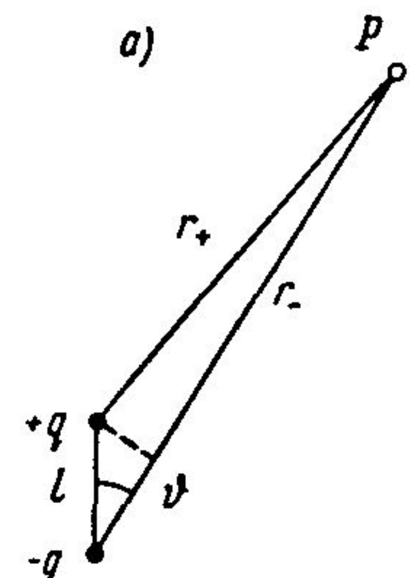
- **Электрический диполь** — система двух равных по модулю разноименных точечных зарядов +q и -q, расстояние между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля.
- **Плечо диполя** — вектор l, направленный по оси диполя (прямой, проходящей через оба заряда) от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между зарядами.
- Поле диполя обладает симметрией, потому картина поля в любой плоскости, проходящей через ось диполя, одна и та же.
- Потенциал поля в т.Р.:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q}{r_+} - \frac{q}{r_-}\right) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q(r_- - r_+)}{r_+ r_-}$$

- Т.к. r>>l, из рис.: $r_- - r_+ = l\cos\vartheta$ и $r_+ r_- = r^2$
- где r -расстояние от т. Р до диполя, тогда:
- $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p\cos\vartheta}{r^2}$ где p=ql – электрический
- момент диполя



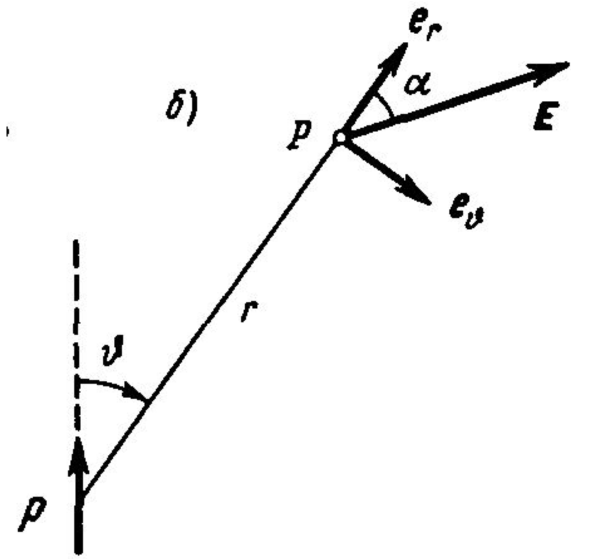
- Электрическому моменту диполя сопоставляют вектор, направленный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному ($q>0$, **l** – вектор, направленный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному):

$$\boxed{\mathbf{p} = q\mathbf{l},}$$

- Используя определение $E_l = -\partial\varphi/\partial l$ вычислим проекции вектора **E** вдоль ортов e_r и e_θ:

$$E_r = -\frac{\partial\varphi}{\partial r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2p\cos\vartheta}{r^3}$$

$$E_\vartheta = -\frac{\partial\varphi}{r\partial\vartheta} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p\sin\vartheta}{r^3}$$



- Тогда модуль вектора **E**: $E = \sqrt{E_r^2 + E_\vartheta^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p}{r^3}\sqrt{1 + 3\cos^2\vartheta}$
- При $\theta=0$ – ось диполя: $\boxed{E_\parallel = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2p}{r^3}}$
- При $\theta=\pi/2$ – перпендикулярно оси диполя: $\boxed{E_\perp = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p}{r^3}}$

- **Энергия диполя**
- Точечный заряд q в поле с потенциалом ϕ имеет энергию: $W=q\phi$
- Диполь во внешнем поле:

$$W = q_+\varphi_+ + q_-\varphi_- = q(\varphi_+ - \varphi_-)$$

- где ϕ- и ϕ+ - потенциалы в точках нахождения зарядов +q и –q;
- Т.к. $\varphi_+ - \varphi_- = \frac{\partial \varphi}{\partial l} l,$
- где $\partial\phi/\partial l$ – производная потенциала по направлению вектора **l**
- По определению $\partial\phi/\partial l = -E_l$, то $\phi_+ - \phi_- = -E_l l = -\mathbf{El}$, тогда:
- $$\boxed{W = -q\mathbf{El} = -\mathbf{pE}}$$
- Минимальную энергию диполь имеет в положении **p**↑↑**E** – положение устойчивого равновесия.
- При отклонении из положения равновесия → момент внешних сил, возвращающий диполь к положению равновесия

- Диэлектрики – нет свободных носителей зарядов, способных перемещаться на большие расстояния.

- Диэлектрик во внешнем поле меняется поле внутри и снаружи диэлектрика.

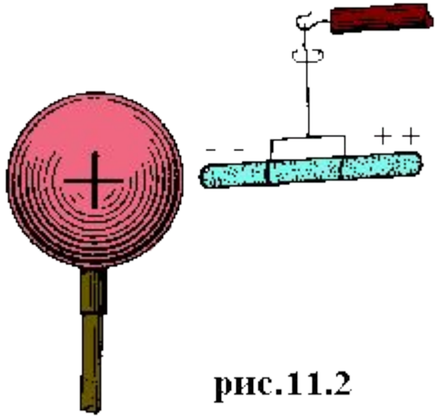
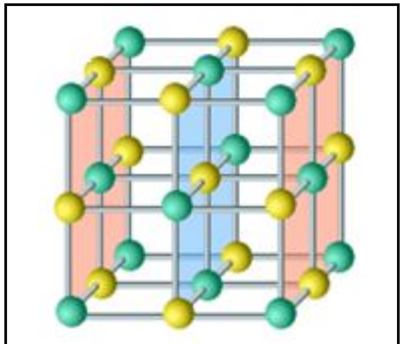
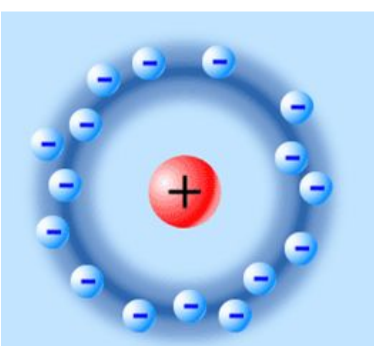
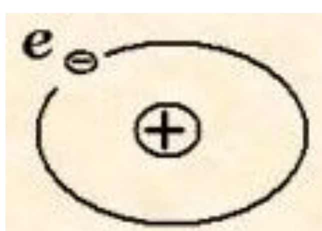
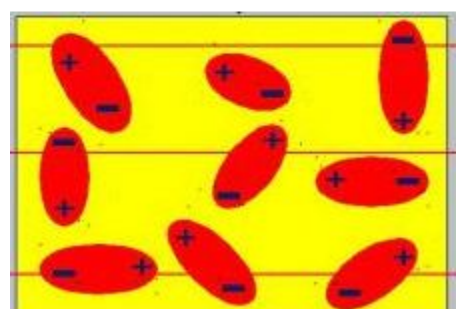
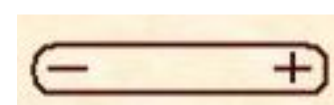


рис.11.2

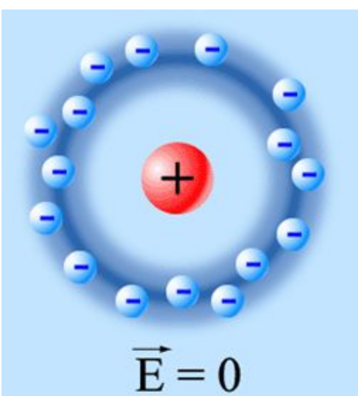
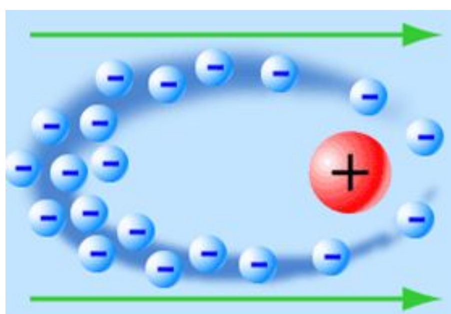
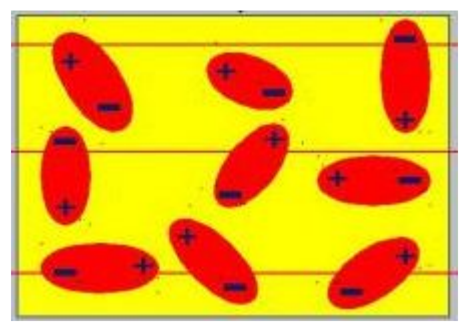
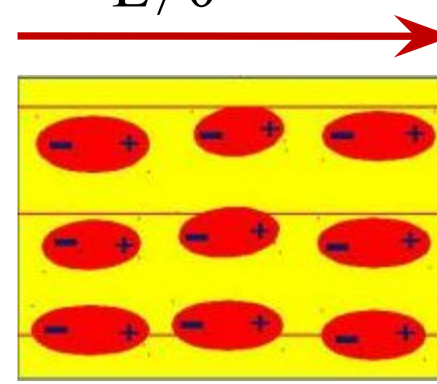
- Заряженный электрометр
- Приближаем незаряженный диэлектрик
- (стеклянную пластину).
- Показания электрометра уменьшаются.
- В чем причина?
- Диэлектрик состоит из нейтральных молекул или заряженных ионов (находящихся в узлах кристаллической решетки)

- Молекулы могут быть полярными и неполярными.



Неполярный диэлектрик	Полярный диэлектрик
состоит из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают	состоит из атомов или молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают ; центр «тяжести» отрицательного заряда сдвинут относительно центра тяжести положительных зарядов
нет собственного дипольного момента ***p***	обладают собственным дипольным моментом ***p***
 	 молекулы диполи 

- Под действием внешнего электрического поля происходит **<u>поляризация</u>** диэлектриков.

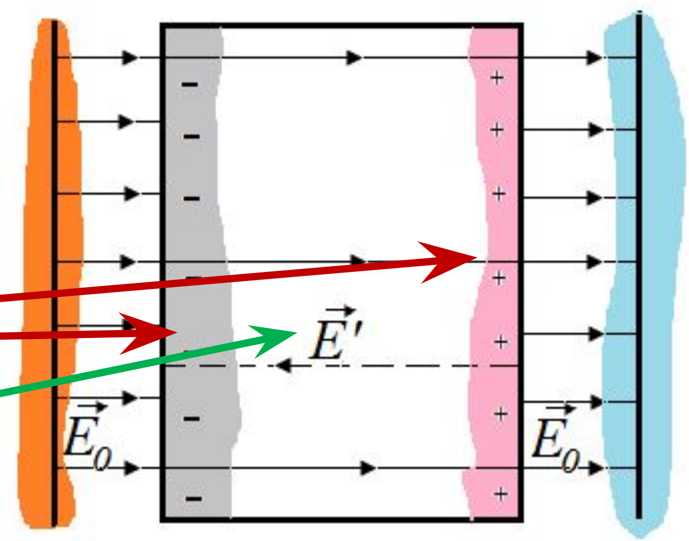
Неполярный диэлектрик	**Полярный диэлектрик**
Смещение зарядов в пределах каждой молекулы («+» - по полю; «-» - против поля)	При отсутствии внешнего поля E=0 - дипольные моменты ориентированы хаотически (из-за теплового движения) При внешнем поле E≠0– переориентируются по полю
 	E=0 E≠0  

- В <u>диэлектрических кристаллах</u> при E≠0: положительные ионы по полю, отрицательные ионы против поля

- Для количественной характеристики поляризации диэлектрика служит физическая величина, которая называется поляризованностью.
- <u>Поляризованность</u> диэлектрика – <u>**вектор поляризации**</u> диэлектрика - называется электрический дипольный момент всех молекул в единице объема диэлектрика.
- , где pi- дипольный момент i-й
- молекулы в объеме V
- Связь поляризованности и электрической напряженности поля E
- $\mathbf{P} = \varkappa\varepsilon_0\mathbf{E}$, , где χ - диэлектрическая восприимчивость

В результате поляризации в объеме (или на поверхности) диэлектрика возникают– <u>*связанные заряды*</u>

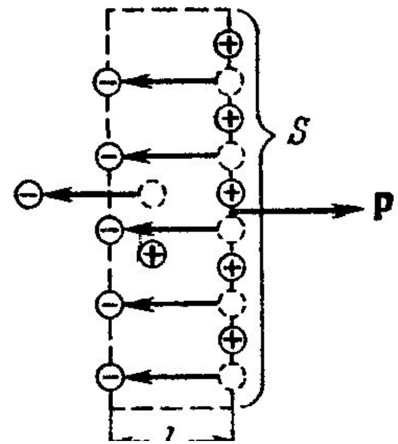
<u>**E’** - поле связанных зарядов внтури диэлектрика</u>



- Рассмотрим в поляризованном диэлектрике наклонную призму с основанием *S* и ребром *L*, параллельным вектору поляризации **P** .
- Поляризация → на одном из оснований призмы появятся отрицательные заряды с поверхностной плотностью -σ, а на другой положительные заряды с плотностью +σ.
- <u>С макроскопической точки зрения</u>:

Система: диполь с зарядами -σS и +σS с плечом L

Электрический момент системы: p=σ'SL.



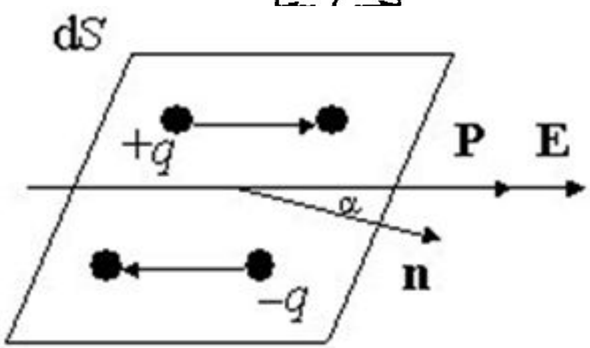
- <u>С другой стороны:</u>

Данный объем призмы ΔV= S L cos α имеет

электрический дипольный момент

PΔV = PS L cos α ,

где P – модуль поляризованности.



- <u>Тогда:</u> PS L cos α = σ'SL → σ'= P cos α = P_n ,
- Знак величины σ' зависит от угла (**Pn**)

- Макроскопическое поле в диэлектрике получается за счет сложения двух полей:
  - **$\mathbf{E}_0$** – создается свободными зарядами (могут передаваться от одного тела к другому при соприкосновении и находится внутри и вне диэлектрика)
  - **E'**- поле связанных зарядов (смещаются только внутри электрически нейтральной молекулы):

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'$$

- Связанные заряды отличаются от свободных только тем, что не могут существовать отдельно друг от друга. Они также являются источником поля

- Поле внутри диэлектрика определяется сторонним и связанным зарядом: [illegible] $\rightarrow$ [illegible]

- Тогда теорема Гаусса:

$$\Phi_E = \oint_S E_n \, dS = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(\sum q + \sum q'\right)$$

- Введем величину- вектор электрического смещения (вектор электрической индукции): $\boxed{\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}}$

- Подставим [illegible] , тогда [illegible] , где $\varepsilon = 1 + \chi$ - диэлектрическая проницаемость среды

- Теорема Гаусса в дифференциальной форме принимает вид:

[illegible]

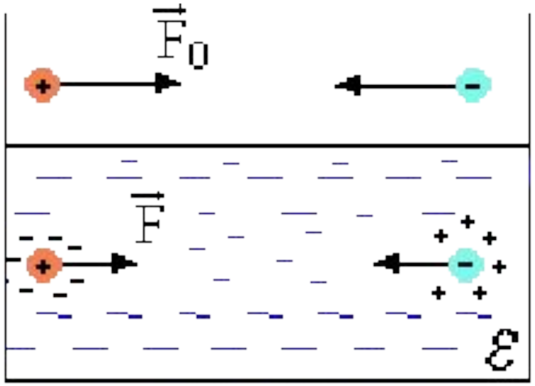
- Линии вектора начинаются только на положительных сторонних зарядах q>0, и заканчиваются только на отрицательных сторонних зарядах q<0

- $\Phi_D = \oint\limits_S D_n\, dS = \sum q \rightarrow \boxed{\Phi_D = \oint\limits_S D_n\, dS = \int\limits_V \rho\, dV}$

- **Теорема Гаусса для вектора электрического смещения:** поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности свободных (сторонних) зарядов

- Пусть два заряженных шарика взаимодействуют между собой в вакууме

- Погрузим их в изолирующую (диэлектрическую) жидкость, например, в керосин, с диэлектрической проницаемостью ε:



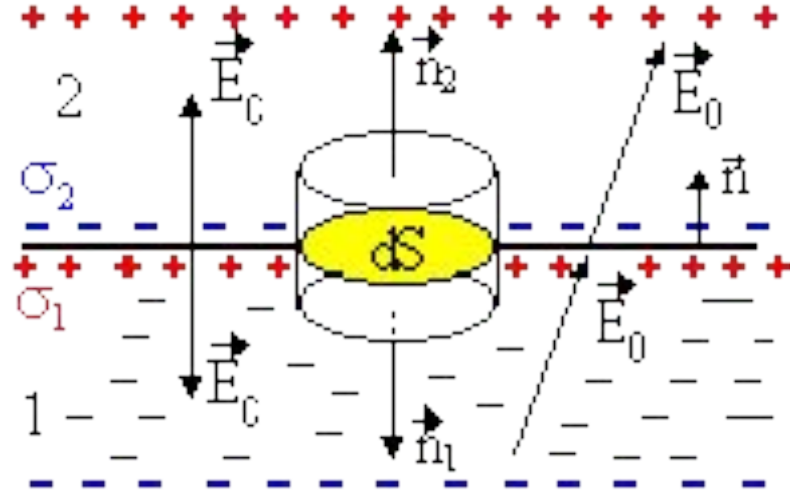
- Керосин поляризуется:

 у поверхности положительного шарика собираются отрицательные заряды молекулярных диполей керосина

 около отрицательного шарика - положительные заряды

 поле ослабевает → уменьшается сила взаимодействия между шариками.

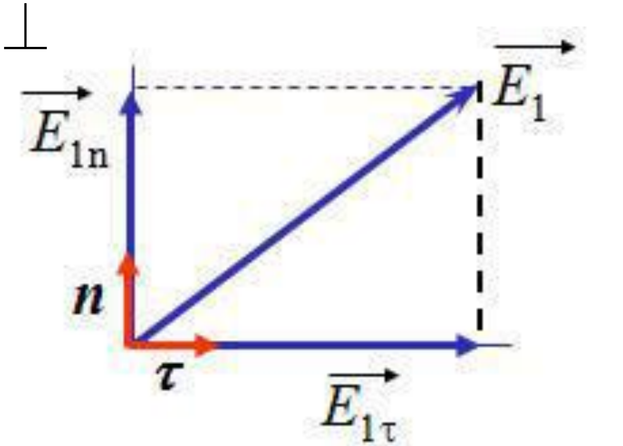
- Рассмотрим границу двух диэлектриков, на которые наложено внешнее поле E0.
- Есть внешнее поле → оба диэлектрика поляризуются → вблизи границы в каждом из них появятся поляризационные заряды → каждый создает собственное поле:



- Собственные поля направлены в разные стороны
- Вектор напряженности можно разложить на две составляющие:
- Нормальная составляющая - ⊥ поверхности
- Тангенциальная составляющая - // поверхности

$$\vec{E}_2 = E_{2\tau}\vec{\tau} + E_{2n}\vec{n}.$$

$$\vec{E}_1 = E_{1\tau}\vec{\tau} + E_{1n}\vec{n},$$

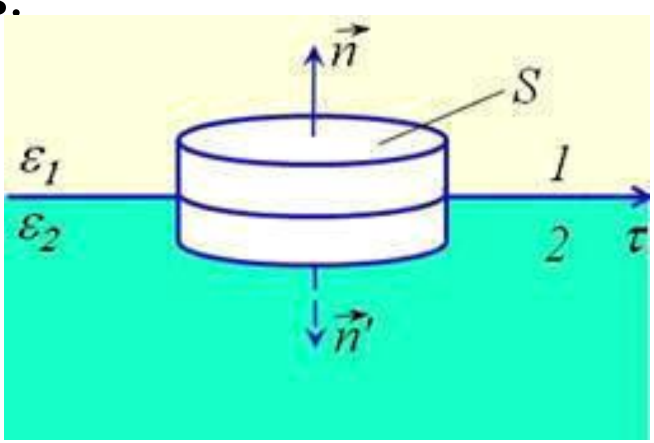


- **Граничные условия:**

- <u>тангенциальная составляющая вектора **E**</u> оказывается одинаковой по обе стороны границы раздела (<u>не претерпевает скачка</u>).

- Нормальная составляющая: поместим на границе раздела двух диэлектриков цилиндр малой высоты, такой чтобы в пределах каждого его торца вектор был одинаков.

- По теореме Гаусса для вектора :



$$\oint_S \vec{D}\,d\vec{S} = \oint_S \vec{D}\,\vec{n}\,dS = \int \vec{D}_1\vec{n}\,dS + \int \vec{D}_2\vec{n}'\,dS = \sum_{i=1}^{n} q_i$$

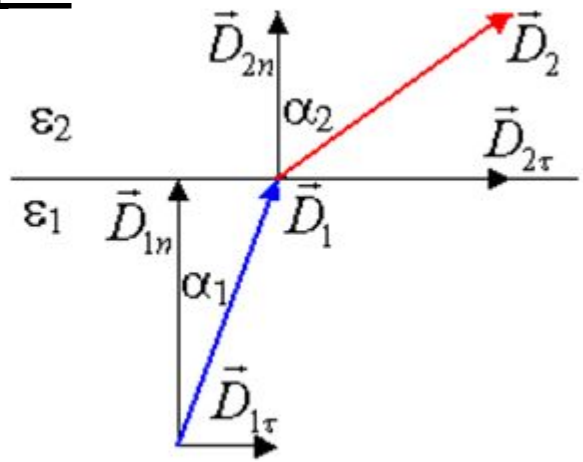
- Т.к. $\vec{D}_1 = D_{1\tau}\vec{\tau} + D_{1n}\vec{n},$ $\quad \vec{D}_2 = D_{2\tau}\vec{\tau} + D_{2n}\vec{n}$

- То $D_{1n}\Delta S + D_{2n'}\Delta S = \sigma\Delta S.$ → возьмем одну нормаль от диэлектрика 2 к диэлектрику 1: $D_{2n'} = -D_{2n}$.Тогда: $D_{1n} - D_{2n} = \sigma.$

- <u>**Нормальная составляющая** вектора **D** претерпевает скачок</u> при переходе границы раздела

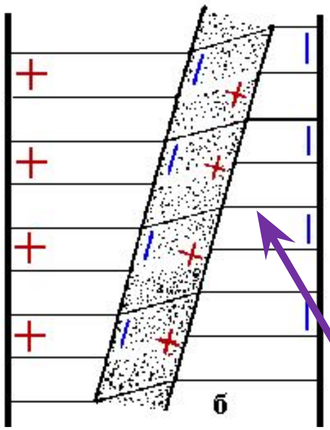
- <u>Если на границе нет сторонних зарядов</u>: $D_{1n} = D_{2n},$

- Если на поверхности есть сторонний заряд, то электрическая индукция терпит разрыв: $\boxed{D_{1n} - D_{2n} = \sigma.}$
- Если такого заряда нет, то индукция непрерывна $\boxed{D_{1n} = D_{2n},}$
- <u>Преломление линий электрической индукции</u>:
- Из рис.:
- →

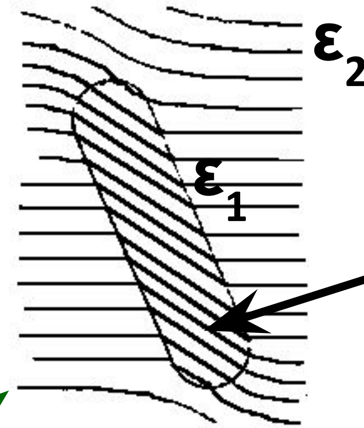


- На границе двух диэлектриков линии электрического поля преломляются по закону:
- В однородном изотропном диэлектрике индукция и напряженность сонаправлены и величина **ε** - скаляр

- Преломление электрического поля на бесконечной плоскопараллельной диэлектрической пластинке



$\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ -линии сгущаются



Среда с большой диэлектрической проницаемостью

- **Линии напряженности** частично прерываются на границе раздела, а **линии индукции** непрерывны
- Когда линии индукции переходят из среды с меньшей проницаемостью в среду с большей проницаемостью, то вследствие преломления они оказываются ближе друг к другу

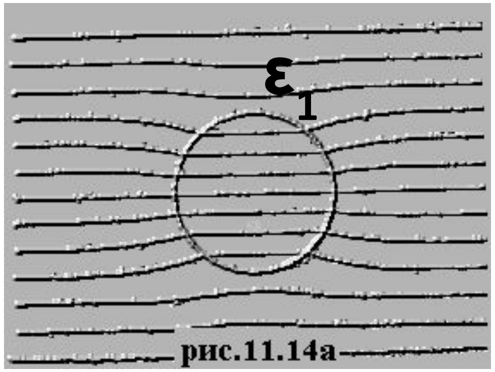


рис.11.14а

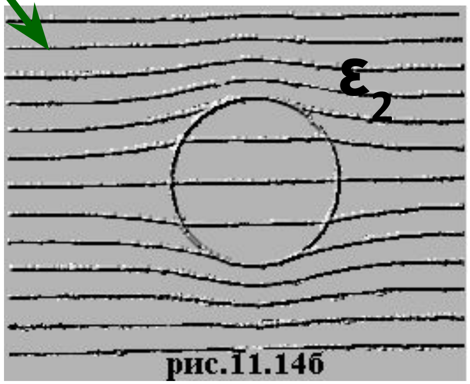


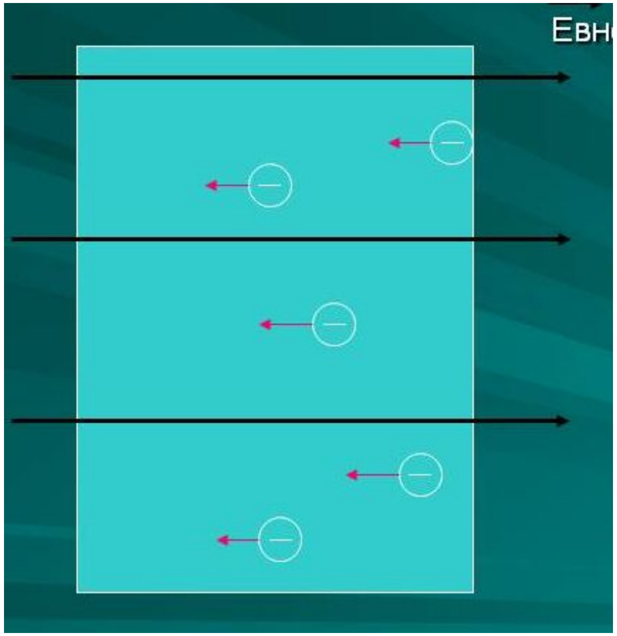
рис.11.14б

Диэлектрический шар в однородном поле:

ε_1 шара > ε_2 шара

Проводники в электрическом поле

- Проводниками называют материалы, имеющие так называемые свободные заряды
- В отсутствие внешнего поля частицы распределяются внутри вещества так, что создаваемое ими электрическое поле в среднем по объемам, включающим большое число атомов или молекул, равно нулю.
- При внесении незаряженного проводника во внешнее электрическое поле свободные заряды начинают двигаться и через небольшое время приходят в равновесие.
- Свободные носители – электроны
- двигаются в направлении против
- силовых линий



- Напряженность поля всюду внутри проводника должна быть равна нулю E=0.
- Т.к. [illegible], то потенциал внутри проводника должен быть постоянным: [illegible]
- Напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности
- Если $E\tau \neq 0$, то заряды будут
- перемещаться до тех пор, пока $E\tau=0$
- в случае равновесия зарядов : поверхность
- проводника будет эквипотенциальной.
- Если проводящему телу сообщить
- заряд q, условие равновесия должно выполняться.

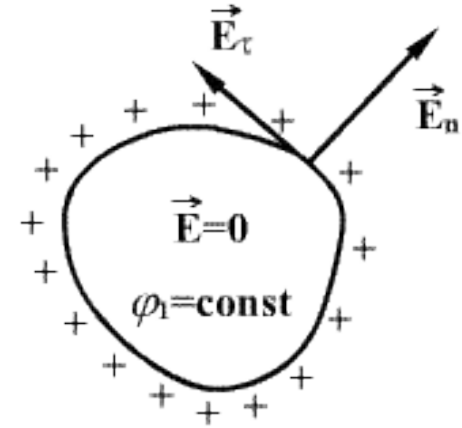


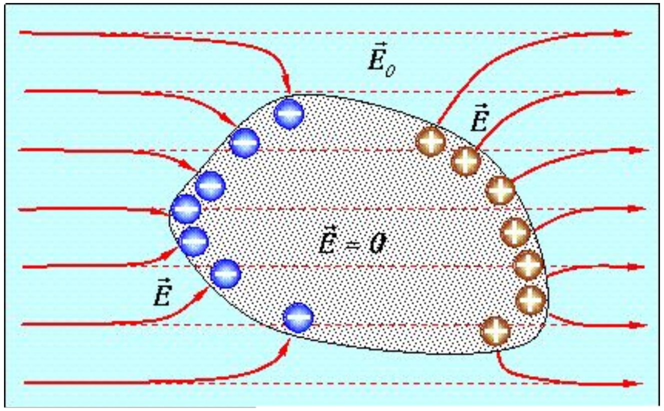
рис. 15.1

- При равновесии: поле внутри проводника отсутствует → поток вектора электрического смещения через поверхность равен нулю → (по т. Гаусса) Σq= 0 → внутри проводника не д.б. избыточных зарядов → заряды распределены на поверхности

- Избыточный заряд распределяется на полом или сплошнос проводнике по его наружной поверхности!

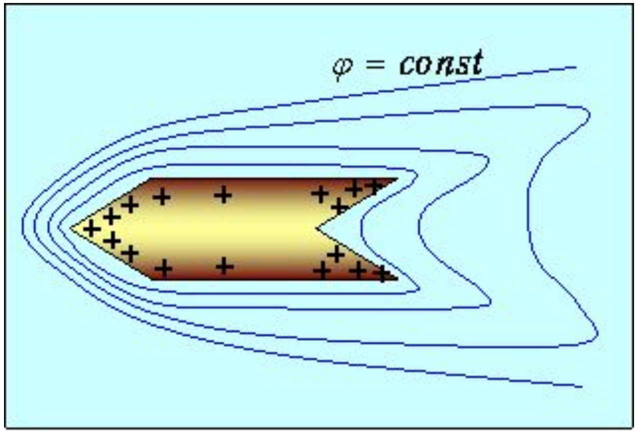
- Создается стационарное распределение зарядов:

на одной стороне проводника образуется избыток отрицательных зарядов, а на другой – избыток положительных



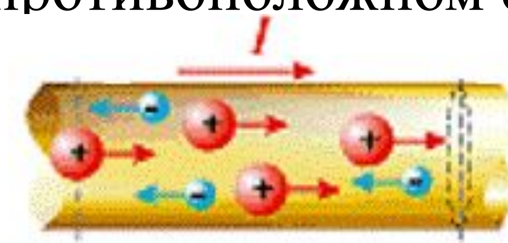
Если поверхность проводника имеет впадины и выпуклости:

наибольшая плотность зарядов на выпуклости (особенно острие)



- Электрический ток – перенос заряда через поверхность S, упорядоченное движение зарядов (ионы в электролитах, электроны в металлах) :
  - «+» в направлении поля
  - «-» отрицательные против поля
- Электрический ток характеризуют силой тока – скалярной величиной, равной заряду, переносимому носителями через рассматриваемую поверхность в единицу времени.
- Пусть за время dt переносится заряд dq, тогда сила тока i:
- $$i = \frac{dq}{dt}$$ В СИ [I]: ампер (А)
- Электрический ток обусловлен движением и «+», и «-» носителей
- Пусть в проводнике движутся носители обоих знаков, за время dt чрез данную поверхность S переносятся в одном направлении положительные носители dq+, в противоположном dq-, тогда сила тока:

$$i = \frac{dq^+}{dt} + \frac{dq^-}{dt}$$



- *Направление токов- направление перемещения «+» носителей!*

- Молекулярное тепловое движение ➤ носители заряда движутся со скоростью v ➤ при включении поля на хаотическое движение v накладывается упорядоченное движение u ➤ средняя скорость носителей:

$$\overline{\mathbf{v}+\mathbf{u}}=\overline{\mathbf{v}}+\overline{\mathbf{u}}=\mathbf{u}.$$

- Электрический ток может быть распределен по поверхности, тогда используют <u>вектор плотности тока j</u>: численно равен силе тока dI через расположенную в данной точке перпендикулярную к направлению движения носителей площадку dS, отнесенной к величине этой площадки:

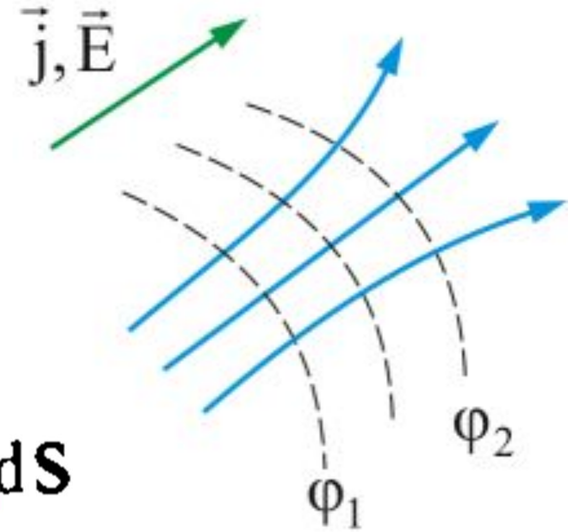
$$j=\mathrm{d}I/\mathrm{d}S_{\perp}.$$

- Если носителями являются как положительные, так и отрицательные заряды, то плотность тока определяется формулой:

$$\mathbf{j}=\rho_{+}\mathbf{u}_{+}+\rho_{-}\mathbf{u}_{-}$$

- где ρ_+ и ρ_- - объемные плотности положительного и отрицательного зарядов-носителей, u_+ и u_- - скорости их упорядоченного движения.

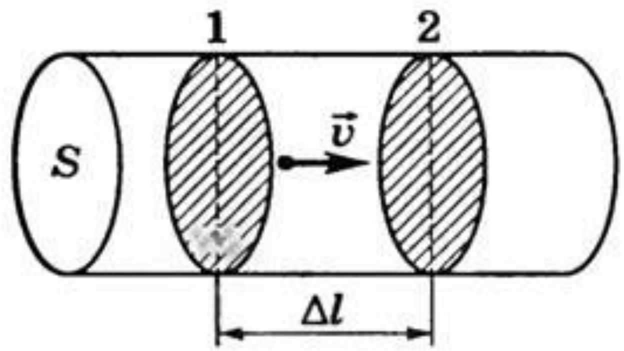
- <u>Поле вектора *j*</u> можно изобразить графически с помощью *линий тока*, которые проводят так же, как и линии вектора напряженности



- Знаял *j* в каждой точке поверхности *S*,
- можно найти *силу тока* I через эту
- поверхность, *как <u>поток вектора j</u>:*

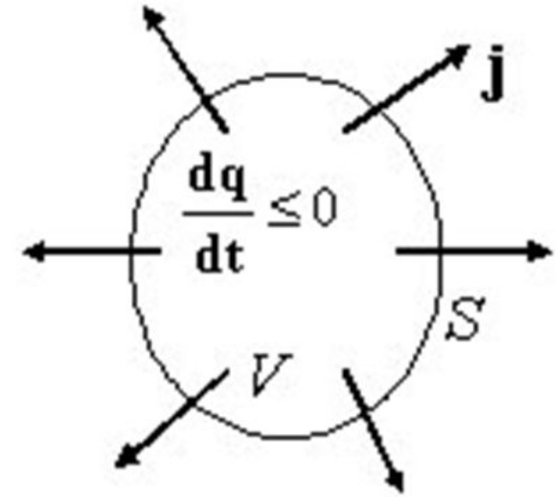
$$I = \int j_n dS$$

- В СИ [j]: ампер на квадратный метр (А/м2)
- Рассмотрим участок проводника:



- S- площадь, Δl- длина проводника
- n –концентрация частиц,
- q_0 - заряд частицы
- Общий заряд: $\Delta q = q_0 n S \Delta l$
- Средняя скорость упорядоченного движения <v>
- Сила тока за время $\Delta t = \Delta l / \langle v \rangle$: $I = \Delta q / \Delta t = q_0 n S \langle v \rangle$
- <u>Сила тока в проводнике зависит от</u> заряда, переносимого одной частицей, их концентрации, средней скорости направленного движения частиц и площади поперечного сечения проводника

- Если сила тока не меняется во времени, то ток, протекающий в проводнике, называют <u>постоянным</u>
- Рассмотрим среду, в которой течет ток
- Выделим в ней замкнутую поверхность *S*
- Для тока, выходящего в единицу
- времени из объема *V*, ограниченного
- поверхностью *S*, имеем:

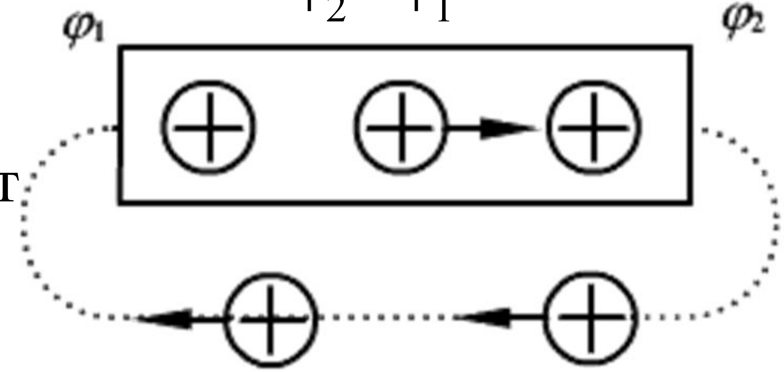


$$i = \oint_S \mathbf{j} d\mathbf{S}$$

- В силу закона сохранения заряда эта величина должна быть равна скорости убывания заряда, содержащегося в объеме V:
- $$\boxed{\oint_S \mathbf{j} d\mathbf{S} = -dq / dt}$$ <u>- уравнение непрерывности</u>
- «-», так как заряд убывает, левая часть будет положительна, если полный заряд в данном объеме увеличивается
- Для стационарного тока dq/dt=0: $\oint \mathbf{j} \, d\mathbf{S} = 0$
- Для постоянного тока поле вектора j не имеет источников.

- В проводнике создается электрическое поле

$\phi_2 < \phi_1$



  ➤ носители зарядов перемещаются

  ➤ их количество ограничено

  ➤ поле внутри проводника исчезнет

  ➤ ток прекратиться

- Для поддержания тока необходимо
- от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить приносимые током заряды;
- к концу с большим потенциалом непрерывно их подводить.
- Циркуляция вектора напряженности электростатического поля, равна нулю ➤ в замкнутой цепи должны быть участки, на которых перенос положительных зарядов происходит в направлении возрастания ϕ, *т.е. против сил электростатического поля*.
- Перемещение, зарядов на этих участках возможно лишь с помощью сил не электростатического происхождения, называемых <u>сторонними силами</u>.
- <u>Для поддержания тока необходимы сторонние силы</u>

- Сторонние силы могут быть обусловлены:
  - химическими процессами,
  - диффузией носителей заряда в неоднородной среде или через границу двух разнородных веществ,
  - электрическими (но не электростатическими) полями,
  - порожденными меняющимися во времени магнитными полями и т.д.
- Сторонние силы можно охарактеризовать работой, которую они совершают над перемещающимися по цепи зарядами.
- Работа сторонних сил = работа, совершаемая против электрического поля внутри источника тока ($A_{ист}$) + работа, совершаемой против сил сопротивления среды (A’):
- $A_{ст}=A_{ист}+A'$
- *Величина, равная работе сторонних сил, отнесенной к единице положительного заряда называется* ***<u>электродвижущей силой</u>*** *(э.д.с.), действующей в цепи или на участке:*

$$\boxed{\mathscr{E} = \frac{A}{q}}$$

- Работа против сил электрического поля, по определению равна
- Если полюсы источника разомкнуты, то и тогда
- т.е. э.д.с. источника тока при разомкнутой внешней цепи равна разности потенциалов, которая создается на его полюсах.
- В СИ [ξ] = размерность потенциала = Вольт (В)
- Стороннюю силу $F_{ст}$, действующую на заряд, можно представить в виде:
- $$\boxed{F_{ст}=E^*q}$$
- Векторную величину E* называют напряженностью поля сторонних сил. Работу сторонних сил над зарядом q на всём протяжении замкнутой цепи можно выразить следующим образом:

$$A=\oint f_{ст l}\,dl=q\oint E_l^*\,dl$$

- Разделим эту работу на q , получим э.д.с., действующую в цепи:
- $$\boxed{\mathscr{E}=\oint E_l^*\,dl}$$ э.д.с. , действующая в замкнутой цепи, может быть определена как циркуляция вектора напряженности поля сторонних сил

- Для участка цепи электродвижущая сила, действующая на некотором участке 1 -2: $$\mathscr{E}_{12} = \int_1^2 E_l^* \, dl$$
- Кроме сторонних сил на заряд действуют силы электростатического поля:
- Результирующая сила, действующая в каждой точке цепи на заряд q, равна:
- Полная работа, совершаемая этой силой над зарядом q на участке цепи 1-2, дается выражением: $$A_{12} = q \int_1^2 E_l^* \, dl + q \int_1^2 E_l \, dl = q\mathscr{E}_{12} + q(\varphi_1 - \varphi_2)$$
- Для замкнутой цепи работа электростатических сил равна нулю: $$A = q\mathscr{E}$$
- Величина, численно равная работе, совершаемой электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется <u>падением напряжения или просто напряжением</u> U на данном участке цепи:
- $\boxed{U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathscr{E}_{12}.}$ Если Fст=0, то

- Немецкий физик Г. Ом экспериментально установил закон Ома для участка цепи: сила тока, текущего по однородному (отсутствуют сторонние силы) металлическому проводнику, пропорциональна падению напряжения на проводнике:

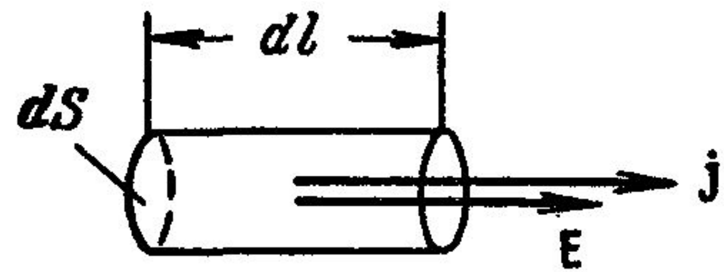
$$\boxed{I = \frac{1}{R} U}$$

- Однородным называется участок цепи, в котором не действуют сторонние силы (нет источников тока).
- Величина R называется электрическим сопротивлением проводника
- В СИ [R] - Ом, 1 Ом равен сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении 1В течет ток в 1 А.
- $\boxed{R = \rho \frac{l}{S}}$ где l - длина проводника; S - площадь его поперечного
- сечения; ρ - коэффициент, зависит от свойств материала, называется удельным электрическим сопротивлением. В СИ [ρ] = Ом*м;
- Коэффициент электропроводимости – проводимость материала:

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

- Для большинства металлов удельное сопротивление растет с температурой приблизительно по линейному закону:

- где ρ_0- удельное сопротивление при 0°C, t - температура в градусах Цельсия, α- постоянный коэффициент, численно равный примерно 1/273.
- Выделим в проводнике элементарный цилиндрический объем dV
- *dl* параллельна вектору плотности тока J
- jdS - ток через поперечное сечение dS
- Edl - напряжение, приложенное к цилиндру
- E - напряженность поля в данном месте



- Сопротивление цилиндра: $\rho\dfrac{dl}{dS}$
- Используя закон Ома: $$j\,dS = \frac{dS}{\rho\,dl}\cdot E\,dl$$
- Носители заряда в каждой точке движутся в направлении вектора E → направления векторов E и j совпадают.
- <u>Закон Ома в дифференциальной форме</u>: $$\boxed{\mathbf{j} = \frac{1}{\rho}\mathbf{E} = \sigma\mathbf{E}}$$

- Пусть в проводнике течет постоянный ток;
- Электростатическое поле и внешние силы совершают работу по перемещению электрического заряда от одного конца проводника к другому;
    - при этом проводник остается неподвижный и внутри него не происходят химические превращения→
    - работа сторонних сил расходуется на увеличение внутренней энергии проводника, на его нагревание.
- Пусть на концах участка пров-ика разность потенциалов:
- Работа по переносу q на этом участке равна:
- По определению I= q/t. откуда q= I t. Тогда:
- Так как работа идет на нагревание проводника, то выделяющаяся в проводнике теплота = работе электростатических сил: Q=A
- $\boxed{Q = RI^2t}$ - <u>закон Джоуля-Ленца (интегральная ф.)</u>
- Если сила тока изменяется со временем: $\boxed{Q = \int_0^t Ri^2\,dt}$

- Найдем Q для выделенного участка: пусть V – объем цилиндрической формы, dS и dl – его поперечное сечение и длина.
- Ось этого цилиндра совпадает с направлением вектора плотности тока j.
- За время dt в данном объем выделится количество теплоты:

$$\delta Q = RI^2\,dt = \frac{\rho\,dl}{dS}(j\,dS)^2\,dt = \rho j^2\,dV\,dt$$

- Разделим ур… <u>…ной тепловой мощности тока ω</u>:

$$w = \rho j^2$$

- равна энергии выделенной з… у время прохождения тока в каждой единице объема проводника
- Используем з. Ома в дифференциальной форме:

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\rho}\mathbf{E} = \sigma\mathbf{E}$$

- <u>Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форм…</u> *тепловая мощность тока пропорциональна квадрату плотности электрического тока и удельному сопротивлению среды в данной точке:*

$$\boxed{w = jE = \sigma E^2} \qquad \boxed{w = \rho j^2}$$

- <u>Закон Ома для неоднородного участка цепи (для участков, где действуют сторонние силы)</u>:

- Пусть на концах участка разность
- потенциалов (φ1-φ2):
- В направлении стрелки I>0, ξ>0
- Проводник неподвижен: единственный результат – нагрев
- Работа всех сил (эл/ст+стор), совершенная над носителями = теплу
- За время dt переносится заряд dq=Idt.
- Работа над зарядом: $dA = \mathscr{E}_{12}\,dq + (\varphi_1 - \varphi_2)\,dq$
- Тепло, выделившееся за dt: $dQ = I^2R\,dt = IR\,(I\,dt) = IR\,dq$
- Тогда:

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathscr{E}_{12} \quad \Rightarrow \quad \boxed{I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathscr{E}_{12}}{R}}$$

- $\xi_{12}<0$ – если э.д.с. препятствует движению «+» носителей
- $\xi_{12}>0$ – если э.д.с. способствует движению «+» носителей
- <u>В дифференциальной форме</u>: $\boxed{\mathbf{j} = \sigma\,(\mathbf{E} + \mathbf{E}^*)}$

- Закон Ома для замкнутой цепи:
- если необходимо найти силу тока в цепи, но при этом напряжение на ее концах не задано;
- известно сопротивление цепи и электродвижущая сила источника тока;
- То применить закон Ома для участка цепи невозможно;
- В этом случае применяют закон Ома для замкнутой цепи:

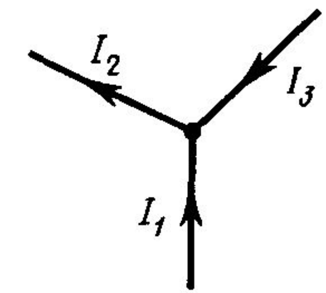
$$\boxed{I = \frac{\xi}{R + r}}$$

- где R -сопротивление внешней цепи; r - внутреннее сопротивление источника тока; I - сила тока в цепи;ξ - электродвижущая сила источника тока
- Мощность электрического тока равна отношению работы тока ΔA к интервалу времени Δt, за которое эта работа была совершена:
- СИ [P]= Ватт (Вт)

$$\boxed{P = \frac{\Delta A}{\Delta t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}}$$

- <u>Правила Кирхгофа</u>:
- <u>Первое правило</u> относится к узлам цепи, т.е. к точкам, в которых проходит более чем два тока.
- <u>Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю</u>:

$$\boxed{\sum I_k = 0}$$



$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

- Токи, текущие к узлу, считается имеют
- один знак (плюс или минус), от узла –
- имеют другой знак (минус или плюс).
- <u>Второе правило</u> является следствием з.Ома для неоднородных участков цепи: *алгебраическая сумма произведений сил токов в отдельных участках произвольного замкнутого контура на их сопротивления равна алгебраической сумме э.д.с., действующих в этом контуре*:

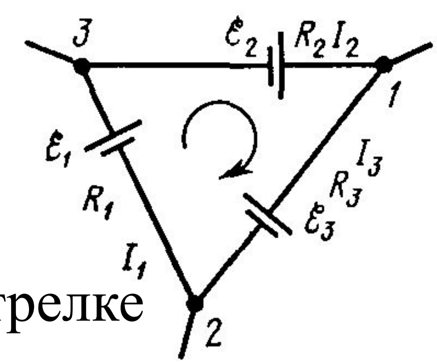
$$\boxed{\sum I_k R_k = \sum \mathscr{E}_k}$$

$$I_1 R_1 = \varphi_2 - \varphi_3 + \mathscr{E}_1,$$

$$I_2 R_2 = \varphi_3 - \varphi_1 + \mathscr{E}_2,$$

$$I_3 R_3 = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathscr{E}_3.$$

Контур из 3-х участков;
Направление обхода по часовой стрелке



- Энергия взаимодействия системы электрических зарядов:

$$\boxed{W = {}^1/_2 \sum q_i \varphi_i}$$

- Если заряды распределены непрерывно, то имея систему элементарных зарядов $dq = \rho\, dV$ получим:

$$\boxed{W = \frac{1}{2} \int \rho \varphi \, dV}$$

- где ϕ - потенциал, создаваемый всеми зарядами системы в элементарном объеме dV
- Энергия уединенного проводника зарядом q и потенциалом ϕ (одинаковым во всех токах проводника):

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

- Энергия конденсатора с разностью потенциалов U и электрической ёмкостью C:

$$\boxed{W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}}$$

- <u>Это полная энергия взаимодействия</u> = энергия взаимодействия зарядов одной обкладки и со второй + энергия взаимодействия внутри каждой обкладки

- Энергия электрического поля:
- Плоский конденсатор имеет энергию: $W = CU^2/2$
- Т.к. $C = \varepsilon\varepsilon_0 S/h$, то

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2}\left(\frac{U}{h}\right)^2 Sh$$

- Т.к. $U/h = E$ и $Sh = V$ - объем между обкладками конденсатора, то:

$$W = {}^1/_2\varepsilon_0\varepsilon E^2 V$$

- Энергия поля для изотропного диэлектрика:

$$\boxed{W = \int \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2}\,\mathrm{d}V = \int \frac{\mathbf{ED}}{2}\,\mathrm{d}V}$$

- Объемная плотность энергии, распределенной в пространстве w:

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