

Проводники в электрическом поле

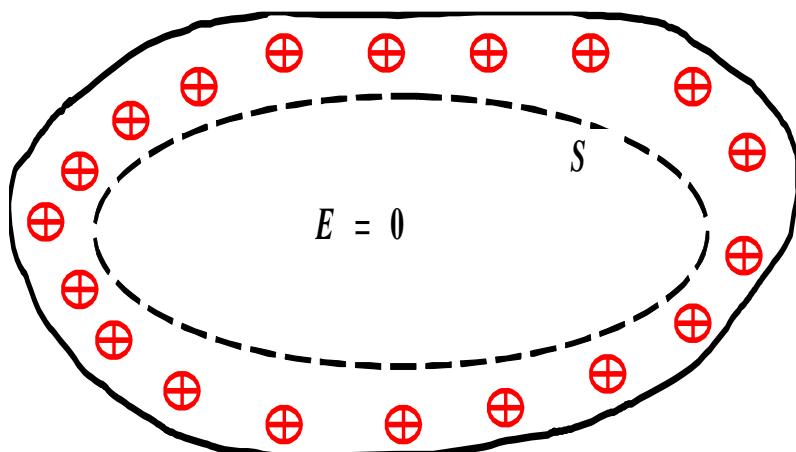
Проводники

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 $+q$

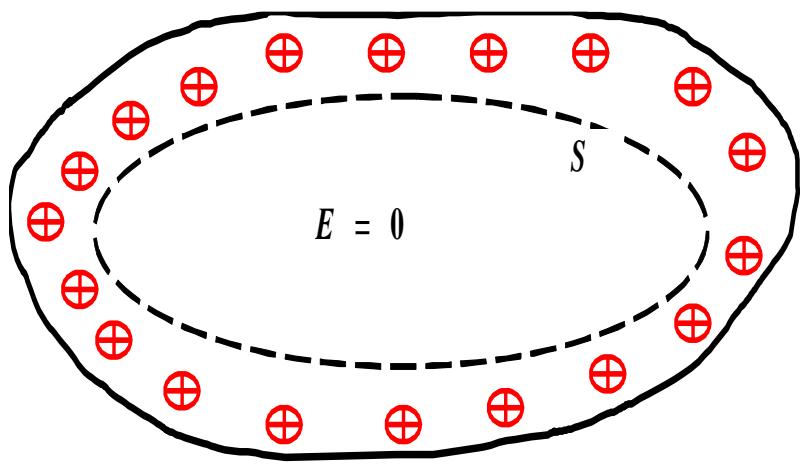


$$\vec{E} = 0$$

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 $+q$



$$\vec{E} = 0$$

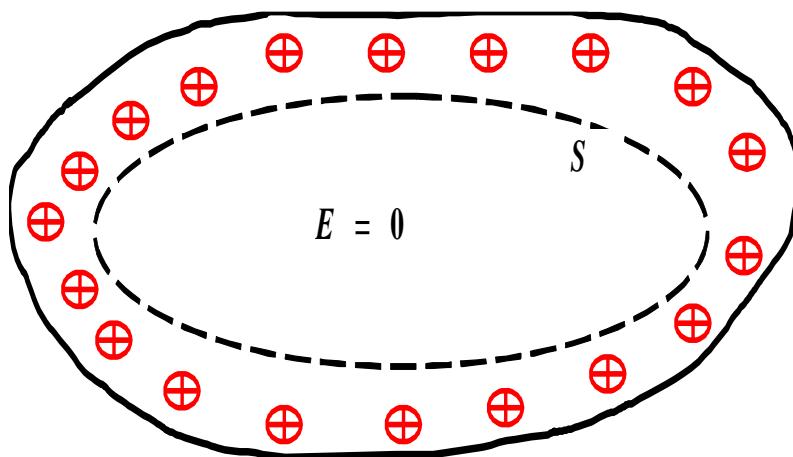
$$\int_S \vec{E} d\vec{S} = \int_V \frac{\rho dV}{\epsilon_0} = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$$

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**.

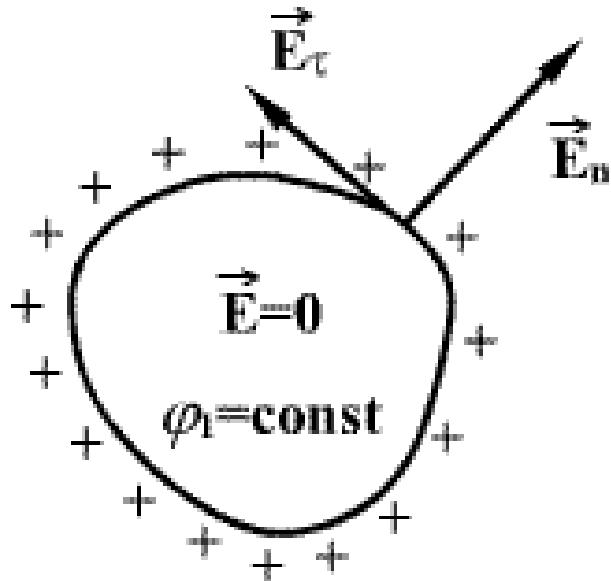
$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$$

$$\vec{E} = 0$$

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

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

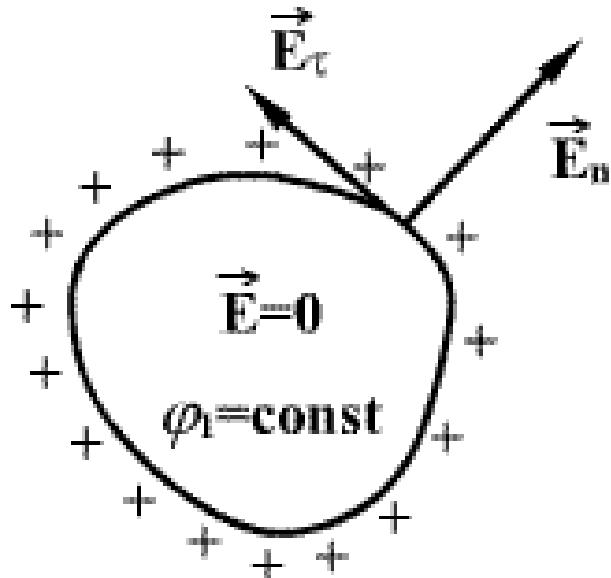
Равновесие зарядов в проводниках.



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) $E_{внутр} = E = 0.$

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

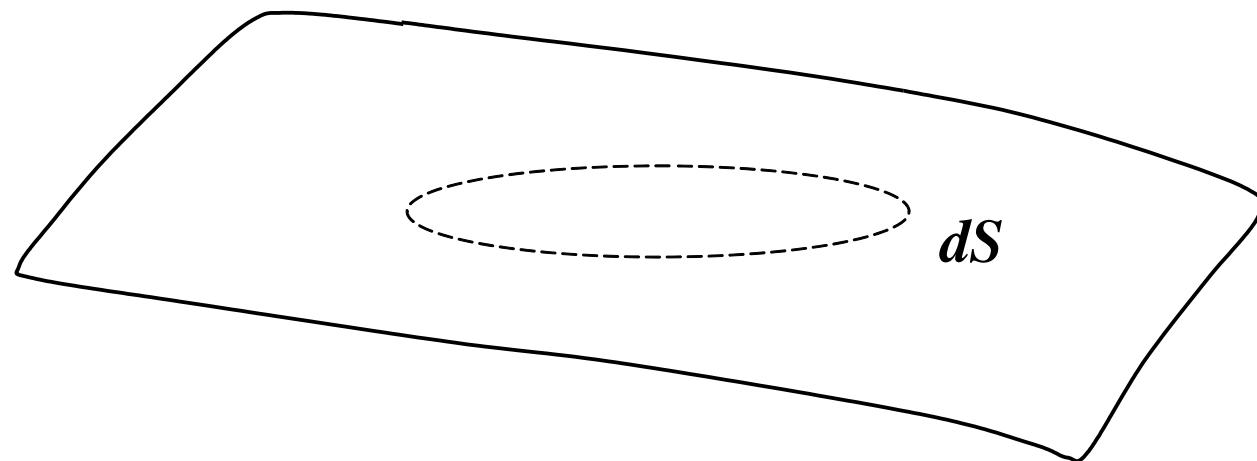
2) $\varphi_{внутр} = \text{const}$ весь объем проводника и его поверхность **эквипотенциальны**.

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

4) $\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}$ $\rightarrow \vec{D}_{внутр} = 0$

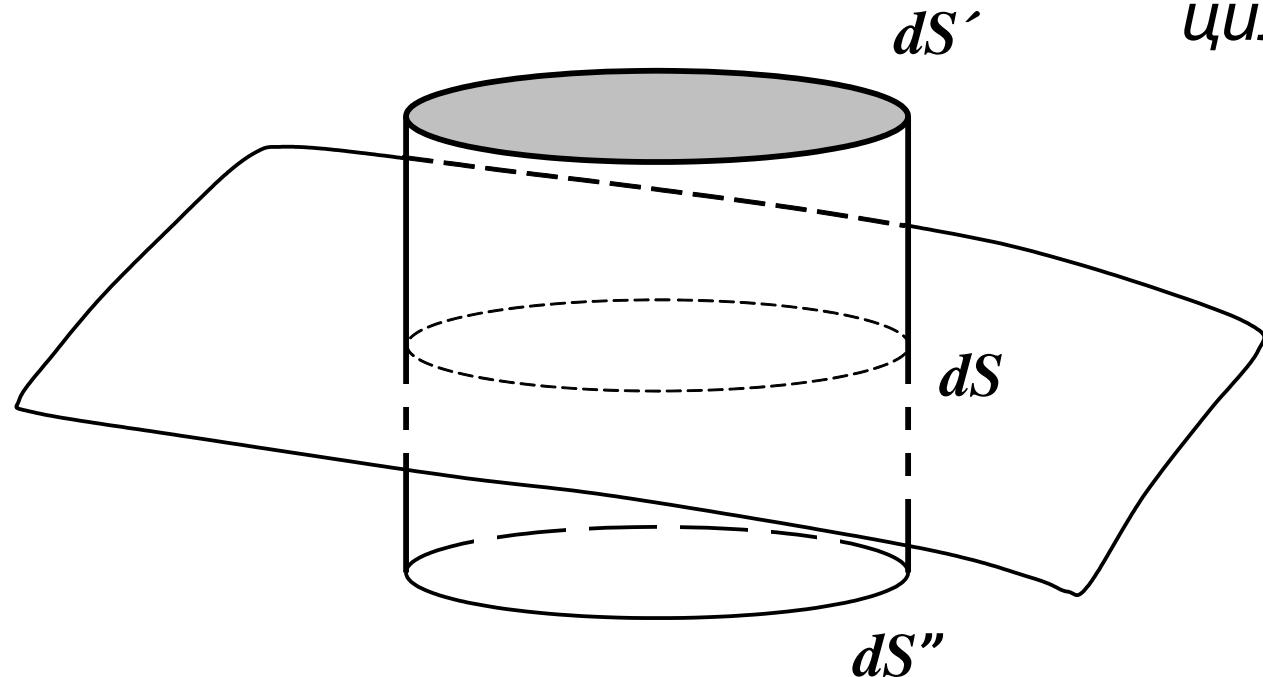
Поле вблизи поверхности заряженного проводника

*Выделим на
поверхности
проводника
произвольную
площадку dS .*

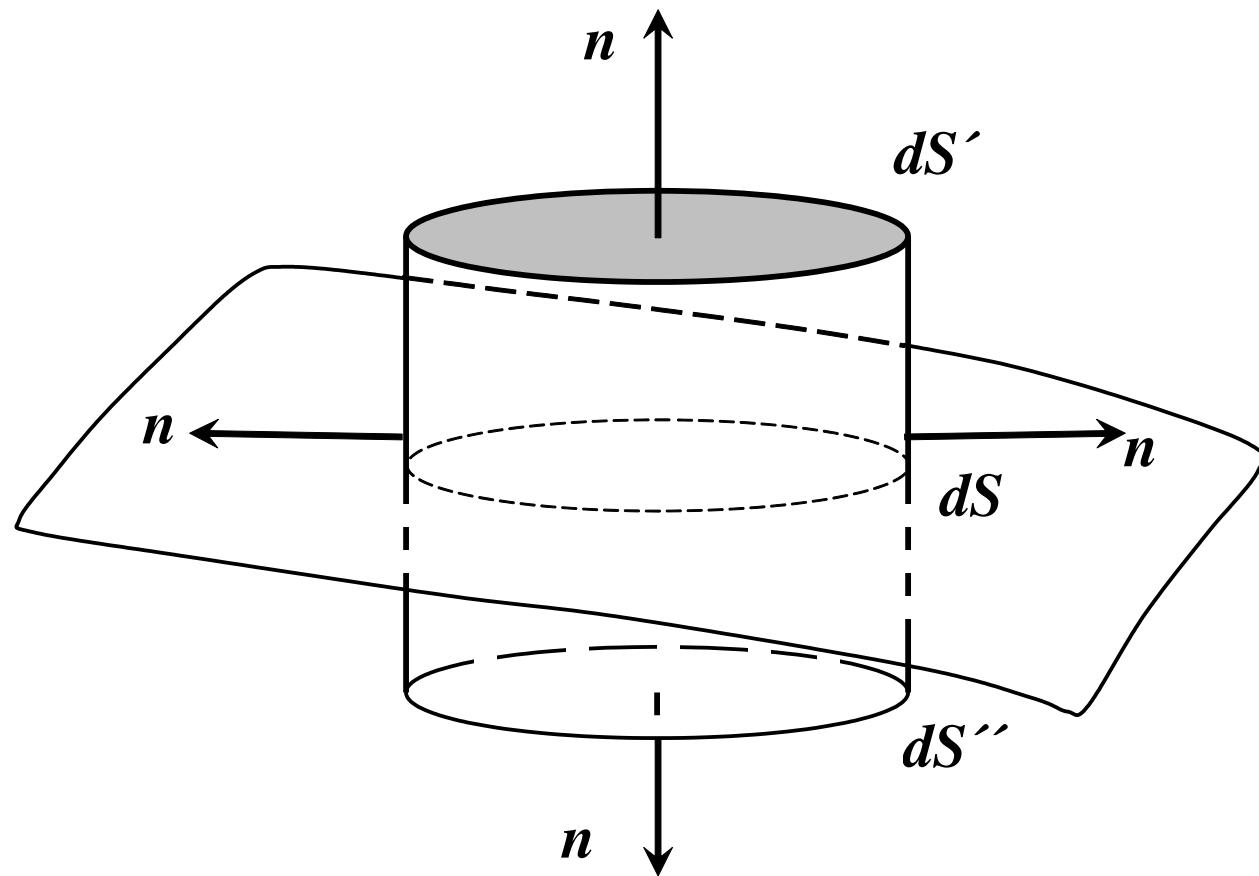


Поле вблизи поверхности заряженного проводника

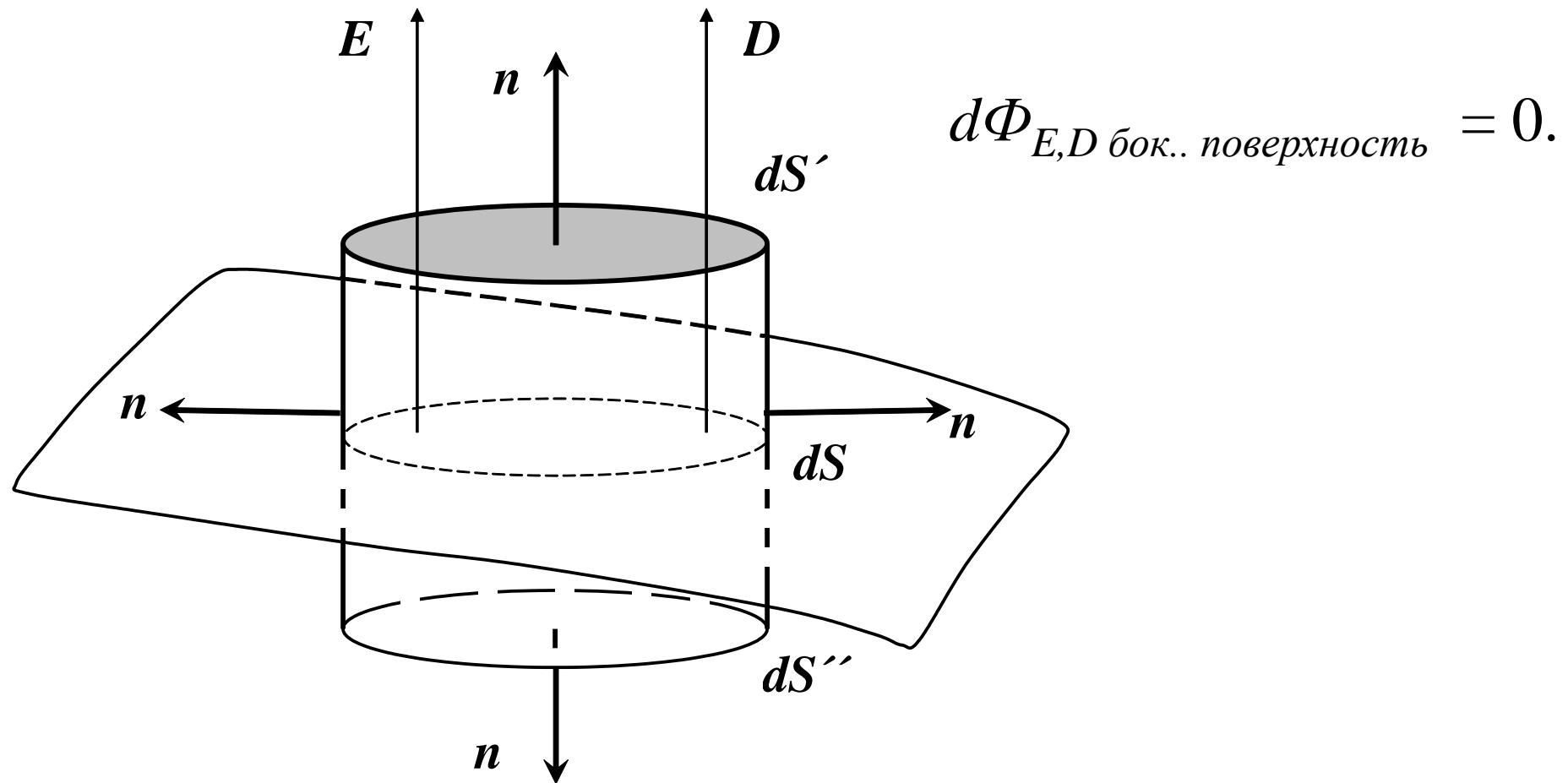
*Построим на ней
цилиндр высотой dh*



Поле вблизи поверхности заряженного проводника



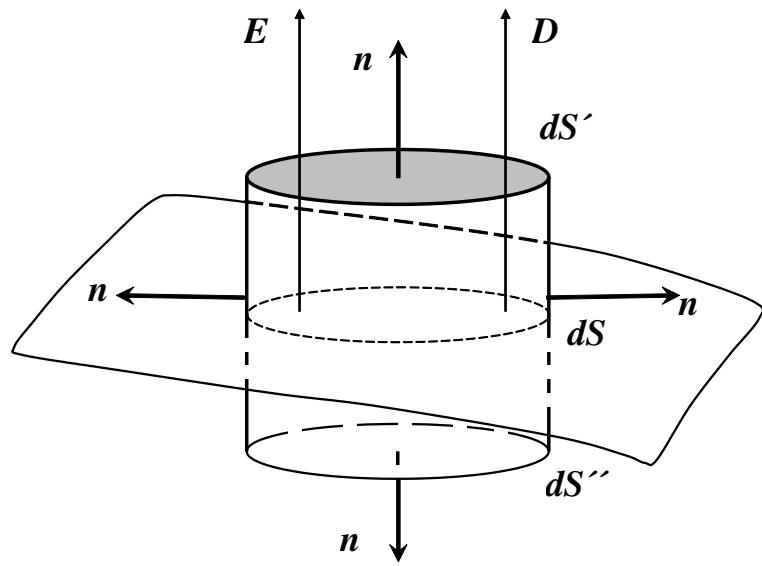
Поле вблизи поверхности заряженного проводника



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

$$\vec{D}_{\text{внумп}} = 0 \quad d\Phi_D \mid_{dS''} = 0$$

Поле вблизи поверхности заряженного проводника



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

Теорема Гаусса для D :

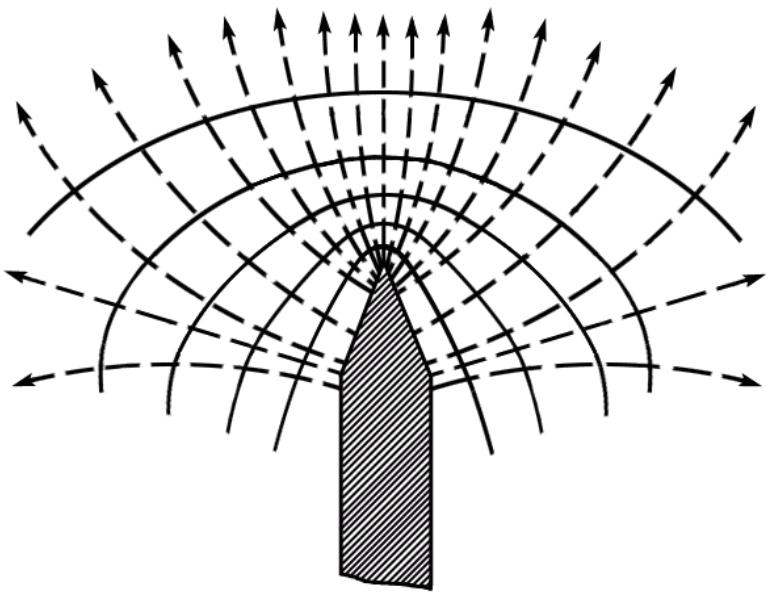
$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = d\vec{q} = \sigma \cdot dS$$

$$D_n = \sigma$$

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

$$E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$$

Поле вблизи поверхности заряженного проводника



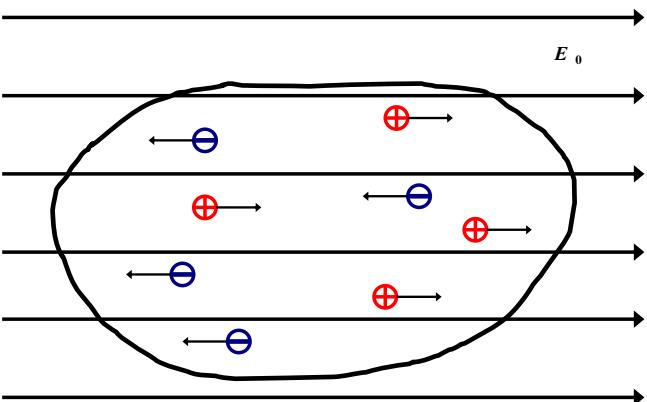
Вектор E вблизи поверхности проводника зависит от кривизны поверхности проводника.

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

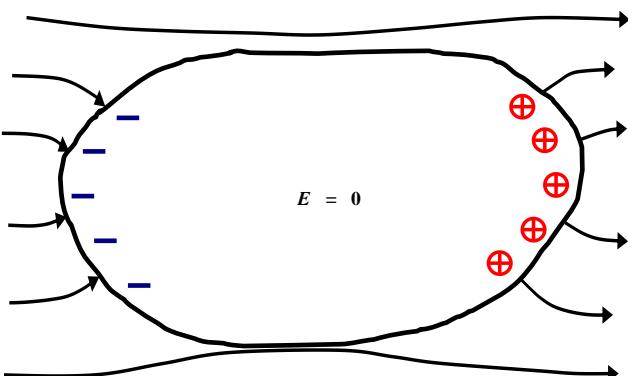
Распределение зарядов по внешней поверхности проводника зависит только от её формы.

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

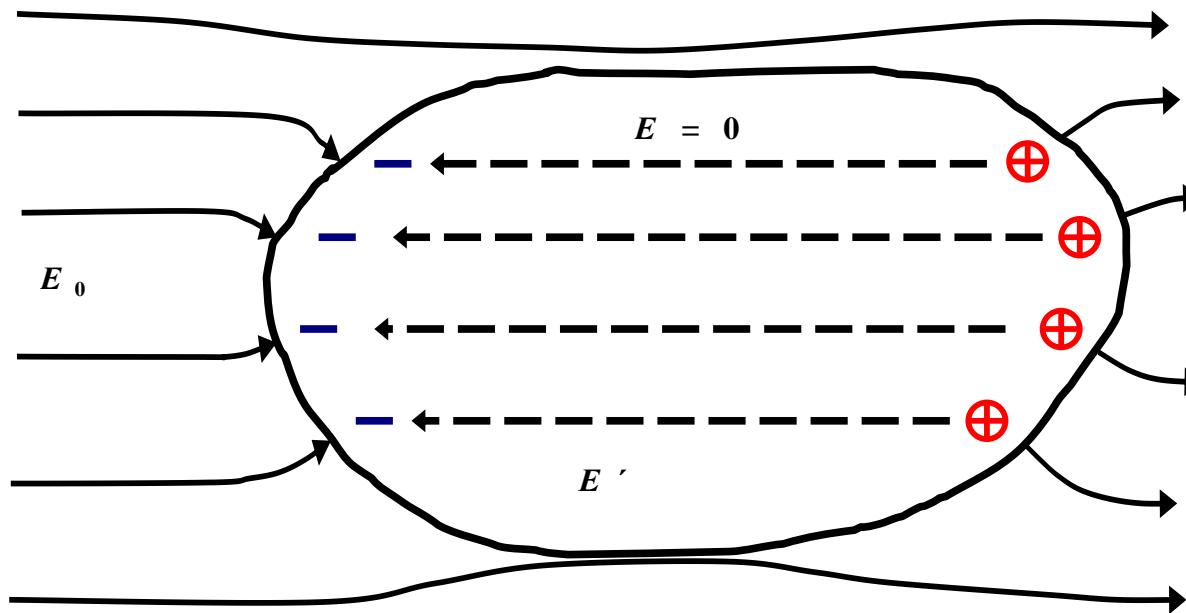
Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.



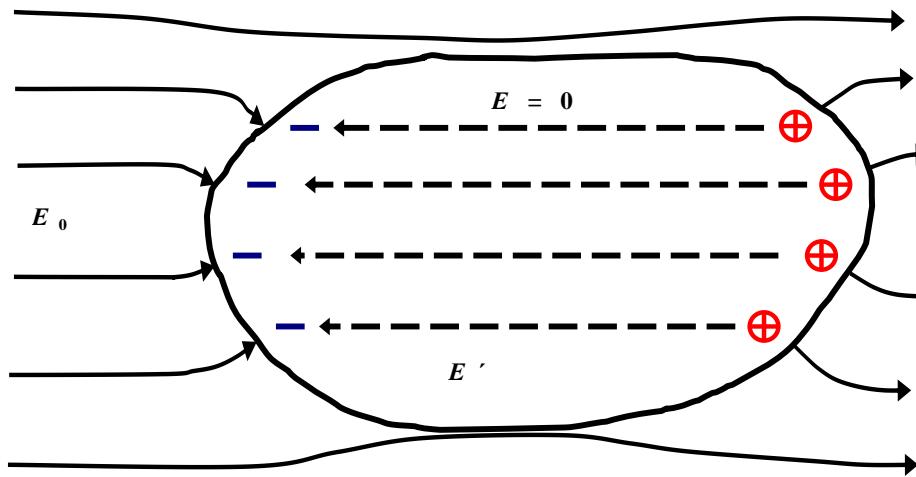
**Электроны проводимости и
положительные ионы**
перераспределяются до тех
пор пока внутри проводника
поле электронов
проводимости и
положительных ионов не
скомпенсирует внешнее поле.



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

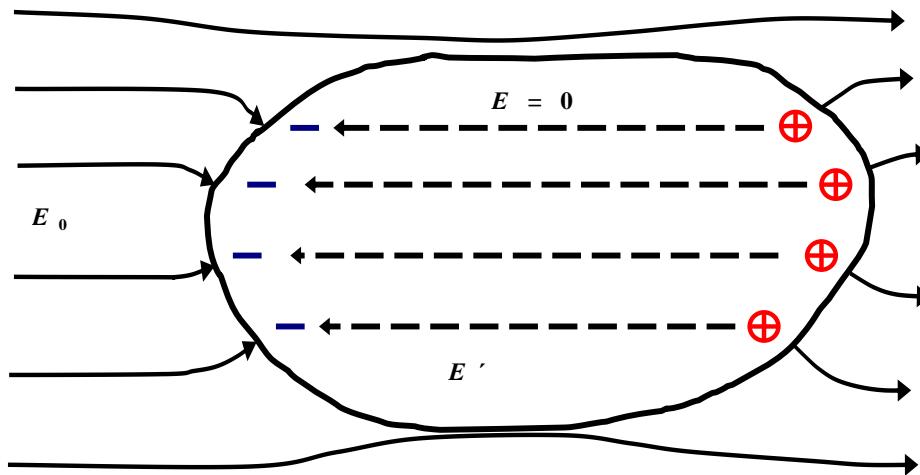


Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.



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

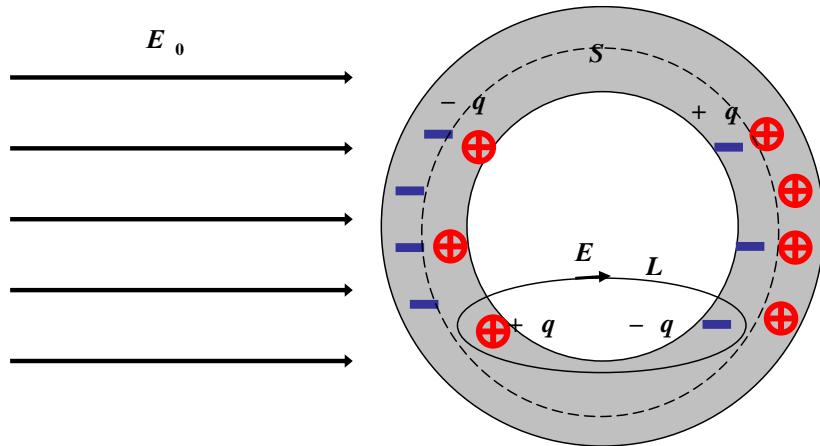
Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.



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

Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция.

Электрическое поле в полости проводника



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

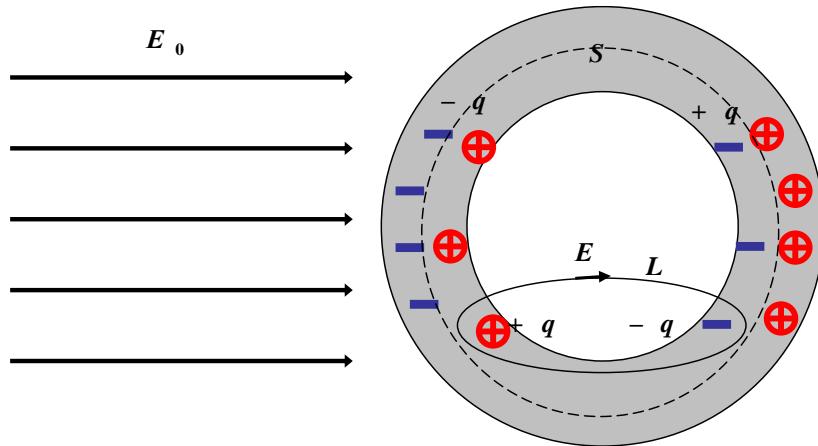
$$\vec{E} = 0$$

$$\sum q = 0$$

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

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

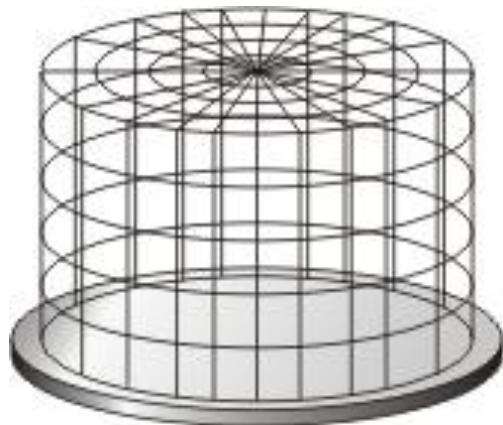
$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} \neq 0$$

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

Электроемкость 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

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad E \sim \sigma \sim q$$

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

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

$$E \sim \varphi \quad \xrightarrow{\text{ }} \quad q = C\varphi$$

$$E \sim q$$

*C – коэффициент пропорциональности
(электроемкость).*

Электроемкость проводника

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

В СИ C измеряется в фарадах [1 Φ = 1Кл / 1В].

Электроемкость проводника – это физическая величина численно равная заряду, который необходимо сообщить проводнику, чтобы увеличить его потенциал на 1В.

Электроемкость шара

$$E = -\frac{d\varphi}{dr} \quad Edr = -d\varphi$$

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

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

Электроемкость шара

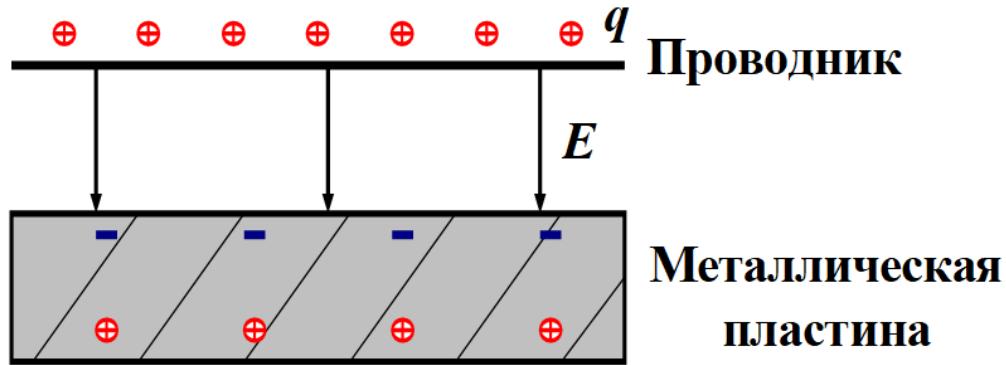
$$\frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \int_R^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad \varphi_2 = \varphi_{\infty} = 0$$

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

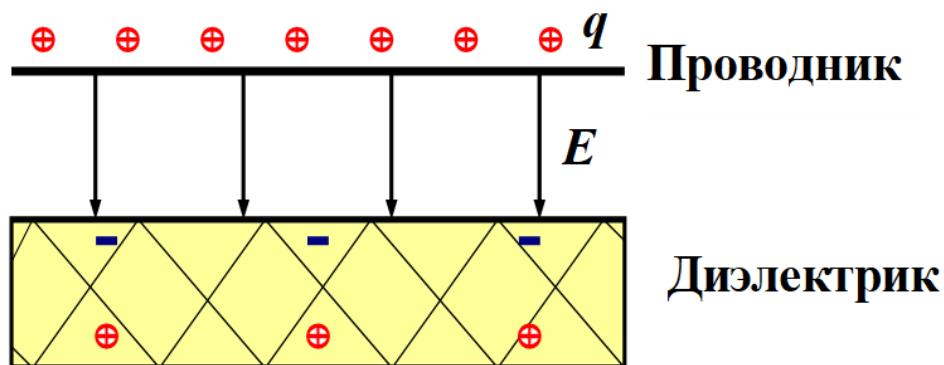
$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$$

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

Взаимная электроемкость



$$\varphi = \varphi_+ + \varphi_-; \varphi < \varphi_+$$
$$q = \text{const}$$



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

Взаимная электроемкость больше, чем
емкость уединенного проводника.

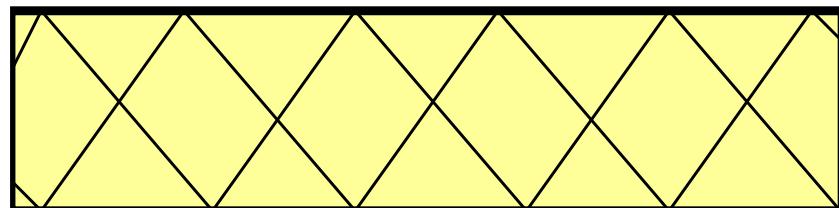
Конденсаторы

Особенно большой электроемкостью обладает конденсатор.

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



П р о в о д н и к



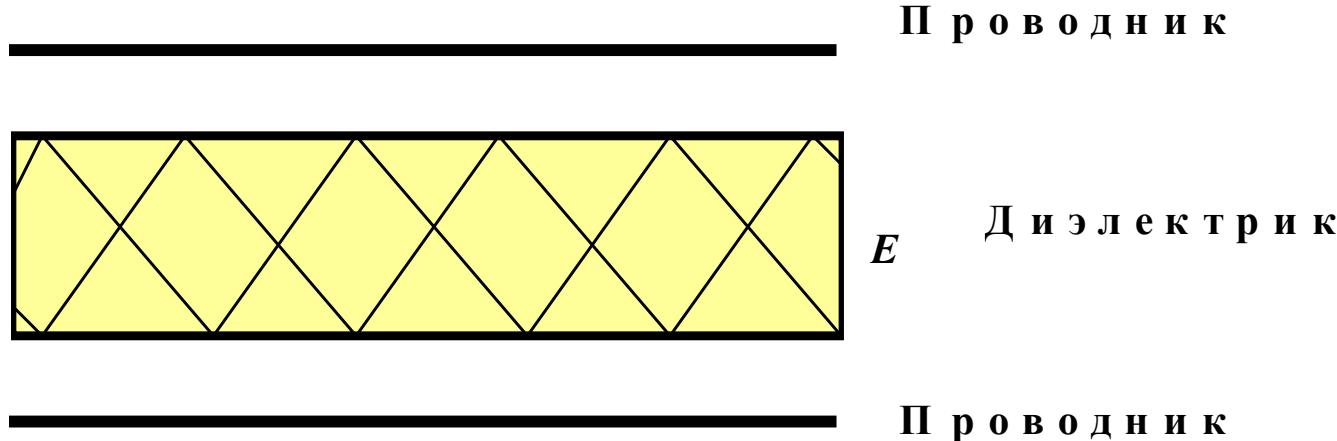
E

Д и э л е к т р и к



П р о в о д н и к

Конденсаторы



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

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

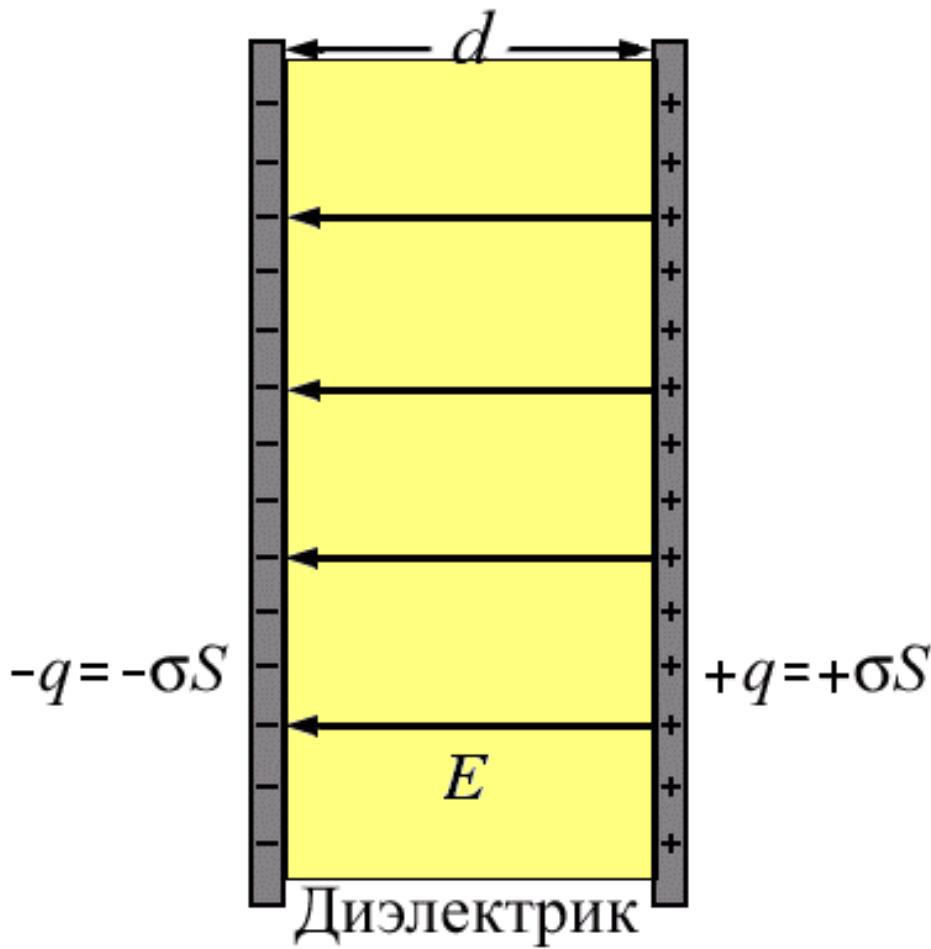
Конденсаторы

Конструктивно конденсаторы бывают
плоские, цилиндрические, сферические.

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

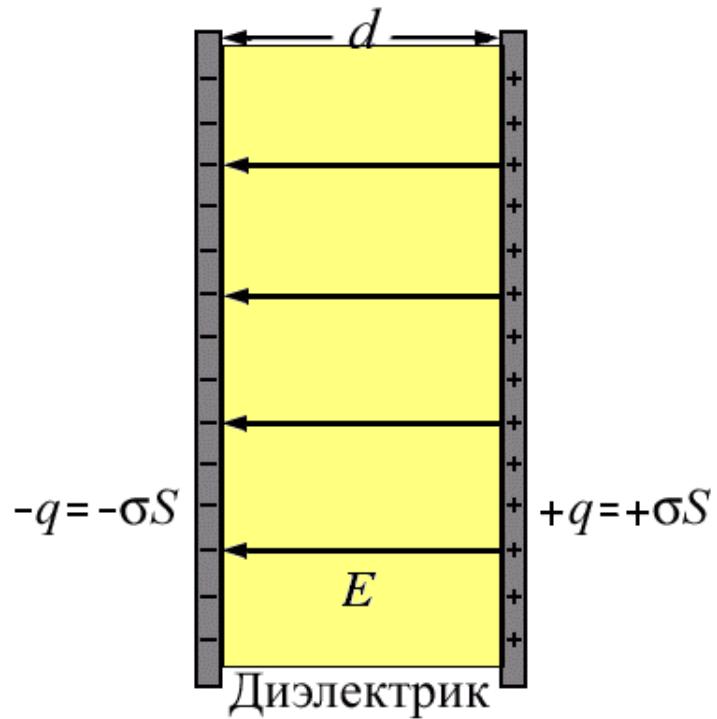
$\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов между обкладками;
 q – заряд конденсатора.

Плоский конденсатор



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

Плоский конденсатор



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

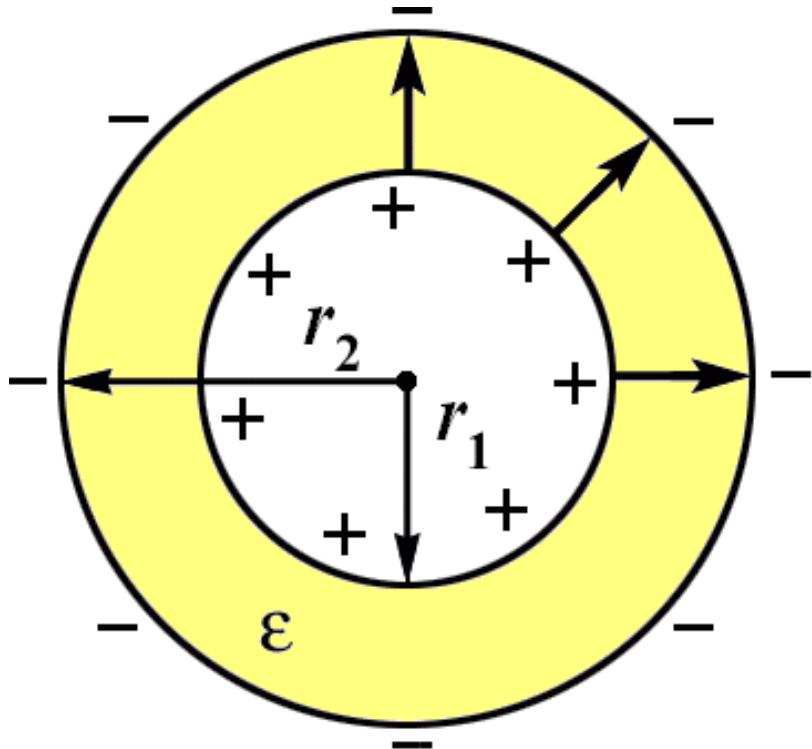
$$\int_0^d \frac{\sigma dr}{\epsilon \epsilon_0} = - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi$$

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

$$q = \sigma S$$

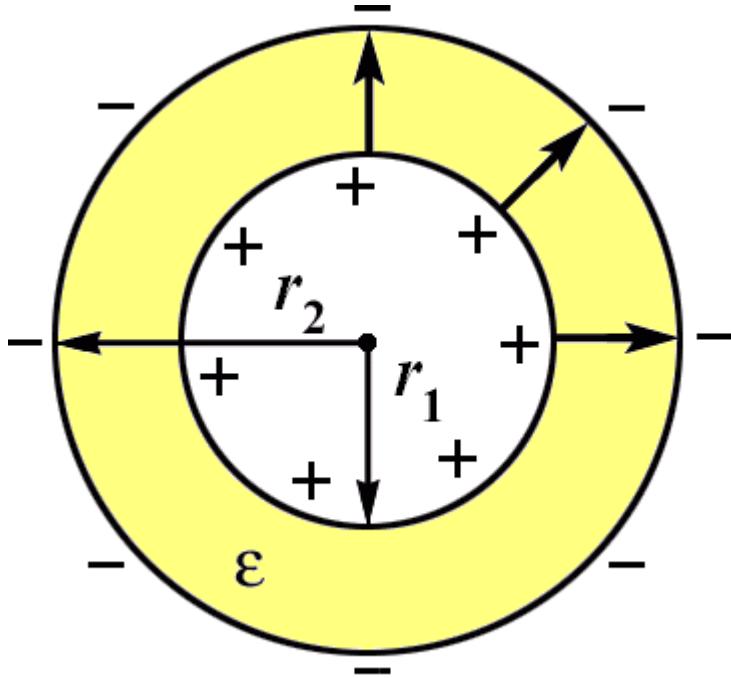
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

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:

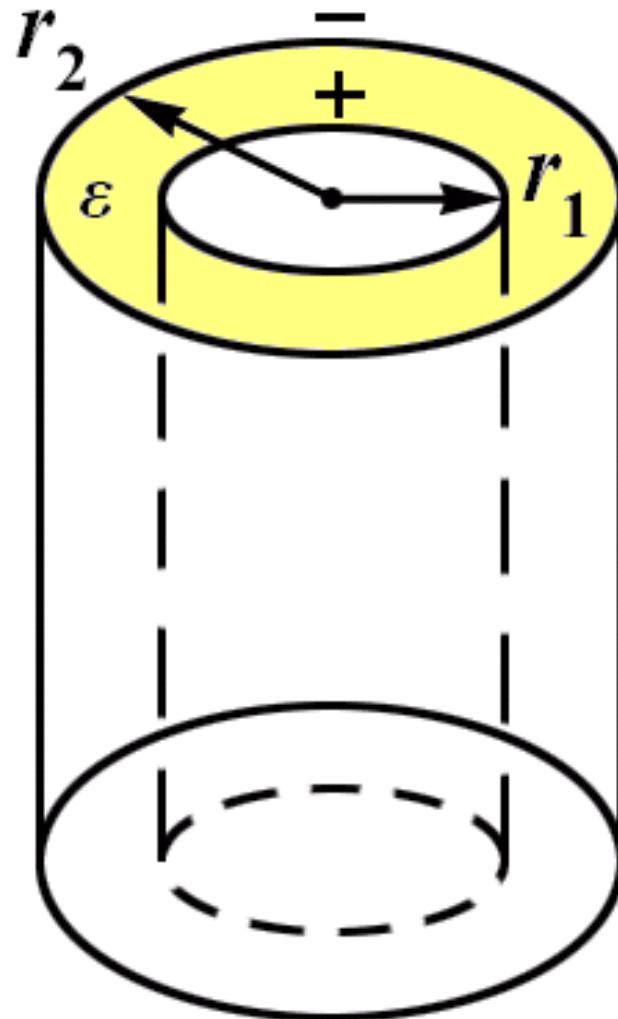
$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$$

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



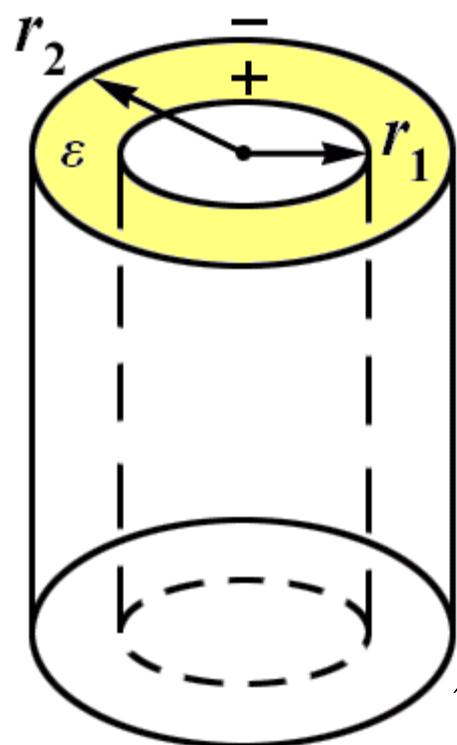
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}$$

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



$r_1 < r_2$; $r_1, r_2 <$ длины
поля бесконечного заряженного
цилиндра:

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

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

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

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

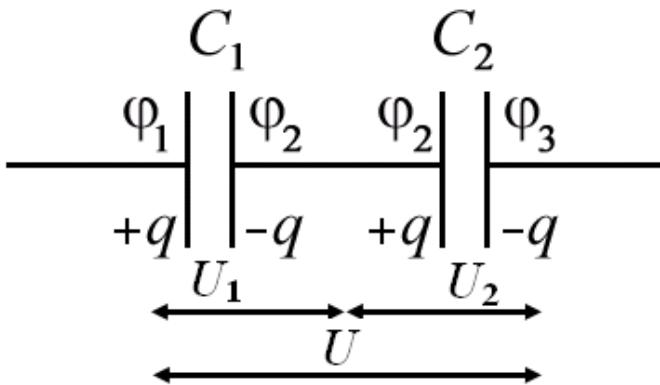
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

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:

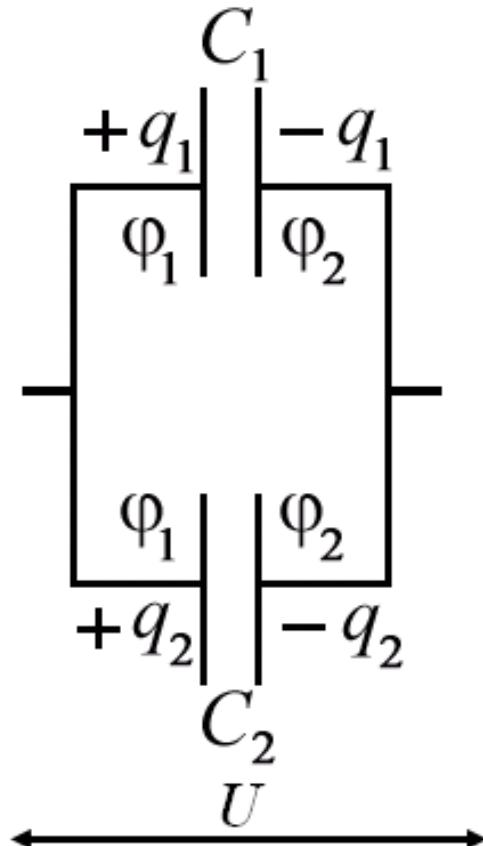
$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

$$C < C_1, C < C_2$$

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:

$$dA = \varphi \cdot dq$$

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



$$dA = \frac{qdq}{C}$$

При этом заряд проводника увеличивается на dq .

Энергия заряженного проводника

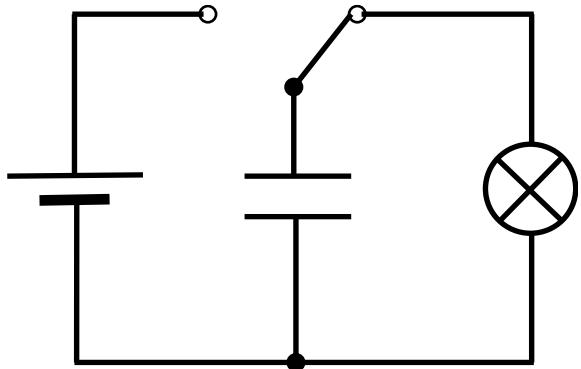
Работа, затрачиваемая на зарядку проводника от нулевого потенциала ($\varphi = 0$) до φ

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

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.

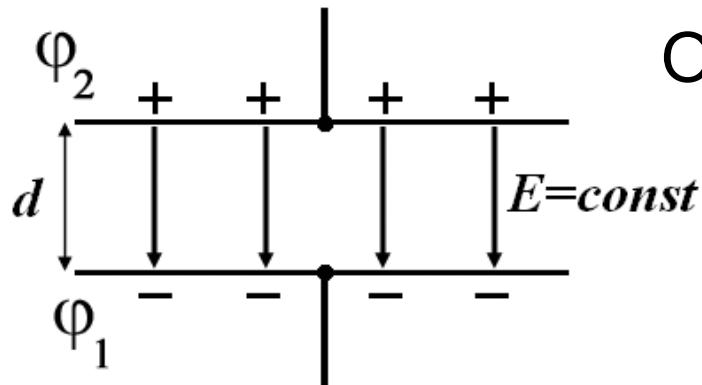
$$\left. \begin{array}{l} dA = U \cdot dq \\ U = \frac{q}{C} \end{array} \right\}$$



$$dA = \frac{qdq}{C}$$

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

Объемная плотность энергии электрического поля



Объемная плотность энергии:

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

$$\omega = \frac{C(Ed)^2}{2Sd} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S (Ed)^2}{d \cdot 2Sd}$$

$$\boxed{\omega = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2}}$$

- 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 (теплового) движения $v_{cp} \sim \sqrt{kT}$;
- 2) направленного со $v_{cp} \sim E$.

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 / Времени.]

Сила тока

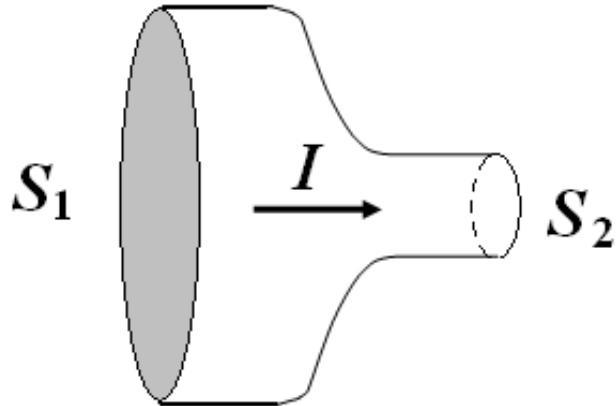
Если ток создается двумя видами носителей:

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

Для постоянного тока:

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

Плотность тока



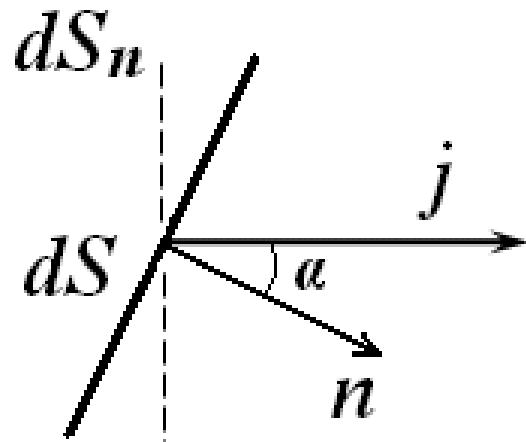
Вектор плотности тока вводится для характеристики распределения заряда по сечению проводника.

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

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



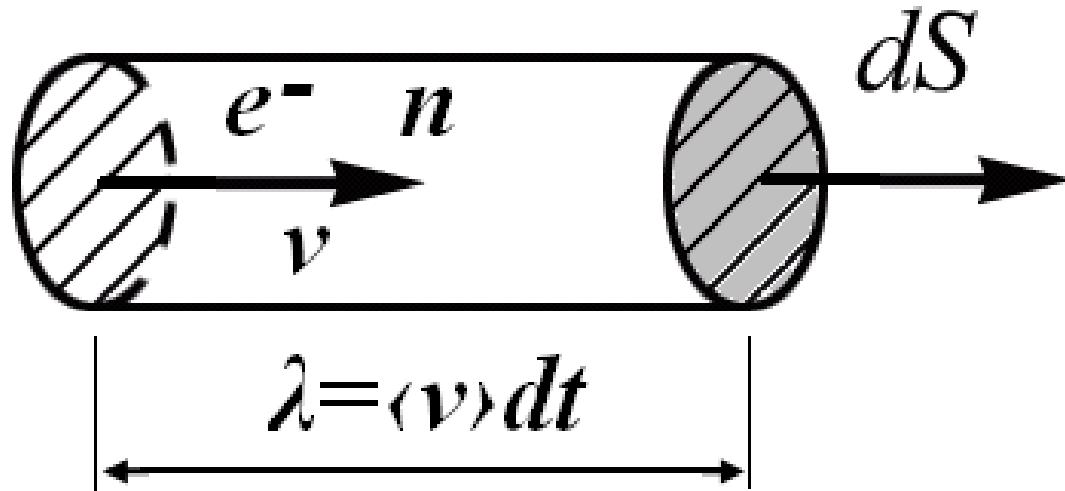
$$\begin{aligned} dI &= \vec{j} d\vec{S} = \\ &= j dS \cos(\vec{j}, d\vec{S}) = \\ &= j dS \cos \alpha = j dS_n \end{aligned}$$

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

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

Связь между силой тока и плотностью тока

Рассмотрим проводник сечением dS .

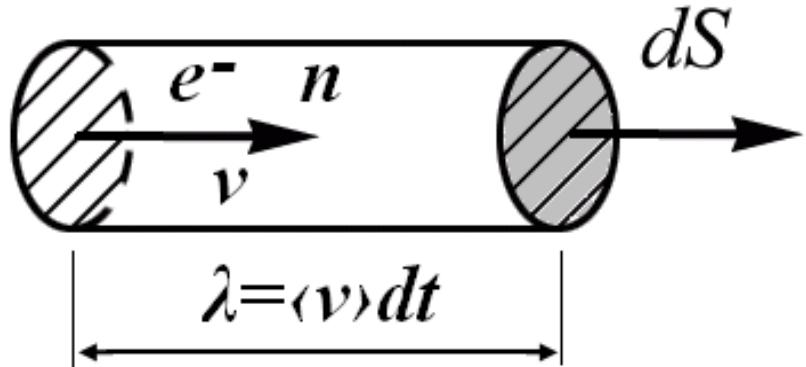


e – элементарный заряд;

n – концентрация зарядов в объеме проводника;

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

Связь между силой тока и плотностью тока

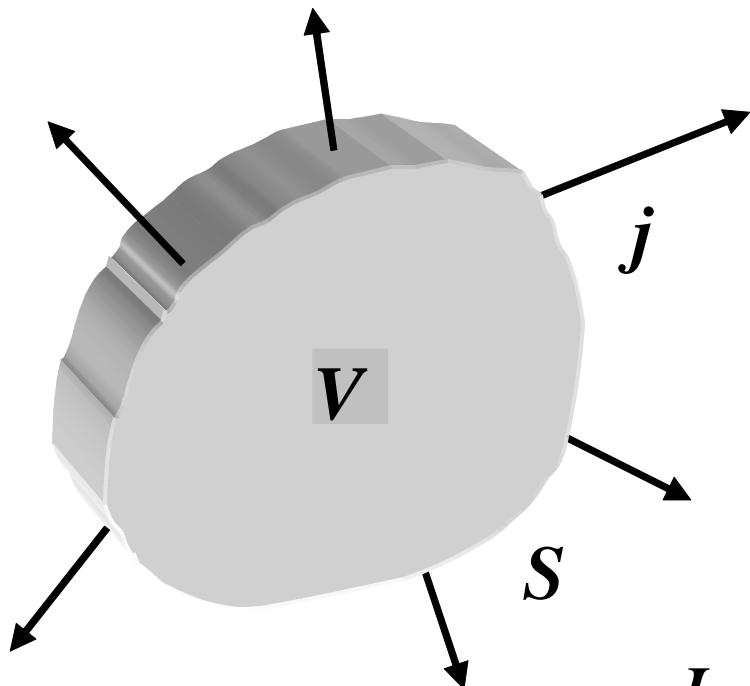


$$I = \frac{dq}{dt}$$

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

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

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
форме

Знак минус в уравнении означает то, что заряды
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 .

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

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

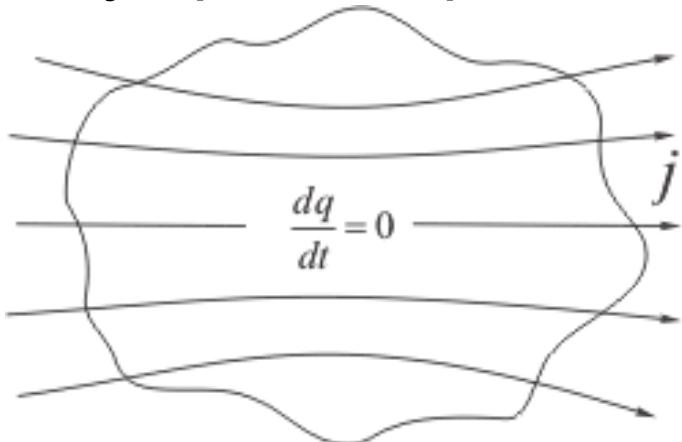
уравнение непрерывности для постоянного тока (в интегральной форме).

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

уравнение непрерывности для постоянного тока (в дифференциальной форме).

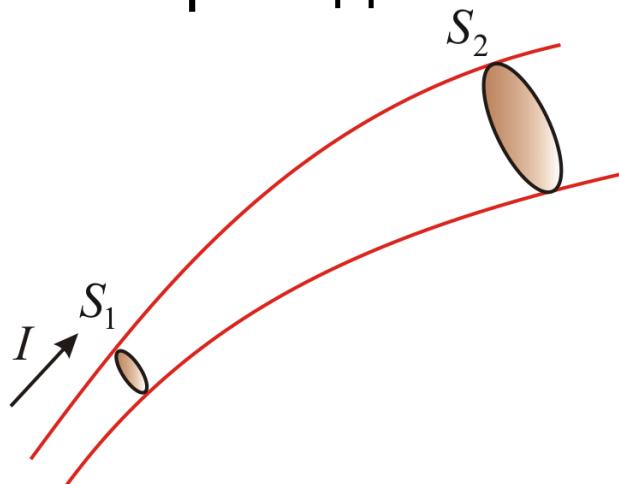
Уравнение непрерывности

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



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

Если проводник имеет неоднородное сечение $\neq const$



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

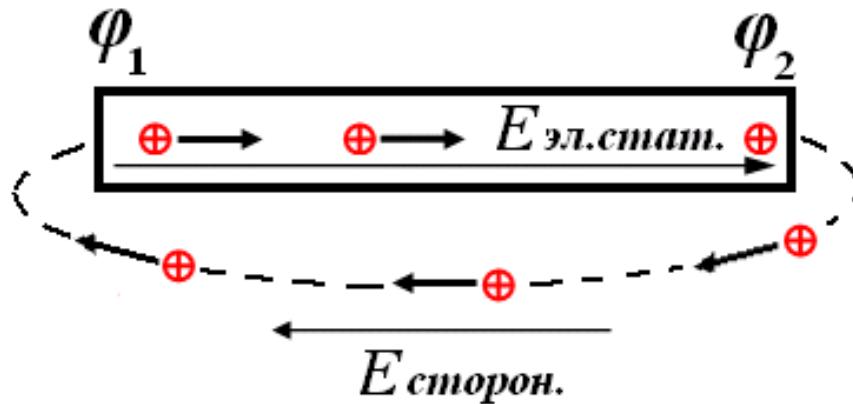
Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

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.

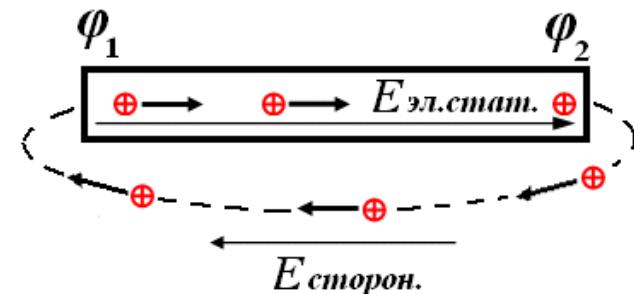


Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов.

Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

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

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_0+}.$$



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

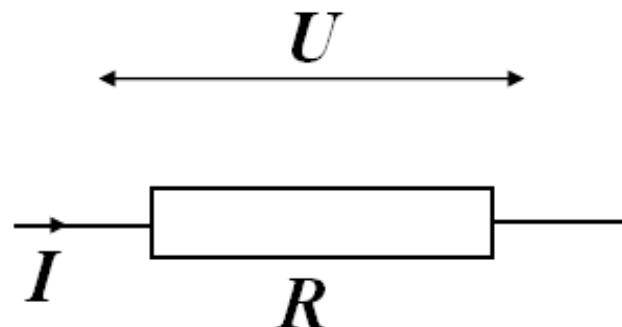
Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

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

- Сопротивление 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.

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

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

$$d\varphi = Edl;$$

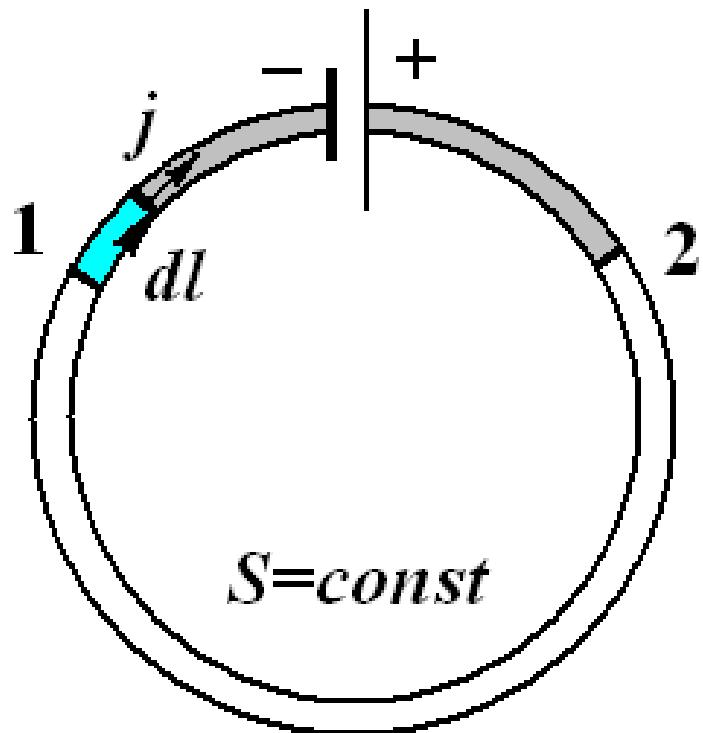
$$dI = \frac{d\varphi}{dR}, \quad jdS = \frac{Edl}{\rho dl} \cdot dS, \quad \Rightarrow \quad j = \frac{E}{\rho}.$$

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

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

Закон Ома для неоднородного участка цепи

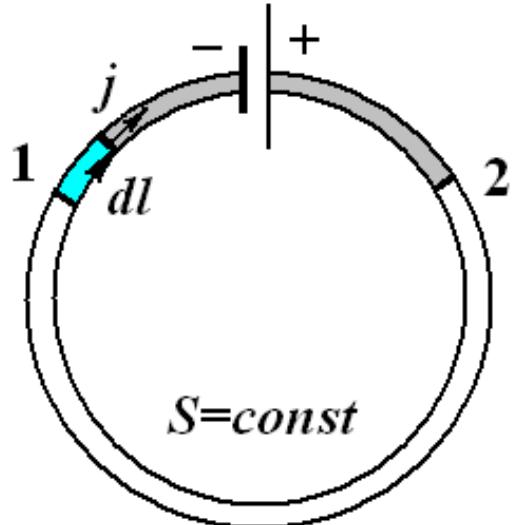
- *Неоднородный* – участок цепи, содержащий источник э.д.с.



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

E – напряженность поля
кулоновских сил,
 E_{cm} – напряженность поля
сторонних сил.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

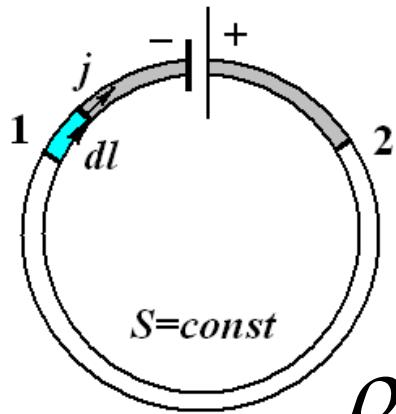


$$d\vec{l} \cdot \vec{j} = \sigma \vec{E} d\vec{l} + \sigma \vec{E}_{cm} d\vec{l}.$$

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

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

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



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

$$\int_1^2 Edl = \varphi_1 - \varphi_2$$

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

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

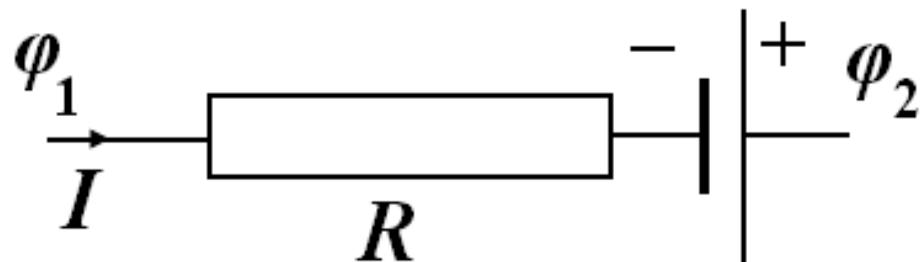
$$\frac{I\rho}{S} l_{21} = \int_1^2 Edl + \int_1^2 E_{cm}dl.$$

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

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)**.

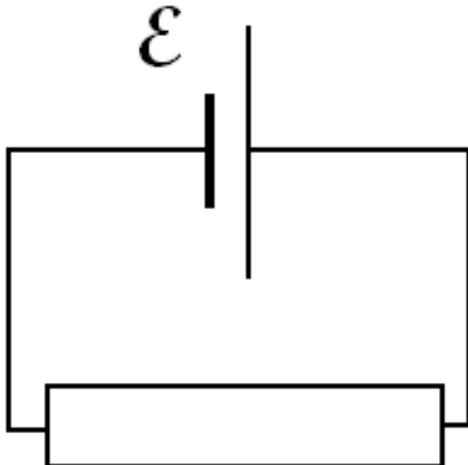
Так как точки 1, 2 были выбраны произвольно, то полученные соотношения справедливы для любых двух точек электрической цепи:



$$I = \frac{\phi_1 - \phi_2 \pm \mathcal{E}}{R}.$$

Закон Ома для замкнутой цепи

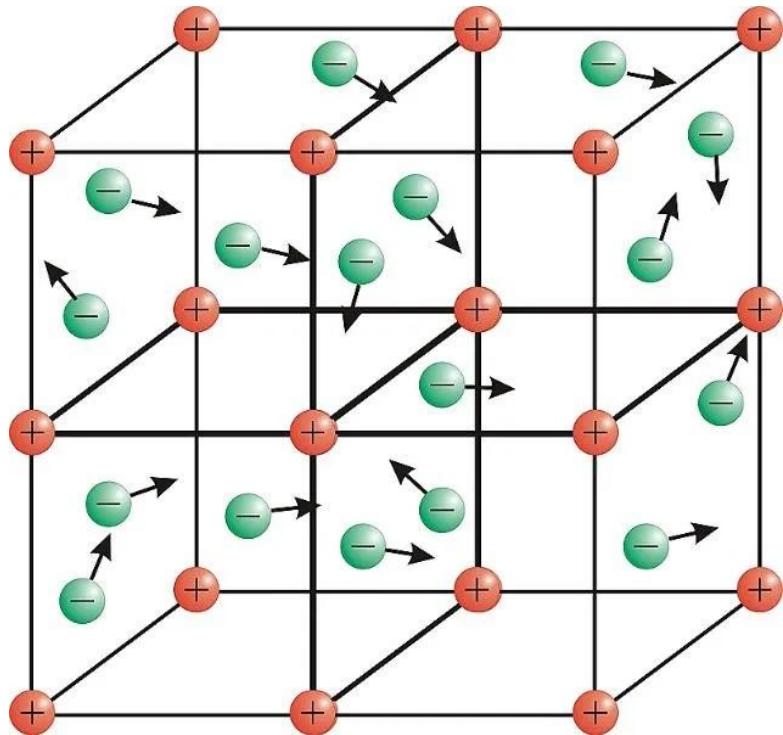
- Если цепь **замкнутая**, то $\varphi_1 = \varphi_2$.



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{полн}};$$

$$R_{полн} = r_{внутр.ист.м.} + R_{внеш.цепи}.$$

Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца

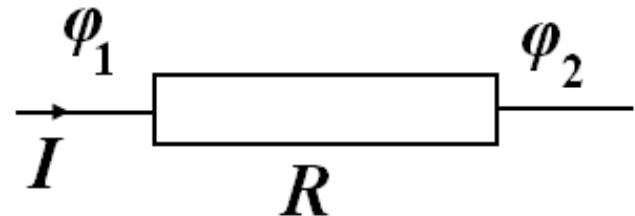


Проводник нагревается.
Выделившееся тепло Q равно работе тока A .

Мощность
электрического тока:
$$P = \frac{A}{t}$$
.

Закон Джоуля-Ленца

- Однородный участок цепи



$$A = Q = q(\phi_1 - \phi_2) = (\phi_1 - \phi_2)I \cdot t =$$

$$= IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t.$$

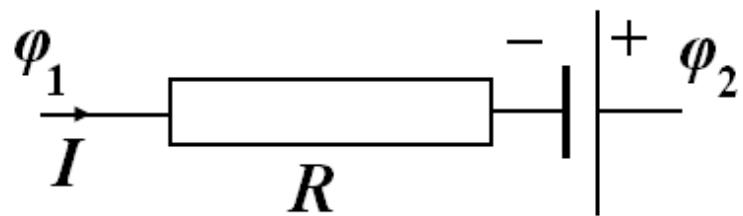
$$Q = I^2Rt$$

$$P = IU$$

Закон Джоуля-Ленца

- Неоднородный участок цепи

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

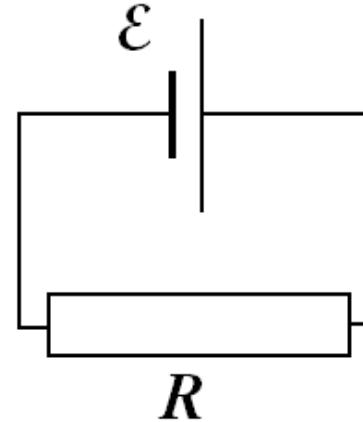


$$P = (\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E})I.$$

Закон Джоуля-Ленца

- Замкнутая цепь.

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

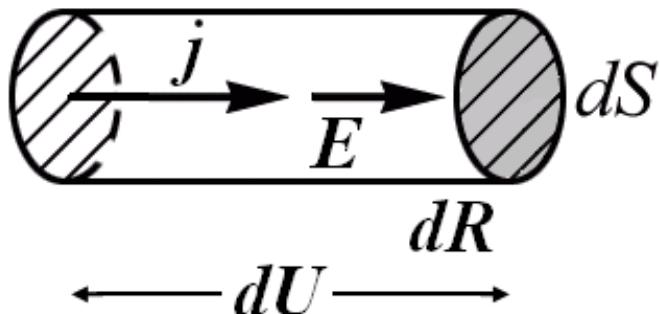


$$P = \mathcal{E}I.$$

- К.п.д. источника тока:

$$\eta = \frac{I^2 R}{I\mathcal{E}} = \frac{U}{\mathcal{E}}.$$

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме



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

$$dA = dQ$$

$$dQ = IUDt = I^2 R dt$$

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

$$P_{yd} = \frac{dQ}{dVdt}.$$

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

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

$$dQ = (dI)^2 dR dt = \frac{(jdS)^2 \rho dl}{dS} dt = j^2 \rho \underbrace{dS dl}_{dV} \cdot dt, \quad j = \sigma E.$$

$$dQ = \sigma^2 E^2 \rho dV \cdot dt, \quad \sigma = \frac{1}{\rho}.$$
$$P_{y\partial} = \frac{dQ}{dV dt} = \sigma E^2.$$

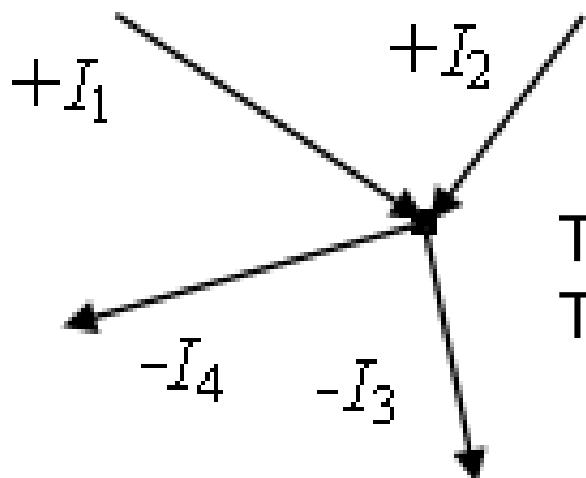
Законы Кирхгофа

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).

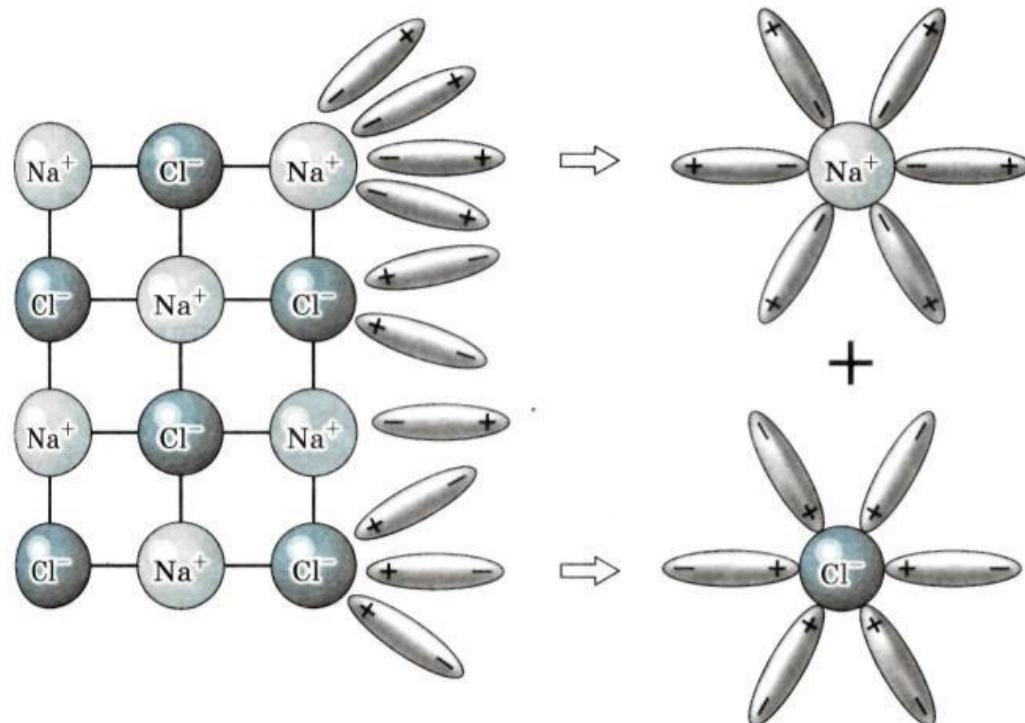
Электролитическая диссоциация – это процесс распада молекул вещества на ионы при его растворении (плавлении).

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

Электрический ток в электролитах

Причины электролитической диссоциации

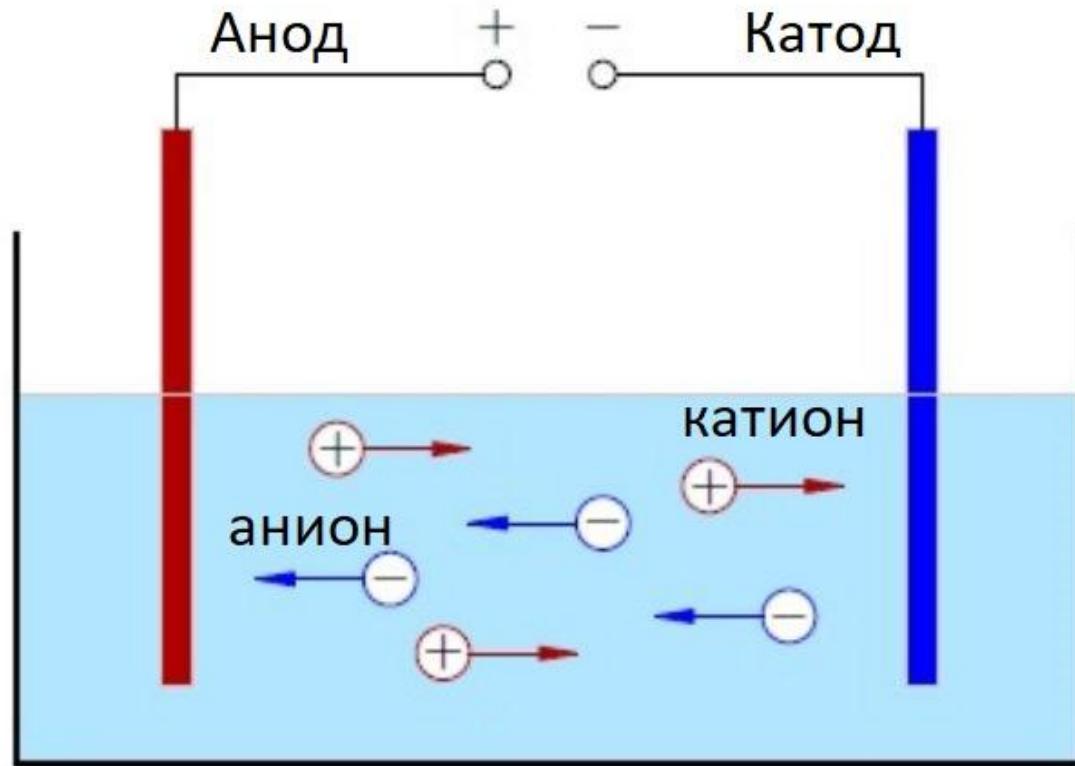
- Термическое движение полярных молекул растворенного вещества;
- Взаимодействие этих молекул с полярными молекулами растворителя.



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 $j = qn\nu$

$$j = q_+ n_+ \nu_+ + q_- n_- \nu_-$$

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.

$$j = zne(\nu_+ + \nu_-)$$

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:

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