

Проводники в электрическом поле

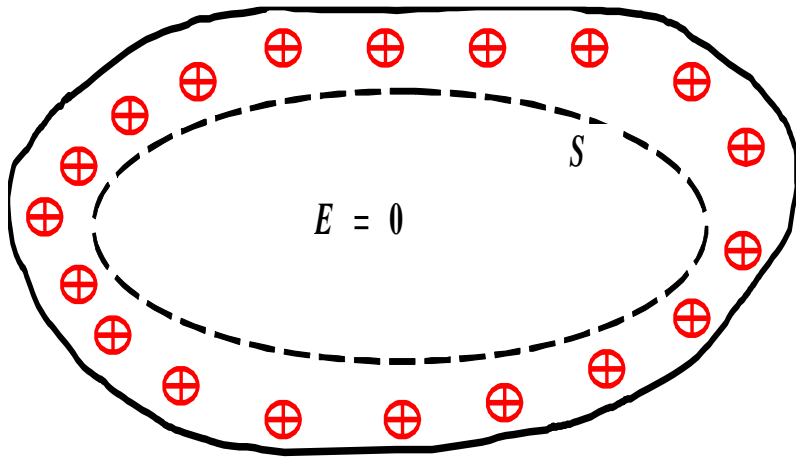
Проводники

В проводниках имеются электрически заряженные частицы – *носители заряда*, которые способны под действием внешнего электрического поля перемещаться по всему объему проводника.

Носителями зарядов в твердых металлических проводниках являются электроны, которые называются *электронами проводимости* или *свободными электронами*.

Равновесие зарядов в проводниках.

Проводнику сообщили заряд $+q$

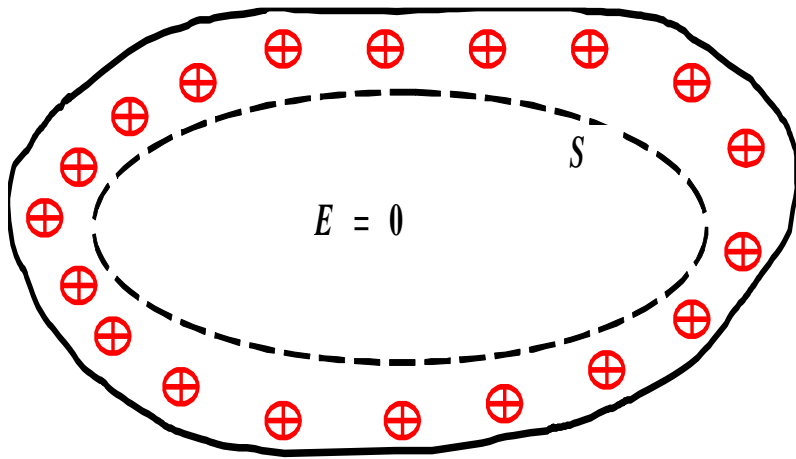


$$\vec{E} = 0$$

Если бы между любыми произвольно выбранными двумя точками проводника существовало поле, то возник бы и **электрический ток** без источника, что **противоречит** закону сохранения энергии.

Равновесие зарядов в проводниках.

Проводнику сообщили заряд $+q$



$$\vec{E} = 0$$

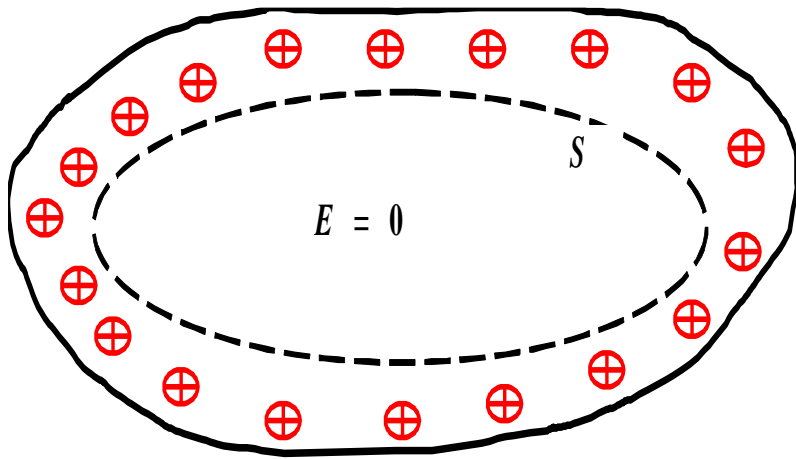
$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \int_V \frac{\rho dV}{\epsilon_0} = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$$

S – произвольная замкнутая
поверхность внутри проводника

$$\vec{E} = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho = 0$$

Равновесие зарядов в проводниках.

Проводнику сообщили заряд $+q$



$$\rho = 0$$

В объеме проводника избыточные **заряды** отсутствуют и могут находиться только **на внешней поверхности проводника**.

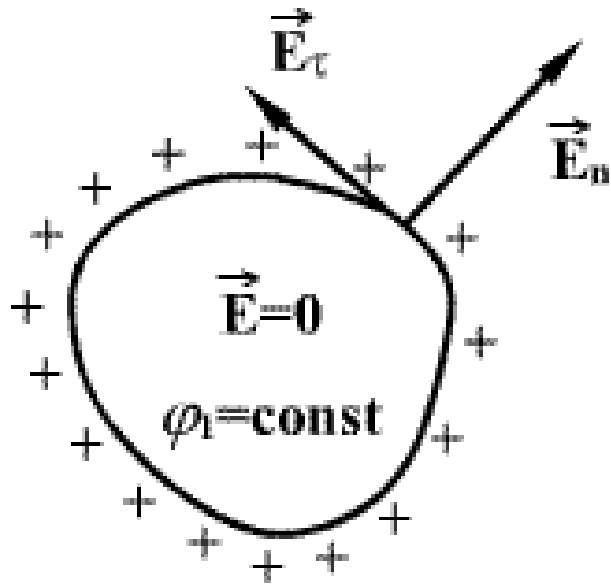
$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$$

$$\vec{E} = 0$$

$$\varphi = \text{const}$$

Любой **проводник** представляет собой **эквипотенциальное тело**, а его поверхность, естественно, является *эквипотенциальной*.

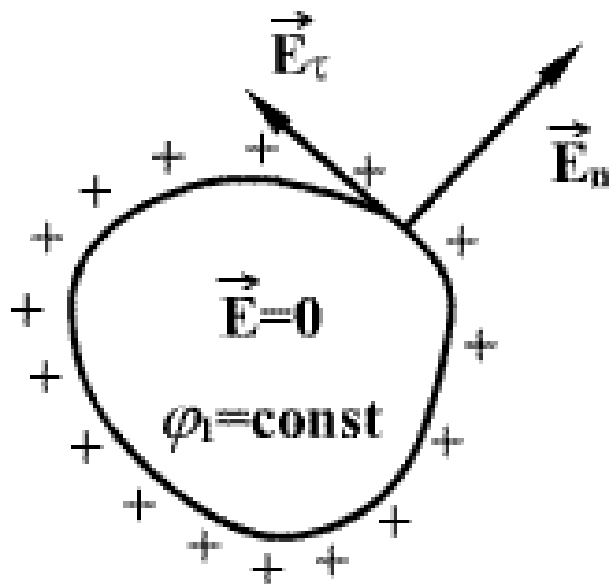
Равновесие зарядов в проводниках.



На поверхности проводника вектор E должен быть направлен по нормали к этой поверхности.

Иначе под действием тангенциальной составляющей вектора напряженности E_τ заряды бы перемещались по проводнику, что противоречит их статическому распределению.

Равновесие зарядов в проводниках.



В равновесном состоянии:

1) $E_{\text{внутр}} = E = 0.$

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\vec{\nabla}\varphi$$

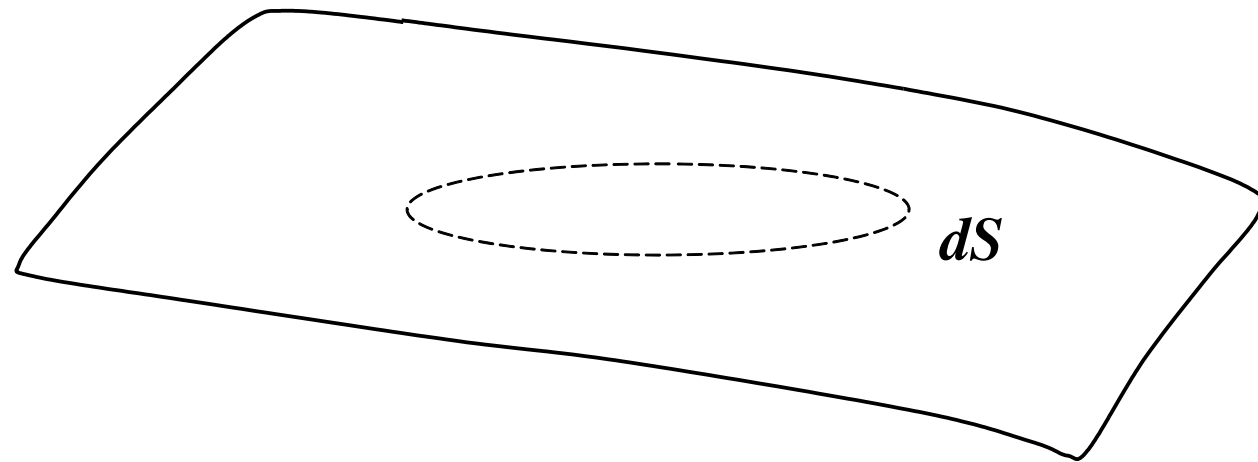
2) $\varphi_{\text{внутр}} = \text{const}$ весь объем проводника и его поверхность **эквипотенциальны**.

3) На поверхности проводника $\vec{E} = \vec{E}_n, \quad \vec{E}_\tau = 0.$

4) $\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E} \quad \longrightarrow \quad \vec{D}_{\text{внутр}} = 0$

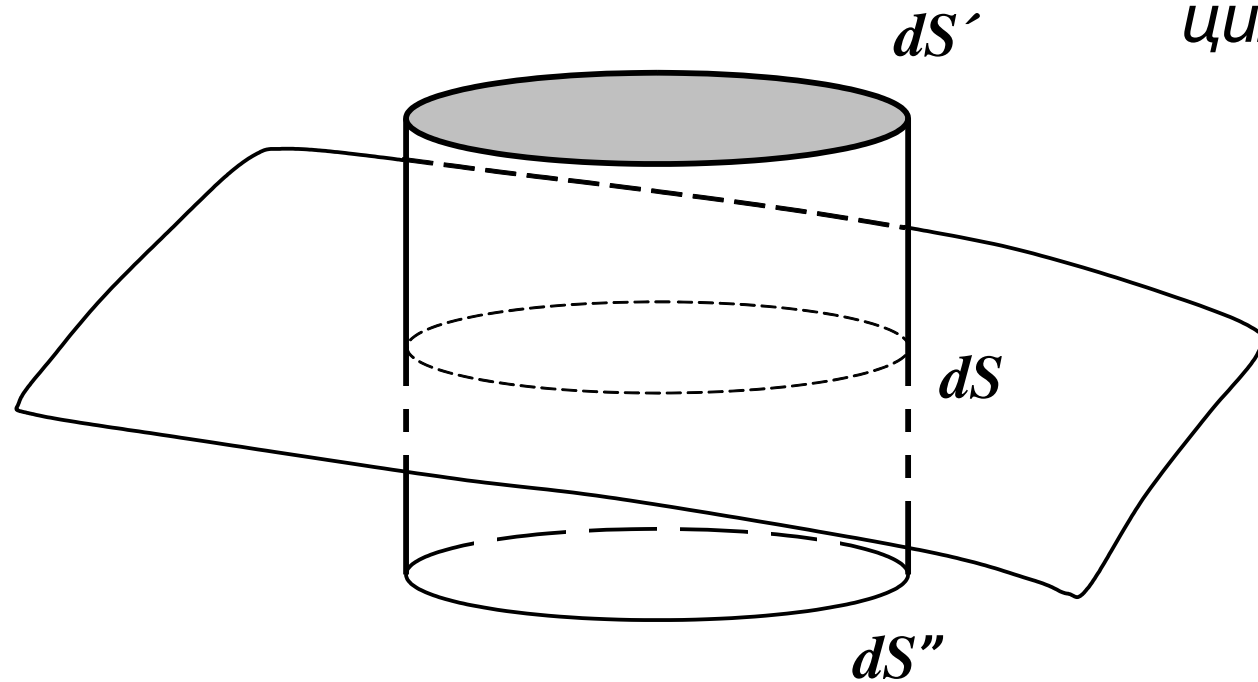
Поле вблизи поверхности заряженного проводника

Выделим на
поверхности
проводника
произвольную
площадку dS .

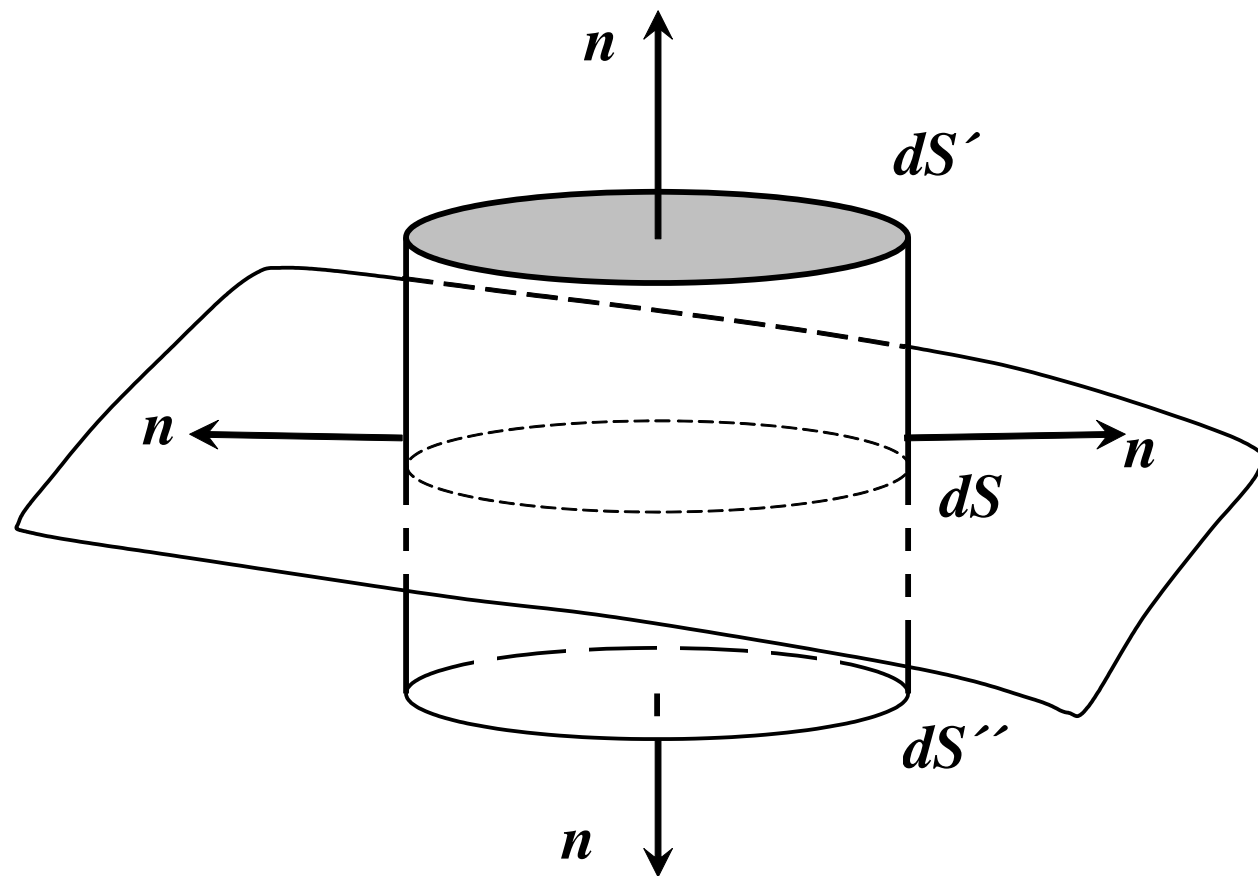


Поле вблизи поверхности заряженного проводника

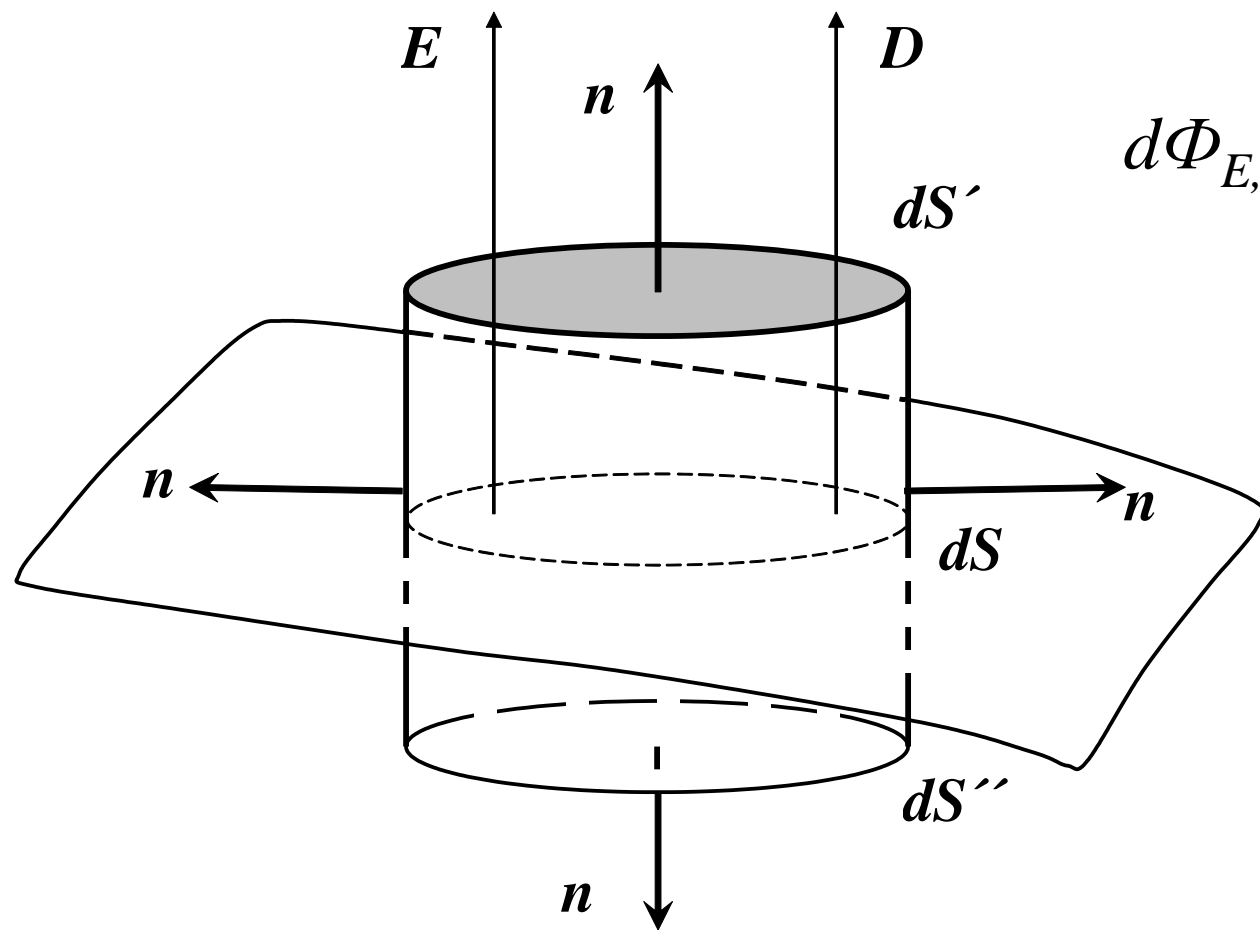
*Построим на ней
цилиндр высотой dh*



Поле вблизи поверхности заряженного проводника



Поле вблизи поверхности заряженного проводника

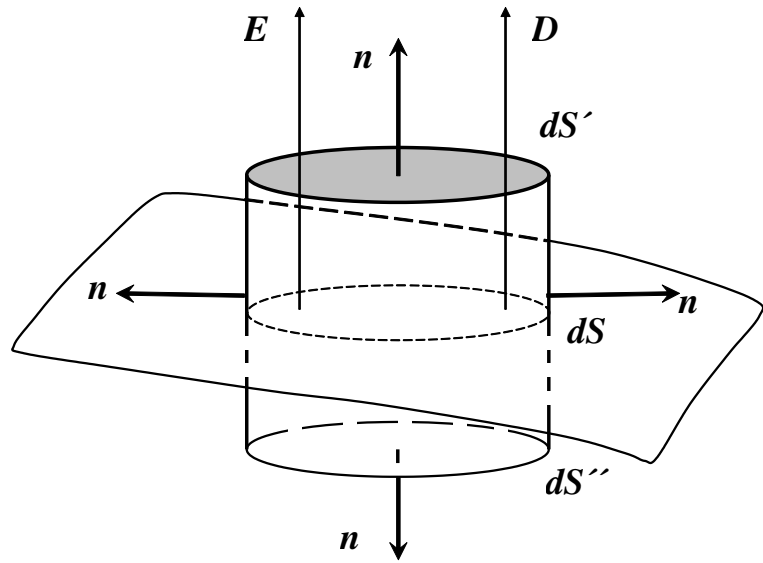


$$d\Phi_{E,D \text{ бок.. поверхность}} = 0.$$

$$\vec{D}_{\text{внутр}} = 0$$

$$d\Phi_D \text{ } dS'' = 0$$

Поле вблизи поверхности заряженного проводника



$$d\Phi_D = d\Phi_D \, dS' = D_n \cdot dS.$$

Теорема Гаусса для \mathbf{D} :

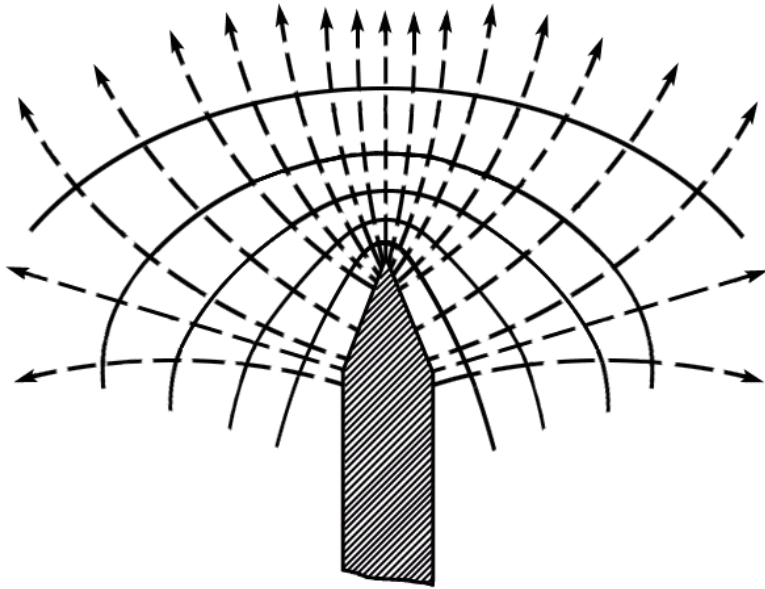
$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = dq = \sigma \cdot dS$$

$$D_n = \sigma$$

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

Поле вблизи поверхности заряженного проводника



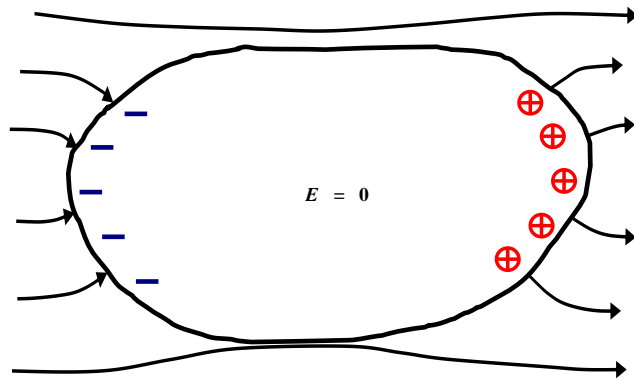
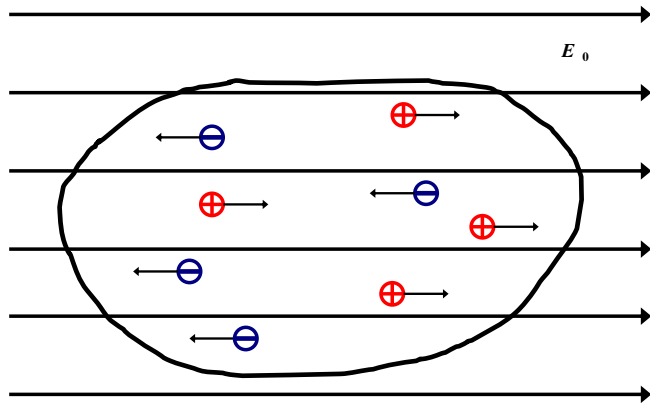
Вектор E вблизи поверхности проводника зависит от кривизны поверхности проводника.

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

Распределение зарядов по внешней поверхности проводника зависит только от её формы.

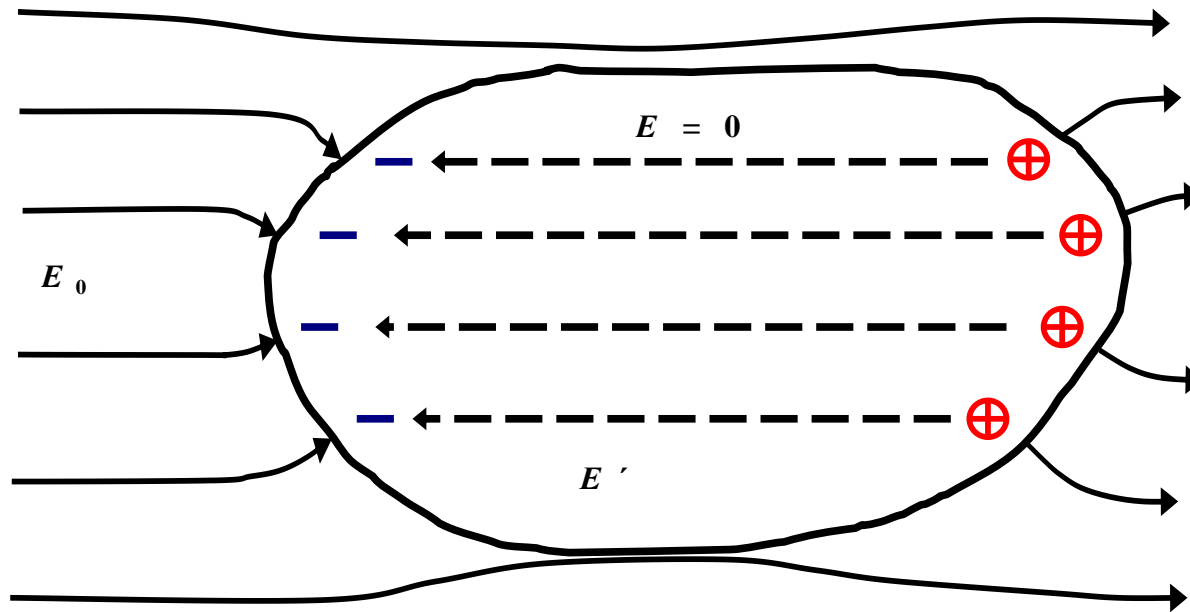
На внутренней поверхности замкнутых полых проводников $\sigma = 0$.

Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.



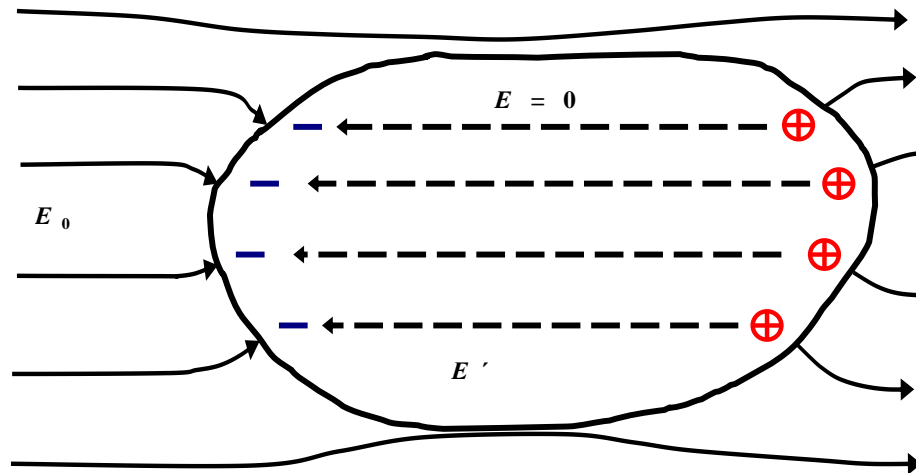
Электроны проводимости и положительные ионы перераспределяются до тех пор пока внутри проводника поле электронов проводимости и положительных ионов не **скомпенсирует** внешнее поле.

Электростатическая индукция —
явление перераспределения поверхностных
зарядов на проводнике во внешнем
электростатическом поле.



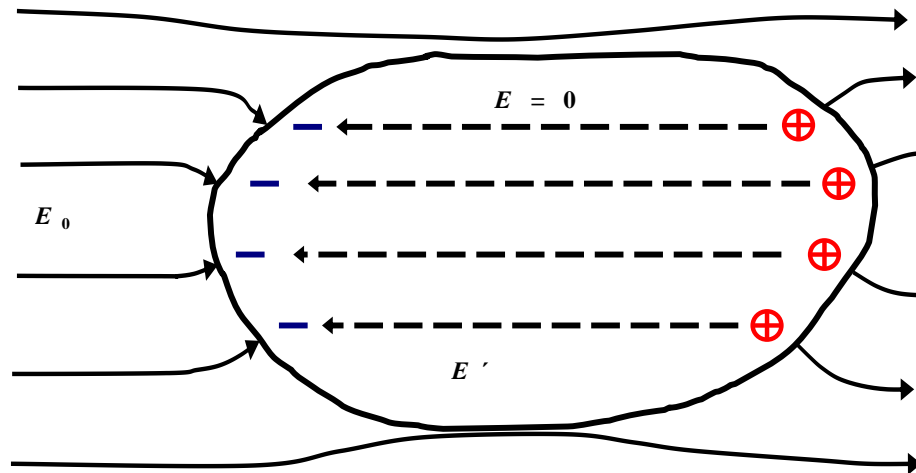
Проводники в электрическом поле.

Электростатическая индукция.



Нейтральный проводник, внесенный в электростатическое поле, разрывает часть линий напряженности, они заканчиваются на отрицательных **индуцированных зарядах** и вновь начинаются на положительных.

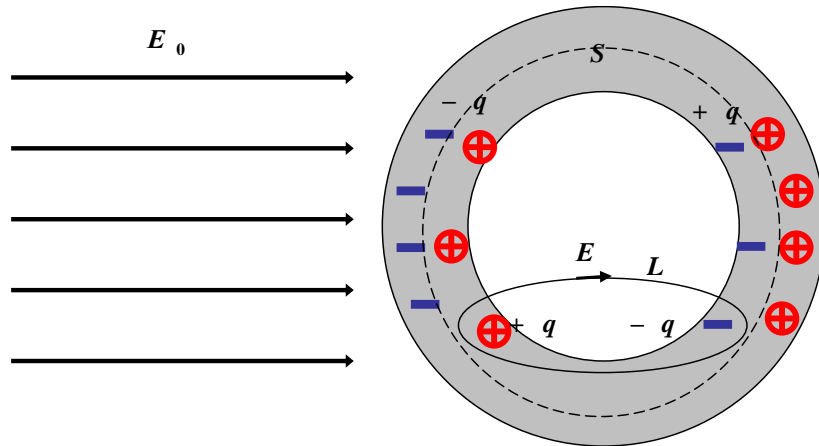
Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.



Индукцированные (наведенные) на проводнике заряды исчезают, когда проводник удаляют из электрического поля.

Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.

Электрическое поле в полости проводника



$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$$

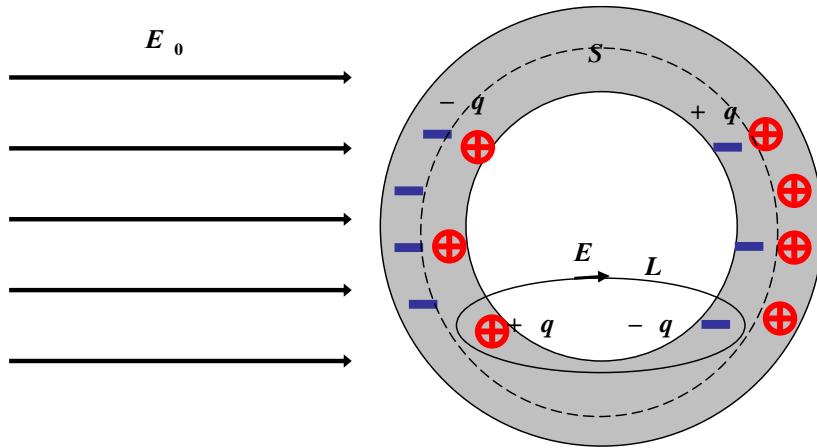
$$\vec{E} = 0$$

$$\sum q = 0$$

$$\sum q = q_+ + q_-$$

Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.

Электрическое поле в полости проводника



Если работа по перемещению заряда в полости $\neq 0$.

Следовательно, работа по перемещению заряда по замкнутому контуру L отлична от нуля и

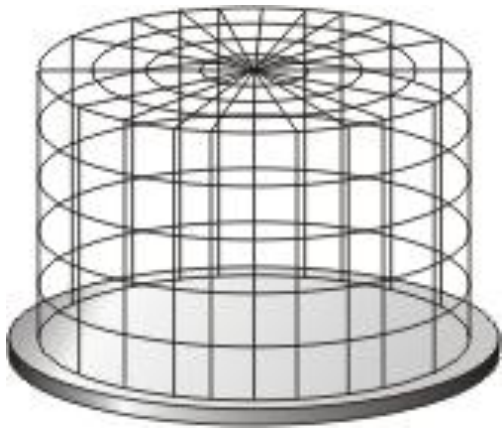
$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} \neq 0$$

что **НЕВОЗМОЖНО** для кулоновских сил.

Поэтому заряды и электростатическое поле внутри полости металла, находящегося в электрическом поле, отсутствуют.

Электростатическая защита

На этом основана электростатическая защита – экранирование тел (измерительные приборы, колебательный контур) от влияния внешних электрических полей.



Опыт Кавендиша

Самостоятельно!

Электроемкость проводника

Електроємкость уединенного проводника

Уединенный проводник – проводник, вблизи которого нет других тел, способных повлиять на распределение зарядов на нем.

Проводнику сообщили заряд q , который распределился по поверхности проводника так, что внутри проводника поле $E = 0$.

Если сообщить проводнику дополнительный заряд, поле внутри $E = 0$, а потенциал на поверхности измениться.

Электроемкость уединенного проводника

Вблизи поверхности
проводника

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

$$E \sim \sigma \sim q$$

$$\int_r^\infty \vec{E} d\vec{r} = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$\varphi_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \int_r^\infty \vec{E} d\vec{r} = \varphi$$

$$E \sim \varphi$$

$$E \sim q$$



$$q = C\varphi$$

C – коэффициент пропорциональности
(электроемкость).

Електроємкость провідника

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

В СІ C вимірюється в фарадах [$1\text{Ф} = 1\text{Кл} / 1\text{В}$].

Електроємкость провідника – це фізична величина численно равная заряду, который необходимо сообщить проводнику, чтобы увеличить его потенциал на **1В**.

Электроемкость шара

$$E = -\frac{d\varphi}{dr} \qquad E dr = -d\varphi$$

Вне шара: $r \geq R$, $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$

$$\int_R^{\infty} \frac{q dr}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} = -\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi$$

Електроємність шара

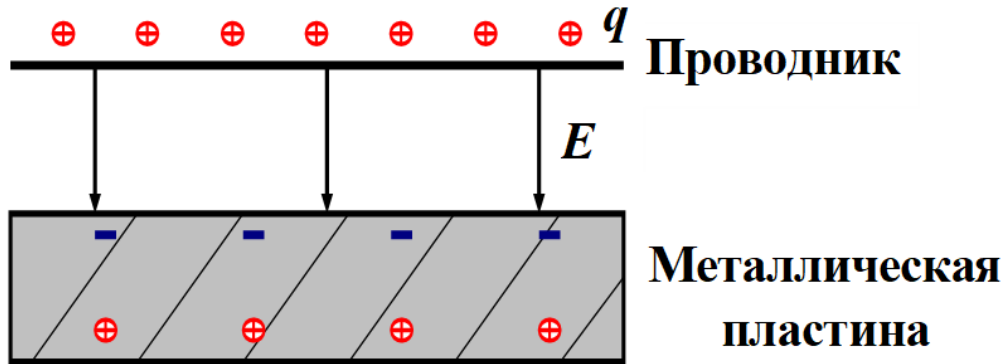
$$\frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \int_R^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad \varphi_2 = \varphi_{\infty} = 0$$

$$\frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R} = \varphi \quad C = \frac{q}{\varphi}$$

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

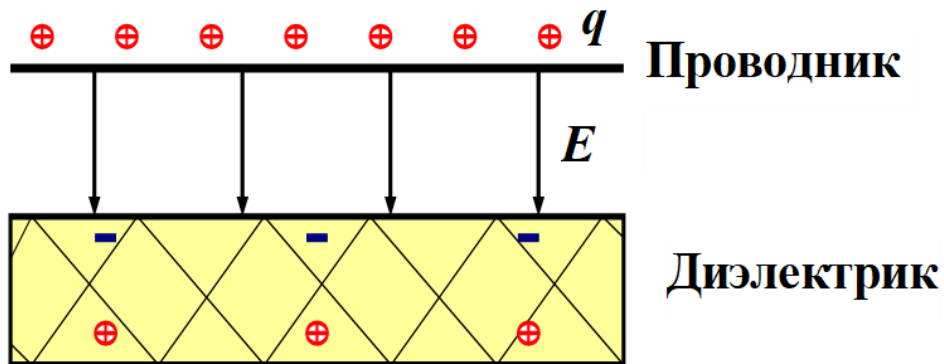
Електроємність проводника
зависит от его формы и
размеров, свойств
окружающей среды (ϵ).

Взаимная емкость



$$\varphi = \varphi_+ + \varphi_-; \varphi < \varphi_+$$

$$q = \text{const}$$



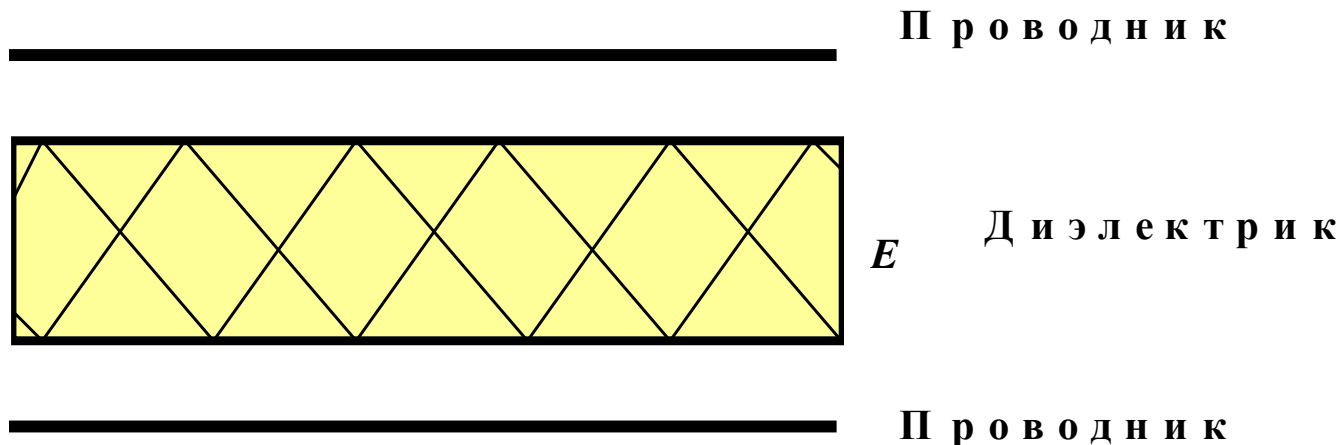
$$C = q / \varphi - \text{увеличится.}$$

Взаимная емкость больше, чем емкость уединенного проводника.

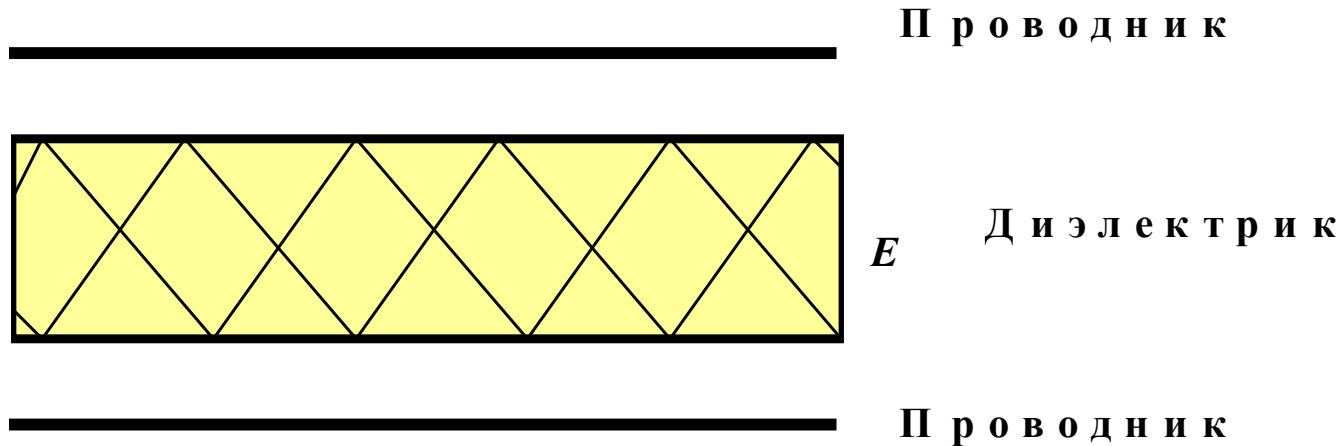
Конденсаторы

Особенно большой электроемкостью обладает конденсатор.

Конденсатор – система из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, продольные размеры которых много больше расстояния между ними.



Конденсаторы



Конденсаторы конструируют таким образом, чтобы поле было сосредоточено между обкладками.

В этом случае на емкость конденсатора не оказывают влияния окружающие тела.

Конденсаторы

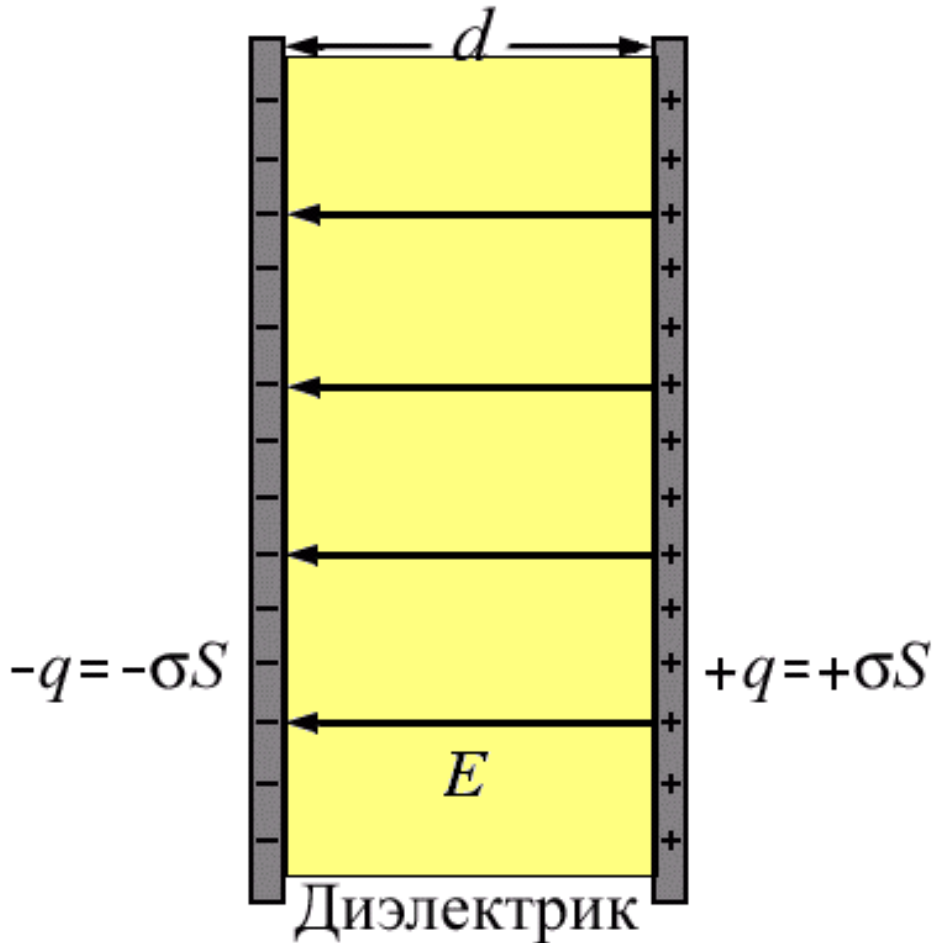
Конструктивно конденсаторы бывают ***плоские, цилиндрические, сферические.***

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

$\varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов между обкладками;

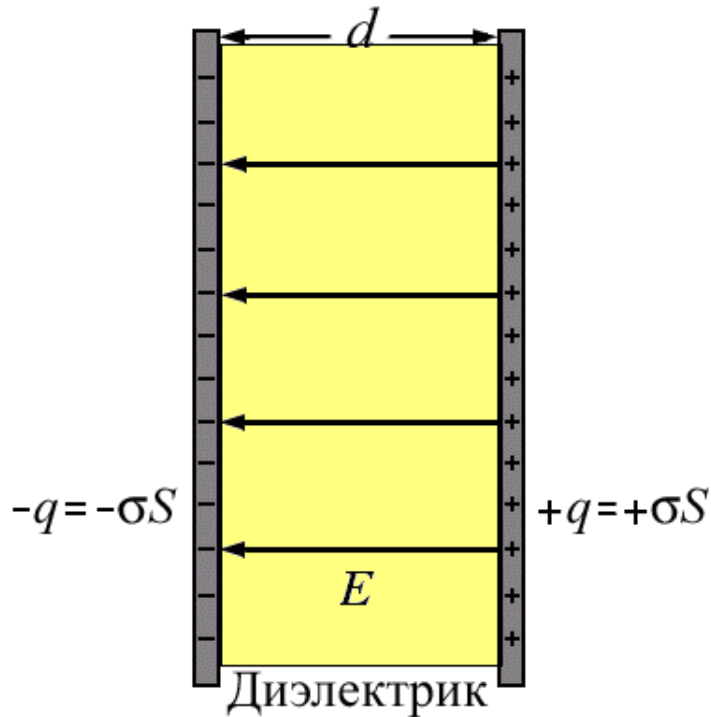
q — заряд конденсатора.

Плоский конденсатор



Расстояние между обкладками d много меньше линейных размеров конденсатора. Следовательно, поле конденсатора можно рассматривать как поле между двумя бесконечными пластинами.

Плоский конденсатор



$$E = \frac{\sigma}{\epsilon \epsilon_0} \quad E = -\frac{d\varphi}{dr}$$

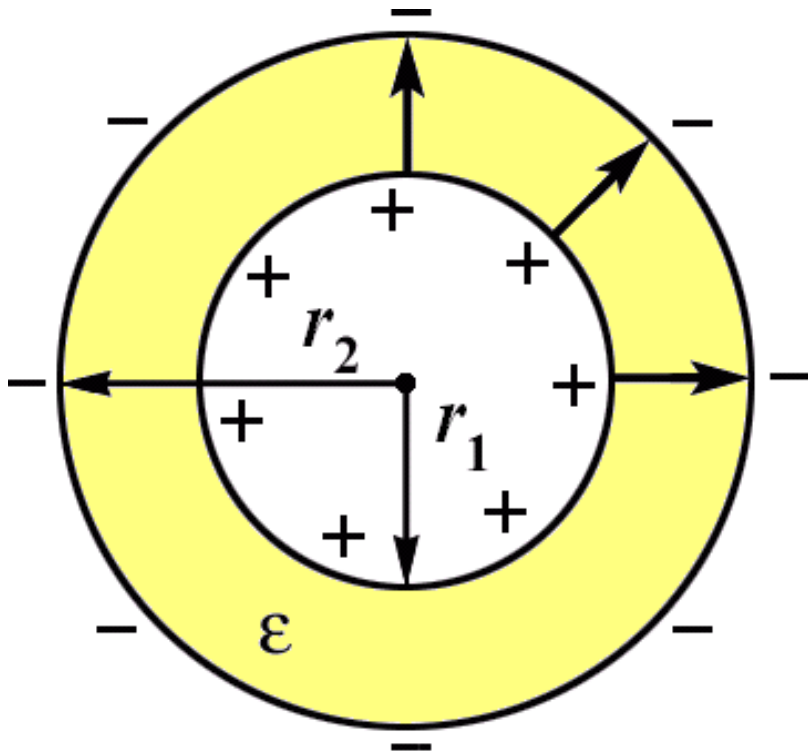
$$\int_0^d \frac{\sigma dr}{\epsilon \epsilon_0} = -\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi$$

$$\frac{\sigma \cdot d}{\epsilon \epsilon_0} = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$q = \sigma S$$

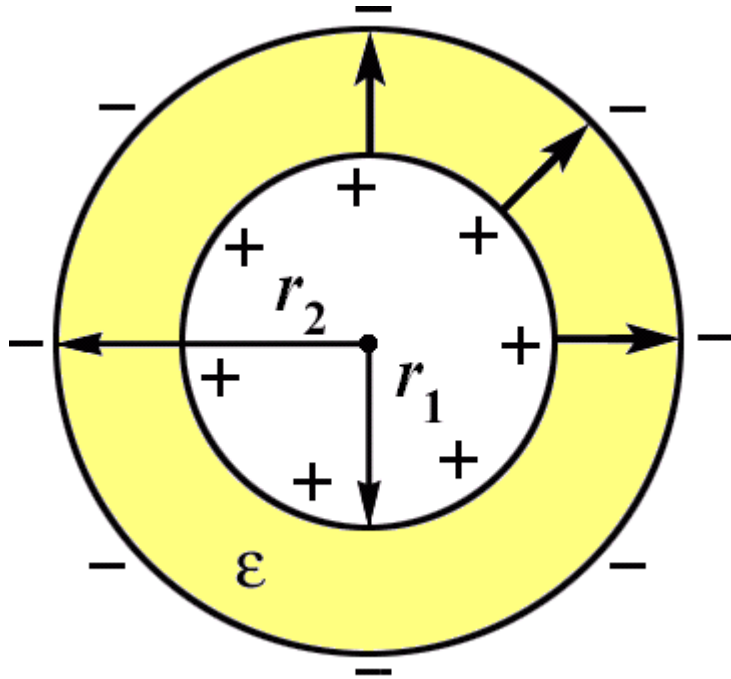
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

Сферический конденсатор



Состоит из двух
концентрических
обкладок
сферической
формы,
разделенных слоем
диэлектрика.

Сферический конденсатор



Поле равномерно заряженной
сферической поверхности (вне сферы)
эквивалентно полю точечного заряда:

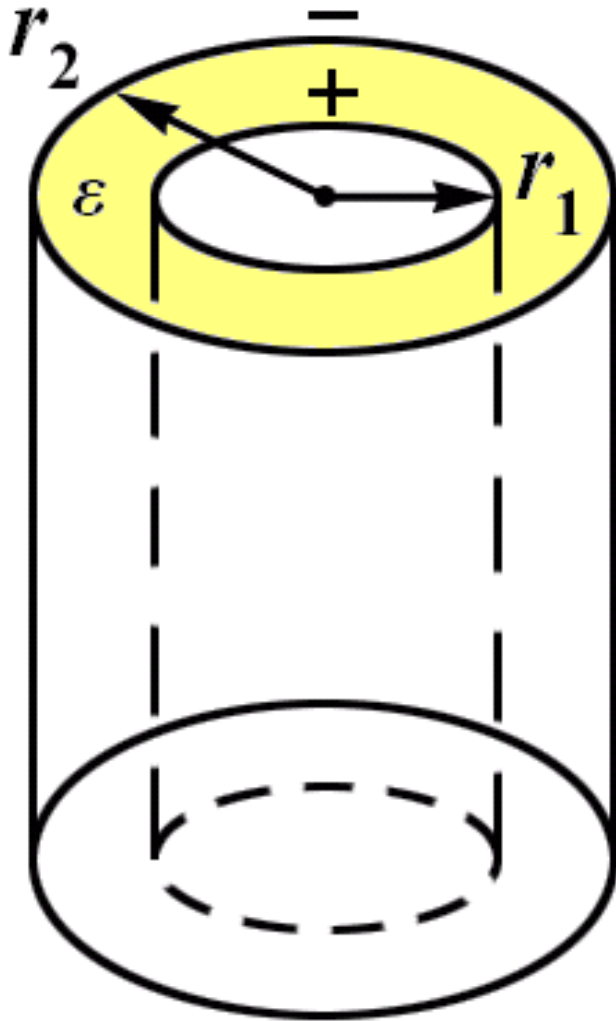
$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$



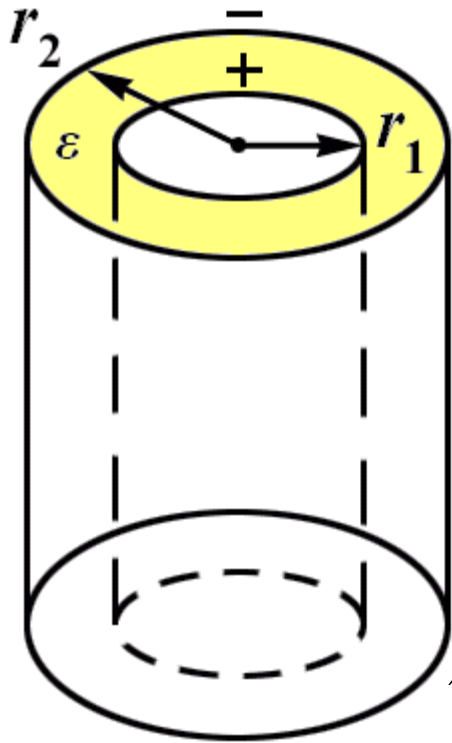
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}$$

Цилиндрический конденсатор



Состоит из двух полых коаксиальных цилиндров с радиусами r_1 и r_2 , вставленных один в другой ($r_1 < r_2$) и разделенных слоем диэлектрика.

Цилиндрический конденсатор



$r_1 < r_2$; $r_1, r_2 < \text{длины}$

поля бесконечного заряженного
цилиндра:

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

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$\tau = \frac{q}{l}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 l} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

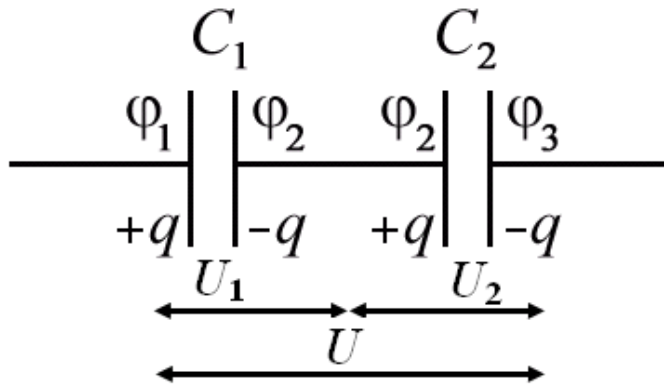
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Конденсаторы

Конденсаторы характеризуются пробивным напряжением – разность потенциалов, при которой происходит пробой – электрический разряд через слой диэлектрика. Пробивное напряжение зависит от формы обкладок, свойств диэлектрика и его толщины.

Соединения конденсаторов

Последовательное соединение конденсаторов



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

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$$

Для n конденсаторов:

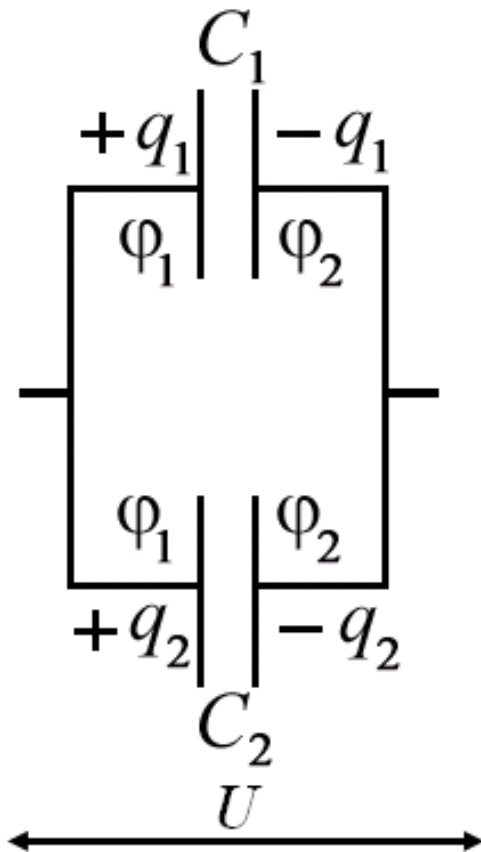
$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

$$C < C_1, C < C_2$$

Если конденсаторы
одинаковы, то общая
емкость $C = C / n$.

Соединения конденсаторов

Параллельное соединение конденсаторов



- Разность потенциалов на обкладках конденсаторов одинакова и равна U .
- Заряд батареи согласно закону сохранения заряда $q_1 + q_2 = \text{const}$.

$$C_1 U + C_2 U = C U$$

$$C_1 + C_2 = C$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i$$

Энергия заряженного проводника

В поле уединенного проводника перемещаем заряд dq .

При переносе заряда dq из ∞ на проводник емкостью C имеющий потенциал φ , совершается работа:

$$dA = \varphi \cdot dq$$

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



$$dA = \frac{q dq}{C}$$

При этом заряд проводника увеличивается на dq .

Энергия заряженного проводника

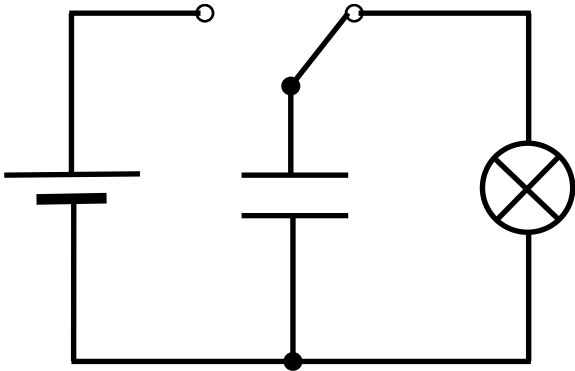
Работа, затрачиваемая на зарядку проводника от нулевого потенциала ($\varphi = 0$) до φ

$$A = \int dA = \int \frac{q dq}{C} = \frac{q^2}{2C}$$

Энергия заряженного проводника равна работе, которую необходимо совершить, чтобы зарядить этот проводник:

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

Энергия заряженного конденсатора



Если заряженный конденсатор замкнуть на электрическую лампочку, то она какое-то время будет гореть.

Следовательно, конденсатор **обладает энергией**.

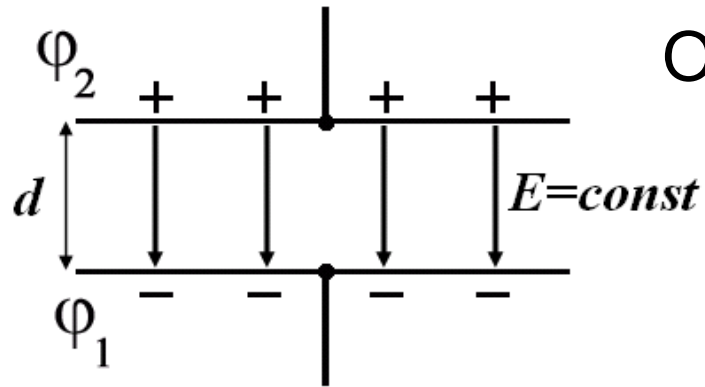
$$\left. \begin{aligned} dA &= U \cdot dq \\ U &= \frac{q}{C} \end{aligned} \right\}$$



$$dA = \frac{q dq}{C}$$

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

Объемная плотность энергии электрического поля



Объемная плотность энергии:

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{CU^2}{2Sd}$$

$$\omega = \frac{C(Ed)^2}{2Sd} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S(Ed)^2}{d \cdot 2Sd}$$

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

- энергия, приходящаяся на
единичный объем однородного поля.

$$dW = \omega \cdot dV \quad W = \int_V \omega \cdot dV$$

Постоянный электрический ток

Электрический ток

- ***Электрический ток*** – упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.
- *Ток проводимости* (ток в проводниках) – движение микрозарядов в макротеле.
- *Конвекционный ток* – движение макроскопических заряженных тел в пространстве.
- *Ток в вакууме* – движение микрозарядов в вакууме.

Электрический ток

В проводнике под действием приложенного электрического поля **свободные** электрические заряды перемещаются:

положительные — по полю,
отрицательные — против поля.

Движение носителей заряда складывается из:

- 1) хаотического (теплого) движение $v_{cp} \sim \sqrt{kT}$;
- 2) направленного $v_{cp} \sim E$.

Условия появления и существования тока проводимости:

1. Наличие в среде свободных носителей заряда, т.е. заряженных частиц, способных перемещаться.

В **металле** это электроны проводимости;

в **электролитах** – положительные и отрицательные ионы;

в **газах** – положительные, отрицательные ионы и электроны.

2. Наличие в среде электрического поля, энергия которого затрачивалась бы на перемещение электрических зарядов.

Т.е. нужен источник электрической энергии – устройство, в котором происходит преобразование какой-либо энергии в энергию электрического поля.

Сила тока

За **направление тока** условно принято направление движения положительных зарядов.

Сила тока – количественная мера (характеристика) электрического тока.

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

– сила тока численно равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу

В СИ: [1А = 1Кл / с].

Сила тока

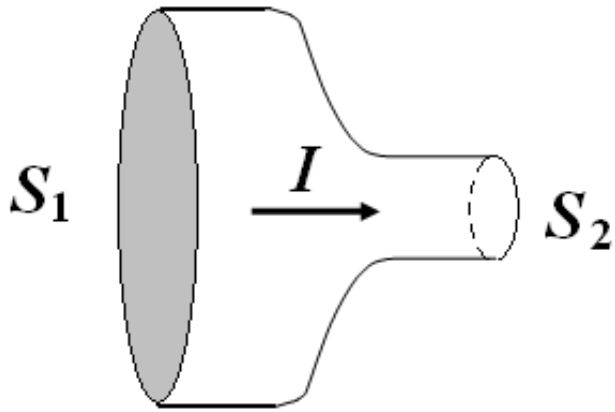
Если ток создается двумя видами носителей:

$$I = \frac{dq_+}{dt} + \frac{dq_-}{dt}$$

Для постоянного тока:

$$I = \frac{q}{t}$$

Плотность тока



Вектор плотности тока \vec{j}

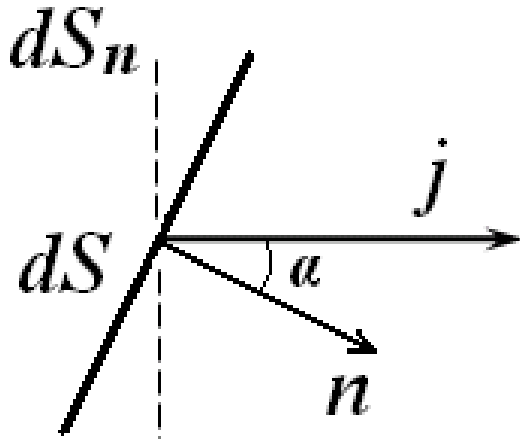
вводится для характеристики распределения заряда по сечению проводника.

$$j = \frac{dq}{dS_n dt} = \frac{dI}{dS_n}$$

В СИ: [А / м²]

плотность тока численно равна **заряду**,
проходящему через единичную площадку dS_n ,
расположенную перпендикулярно направлению тока,
за единицу времени.

Связь между силой тока и плотностью тока



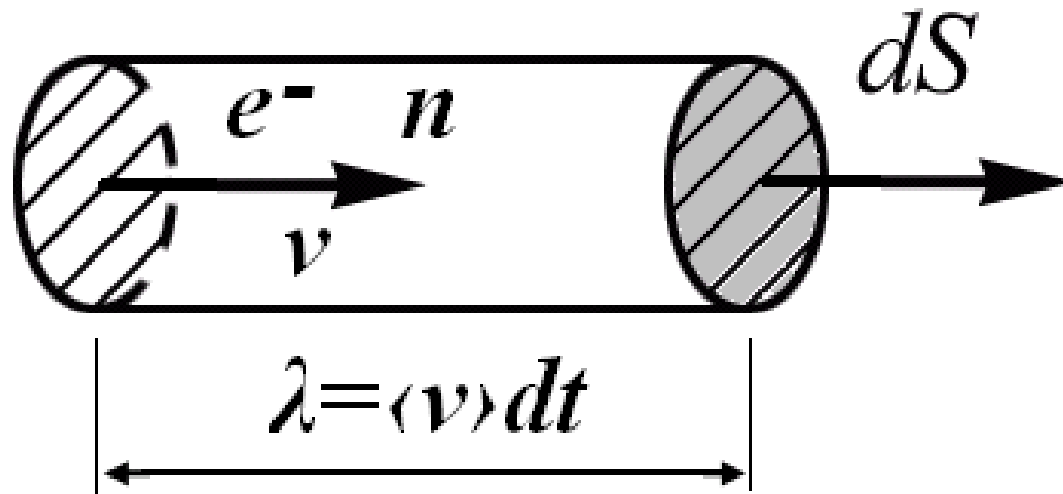
$$\begin{aligned} dI &= \vec{j} d\vec{S} = \\ &= jdS \cos(\angle \vec{j}, d\vec{S}) = \\ &= jdS \cos \alpha = jdS_n \end{aligned}$$

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}$$

$$I = \oint_S (\vec{j} d\vec{S})$$

Связь между силой тока и плотностью тока

Рассмотрим проводник сечением dS .

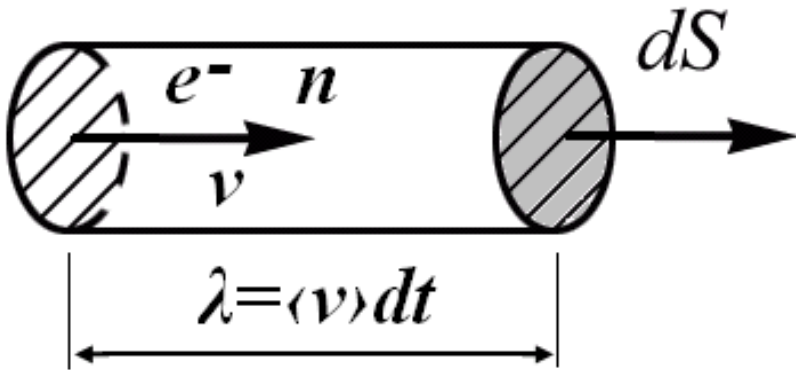


e — элементарный заряд;

n — концентрация зарядов в объеме проводника;

$\langle v \rangle$ — средняя скорость упорядоченного движения зарядов.

Связь между силой тока и плотностью тока

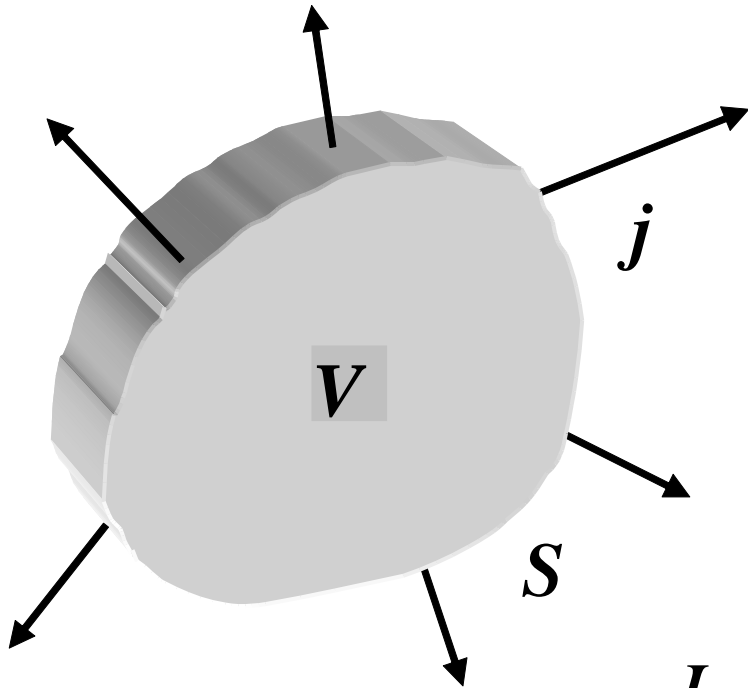


$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$I = \frac{nedV}{dt} = \frac{ne\langle\lambda\rangle dS}{dt} = \frac{ne\langle v\rangle dt dS}{dt} = ne\langle v\rangle dS$$

$$j = \frac{I}{dS} = ne\langle v \rangle$$

Уравнение непрерывности



Теорема
Остроградского-Гаусса:

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = I$$

$$I = -\frac{dq}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

Уравнение непрерывности в интегральной

Знак минус в уравнении означает то, что заряды **форме** уходят из объема V .

Уравнение непрерывности

$$I = \oint_S \vec{j} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{j} dV$$

$$I = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$



$$\operatorname{div} \vec{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

**Дифференциальная форма
записи уравнения
непрерывности**

(закон сохранения заряда).
Знак минус в уравнении означает,
что в точках, которые являются
источниками тока (j), происходит
убывание заряда.

Уравнение непрерывности

В случае постоянного тока (стационарный ток):
Потенциал φ и плотность заряда ρ остаются неизменными, т.е. ρ не зависит от времени t .

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = I = -\frac{dq}{dt} \quad q = \text{const}$$

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0$$

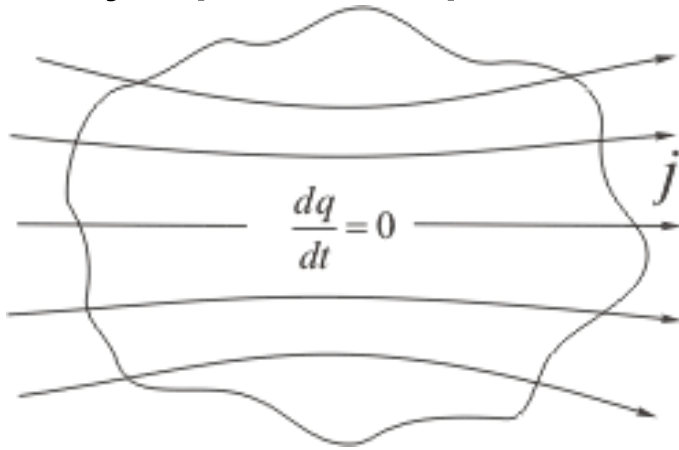
уравнение непрерывности для постоянного тока (в интегральной форме).

$$\text{div} \vec{j} = 0$$

уравнение непрерывности для постоянного тока (в дифференциальной форме).

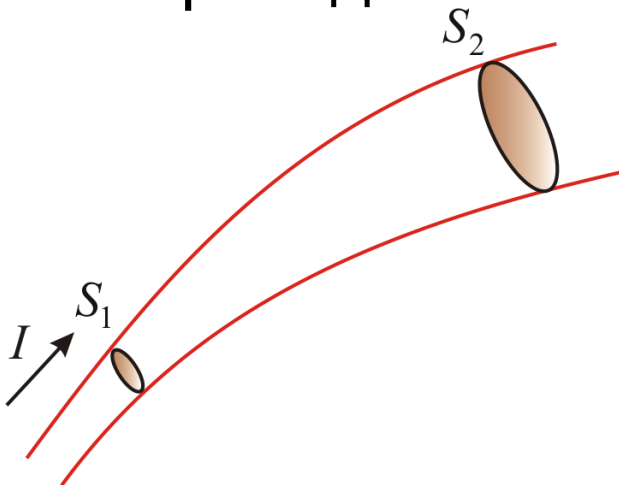
Уравнение непрерывности

Если ток постоянный, то **избыточный заряд** внутри однородного проводника всюду **равен**



$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0$$

Если проводник имеет неоднородное сечение $j \neq const$



$$\frac{j_2}{j_1} = \frac{S_1}{S_2}$$

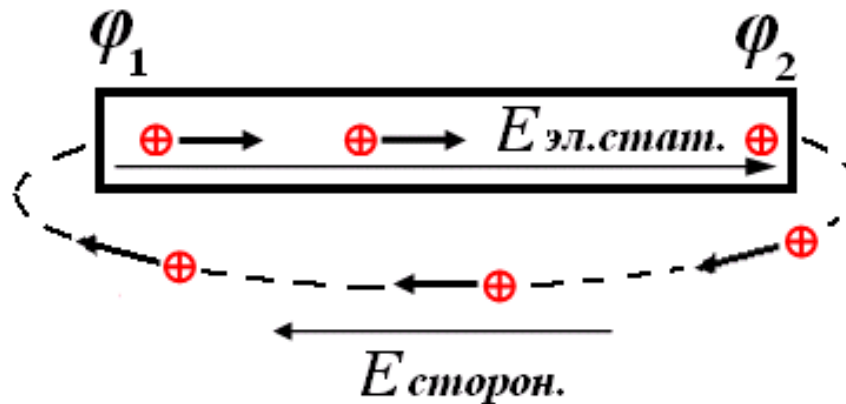
Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

Для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, которое создает и поддерживает разность потенциалов $\Delta\varphi$ за счет работы сил неэлектрического происхождения.

Такие устройства называются **источниками тока** (генераторы – преобразуется механическая энергия; аккумуляторы – энергия химической реакции между электродами и электролитом).

Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

Сторонние силы - силы неэлектрического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока.

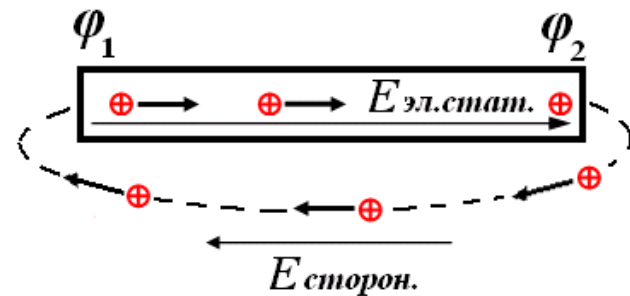


Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов.

Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

Электродвижущая сила (э.д.с. – \mathcal{E}) – физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_{0+}}.$$



$$\mathcal{E} = \oint \vec{E}_{cm} d\vec{l}.$$

Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

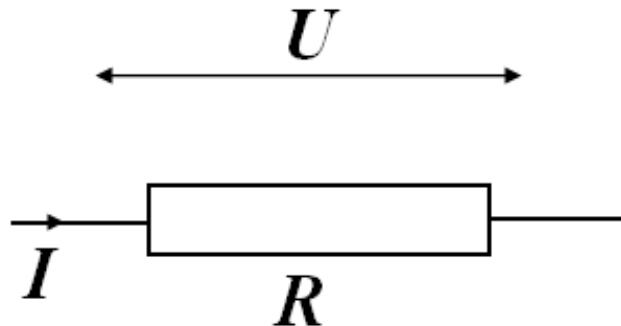
Напряжение на участке цепи-

величина, численно равная работе, совершаемой полем электростатических и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на этом участке цепи

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}.$$

Закон Ома для однородного участка цепи

- **Однородным** называется участок цепи не содержащий источника э.д.с.



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

Закон Ома в интегральной форме: сила тока прямо пропорциональна падению напряжения на однородном участке цепи и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка.

Закон Ома

Закон Ома не является универсальной связью между током и напряжением.

- а) Ток в газах и полупроводниках подчиняется закону Ома только при небольших U .
- б) Ток в вакууме не подчиняется закону Ома.

Закон Богуславского-Лэнгмюра (закон $3/2$):

$$I \sim U^{3/2}.$$

- в) в дуговом разряде – при увеличении тока напряжение падает.
- Неподчинение закону Ома обусловлено зависимостью сопротивления от тока.

Закон Ома

$$[1\text{Ом} = 1\text{В} / 1\text{А}].$$

Величина R зависит от формы и размеров проводника, а также от свойств материала, из которого он сделан. Для цилиндрического проводника :

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

ρ — удельное электрическое сопротивление [Ом·м], для металлов его величина порядка 10^{-8} Ом·м.

Закон Ома

- Соппротивление проводника зависит от его температуры:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \cdot t),$$

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

α – температурный коэффициент сопротивления, для чистых металлов,
 ρ_0, R_0 – удельное сопротивление и сопротивление проводника при $t = 0$ °C.

$$T \uparrow \quad \Rightarrow \quad v_{cp}^{ионовКР} \sim \sqrt{kT} \uparrow, \quad v_{cp}^{электронов} \sim E \downarrow$$

Закон Ома

- Последовательное соединение.

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

- Параллельное соединение.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Закон Ома в дифференциальной форме

$$d\varphi = Edl;$$

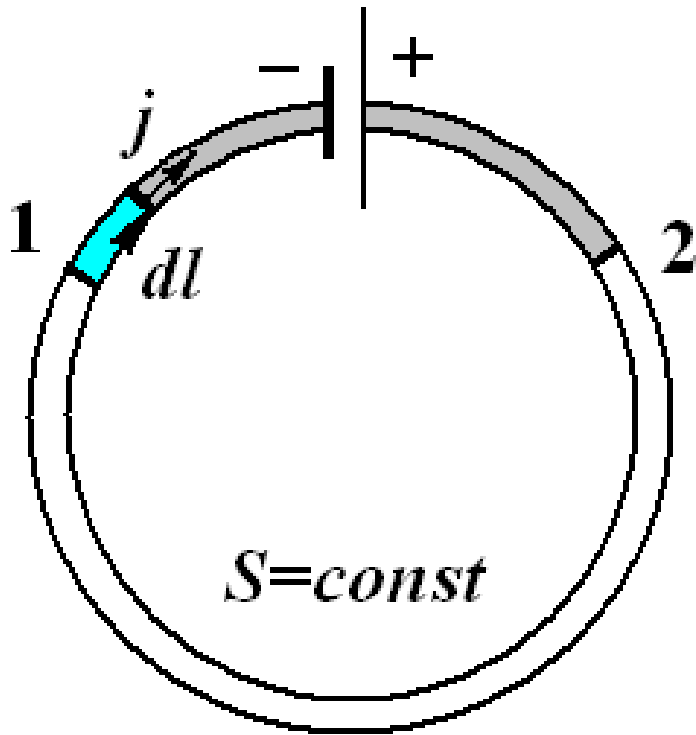
$$dI = \frac{d\varphi}{dR}, \quad jdS = \frac{Edl}{\rho dl} \cdot dS, \quad \Rightarrow \quad j = \frac{E}{\rho}.$$

$\sigma = 1/\rho$ – удельная электрическая
проводимость, [сименс на метр, См/м].

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}.$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

- **Неоднородный** – участок цепи, содержащий источник э.д.с.

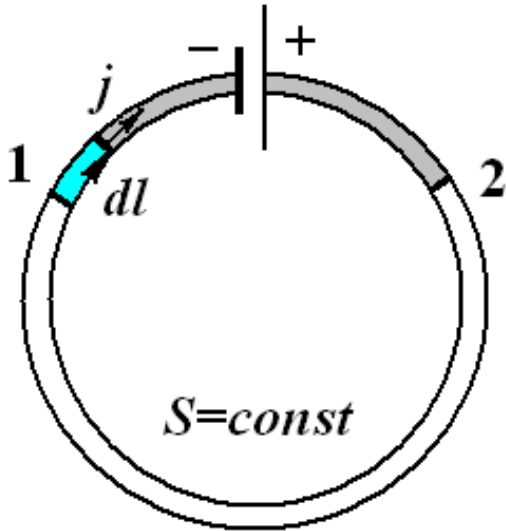


$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_{cm}),$$

\vec{E} – напряженность поля
кулоновских сил,

\vec{E}_{cm} – напряженность поля
сторонних сил.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

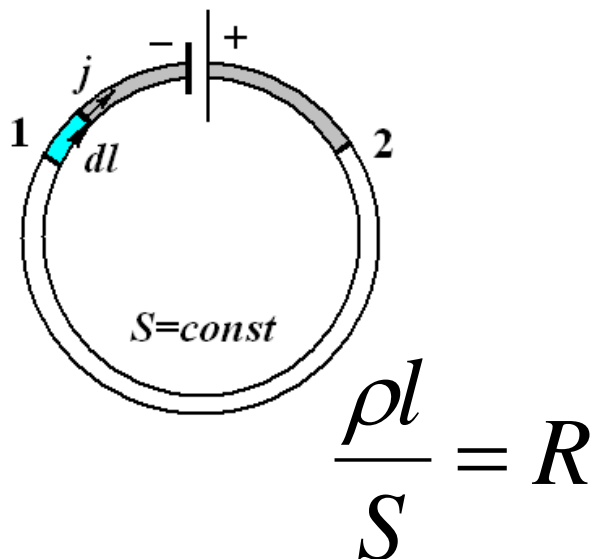


$$d\vec{l} \cdot \vec{j} = \sigma \vec{E} d\vec{l} + \sigma \vec{E}_{cm} d\vec{l}.$$

Вектор $d\vec{l}$ выбрали
совпадающим по
направлению с вектором
плотности тока \vec{j} .

$$d\vec{l} \uparrow \uparrow \vec{j} \uparrow \uparrow \vec{E} \uparrow \uparrow \vec{E}_{cm};$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}; \quad j = \frac{I}{S}.$$



$$\int_1^2 \frac{\rho I}{S} dl = \int_1^2 E dl + \int_1^2 E_{cm} dl,$$

$$\frac{I \rho}{S} l_{21} = \int_1^2 E dl + \int_1^2 E_{cm} dl.$$

$$\int_1^2 E dl = \varphi_1 - \varphi_2$$

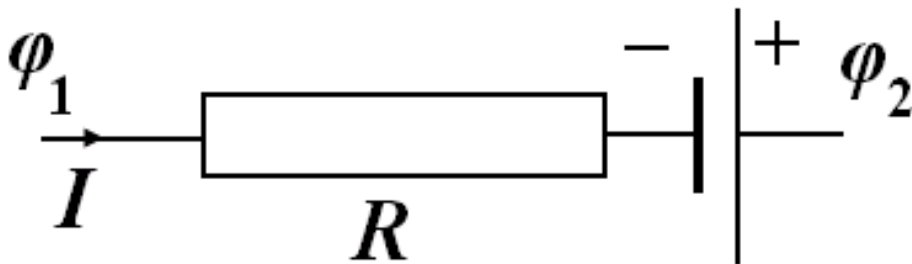
работа, совершаемая кулоновскими силами по перемещению q_{0+} из точки 1 в точку 2.

$$\int_1^2 E_{cm} dl = \mathcal{E}$$

работа, совершаемая сторонними силами по перемещению q_{0+} из точки 1 в точку 2.

- Работа, совершаемая кулоновскими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда q_{0+} – ***падение напряжения (напряжение)***.

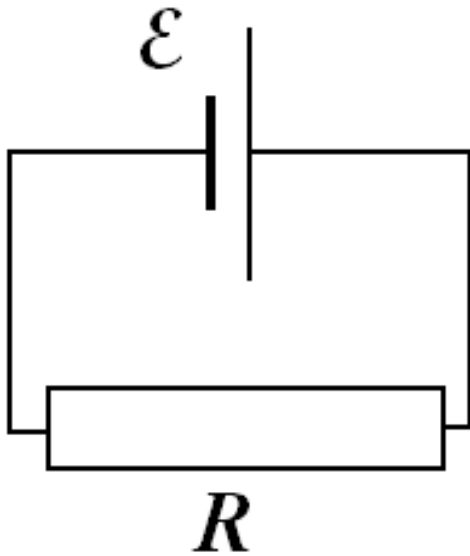
Так как точки 1, 2 были выбраны произвольно, то полученные соотношения справедливы для любых двух точек электрической цепи:



$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}}{R}.$$

Закон Ома для замкнутой цепи

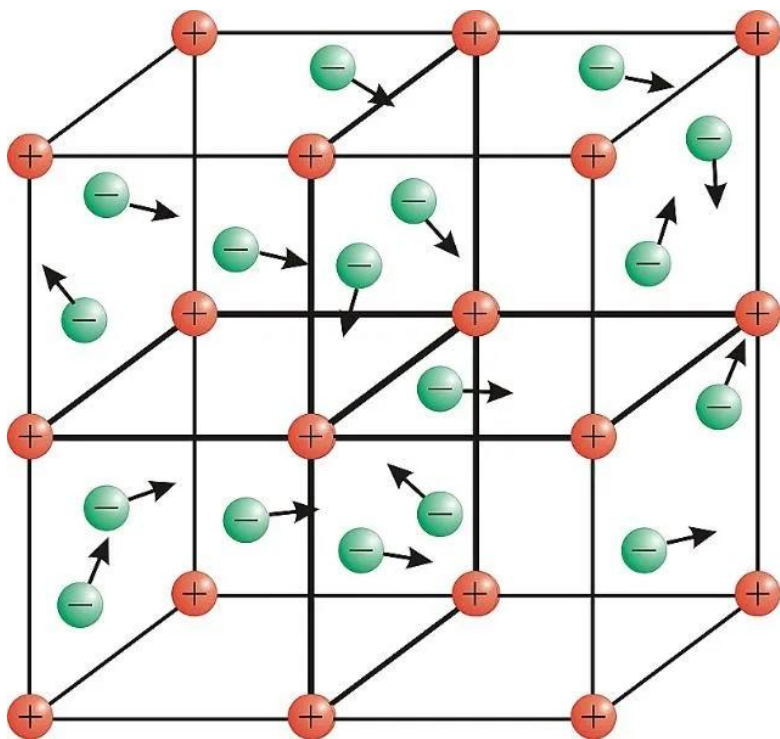
- Если цепь **замкнутая**, то $\varphi_1 = \varphi_2$.



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{полн}}};$$

$$R_{\text{полн}} = r_{\text{внутр.ист.т.}} + R_{\text{внеш.цепи}}.$$

Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца



Проводник
нагревается.

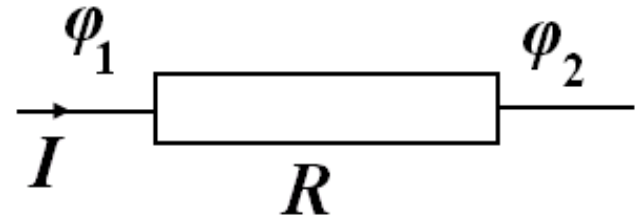
Выделившееся тепло
 Q равно работе тока
 A .

Мощность
электрического тока:

$$P = \frac{A}{t}.$$

Закон Джоуля-Ленца

- Однородный участок цепи



$$\begin{aligned} A = Q &= q(\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2)I \cdot t = \\ &= IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \end{aligned}$$

$$P = IU$$

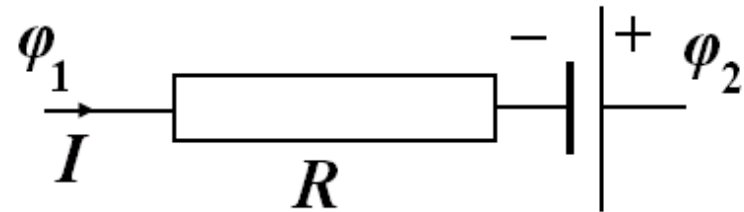
$$Q = I^2 R t$$

Закон Джоуля-Ленца

- Неоднородный участок цепи

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}) =$$
$$= (\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E})I \cdot t.$$

$$P = (\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E})I.$$



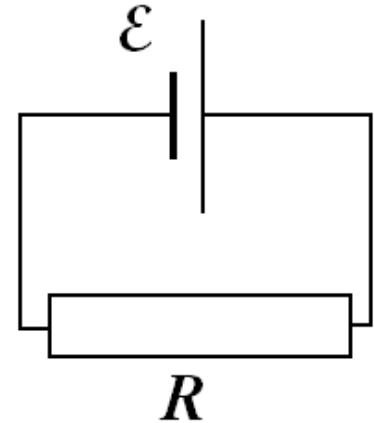
Закон Джоуля-Ленца

- Замкнутая цепь.

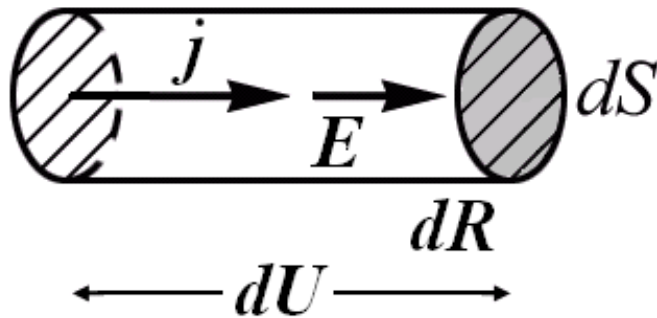
$$A = \mathcal{E}q = \mathcal{E}I \cdot t.$$

$$P = \mathcal{E}I.$$

- К.п.д. источника тока: $\eta = \frac{I^2 R}{I\mathcal{E}} = \frac{U}{\mathcal{E}}.$



Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме



$$dq = Idt, \quad dA = Udq = IUdt$$

$$dA = dQ$$

$$dQ = IUdt = I^2 Rdt$$

- **удельная тепловая мощность тока** – количество тепла, выделившееся в единичном объеме за единицу времени.

$$P_{y\partial} = \frac{dQ}{dVdt}.$$

$$dQ = (dI)^2 dRdt = \frac{(jdS)^2 \rho dl}{dS} dt = j^2 \rho \underbrace{dSdl}_{dV} \cdot dt$$

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

$$\left. \begin{aligned} dQ &= (dI)^2 dR dt = \frac{(jdS)^2 \rho dl}{dS} dt = j^2 \rho \underbrace{dS dl}_{dV} \cdot dt, \\ j &= \sigma E. \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} dQ &= \sigma^2 E^2 \rho dV \cdot dt, \\ \sigma &= \frac{1}{\rho}. \end{aligned} \right\}$$

$$P_{y\partial} = \frac{dQ}{dV dt} = \sigma E^2.$$

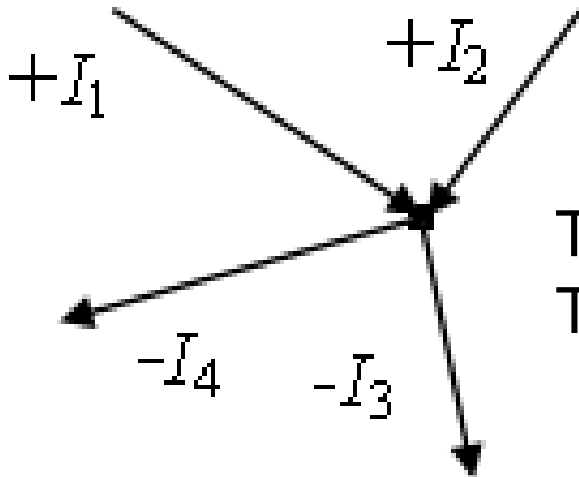
Законы Кирхгофа

Используются для расчета разветвленных цепей постоянного тока.

- *Неразветвленная электрическая цепь* – цепь, в которой все элементы цепи соединены последовательно.
- *Элемент электрической цепи* – любое устройство, включенное в электрическую цепь.
- *Узел электрической цепи* – точка разветвленной цепи, в которой сходится более двух проводников.
- *Ветвь разветвленной электрической цепи* – участок цепи между двумя узлами.

- **Первый закон Кирхгофа** (следствие закона сохранения заряда): алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$



Ток, подходящий к узлу – положительный.
Ток, отходящий от узла – отрицательный.

Пример: $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$.

- **Второй закон Кирхгофа** (обобщенный закон Ома): в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивление соответствующих участков R_i этого контура равна алгебраической сумме э.д.с. в контуре.

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_i.$$

Порядок расчета разветвленной цепи:

1. Произвольно выбрать и обозначить на чертеже направление тока во всех участках цепи.
2. Подсчитать число узлов в цепи (m). Записать первый закон Кирхгофа для каждого из ($m-1$) узлов.
3. Выделить произвольно замкнутые контуры в цепи, произвольно выбрать направления обхода контуров.
4. Записать для контуров второй закон Кирхгофа. Если цепь состоит из p -ветвей и m -узлов, то число независимых уравнений 2-го закона Кирхгофа равно ($p-m+1$).

Электрический ток в электролитах

Электролиты – это водные растворы солей, кислот, щелочей (проводники второго рода).

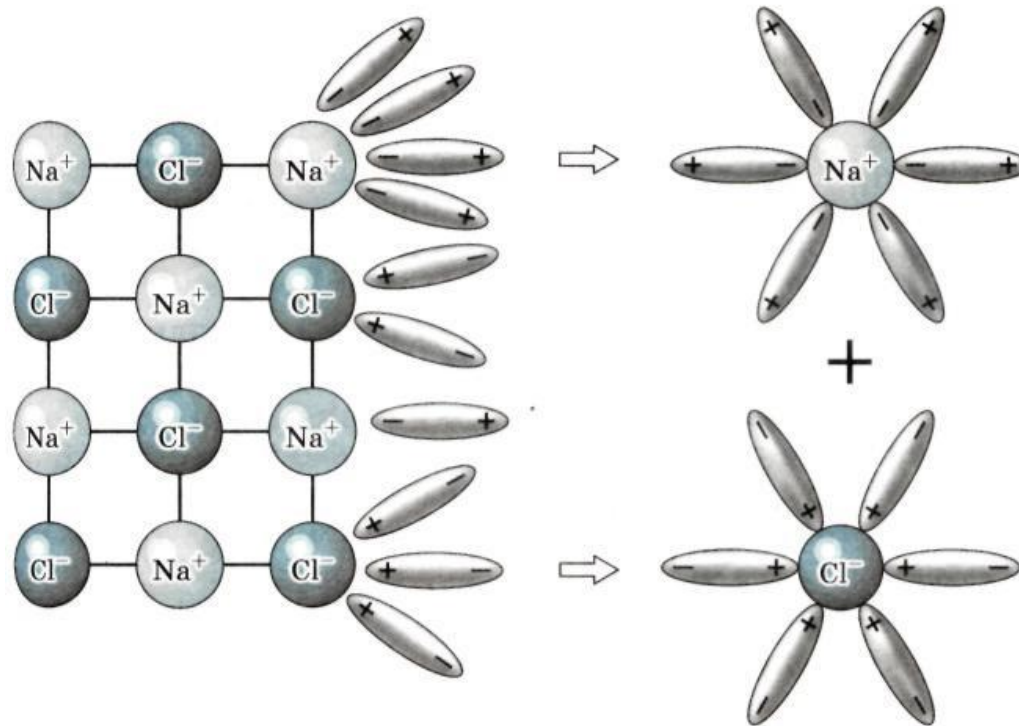
Электролитическая диссоциация – это процесс распада молекул вещества на ионы при его растворении (плавлении).

Рекомбинация – это процесс образования молекулы при столкновении положительного и отрицательного ионов.

Электрический ток в электролитах

Причины электролитической диссоциации

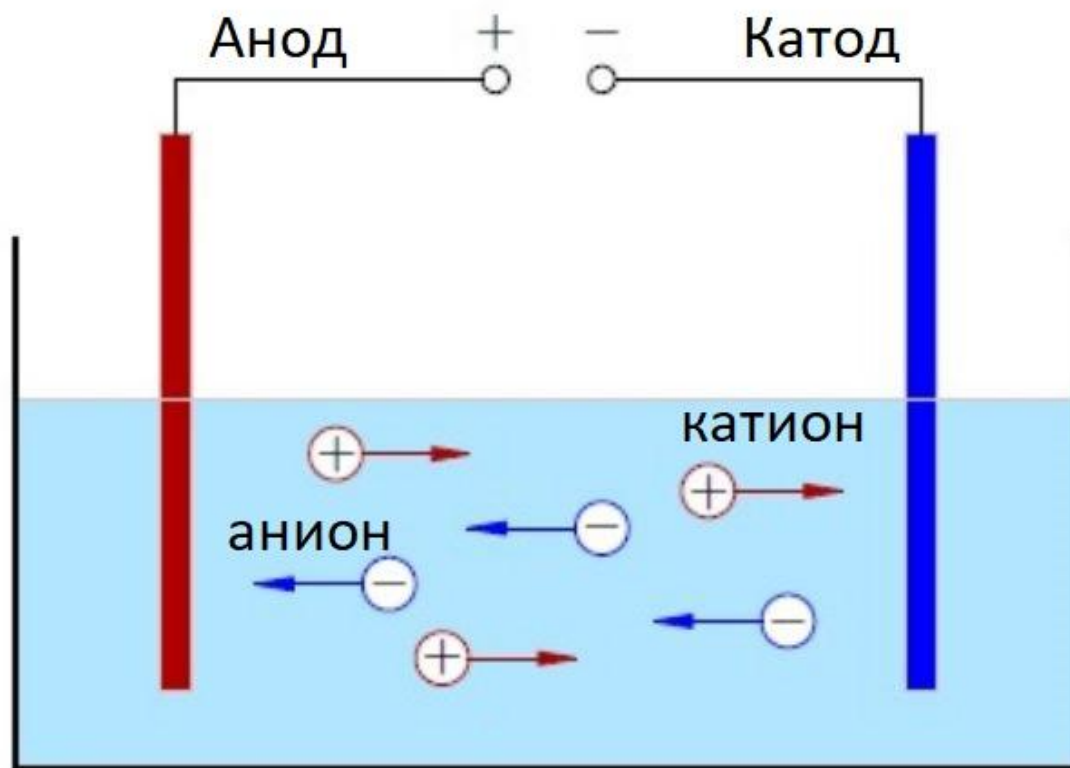
- Тепловое движение полярных молекул растворенного вещества;
- Взаимодействие этих молекул с полярными молекулами растворителя.



Сольватная
оболочка

Гидратированные ионы

Электрический ток в электролитах



Электролиз – процесс выделения на электродах составных частей растворенных веществ или веществ вторичных реакций при протекании электрического тока.

Электрический ток в электролитах

Первый закон Фарадея: масса вещества M , выделившегося на электродах, прямо пропорциональна электрическому заряду Q , прошедшему через электролит.

$$M = kQ = kIt$$

k — электрохимический эквивалент.

Электрохимический эквивалент вещества показывает, сколько (грамм или килограмм, а точнее, какая масса) вещества выделится на катоде при электролизе при прохождении через раствор одного кулона электричества.

Электрический ток в электролитах

Второй закон Фарадея: электрохимический эквивалент вещества k пропорционален отношению молярной массы A ионов этого вещества к их валентности z .

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{z}$$

где $F = 96486,7$ Кл/моль – постоянная Фарадея, определяющая соотношение между электрохимическими и физическими свойствами вещества. Для нее справедливо соотношение:

$$F = eN_A$$

Закон Ома для электролитов

Плотность тока $j = qnv$

$$j = q_+ n_+ v_+ + q_- n_- v_-$$

q и n – заряд и концентрация ионов электролита,

$$q_+ = z_+ e, \quad q_- = z_- e,$$

z – валентность ионов.

$$z_+ = z_- = z, \quad n_+ = n_- = n,$$

так как в электролите происходит диссоциация нейтральных молекул.

$$j = zne(v_+ + v_-)$$

Закон Ома для электролитов

$$z_+ e E - F_{mp} = 0$$

Закон Стокса: $F_{mp} = 6\pi\eta \cdot r_+ v_+,$

η – коэффициент вязкости среды,

r_+ – радиус иона (сольватной оболочки).

$$v_+ = \frac{z_+ e}{6\pi\eta r_+} E.$$

Введем $u_+ = \frac{z_+ e}{6\pi\eta r_+}$ – подвижность ионов

(скорость ионов при единичной напряженности E)

Закон Ома для электролитов

Плотность тока

$$j = zne(u_+ + u_-)E$$

Закон Ома для электролитов в дифференциальной форме.

Принимая во внимание, что $j = \sigma E$

Следовательно для электролитов удельная проводимость:

$$\sigma = zne(u_+ + u_-)$$