии внешних сил импульс не меняется

2) Пусть два тела взаимодействовали время Δt , тогда в третий закон $F_{12} = -F_{21}$, подставляем второй $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$,

тогда $\Delta p_1 = -\Delta p_2$, тогда $p'_1 - p_1 = -(p'_2 - p_2) \Rightarrow p'_1 + p'_2 = p_1 + p_2$.

3) Система из двух тел действует внешние силы. Пусть на $A - F_A$, $B - F_B$, тогда для каждого закон Ньютона:

$$\begin{cases} p_A = (F_A + F_{AB})\Delta t \\ p_B = (F_B + F_{BA})\Delta t \end{cases}$$

Пусть тогда $p_A + p_B = p$, тогда, выполняется второй закон Ньютона для всей системы в целом и тогда третий закон для импульса, а если внешняя сила 0, то и импульс 0, что называется законом сохранения импульса. Реактивное движение - движение, основанное на сохранении импульса - сколько вышло импульса, столько и система в целом потеряла, и по третьему закону Ньютона, если приложить силу в другом направлении, то вся система отправится в другое (идеальный пример - лодка в воде, и из лодки бросают параллельно корме камень, который заставляет двигаться лодку в другом направлении)

6. Центр масс. Система центра масс. Приведённая масса.

Изменение суммарного импульса есть: $\frac{\Delta p_A + p_B}{\Delta t} = \frac{\Delta(m_A + m_B)}{\Delta t} = F_A + F_B = F$ - суммарная внешняя сила

Поделим тогда суммарный импульс поделим на суммарную массу:

$$\frac{\Delta(\frac{m_a v_a + m_b v_b}{m_a + m_b})}{\Delta m} = \frac{F_A + F_B}{m_A + m_B} = \frac{F}{m} = a_0$$

a_0 - отношение суммарной силы к полной массе.

Тогда напомним суммарную скорость системы: $v_0 = \frac{m_a v_a + m_b v_b}{m_a + m_b} = \frac{p}{m} \Rightarrow \frac{\Delta v_0}{\Delta t} = a_0$,

Отсюда: координата центра масс $r_0 = \frac{m_a r_a + m_b r_b}{m_a + m_b} \Rightarrow \frac{\Delta r_0}{\Delta t} = v_0$.

Центр масс треугольника находится в точке пересечения медиан

При описании движения системы, в которой не имеет значения ничто, кроме материальной точки, то перейдём в начало координат, тогда для двух тел: $m_a r_a + m_b r_b = 0 \Rightarrow \frac{m_a}{m_b} = \frac{l_a}{l_b}$. При столкновении двух тел

$$p_1 + p_2 = 0, p'_1 + p'_2 = 0.$$

В системе двух тел относительное ускорение

$$a = a_1 - a_2 = \frac{F_1}{m_1} - \frac{F_2}{m_2} = F_1 \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \Leftrightarrow \frac{F}{m_{\text{прив}}}$$

$m_{\text{прив}}$ - масса приведённая, равная $\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$

7. Упругий и неупругий удар.

Пусть частица 1 налетает со скоростью v_1 на покоящуюся частицу 2 той же массы ($v_2 = 0$) так, что они остаются на той же прямой и движутся со скоростями u_1, u_2 .

Тогда, сокращая массу в законах сохранения импульса и энергии, получаем:

$$v_1 = u_1 + u_2 \text{ и } v_1^2 = u_1^2 + u_2^2.$$

Соберём слева величины для частицы 1 и справа для частицы 2:

$$v_1 - u_1 = u_2 \text{ и } v_1^2 - u_1^2 = u_2^2.$$

Разложив разность квадратов, находим $u_2 = v_1$ и $u_1 = 0$.

8. Механическая работа. Мощность. Потенциальная энергия в однородном поле тяжести.

Из механики выпишем формулу свободного падения $v_2 = 2gh$ впишем массу и поделим на два:

$$\frac{mv^2}{2} = mgh;$$

9. Кинетическая и потенциальная энергии. Закон сохранения механической энергии.

10. Вращательное движение твердого тела. Кинетическая энергия. Момент инерции.

11. Вращательное движение твердого тела. Момент силы и момент импульса.

12. Закон всемирного тяготения. Сила тяжести. Потенциальная энергия гравитационного поля.

13. Первая и вторая космическая скорость. Законы Кеплера.

14. Упругость. Закон Гука. Модуль Юнга. Пластические деформации.

15. Закон Паскаля. Сила Архимеда. Уравнение Бернулли. Формула Торричелли.
16. Гидродинамика вязкой жидкости. Определение вязкости методом Стокса.

МКТ и термодинамика

1. Основные положения МКТ. Молекулы. Число Авогадро.

Основные положения:

1. Все физические тела состоят из мельчайших частиц - молекул, атомов, других.
2. Частицы непрерывно и беспорядочно движутся.
3. Частицы взаимодействуют друг с другом.

Броуновское движение - беспорядочное самопроизвольное движение мелких частиц в жидкости. Поскольку жидкость не сплошная, а состоит из молекул, возникают флуктуации - неуравновешенные случайные отношения сил, возникающих при хаотичных ударах молекул

Массы нуклонов - одинаковые. Тогда масса атома, из-за пренебрежительно малой массы электрона, массе нуклона $m_n = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг - атомная единица массы, умноженной на количество в атоме.

Тогда в 1 грамме $\frac{1}{m_n} = 6,02 \cdot 10^{23}$ нуклонов. Это число называется числом Авогадро, N_A атомов водорода имеют массу 1 грамм, N_A атомов кислорода - 16 граммов. Такое количество атомов или молекул называется 1 моль, его масса граммов численно равна его атомной (молекулярной) массе в атомных единицах. Опыт показал, что моль любого газа при нормальных условиях занимает один и тот же объем 22,4 литра.

2. Основное уравнение МКТ

Основное начало (нулевое начало):

- 1) всякая изолированная система рано или поздно приходит термодинамическое равновесия, когда прекращаются все макроскопические процессы. Это состояние транзитивно, что позволяет ввести температуру как меру универсальную характеристику тел в равновесии. И определять саму температуру количественно по хорошо заметным изменениям в одном из тел.

Первое начало:

- 1) Отражает закон сохранения энергии. $\Delta Q = \Delta U + \Delta A$.

Второе начало:

- 1) Самопроизвольный переход тепла от холодного тела к горячему невозможен.
- 2) Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы совершение работы за счёт охлаждения теплового резервуара.
- 3) Процессы в природе идут в таком направлении, что менее вероятные состояния заменяются на более вероятные

Третье начало:

- 1) Описывает особенности поведения физических величин при температурах, близких к абсолютному нулю. Существенно опирается на понятие энтропии. Можно сформулировать как абсолютный ноль не достижим за конечное число действий.

Необратимость процессов: теплопроводность, диффузия, вязкость, расширение газа в пустоту

Закон Алины Шавалиевой: брёвна с Глебами Мошкинами могут перемещаться.

3. Тепловое равновесие. Температура.

В термодинамике различают упорядоченное и хаотичное/неупорядоченное/беспорядочное движение.

Упорядоченное может переходить в неупорядоченное, но обратное невозможно - фундаментальный опытный факт.

Тепловое движение: беспорядочное движение частиц, из которых состоят физические тела. На макроскопическом движении тел это не отражается.

Тепловое равновесие: состояние к которому рано или поздно приходят тела, находящиеся в тепловом контакте (то есть с возможностью передачи энергии неупорядоченного движения молекул)

Термометр: устройство, содержащее термометрическое тело (ртуть, спирт...) по мере нагрева расширяется, а расширение доступно макроскопическому изменению.

Транзитивность теплового равновесия: если два тела А и В находятся в тепловом равновесии друг с другом, то они приводят к одинаковым показаниям термометра. Как показал опыт, распространяется на бесконечное количество любых тел.

Температура: общая характеристика тел в тепловом равновесии, определяемая количественно по телу, выбранному в качестве термометра.

Применительно к нагреву идеального газа: можно напрямую связать температуру идеального газа со средней кинетической энергией его молекул. Тогда введём температуру так, чтобы:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT,$$

где средняя кинетическая энергия молекулы берётся в джоулях (тех же, что и в механике). Температура T в кельвинах: 1К соответствует 1/100 интервала между точками кипения и замерзания воды при нормальном давлении, 0К - абсолютный ноль - имеет температуру -247°С.

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

4. Уравнение состояния идеального газа. Изопроцессы в газах.

Изменение импульса всех отразившихся молекул за единицу времени и есть средняя сила, действующая на стенку со стороны молекул, а сила на единицу площади стенки - давление $p = \frac{F}{S}$.

Скорость должна быть дважды: ей пропорциональны импульс (а значит, и сила) и частота ударов об стенку. Перпендикулярно стенке движется 1/3 всех молекул. А значит формула выглядит как $p = \frac{1}{3}n m v^2$

При ударе N молекул массы m о стенку площади S за время t , возникает средняя сила $F = N m a$, где ускорение $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{2v}{t}$. Число молекул N молекул, достигающих стенки за t , есть 1/6 всех молекул в цилиндрическом объёме V с сечением S и длиной $l = vt$ при концентрации n :

$$N = \frac{1}{6}nV = \frac{1}{6}nSl = \frac{1}{6}Svt.$$

Тогда давление:

$$p = \frac{F}{S} = n \frac{m a}{S} = \frac{1}{6}nSvt \frac{m}{S} \cdot \frac{2v}{t} = \frac{1}{3}n m v^2.$$

Введя температуру как $\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT$, получаем для давления:

$$p = \frac{1}{3}n m v^2 = \frac{2}{3}n \frac{mv^2}{2} = \frac{2}{3}n \frac{3}{2}kT = nKT.$$

Представим концентрацию как отношение числа молекул в заданном количестве газа к его объёму $n = \frac{N}{V}$, число

молекул как отношение данной массы газа к массе одной молекулы $N = \frac{M}{m}$, массу моля газа $\mu = N_A m$, получаем

$$p = nKT = \frac{M}{Vm}kT = \frac{M}{Vm N_A}N_A kT = \frac{M}{V\mu}RT,$$

получаем $pV = \frac{M}{\mu}RT = \nu RT$ — уравнение Менделеева-Клайперона. Оно связывает объём, давление,

температуру заданного количества газа. $\frac{M}{\mu} = \nu$ - число молей газа. $R = N_A k = 8,3 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ - универсальная

газовая постоянная. Если интересуют именно физические свойства как газа, то

$$p = \frac{1}{3}n m v^2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{N_A}{V} \cdot \frac{mv^2}{2} = \frac{2}{3} \frac{U}{V}, \text{ откуда } U = \frac{3}{2}pV.$$

Если молекулы ударяются с обеих сторон о поршень массы M (который движется в цилиндре без трения), то поршень так же будет совершать микроскопические движения, причём его средняя кинетическая энергия будет такая же $\frac{Mv^2}{2} = \frac{1}{2}kT$. (Доказывается путём применения уравнений механики к соударениям поршня и молекул и усреднения по большому числу молекул).

5. Работа и теплота. Первое начало термодинамики.

Внутренняя энергия тела: не зависит от движения или положения тела (системы тел) как целого. (не зависит от выбора системы отсчёта). Равна сумме кинетической энергии всех молекул тела и потенциальной энергии их взаимодействия. Способы изменения внутренней энергии: передать энергию – упорядоченного движения (работа) и/или – неупорядоченного (теплота). Виды теплопередачи (энергии неупорядоченного движения):

- 1) Теплопроводность: при непосредственном контакте тел (соударение молекул двух тел и передача энергии вглубь тел при последующих соударениях). Без переноса вещества.
- 2) Конвекция: перенос порций вещества разной температуры и приведение их в тепловой контакт. Пример: жидкость и газ. Нагретое поднимается, холодное опускается.
- 3) Излучение: передача энергии через электромагнитное поле. (Солнце)

Пусть в цилиндре сечением S под давлением идеального газа p поршень перемещается на Δx

Количество теплоты - энергия, передаваемая при теплопередаче. Связана с изменением температуры, массой вещества и его природой, выражаемой через теплоёмкость:

$$Q = c m \Delta T$$

Количество теплоты, содержащееся в теле, можно представить, если вообразить его передачу телу, находящемуся при абсолютном нуле.

Пусть в цилиндре сечением S давлением газа p поршень перемещается на Δx , тогда изменение объёма есть ΔV , а совершённая работа газа при постоянном давлении $\Delta A = F \Delta x = p S \Delta x = p \Delta V$

Первое начало термодинамики: количество теплоты ΔQ , переданное газу расходуется на изменение его внутренней энергии ΔU и на совершение им механической работы ΔA .

Это формула выражает два способа передачи энергии газу: нагрев (теплота) и сжатие (работа). В случае газа результат обоих способов зависит от траектории процесса на графике ($p; V$) А внутренняя энергия ΔU зависит только от состояния тела - от точки на графике.

Отсюда же вытекает наличие трёх частных случаев:

- 1) $\Delta Q = 0$ - адиабатический процесс. Без передачи тепла (Теплоизоляция)
- 2) $\Delta U = 0$ - изотермический процесс (Постоянная температура)
- 3) $\Delta A = 0$ - изохорический процесс (При постоянном объёме)

6. Теплоемкость идеального газа. Адиабатический процесс.

Теплоёмкость - количество теплоты, необходимое для нагрева на 1 градус заданного количества вещества. Так же

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}.$$

В частных случаях для идеального газа:

- 1) Постоянный объём:

Работа не совершается, $\Delta Q = \Delta U = \frac{3}{2} R \Delta T$, так же $c_V = \frac{3}{2} R$.

- 2) При постоянном давлении:

Работа $\Delta A = p \Delta V = \Delta(pV) = \Delta(RT) = R \Delta T$, вклад в теплоёмкость $\frac{\Delta A}{\Delta T} = R$.

Отсюда отношение Майера $c_p - c_V = R$. Внутренняя энергия не зависит от объёма, поэтому и любых процессах можно записать $\Delta U = c_V \Delta T$ и первое начало $\Delta Q = c_V \Delta T + p \Delta V$

- 3) При постоянной температуре теплоёмкость теряет смысл.
- 4) При отсутствии теплопередачи - так же.

Адиабатический процесс - термодинамический процесс в макроскопической системе, при котором система не обменивается теплотой с другими телами. Например, сжатие газа в компрессоре, тщательно теплоизолированном; звуковая волна - как показал опыт, в области сжатия газ нагревается, но тепло не успевает перейти в относительно холодную область разрежения.

Вывод уравнения:

- 1) $\Delta Q = 0$.

- 2) По первому началу термодинамики: $\Delta Q = c_V \Delta T + p \Delta V = 0$.

- 3) Из трёх переменных p, V, T одну можно исключить при помощи $pV = RT$. Исключаем p : $c_V \Delta T + RT \frac{\Delta V}{V} = 0$.

- 4) Теперь разнесём по разные стороны: $\frac{\Delta T}{T} = - \frac{R}{c_V} \cdot \frac{\Delta V}{V}$.

- 5) Ситуация вида $\frac{\Delta y}{y} = \alpha \frac{\Delta x}{x}$, зная формулы $(1+z)^\alpha \approx 1 + \alpha z$, пусть тогда $y_0 = x_0^\alpha$, теперь для x и y получили

$y = y_0 + \Delta y$ и $x = x_0 + \Delta x$. Поделим теперь $y_0 + \Delta y = (x_0 + \Delta x)^\alpha$ на $y_0 = x_0^\alpha$:

$$1 + \frac{\Delta y}{y_0} = \left(1 + \frac{\Delta x}{x_0}\right)^\alpha \approx 1 + \alpha \frac{\Delta x}{x_0}, \text{ сократим } 1: \frac{\Delta y}{y_0} \approx \alpha \frac{\Delta x}{x_0}.$$

- 6) Преобразуем тождество к виду $\frac{R}{c_V} = \frac{c_p - c_V}{c_V} = \gamma - 1, (\gamma = \frac{c_p}{c_V})$.

7) Получаем $\frac{\Delta T}{T} = (1 - \gamma) \frac{\Delta V}{V}$ и его решение $TV^{\gamma-1} = \text{const}$. Это и есть уравнение адиабаты. Его можно переписать в любых двух переменных p, V, T используя $pV = RT$. Получаем формулу Пуассона $pV^{\gamma} = \text{const}$. Величина γ - показатель адиабаты.

7. Тепловые машины. Цикл Карно, его КПД.

Тепловая машина - машина, преобразующая тепло в механическую энергию регулярно за счёт расширения рабочего тела. Устройство должно быть замкнутым, без обмена с окружающей средой расширяющегося газа. В противном случае - передача тепла от горячего к холодному. Чтобы получить ненулевую работу, нужно сжимать и расширять газ при разных T .

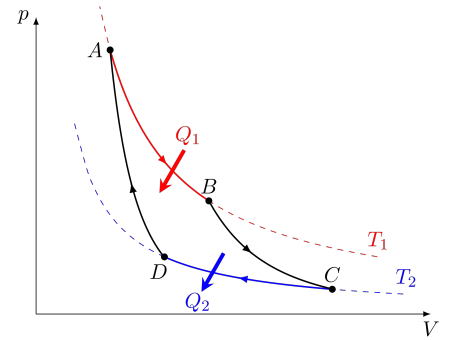
Чтобы переводить работу в тепло, процесс должен быть равновесным, с бесконечно малым перепадом температур. Иначе - бесполезное использование тепла. Поэтому рабочий ход - по изотерме. Обратный ход - так же по изотерме. Сжимать газ выгодно как можно более холодном состоянии поэтому нужно передавать сразу тепло холодильнику. Переходить между изотермами надо - во избежание потерь тепла - без теплообмена, по адиабате.

Цикл Карно имеет бесконечно малую мощность.

Цикл Карно является обратимым, так как нет необратимого рассеяния тепла.

Резервуар с газом должен быть закрыт, без обмена с окружающей средой. В итоге — взаимосвязь эффективности, равновесности, обратимости.

Пусть над 1 молеи газа совершается обратный цикл из 2 изотерм и 2 адиабат. Процессы на участках:
 12 - Изотермическое получение тепла и его непрерывное преобразование в механическую работу. Рабочий ход.
 23 - Адиабатическое расширение с охлаждением
 34 - изотермическое сжатие при низкой температуре, передача тепла холодильнику.
 41 - Адиабатическое сжатие с нагревом



Работа - ненулевая и равна площади внутри цикла.

Рассчитаем теплоту и работу:

1) На изотермах 12 и 34:

$\Delta U = 0$, переданное тепло Q_{12} по изотерме 12 равно работе газа $A_{12} = Q_{12}$

Аналогично на участке 3-4: $A_{34} = Q_{34}$.

2) На адиабатах 41 и 23:

$\Delta U_{23} = -\Delta U_{41}$, так как это переход с изотермы 12 на изотерму 34 и обратно, то есть $\Delta U_{23} + \Delta U_{41} = 0$. А поскольку $\Delta Q = 0$, то и для работ $A_{23} + A_{41} = 0$.

3) Работа на изотермах A_{12} и A_{34} :

Требуется сравнить между собой площади под двумя отрезками гипербол 12 и 34. Докажем что эти кривые можно получить одну из другой, равномерно сжав/растянув всю плоскость по осям абсцисс и ординат.

Найдём растяжение по оси объёмов V .

На адиабатах 2-3 и 1-4 имеет место $T_2 V_2^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1}$ и $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1}$. Учитывая $T_2 = T_1$ и $T_3 = T_4$, делим одно на другое и получаем $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} = \alpha_V$.

Найдём растяжение по оси p :

Из $p_1 V_1 = RT_1$ и для 4, получаем с учётом связи объёмов $\frac{V_4}{V_1} = \frac{V_3}{V_2}$ и температур $T_2 = T_1$ и $T_3 = T_4$:

$\frac{p_1}{p_4} = \frac{T_1}{T_4} \cdot \frac{V_4}{V_1} = [\text{заменяя 14 на 23}] = \frac{T_2 V_3}{T_3 V_3} = \frac{p_2}{p_3} = \alpha_p$ - коэффициент растяжения по V .

Тогда отношение площадей под изотермами $\frac{A_{12}}{A_{34}} = -\alpha_p \alpha_V = \frac{p_4 V_4}{p_1 V_1} = -\frac{T_4}{T_1}$.

Введём коэффициент полезного действия - отношения полезной работы (полной, на всём цикле) к затраченному теплу.

$$\eta = \frac{A_{\text{полн}}}{Q_{\text{затрач}}} = \frac{A_{12} + A_{34}}{Q_{12}} = \frac{A_{12} - A_{41}}{A_{12}} = 1 - \frac{A_{43}}{A_{12}} = 1 - \frac{T_3}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Таким образом, в нуле по Кельвину формально $\eta = 1$, однако это не достижимо, поэтому нельзя сделать двигатель, который всё тепло переводит в работу.

8. Второе начало термодинамики. Обратимые и необратимые процессы.

Второй закон термодинамики указывает направление возможных энергетических превращений - направление процессов, и тем самым выражает необходимость процессов в природе. Этот закон был установлен путём непосредственного обобщения опытных фактов.

Формулировка Р. Клаузиуса: невозможно перевести тепло от более холодной к более горячей системы при отсутствии других одновременных изменений в обеих системах или в окружающих телах. Тепло от более горячего само переходит к более холодным. *Так же из него вытекает заключение о необратимости процесса теплопередачи.*

Необратимыми называются процессы, которые могут самопроизвольно протекать лишь в определённом направлении, в обратном направлении они могут протекать только при внешнем воздействии. Все макроскопические процессы протекают только в одном направлении.

Обратимый процесс - процесс, который можно провести в прямом и обратном направлениях через одни и те же промежуточные состояния без изменений в окружающих телах. *Обратимый процесс должен протекать очень медленно, чтобы все промежуточные состояния были равновесны.* Равновесное состояние - состояние, при котором температура и давление во всех точках системы одинаковы.

Равновесное состояние соответствует хаотичному движению молекул, то есть система с точки зрения микростояний приходит к полному хаосу. Движения молекул - механическое движение, являющееся обратимым. В это же время все необратимые процессы, как теплообмен, являются следствием механических движений. Для соединения этих фактов, Больцмана использовал понятия вероятности. Так, состояние газ, при котором молекулы движутся хаотично является наиболее вероятным, наиболее вероятным является и равномерное распределение молекул по объёму сосуда.

Изменения процессов в макроскопических телах крайне мала, однако для микроскопических объектов это отклонение нормально и называется флуктуациями системы.

9. Фазы и компоненты. Агрегатные состояния. Уравнения теплового баланса.

Компоненты - химически разные вещества.

Агрегатные состояния - твёрдое, жидкое, газ, плазма, конденсат Бозе-Энштейна...

Простые признаки: на макроуровне - несохранение формы/объёма.

На микроуровне: структура, ближний дальний порядок взаимодействия

Фазы: определяется через наличие границ, разделяющих области с физически разными свойствами вещества.

Фазовый переход: изменение

- 1) агрегатного состояния: лёд-вода-пар;
- 2) структуры: тетрагональная - сингальная решётка
- 3) свойств: сверхпроводимость.

Равновесие фаз: термодинамическое: $T=T$, переход молекул жидкость-пар.

Процессы превращений: испарение, конденсация, плавление, кристаллизация, возгонка.

Известные отношения:

- 1) Вода $T_1 + T_2 = T_c$ = смесь;

$$m_1 c_B (T_1 + T_c) = m_2 c_B (T_c - T_2)$$

Отсюда пропорция $\frac{m_1}{m_2} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}$

- 2) Масса m , теплоёмкость c и температуры - T_0 и T_1 . Лёд изначально при $T = 0$. λ - теплота плавления льда.

Таяние льда + его нагрев до T_1 = остывание воды от T_0 и T_1 :

$$m_{\text{л}} \lambda + m_{\text{л}} c_B T_1 = m_{\text{в}} c_B (T_0 - T_1), \text{ откуда } \lambda = \frac{m_{\text{в}} c_B (T_0 - T_1)}{m_{\text{л}}} - c_B T_1$$

$$\text{Табличные значения } \lambda = 3,32 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, c_B = 4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

Скрытой теплотой плавления таяния льда хватит на нагрев той же массы воды от 0°C до 80°C . А теплоты парообразования - на нагрев до 500°C .

10. Насыщенный пар. Влажность воздуха. Диаграмма состояний.

Насыщенный пар: динамическое равновесие с жидкостью. Замкнутый объём или очень влажная погода.

Давление насыщенного пара не зависит от объёма (например, при сжатии сосуда), так как поддерживается переходом молекул из воды в пар и обратно. Оно растёт при нагреве и падает при охлаждении - быстрее, чем давление идеального газа, так как в $PV = \nu RT$ растёт и температура и число молей.

Относительная влажность - отношение парциального давления паров воды в воздухе к равновесному давлению насыщенных паров воды в воздухе

11. Газ Ван дер Ваальса. Метастабильные состояния.

12. Поверхностное натяжение. Капиллярные явления.

13. Идеальный и реальный газ. Длина свободного пробега. Кинетическая природа диффузии, теплопроводности, вязкости.

Электричество и магнетизм

1. Электрический заряд и его свойства. Закон Кулона. Электрическое поле.

Два неподвижных точечных заряда взаимодействуют с силой, выражающийся через вектор. Он направлен по прямой, соединяющий эти заряды:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 0,9 \cdot 10^{10} \text{ (м/ф)}, \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ (м/ф)}$$

Представление $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{q_1}{r^2} q_2 = E_1 q_2$, где E имеет реальный смысл - заряд 1 создаёт поле E, равное

$E_1 = k \frac{q_1}{r^2}$, он направлен по силе. Тогда для второго заряда: $F = E_1 q$. Сила, действующая на единичный положительный заряд

2. Теорема Гаусса.

Математический эквивалент и обсуждение закона Кулона:

1) Окружим заряд замкнутой поверхностью. Геометрически очевидно, что число силовых линий, пересекающих её (с учётом направления), сохраняется при любых деформациях поверхности;

2) Введём поток вектора напряжённости поля через маленькую площадку $\Delta\Phi = E\Delta S$, через всю: $\Phi = \sum E\Delta S$;

3) Рассмотрим поток поля E через сферическую поверхность, в центре которой находится точечный заряд.

$$\epsilon_0 \Phi = \epsilon_0 E S = \frac{q}{4\pi r^2} 4\pi r^2 = q \Leftrightarrow \Phi = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Теорема Гаусса: поток электрического поля через замкнутую поверхность даётся формулой (1) при любой форме поверхности и любом распределении суммарного заряда q внутри неё.

Закон суперпозиции позволяет обобщить выражение (1) на любое пространственное распределение зарядов внутри любой замкнутой поверхности. Поля складываются векторно, а потоки скалярно:

$$\Delta\Phi = (E_1 + E_2)\Delta S = E_1\Delta S + E_2\Delta S = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2.$$

3. Проводники в электростатическом поле.

1) Точечный заряд:

$$\Phi = \frac{q}{\epsilon_0}$$

2) Сплошной заряженный шар - так же, но с изменённым радиусом

3) Линейный заряд: окружаем заряженную линию бесконечным цилиндром, берём участок длины l.

Плотность заряда: $\rho = q/l$, площадь цилиндра: $S = 2\pi r l$:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{q}{\epsilon_0 S} = \frac{\rho l}{\epsilon_0 2\pi r l} = \frac{\rho}{\epsilon_0 2\pi r}.$$

4) Заряженная плоскость:

Поверхностный заряд σ , $q = \sigma S$, площадь 2S (с двух сторон поле):

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{q}{\epsilon_0 S} = \frac{\sigma S}{\epsilon_0 2S} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}.$$

5) Заряженная поверхность металла:

Поле направленно только в одну сторону, поэтому просто больше в два раза чем в плоскости:

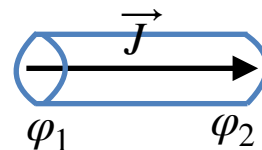
$$\epsilon_0 E = \sigma.$$

4. Плоский конденсатор.

Плоский конденсатор - две пластины площадью S , расстояние между которыми - d . Поле в таком случае снаружи 0, и внутри: двойное $\epsilon_0 E = \sigma$. Поток поля: $\epsilon_0 \Phi = q$. Теперь введём понятие напряжение $U = Ed$ - смысл: рот по переносу единичного заряда $A = Fd = Fqd = q(Ed) = qU$.

Назовём ёмкость: $C = \frac{q}{U} = \frac{q}{Ed} = \frac{\epsilon_0}{\sigma} \cdot \frac{\sigma S}{d} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$.

Энергия же конденсатора - работа по зарядке конденсатора от нуля путём переноса заряда с одной обкладки на другую. Поле потенциально, поэтому заряд можно переносить как по прямой перпендикулярно обкладкам вдоль линий поля ($U = Ed$), так и по любой траектории. Процесс обратим: заряженный конденсатор может совершить боту разряжаясь. Работа в таком случае: $A = qU$. Так же заметим, что напряжение



пропорционально заряду, $U = \frac{q}{C}$. Поэтому $A = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$, выразим заряд через энергию электрического поля, независимость от источника:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{CE^2 d^2}{2} = \frac{\epsilon_0 S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \epsilon_0 S d \frac{E^2}{2} = \epsilon_0 V \frac{E^2}{2}.$$

Независимость от размеров и формы конденсатора показывает: энергия конденсатора не зависит от его конструктивных параметров. Она вся сосредоточена в поле между обкладок:

$$w = \epsilon_0 \frac{E^2}{2}.$$

Необходимо отличать энергию электрического поля в конденсаторе от работы источника по его зарядке. Эта работа выполняется при постоянной ЭДС: $W_\epsilon = \epsilon \Delta q$, поэтому удвоенной энергии: $W_\epsilon = \epsilon q = Uq = 2W$.

5. Напряжение. Разность потенциалов.

Обозначим обкладки конденсатора буквами А и В и выберем в пространстве вне конденсатора некоторую точку С. При переносе заряда напрямую между обкладками совершается работа $F_{AB} = qU_{AB}$.

Напряжение: U_{AB} - работа по переносу единичного заряда не только между обкладками, но и между любыми точками А и В.

Перенос любого заряда между любыми точками можно представить как перенос этого заряда через промежуточную точку С. Примем её за начало отсчёта и назовём потенциал произвольной точки А работу по переносу единичного заряда из А в эту точку. Обозначение: $\varphi_A = U_{AC}$. Сама точка имеет нулевой потенциал $\varphi_C = U_{CC} = 0$, тогда $U_{AB} = U_{AC} - U_{BC} = \varphi_A - \varphi_B$.

В однородном поле (обобщая конденсатор), в силу $U = Ed$: $E = \frac{\Delta \varphi}{\Delta x}$.

6. Диэлектрики в электростатическом поле.

При поляризации:

- а) полярные молекулы поворачиваются
 - б) в неполярных - молекулы зарядов смешиваются в объёме
- В обоих случаях создаётся дипольный момент.

На обкладках конденсатора есть свободный заряд с плотностью $\sigma_{\text{своб}}$, на поверхности диэлектрика выступает связанный электрический заряд $\sigma_{\text{диэл}}$, частично компенсирующий поле обкладок. Внутри диэлектрика сохраняется электронейтральность. Суммарное поле обозначим $\epsilon_0 E = \sigma$, тогда $\epsilon E = \sigma_{\text{своб}} + \sigma_{\text{диэл}}$, так же $\sigma = \epsilon \epsilon_0 E$, где ϵ - диэлектрическая проницаемость.

Поле самих обкладок $-\sigma_{\text{диэл}} = \sigma_{\text{своб}}$.

Пусть в конденсаторе несколько слоёв разных диэлектриков, и все параллельны обкладкам. Поле $-\sigma_{\text{диэл}} = \sigma_{\text{своб}}$ не зависит от диэлектрика и проходит без изменения через все слои. В каждом слое оно делится на местное ϵ в силу формулы $\sigma_{\text{своб}} = \epsilon \epsilon_0 E$.

Точечный заряд: $\epsilon_0 E = \frac{q}{4\pi \epsilon r^2}$.

Заряженная плоскость: $\epsilon_0 E = \frac{\sigma_{\text{своб}}}{2\epsilon}$.

Плоский конденсатор: $\epsilon_0 E = \frac{\sigma}{\epsilon}$.

7. Магнитное поле. Сила Лоренца. Сила Ампера.

Через магнитное поле осуществляются взаимодействия электрических потоков, постоянных магнитов и токов с магнитами.

От характера движения электронов в атомах вещества, от взаимного расположения их орбит зависят магнитные свойства вещества.

Магнетизм, проявляющийся в магнитах и компасах, известен с древности:

- 1) У магнита два полюса, и если исключить один из полюсов, магнитный поток закончится, а значит, магнитных зарядов не существует.
- 2) Линии, как выяснилось на опыте, всегда замкнуты или, условно, уходят на бесконечности (Линии магнитной индукции представляют собой окружности на с центрами на оси тока, расположенные в плоскостях, перпендикулярных к направлению тока).
- 3) Количественно поле характеризуется индукцией магнитного поля – векторной величиной B
- 4) В однородном поле заряд, влетевший перпендикулярно линиям поля, движется по окружности. Это означает: сила перпендикулярна скорости
- 5) В общем случае на движущиеся заряды действует сила, пропорциональная скорости. Она максимальна, если скорость и поле взаимно перпендикулярны, а её величина $F = qvB$. Направления подчиняются правилу левой руки
- 6) На провод с током в магнитном поле действует сила. Она пропорциональна току и перпендикулярна проводу. Она максимальна, когда провод перпендикулярен линиям поля.
- 7) Прямой провод с током создаёт вокруг себя магнитное поле. Линии поля (определяемые, например, по компасу) представляют собой окружности в плоскостях, перпендикулярных проводу. Величина поля обратно пропорциональна расстоянию до провода. Направление поля даётся правилом правого винта (штопора, буравчика и т.д.)
- 8) Ток есть направленное движение зарядов, поэтому всё сказанное относится и к токам. Направления провода, тока и скорости совпадают
- 9) Движущиеся заряды создают магнитное поле. Его величина пропорциональна скорости. Наблюдатель регистрирует максимальное поле, если скорость заряда перпендикулярна направлению от заряда к наблюдателю. Заряд, летящий прямо на наблюдателя, поля не создаёт

Сформулируем правило буравчика: если по направлению тока мысленно ввинчивать буравчик, то направление вращения ручки буравчика укажет направление линий магнитной индукции.

На заряд, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца, равная $F_L = qvB \sin \alpha$. Где $\sin \alpha$ - угол между векторами \vec{v} и \vec{B} .

Пусть теперь электрон влетает в однородное магнитное поле, тогда он начинает движение, согласно силе Лоренца, по окружности с ускорением $a = \omega t$. Закон Ньютона тогда принимает вид $m\omega t = qvB$, откуда $\omega = \frac{eB}{m}$ - циклотронная частота, радиус траектории $\omega R = v$, а это значит, что скорость не зависит от изначального значения.

Сила же, действующая на провод с током, есть сумма взаимодействия на все его отдельно взятые электроны.

Пусть за t прошёл заряд q , тогда: $q = It$, $l = vt$ то $qv = Itv = Il$.

Выразим через заряд и подставим в силу Лоренца: $F = qvb = BIl$.

8. Магнитное поле проводника с током, кольца, катушки. Магнитный поток. Теорема о циркуляции.

Начнём с того, что магнетизме магнитных зарядов нет. Магнитное поле создаётся движением зарядов, а на практике – прежде всего электрическим током. Поэтому удобно взять за основу бесконечно длинный прямой провод, по которому течёт постоянный ток.

Как показал опыт, величина индукции магнитного поля вокруг прямого провода с током можно записать как $Bl = \mu_0 I$, где $l = 2\pi r$ - длина воображаемой окружности, проведённой по линии поля на расстоянии r от провода. Поле направлено по окружностям вокруг провода и постоянно на них.

Тогда $B = \frac{\mu_0 I}{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I}{r} = k \cdot \frac{2I}{r}$, где $k = \frac{\mu_0}{2\pi} = 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

Можно обойти провод не по окружности, а по произвольной кривой, тогда следует разбить контур на короткие участки и вместо BI сосчитать сумму слагаемых вида $B \Delta L \cos \alpha$ (скалярных произведений вектора \vec{B} и элемента длины контура $\Delta \vec{l}$). Результат: $\sum B \Delta l \cos \alpha$ ($\sum B \Delta l \cos \alpha$ называется циркуляцией магнитного поля).

Провод с током может быть любой толщины, проводов может быть несколько. Тогда - теорема о циркуляции: циркуляция вектора магнитной индукции B по любому замкнутому контуру равна полному току, протекающему внутри этого контура.

По фундаментальным законам природы, как выяснилось на практике, теорема о циркуляции может принимать вид $\epsilon_0 \Phi = q$.

Магнитным потоком Φ называется физическая величина, численно равная произведению магнитной индукции B на площадь поперечного сечения S провода, если поле в нём однородно: $\Phi = BS$.

9. Закон электромагнитной индукции Фарадея.

Обобщив общие опытные факты, Фарадей смог сформулировать: при изменении магнитного потока $\Phi = BS$, проходящего через замкнутый проводящий контур, в нём возникает электродвижущая сила (эдс):

$$\epsilon = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

Поток может меняться за счёт поля и площади контура. Направление и эдс определяются правилом Ленца: индукционный ток противодействует вызвавшей его причине.

Рассмотрим простейшую конструкцию - рамка в виде буквы «П» с подвижной перемычкой, поле B перпендикулярно плоскости рамки, сопротивление рамки R не меняется при движении перемычки.

Сила Лоренца $F = qvB$ перемещает заряд по перемычке, в результате чего в замкнутом контуре возникает индукционный ток. Работа этой силы совершается только на перемычке, а на «П» сила, действующая на заряд, приложена поперёк провода и работы не совершает. Модуль эдс (здесь работа силы Лоренца в расчёте на единичный заряд):

$$|\epsilon| = \frac{Fl}{q} = \frac{qvBl}{q} = vBl = \frac{\Delta x}{\Delta t} \cdot Bl = B \cdot \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

По перемычке течёт индукционный ток, и на него действует сила Ампера, по правилу буравчика, - сила направлена влево/против движения (что подтверждает знак «—» в формуле закона Фарадея). (Так же иллюстрацией выполнимости закона является сильный магнит, падающий в железную трубу, заметно замедляется, получая сильное сопротивление относительно возникающих индукционных токов, создающих индукционные токи, противоположные движению магнитов).

Не зависимо от материала и проводимости тока, эдс будет создаваться. Увеличивая сопротивление, можно превратить провод из хорошего проводника в плохой, а затем и вовсе, в изолятор. В предельном случае эдс будет возникать идеально в изоляторе - в вакууме. Это означает, что эдс существует сама по себе, вне зависимости от проводящей среды - как реакция на изменение магнитного потока.

Закон Фарадея для неподвижного контура и однородного переменного магнитного поля в нём:

$$\mathcal{E}l = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - S \frac{\Delta B}{\Delta t}.$$

Поле E , вызванное переменным полем B не потенциально: его линии замкнуты, в нашем случае - они приводят к току в рамке. Такое поле называется вихревое.

10. Измерение токов и напряжений.

Постоянный магнит создаёт поле, в котором находится катушка из тонкого провода. При прохождении тока катушка проворачивается под действием силы Ампера, пока это силы не уравновесится пружиной. Закреплённая на катушке стрелка пресыщается по шкале и указывает силу тока, идущего по катушке.

Амперметр включается в исследуемый участок цепи последовательно, не должен нарушать работу исследуемого объекта, поэтому его сопротивление мало. Шкала - в амперах. Чтобы амперметр на 1 А мог показывать до 10 А, необходимо пустить 9/10 тока в обход через дополнительное сопротивление $R_{\text{доп}} = R_0/9$. Такое подключение соответствует утверждению, что сопротивление амперметра должно быть как можно меньше.

Вольтметр включается параллельно к исследуемому участку. Не должен нарушать работу исследуемого объекта, поэтому ток через вольтметр должен быть мал, а его сопротивление R_0 - большим. Фактически измеряет проходящий через него ток, но на шкале указаны вольт в соответствии с $U = IR_0$. Чтобы вольтметр, рассчитанный на 1 В показывал 10 В, необходимо, чтобы 9/10 всего тока падало на дополнительное сопротивление $R_{\text{доп}}$. Для этого $R_{\text{доп}} = 9R_0$.

Вольтметр из амперметра - подключение последовательно достаточно большое сопротивление, тогда $U = I(R_0 + R_{\text{доп}})$. Включить параллельно исследуемому участку.

Подключить параллельно достаточное малое сопротивление, тогда $I = U(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_{\text{доп}}})$. Включить последовательно исследуемый участок.

11. Однородный участок цепи. Сопротивление. Закон Ома. Работа и мощность тока.

Однородный участок цепи - в котором не участвуют сторонние силы. $\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}$ - напряжение, которое всегда пропорционально силе тока

а в этом случае работу по перемещению заряда совершают только силы стационарного электрического поля, и этот участок характеризуют разностью потенциалов $\Delta\varphi$. Разность потенциалов на концах участка

$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$, где A - работа сил электрического поля. Если же на участке действуют только электрические

силы ($\varepsilon = 0$), то $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Таким образом, только для однородного участка цепи понятия напряжения и разности потенциалов совпадают.

Электрический ток - равномерное движение множества одинаковых зарядов в одну сторону и с одной скоростью.

Сила тока - заряд, который прошёл за время t через поперечное сечение провода $S - I = \frac{q}{t}$.

Плотность тока - ток на единицу площади сечения: $j = \frac{I}{S}$. Так же ясно, что ток пропорционален заряду частиц e ,

их концентрации n и скорости v , то есть $en v$. В проводе l сечения S , объёма $V = l \cdot S$ число электронов

$N = nV = n l S$, суммарный заряд $q = eN = enSl = enSvt$. Тогда плотность $j = en v$ и ток $I = jS = en v S$.

Направление тока в проводе совпадает с его ориентацией в пространстве.

В простом случае и в малом поле, ток прямо пропорционален вызвавшему его электрическому полю $j = \sigma E$, где σ - проводимость.

Введём $\rho = 1/\sigma$ - удельное сопротивление. Тогда ток в проводе $I = jS = \sigma ES = \frac{S}{\rho l} El = \frac{U}{R}$, где $R = \frac{\rho l}{S}$ - сопротивление.

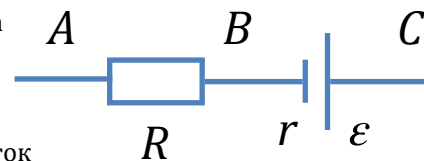
В простом случае, заряды набирают наибольшую скорость u за среднее время τ под действием поля, вызывающем ускорение a , и полностью теряют её при столкновениях с ионами кристаллической решётки. Оценка скорости

$u = a\tau = \frac{F}{m}\tau = \frac{eE}{m}\tau = \frac{e\tau}{m}E = \eta E$, где η - подвижность.

12. Неоднородный участок цепи. Электродвижущая сила.

На участке цепи могут действовать силы, помимо разности потенциалов, химические, электромагнитной индукции. Такие силы называют сторонними, а цепь - неоднородной.

При прохождении единичного заряда через такой участок сторонние силы совершают работу, называемую электродвижущей силой - эдс ε . Рассорим участок цепи ABC. Примем, что ток течёт вправо.



На участке АВ единичный заряд проходит через сопротивление R под действием сил электрического поля, которые совершают работу IR . Чтобы ток через резистор шёл вправо, потенциал А должен быть больше В.

$U_{AB} = IR = \varphi_A - \varphi_B > 0$. Тогда на участке ВС единичный заряд проходит под действием строгих сил, совершающих работу ε . Это электродвижущая сила (в полярности на рисунке). Пусть других сил на этом участке нет, как и омического сопротивления тоже нет. Смысл источника эдс (батарейка) для того, чтобы перемещать заряды в точку с более высоким потенциалом, поэтому при указанной полярности $\varphi_C > \varphi_B$. Положительная разность и есть эдс. $\varepsilon = \varphi_C - \varphi_B \Leftrightarrow \varphi_+ - \varphi_- > 0$

Работа по переносу заряда из А в С это и есть по определению напряжение, приложенное ко всей цепи:

$U_{AC} = \varphi_A - \varphi_C = (\varphi_A - \varphi_B) + (\varphi_B - \varphi_C) = IR - \varepsilon$. Отсюда закон Ома для неоднородного участка $U + \varepsilon = IR$.

Сопротивление R = сумма всех активных сопротивлений на участке, в которые входит и внутреннее сопротивление источника r . Если замкнуть А и С, то $U_{AC} = 0$, и $I(R + r) = \varepsilon$.

Короткозамкнутая батарейка даёт ток $\varepsilon = Ir$.

Второй закон Кирхгофа: что сумма напряжений на резистивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме эдс, входящих в этот контур.

В замкнутом контуре из нескольких звеньев (с произвольными боковыми линиями) сумма падений напряжения на сопротивлениях равна сумме эдс: $\sum IR = \sum \varepsilon$. Боковые ответвления на этот результат не влияют. Возьмём замкнутый контур ABC и запишем для каждого звена:

$$I_1 R_1 = \varphi_A - \varphi_B - \varepsilon_1$$

$$I_2 R_2 = \varphi_B - \varphi_C - \varepsilon_2$$

$$I_3 R_3 = \varphi_C - \varphi_A - \varepsilon_3$$

Знаки при эдс обозначают, в каком от выбранного в данной системе направлении движется ток.

13. Уравнения Максвелла в простейшем виде.

Уравнения Максвелла описывают и обобщают уже ранее известные факты: теорему Гаусса, закон Фарадея, теоремы о циркуляции.

Первый закон Максвелла гласит: поток электрической индукции через замкнутую поверхность равен величине свободного заряда:

$$\Phi = \frac{q}{\varepsilon_0}.$$

Второй закон гласит: поток магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю:

$$\Phi_{\text{по замкнутому контуру}} = 0.$$

Третий закон гласит: циркуляция по замкнутому контуру магнитного поля равна 0.

Четвёртый закон гласит: циркуляция тока по замкнутому контуру равна

$$\mu_0 U; \quad \varepsilon = -S \frac{\Delta B}{\Delta t}.$$