ЛЕКЦИЯ №4. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

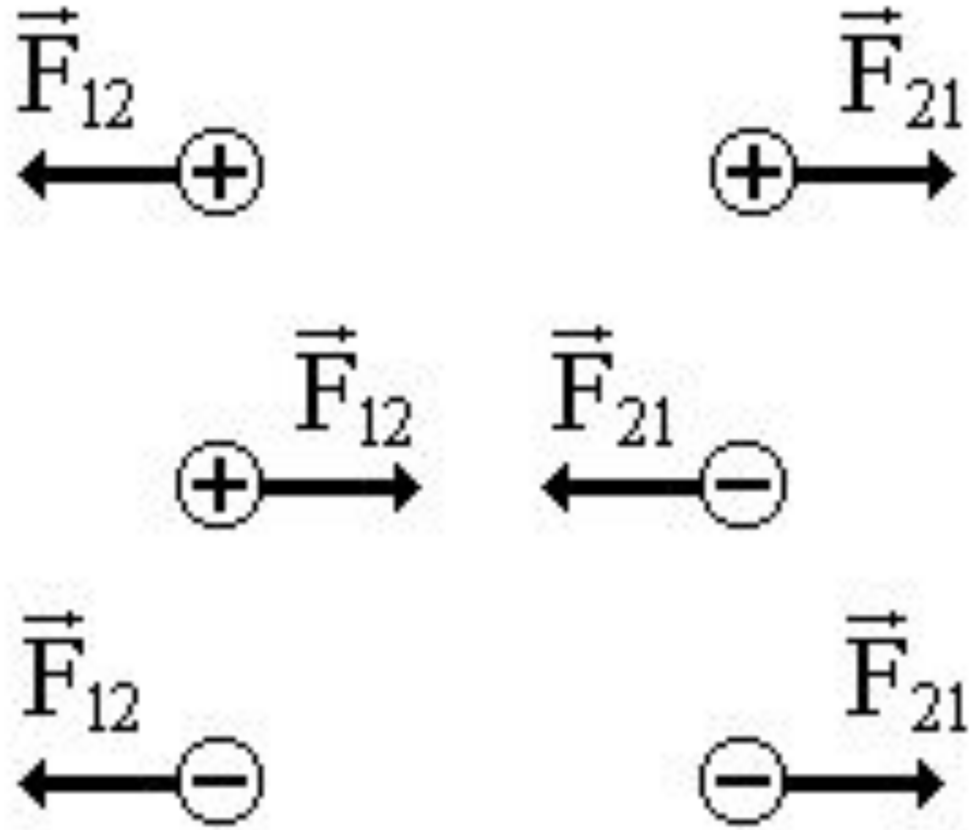
ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Элементарный заряд: e^{-} =1,6·10^{-19} Кл,
e^{+}=1,6·10^{-19} Кл .

$$q = n^{+} \cdot e^{+} + n^{-} \cdot e^{-}$$

$q>0$, если $n^{+}>n^{-}$
$q<0$, если $n^{+}<n^{-}$
$q=0$, если $n^{+}=n^{-}$

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ



ЗАКОН ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ (<u>**ЗАКОН КУЛОНА**</u>)

$$\vec{F} = \kappa \cdot \frac{q_1 q_2}{\varepsilon \, r_{12}^{3}} \cdot \vec{r}_{12}$$

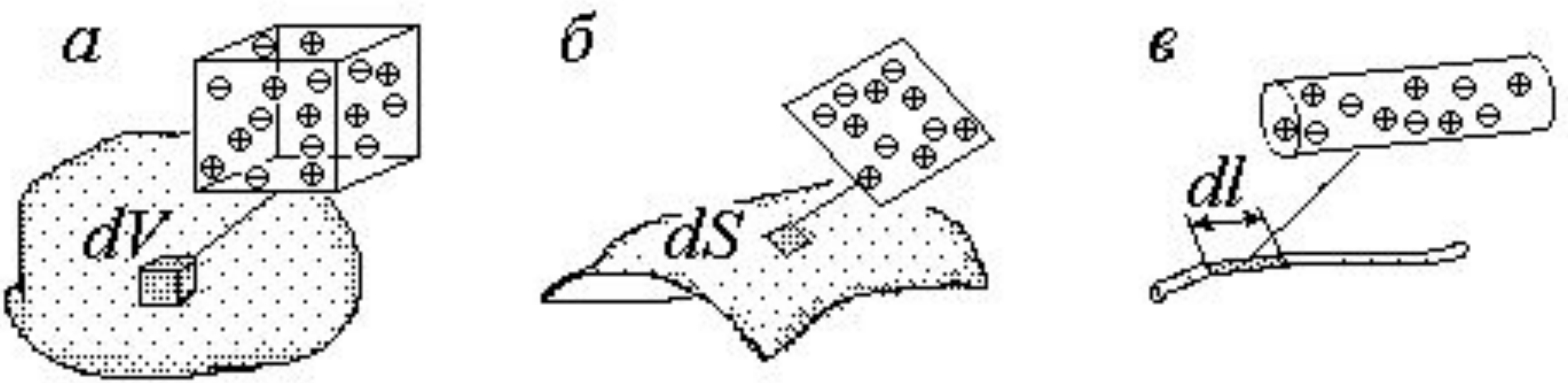
$$\boxed{\vec{F} = \kappa \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^{2}} \left(\frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} \right)}$$

$\kappa = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \quad Н \cdot м^2 / Кл^2$ *– коэффициент пропорциональности в законе Кулона*

ЗАКОН КУЛОНА В СКАЛЯРНОЙ ФОРМЕ

$$F = \kappa \cdot \frac{q_1 q_2}{\varepsilon\, r_{12}^{2}}$$

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ



а) Объемная плотность заряда:

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV}$$

Средняя объемная плотность заряда:

$$\rho_{cp} = \frac{q}{V}$$

$$\left[\frac{Кл}{м^3}\right]$$

б) Поверхностная плотность заряда:

$$\sigma = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{dS}$$

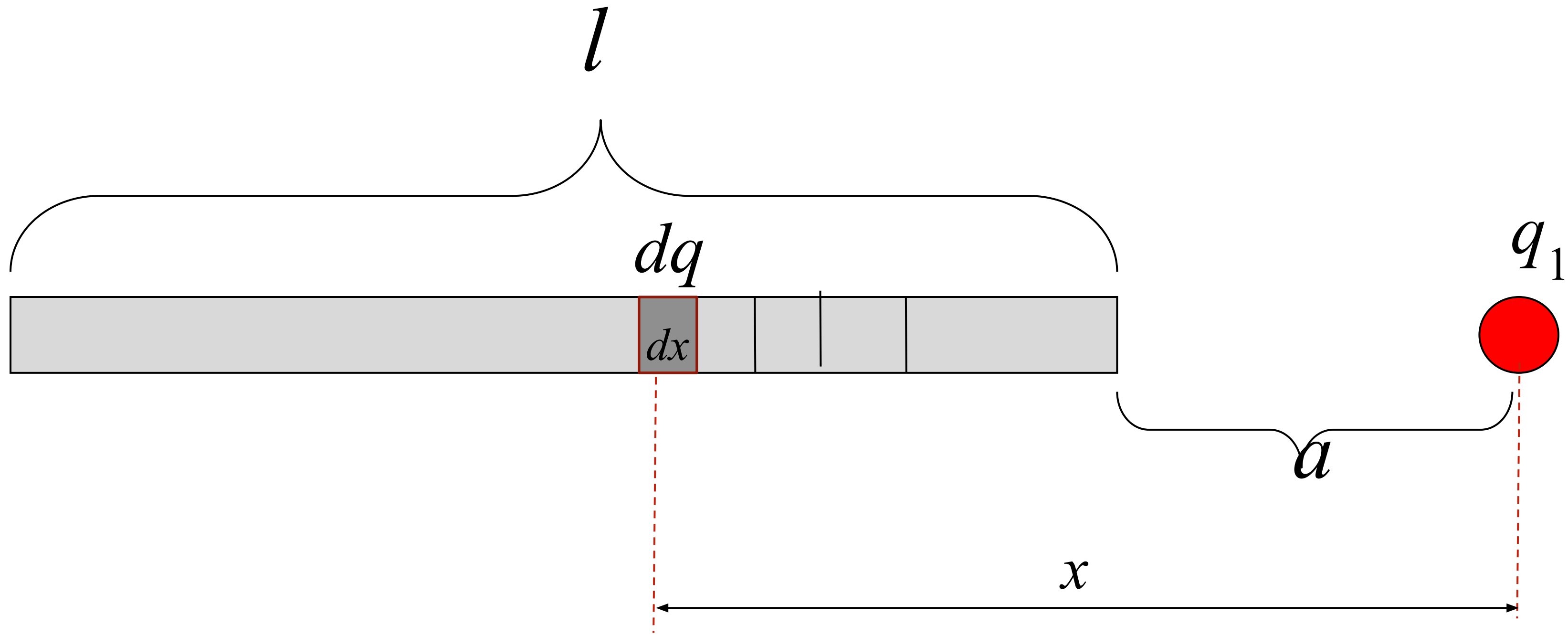
$$\boxed{\sigma_{cp} = \frac{q}{S}}$$

в) линейная плотность заряда

$$\tau = \lim_{\Delta l \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl}$$

$$\boxed{\tau_{\text{ср}} = \frac{q}{l}}$$

РАСЧЕТ СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДА *Q* И ПРОВОЛОКИ ДЛИНОЙ *L*, РАСПОЛОЖЕННОГО НА НЕКОТОРОМ РАССТОЯНИИ *A*.



Результирующая сила взаимодействия заряда q и проволоки :

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

По закону Кулона:

$$dF = k \cdot \frac{q_1 \cdot dq}{x^2},$$

ЛИНЕЙНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА:

$$\tau = \frac{dq}{dx}$$

$$dq = \tau \cdot dx$$

$$F = \int_a^{a+l} dF = \int_a^{a+l} k \frac{q_1 \cdot \tau \cdot dx}{x^2}$$

$$F = k \cdot q_1 \cdot \tau \left(-\frac{1}{a+l} + \frac{1}{a} \right)$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

- **Силовая характеристика электрического поля:**

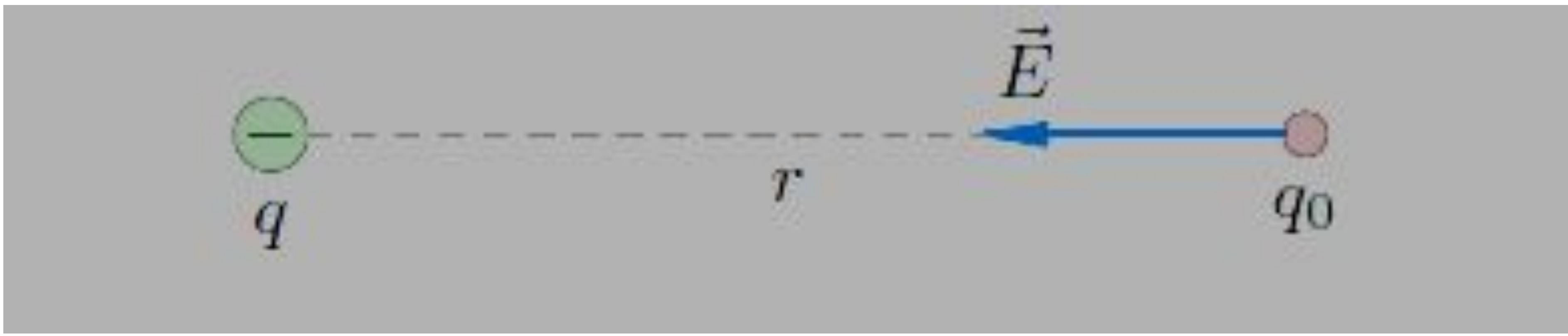
$$\vec{F} = \kappa \cdot \frac{q \cdot q^{/}}{r^2}\left(\frac{\vec{r}}{r}\right) = \kappa \cdot \frac{q \cdot 1}{r^2}\left(\frac{\vec{r}}{r}\right) = \vec{E}$$

$$F = \kappa \cdot \frac{q}{r^2} = E$$

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}$$

Определение направления вектора напряженности



НАПРЯЖЕННОСТЬ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}\left(\frac{\vec{r}}{r}\right)$$

[1В/м]= [1Кл]/ [1м^2].

НАПРЯЖЕННОСТЬ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА В СКАЛЯРНОЙ ФОРМЕ

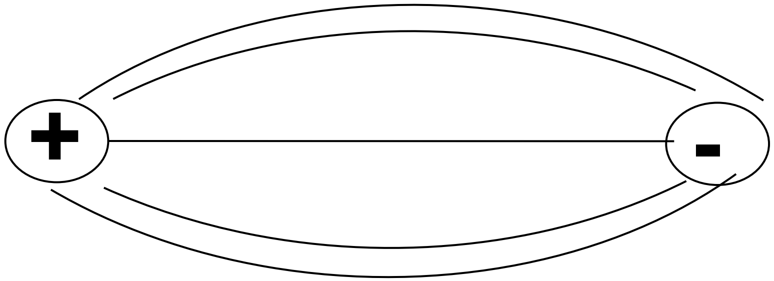
$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$$

ГРАФИЧЕСКОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ

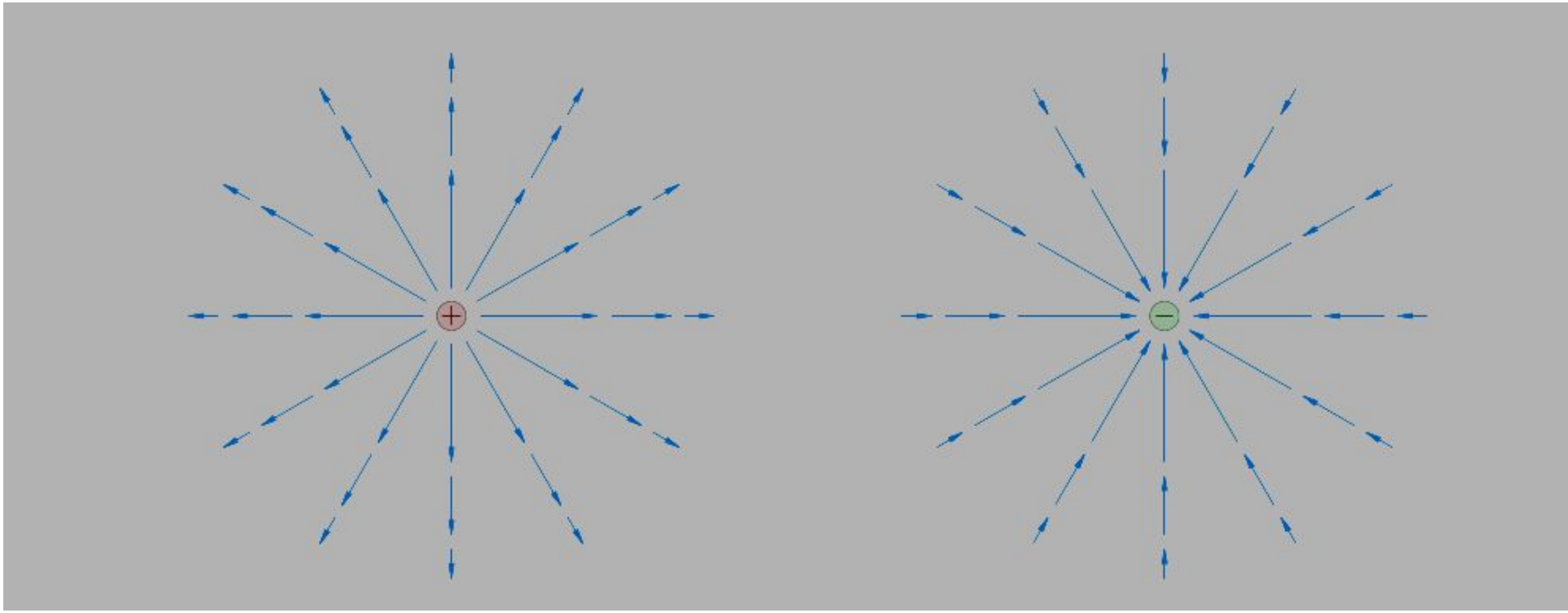
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ:

Источник электростатического поля

Сток электростатического поля



ГРАФИЧЕСКОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ:

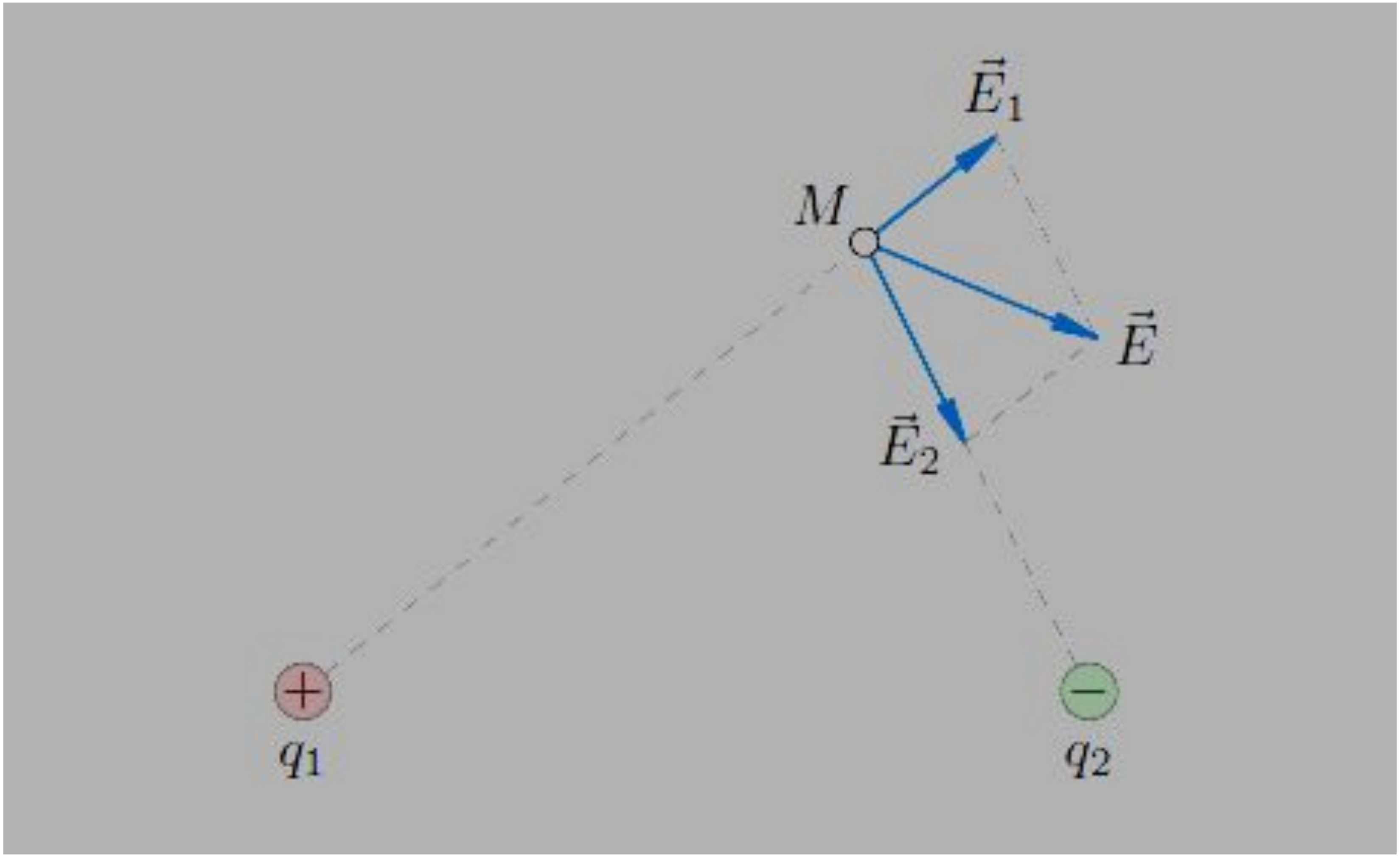


Принцип суперпозиции электростатических полей:

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

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n.$$

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ СИСТЕМЫ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ МЕТОДОМ СУПЕРПОЗИЦИЙ

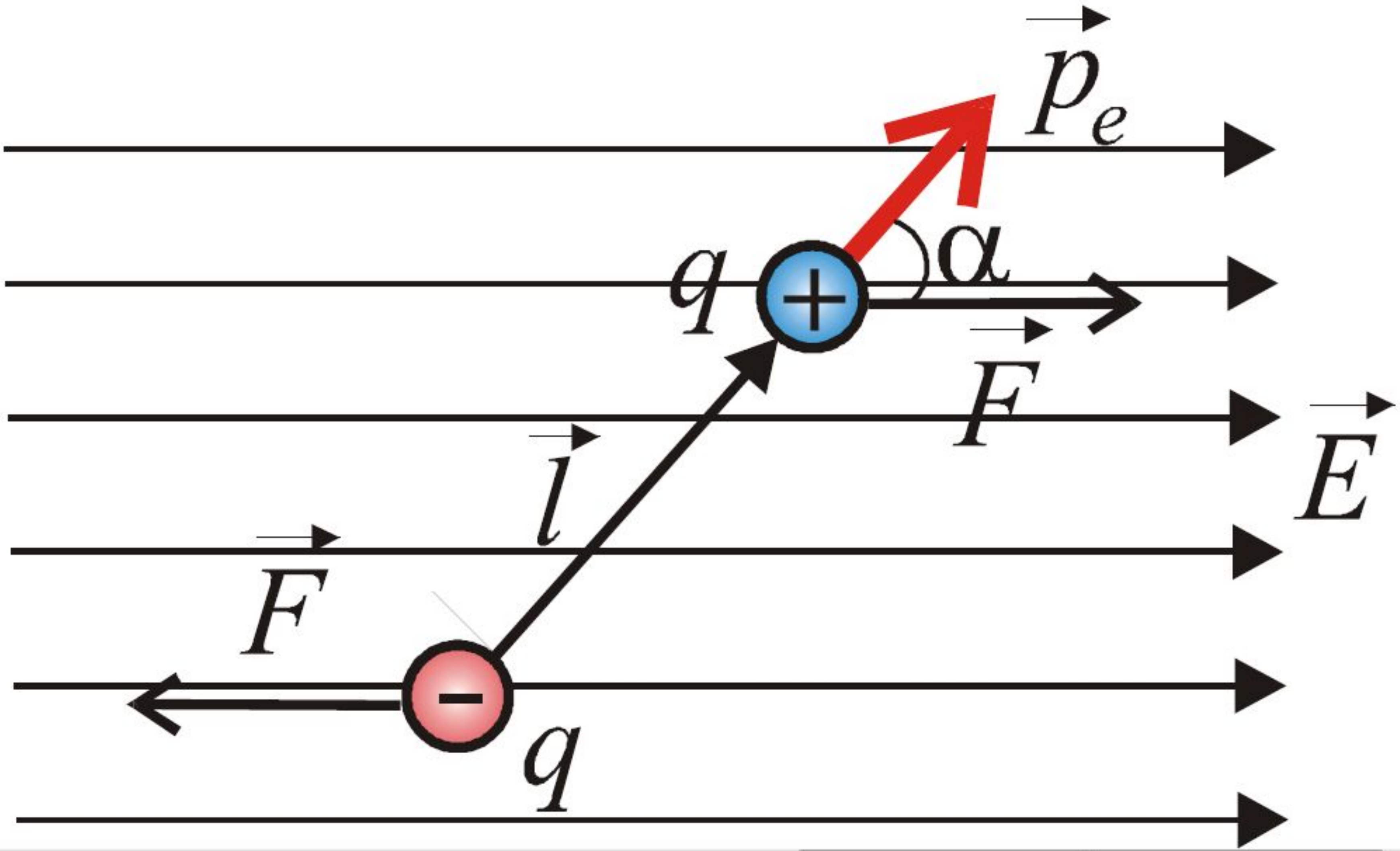


$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$E = \sqrt{E_1{}^2 + E_2{}^2 - 2E_1E_2\cos\alpha}$$

$$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1{}^2} \qquad E_2 = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2{}^2}$$

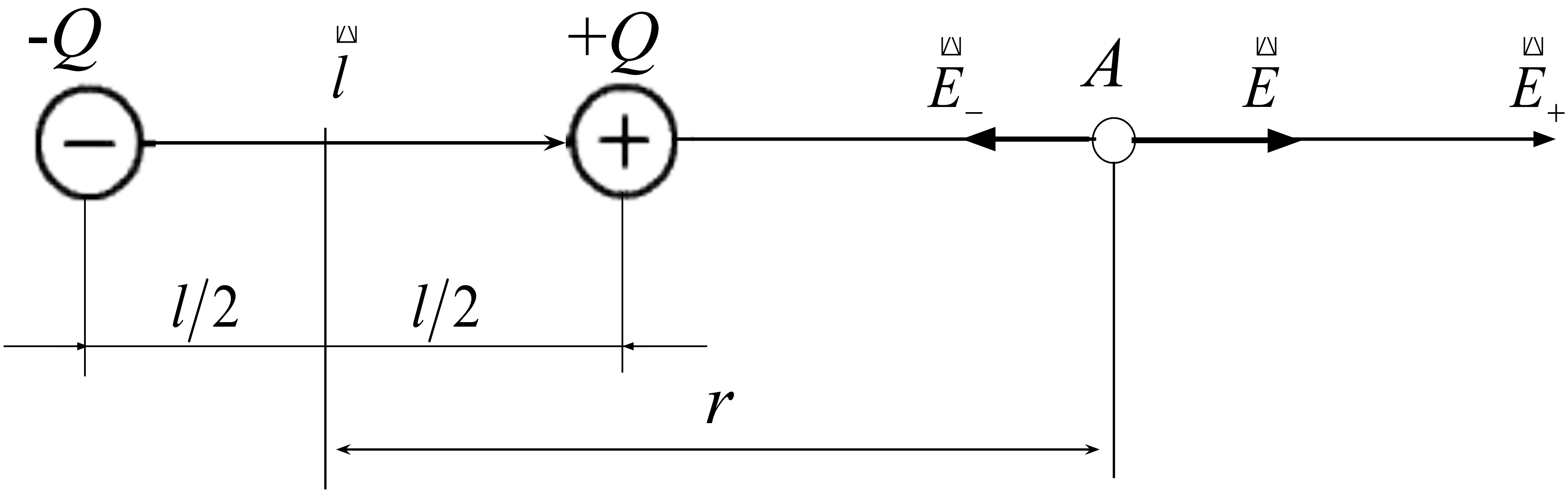
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ



ДИПОЛЬНЫЙ МОМЕНТ

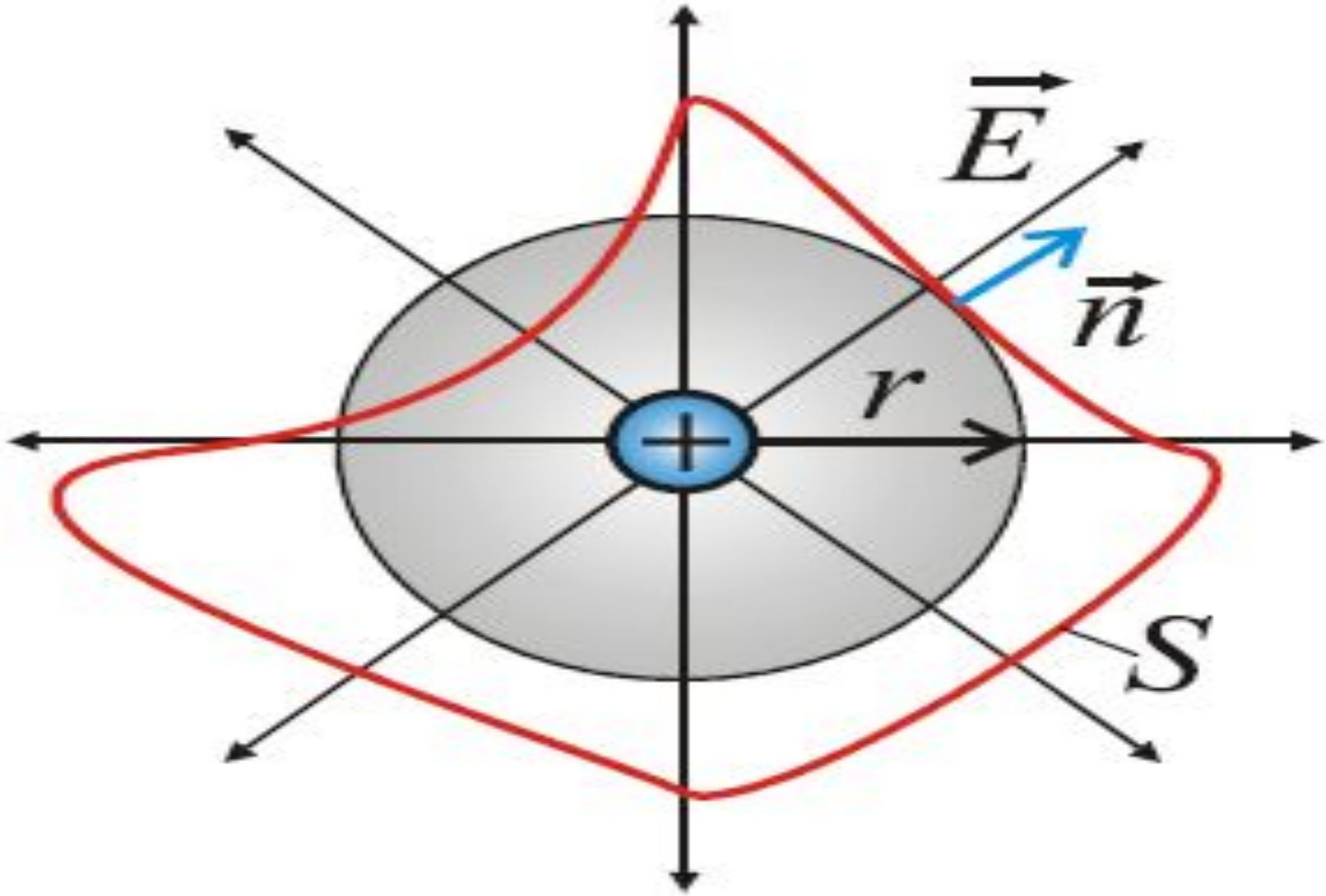
$$\vec{p}_e = q \cdot \vec{l}$$

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТОЧКЕ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ОСИ ДИПОЛЯ



$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{2p}{r^3}$$

ТЕОРЕМА ГАУССА



ПОТОК ВЕКТОРА НАПРЯЖЕННОСТИ СКВОЗЬ СФЕРИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ РАДИУСА *R*, ОХВАТЫВАЮЩУЮ ТОЧЕЧНЫЙ ЗАРЯД *Q*, НАХОДЯЩЕЙСЯ В ЕЕ ЦЕНТРЕ:

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S E \cdot dS \cos\left(\vec{E}, \vec{n}\right) = \oint_S E \cdot dS$$

Силовые линии заряда центрально симметричны, поэтому в каждой точке поверхности этой сферы проекция вектора *E* на внешнюю нормаль (*n*) имеет одно и то же значение:

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

$$\vec{E} \uparrow\uparrow \vec{n} \quad \Rightarrow \quad \cos\alpha = \cos 0^{\circ} = 1$$

$$\Phi_E = \oint_S \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} dS =$$

$$= \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

ТЕОРЕМА ГАУССА:

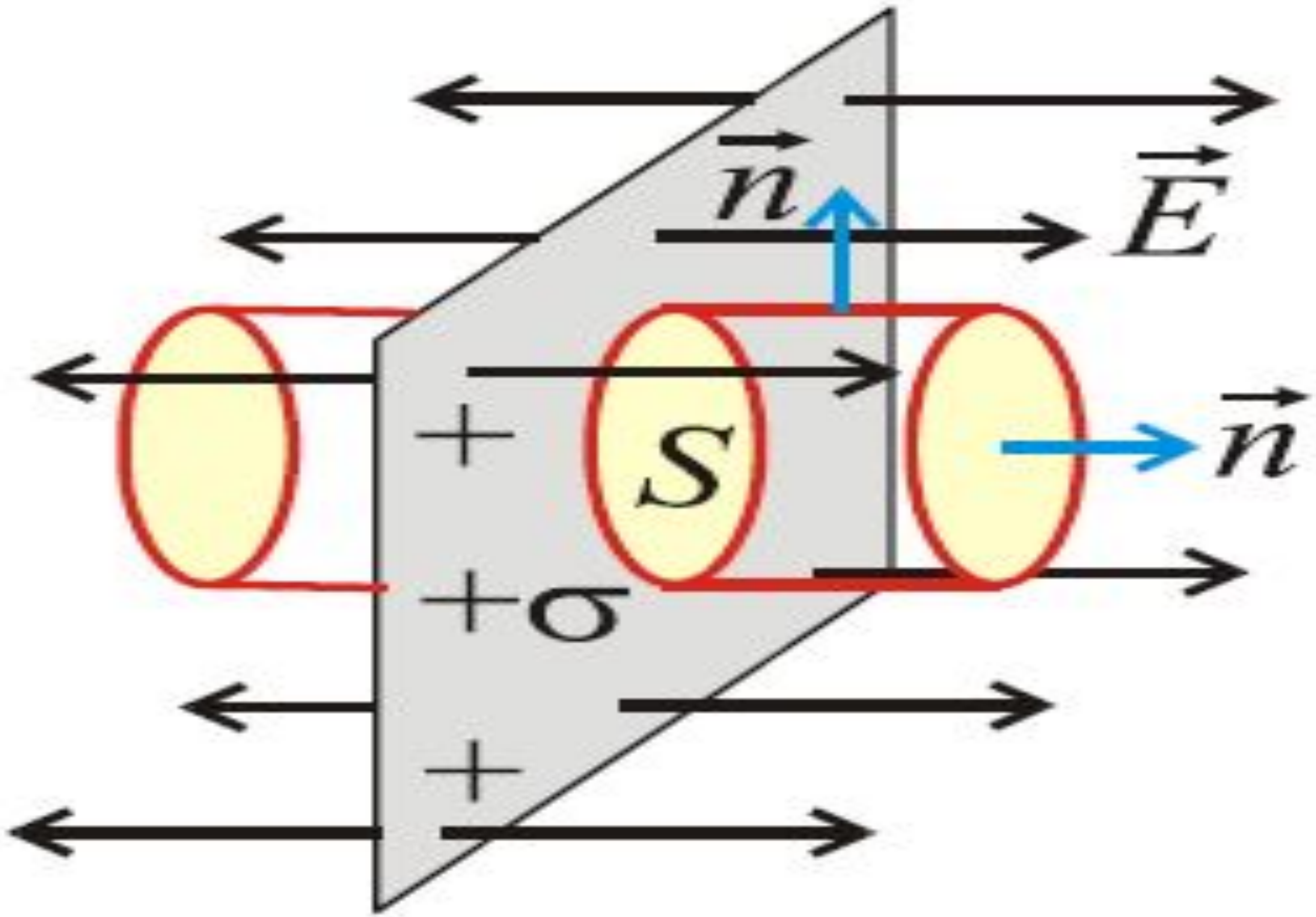
$$\Phi_E = \oint\limits_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint\limits_S \left(\sum_{i=1}^{N} \vec{E}_i\right) \cdot d\vec{S} = \sum_{i=1}^{N} \left(\oint\limits_S \vec{E}_i \cdot d\vec{S}\right) = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{N} Q_i .$$

Поток вектора напряженности электрического поля в вакууме сквозь замкнутую поверхность произвольной формы равен отношению алгебраической суммы зарядов, находящейся внутри этой поверхности, к электрической постоянной.

ЕСЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ РАСПРЕДЕЛЕНЫ НЕРАВНОМЕРНО С ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ *Р* ЗАРЯДОВ, РАЗЛИЧНОЙ В РАЗНЫХ МЕСТАХ ПРОСТРАНСТВА, ТО ТЕОРЕМА ГАУССА ПРИНИМАЕТ ВИД:

$$\oint_S E_n \cdot dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \int_V \rho \cdot dV .$$

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ БЕСКОНЕЧНОЙ РАВНОМЕРНО ЗАРЯЖЕННОЙ ПЛОСКОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ТЕОРЕМЫ ГАУССА



- Представим себе равномерно заряженную бесконечную плоскость с постоянной поверхностной плотностью заряда σ (рис.).
- Построим бесконечно узкий прямой цилиндр, пересекающий данную плоскость, основания которого параллельны заряженной плоскости и лежат по разные стороны от нее на одинаковых расстояниях.

Поток смещения сквозь замкнутую цилиндрическую поверхность :

$$\Phi_E = \Phi_{бок} + 2\Phi_{осн}$$

Так как образующие цилиндра параллельны линиям напряженности, то поток вектора напряженности через боковую поверхность цилиндра равен нулю, а полный поток сквозь цилиндр равен сумме потоков сквозь его основания:

$$\Phi_E = 2\Phi_{осн} = 2E \cdot S$$

По теореме Гаусса:

$$\Phi_E = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

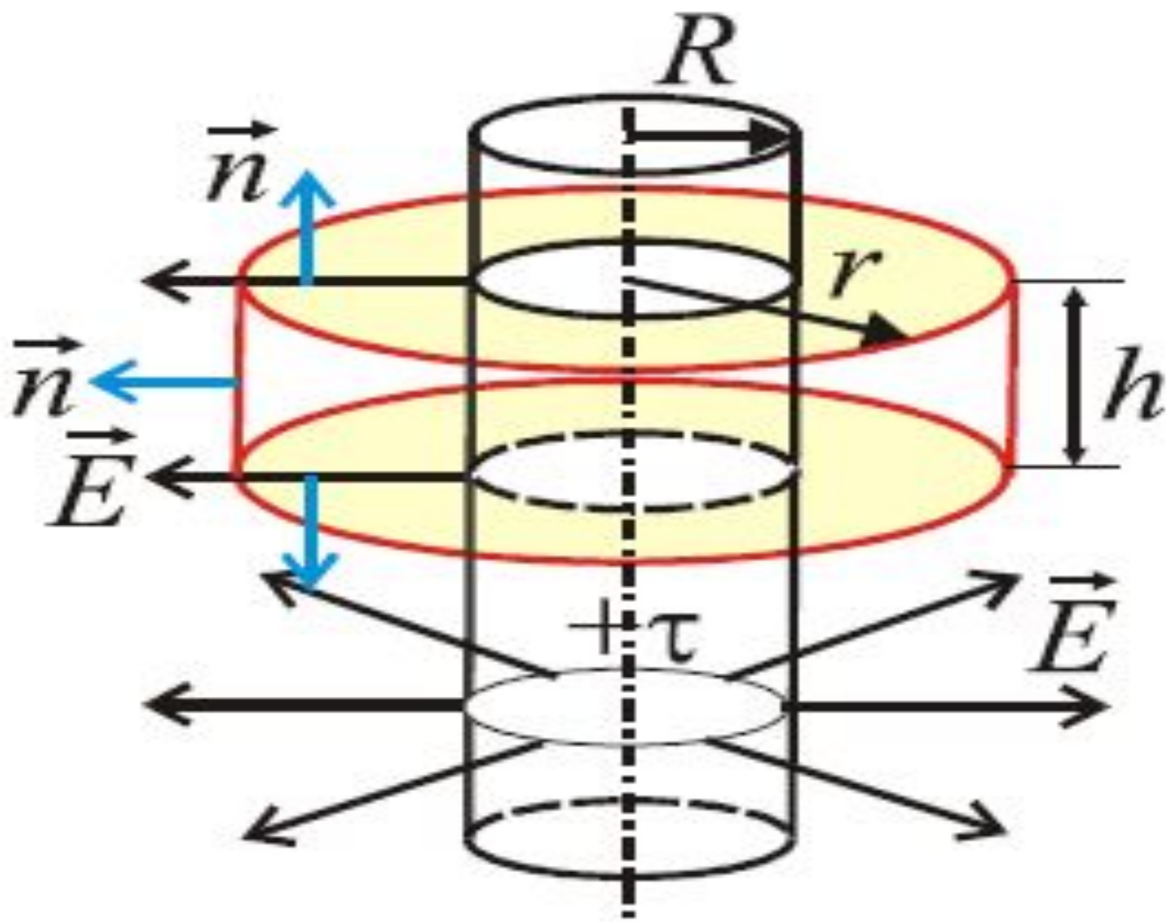
$$\frac{q}{\varepsilon_0} = 2E \cdot S$$

$$q = \sigma \cdot S \quad \Rightarrow \quad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ БЕСКОНЕЧНОЙ РАВНОМЕРНО ЗАРЯЖЕННОЙ ПЛОСКОСТИ:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}$$

ПОЛЕ РАВНОМЕРНО ЗАРЯЖЕННОГО БЕСКОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРА (НИТИ)



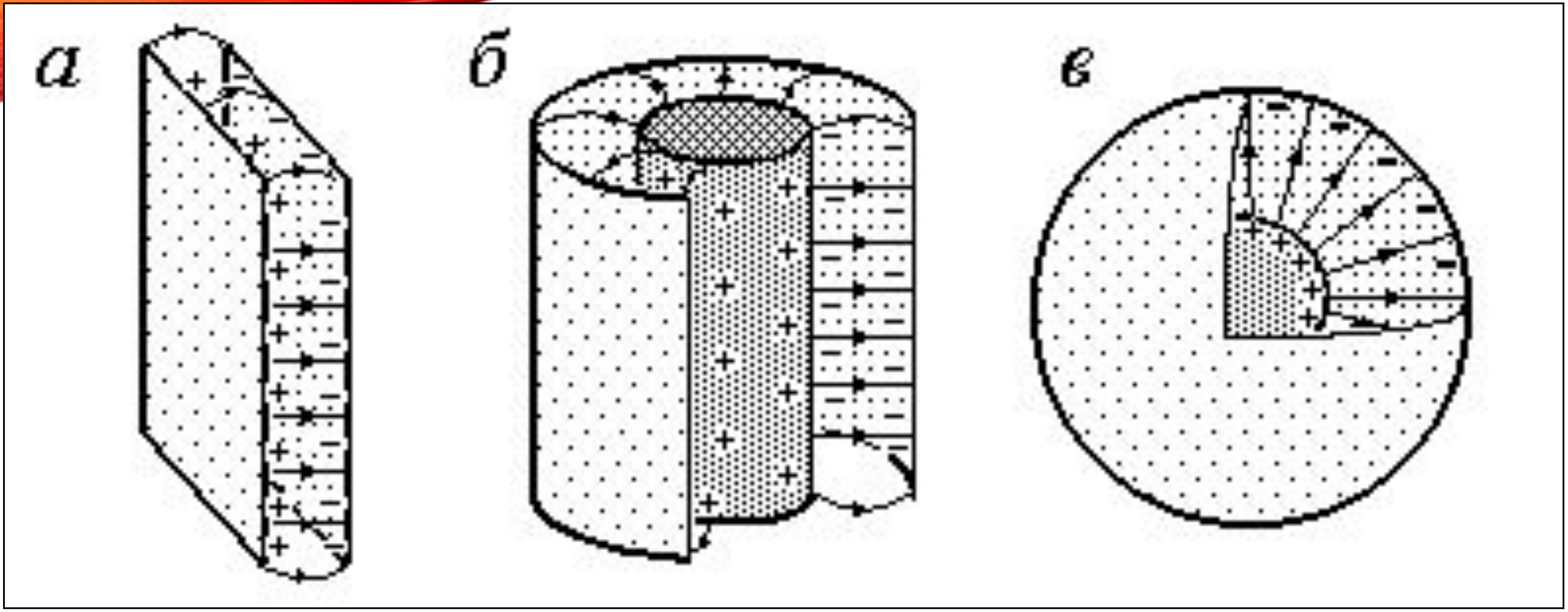
$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

28.09.2022 г.

Конденсаторы.

Электрическое поле в веществе

КОНДЕНСАТОРЫ. ЕМКОСТЬ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА



- **Виды конденсаторов**:
  1. **по виду диэлектрика**: воздушные, слюдяные, керамические, электролитические
  2. по форме обкладок: плоские, сферические, цилиндрические
  3. **по величине емкости**: постоянные, переменные

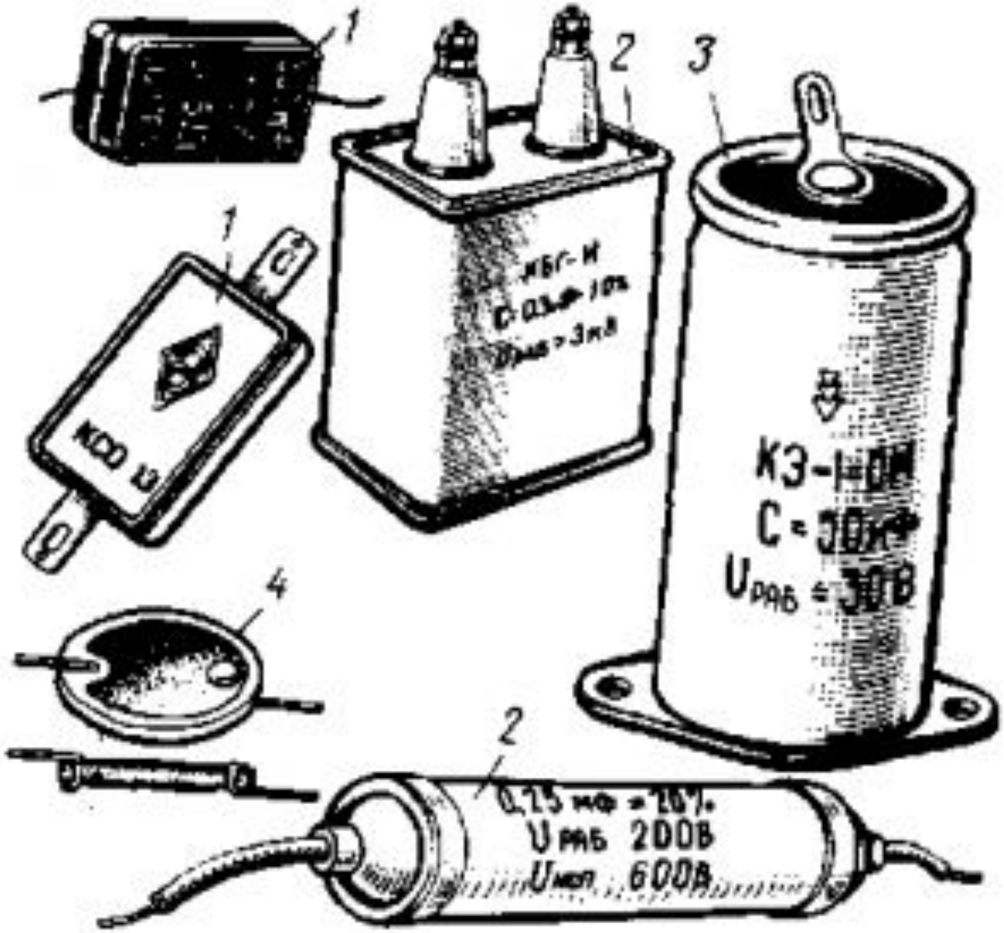
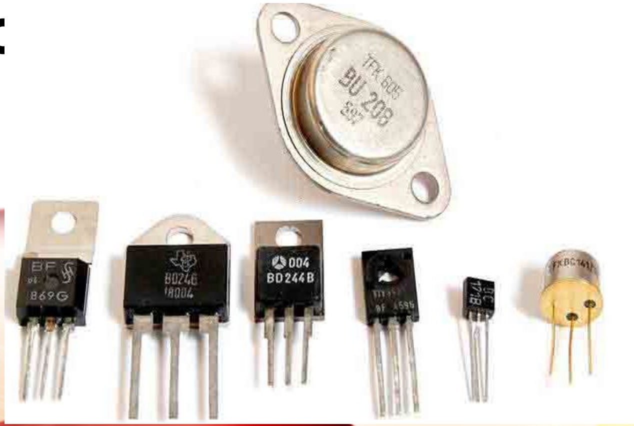


Рис. Общие виды применяемых конденсаторов: 1 — слюдяные; 2 — бумажные; 3 — электролитический; 4 — керамический

Конденсатор переменной емко



Конденсатор постоянной емкости

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

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

$$1Ф = 1\frac{Кулон}{Вольт} = 1\frac{Кл}{В}$$

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

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

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ СФЕРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА:

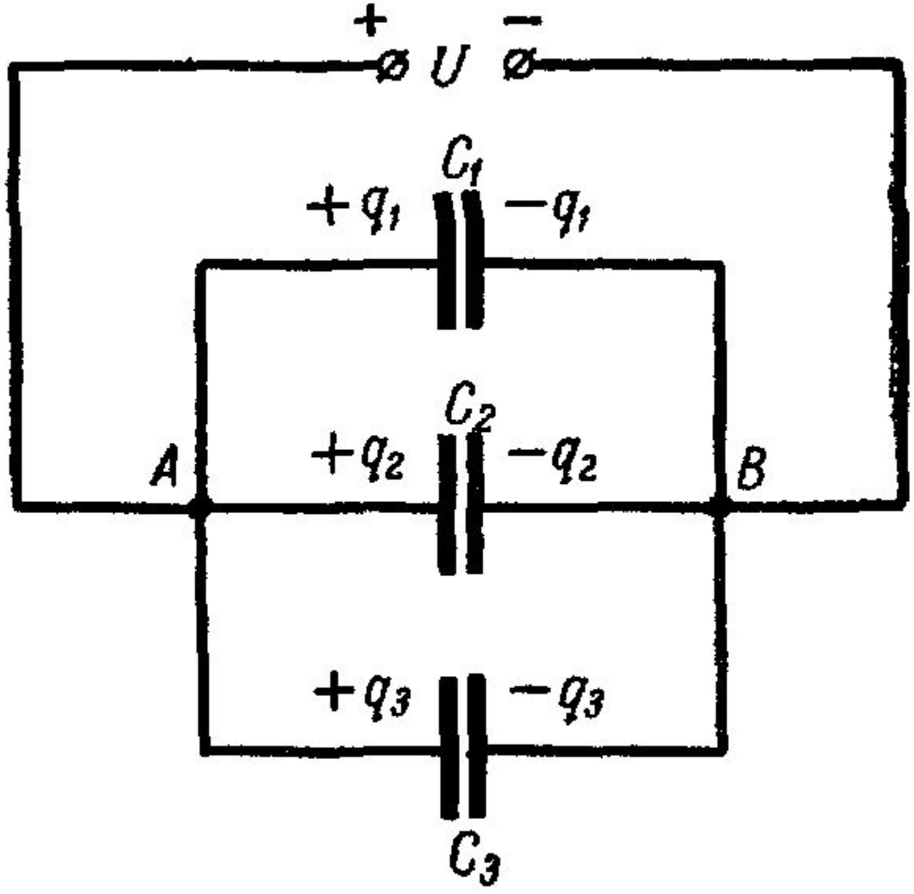
$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 rR}{R - r}$$

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 L}{\ln(\frac{R}{r})}$$

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ



$$U = const$$

$$q_1 = C_1 \cdot U, \quad q_2 = C_2 \cdot U, \quad \ldots, \quad q_n = C_n \cdot U$$

$$q = q_1 + q_2 + \ldots + q_n$$

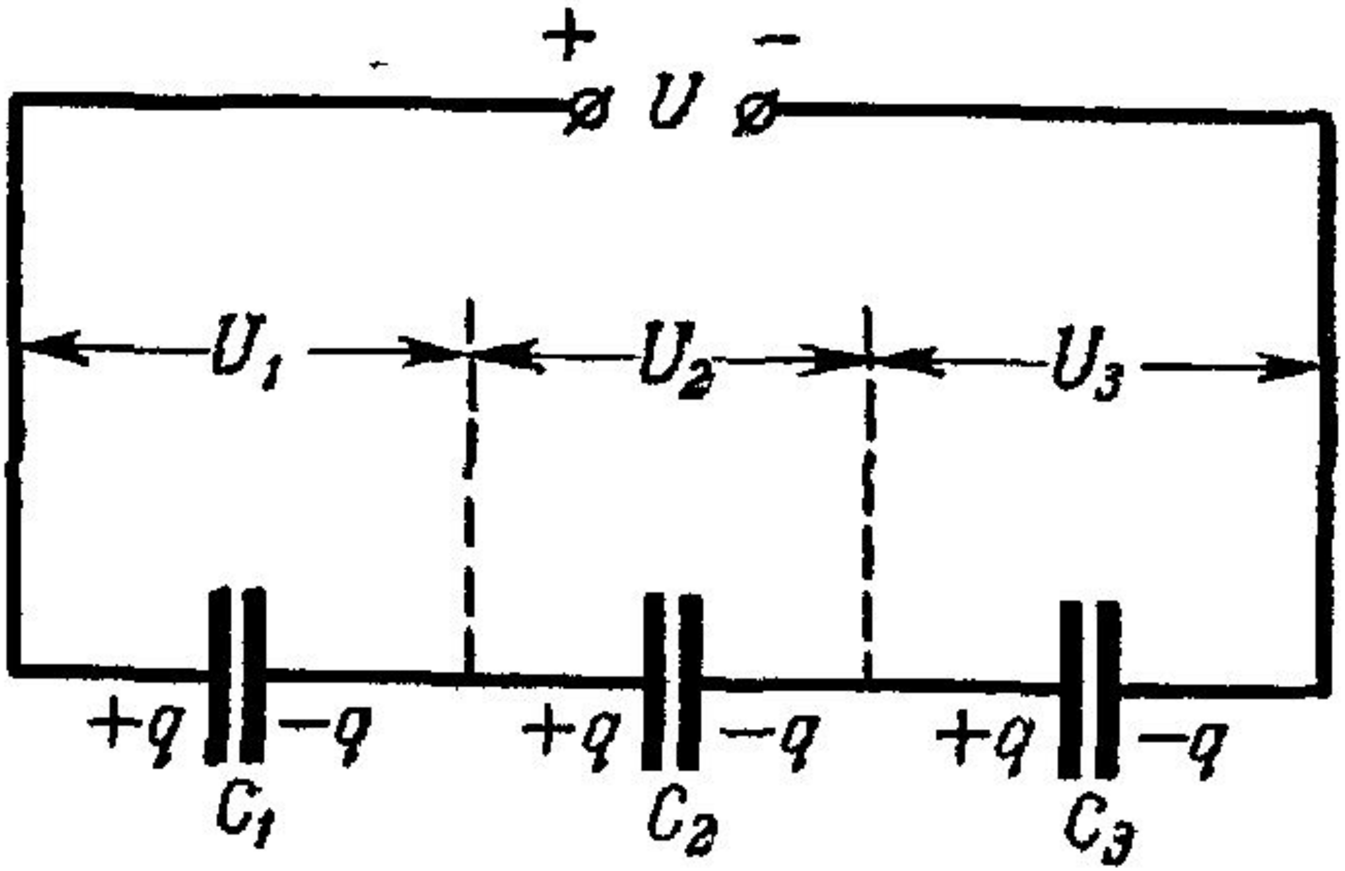
$$q = \left(C_1 + C_2 + \ldots + C_n\right) \cdot U$$

$$C_б = \frac{q}{U} = C_1 + C_2 + \ldots + C_n$$

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

$$\boxed{C_б = \sum_{i=1}^{n} C_i}$$

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ



$$U = \sum_{i=1}^{n} U_i, \quad q = const$$

$$U_1 = \frac{q}{C_1}, \; U_2 = \frac{q}{C_2}, \; \dots, \quad U_n = \frac{q}{C_n}$$

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

$$U = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n} \right) \cdot q$$

$$\frac{1}{C_б} = \frac{U}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}$$

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ СИСТЕМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

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

$$C_б < C_i$$

ЭНЕРГИЯ УЕДИНЕННОГО ПРОВОДНИКА И КОНДЕНСАТОРА

$$\boxed{W = \frac{1}{2}\varphi \cdot Q}$$

$$\boxed{W_k = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2}qU = \frac{1}{2}CU^2}$$

ОБЪЕМНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

$$\omega_0 = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2}{2}$$

ТИПЫ ДИЭЛЕКТРИКОВ. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

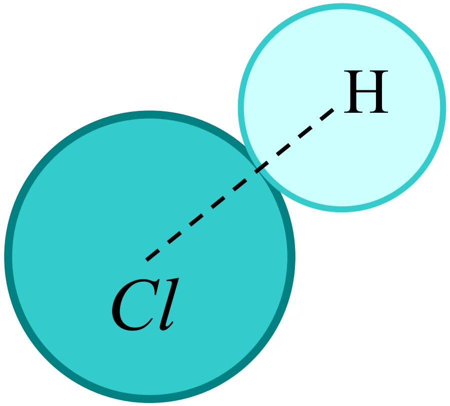
ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

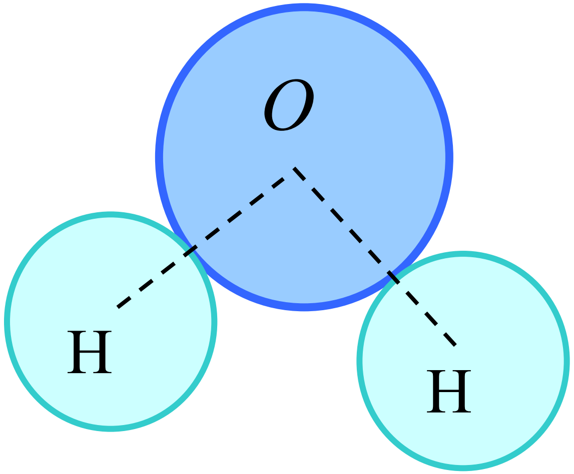
Полярные

Неполярные

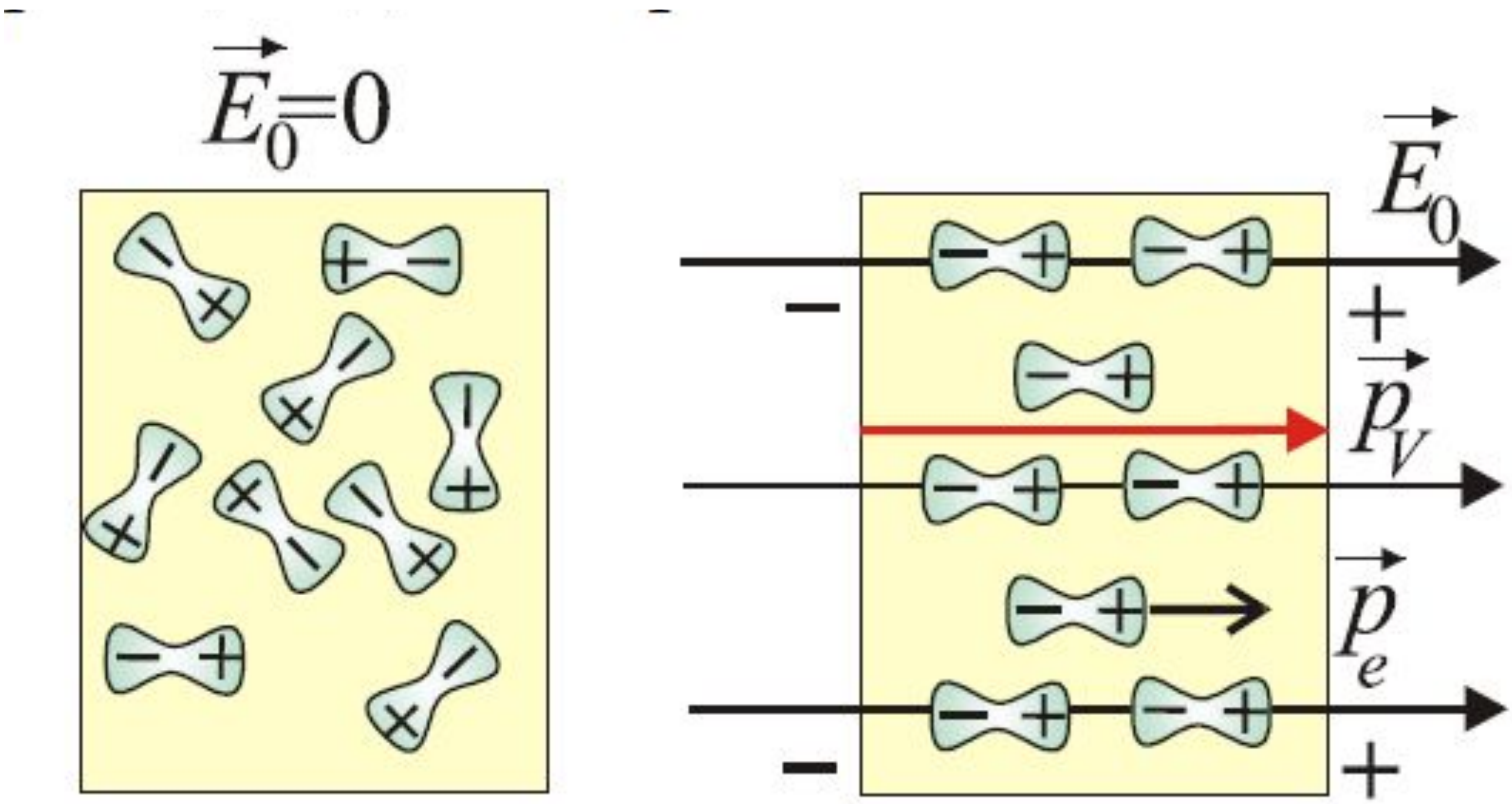
Ионные

ПОЛЯРНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

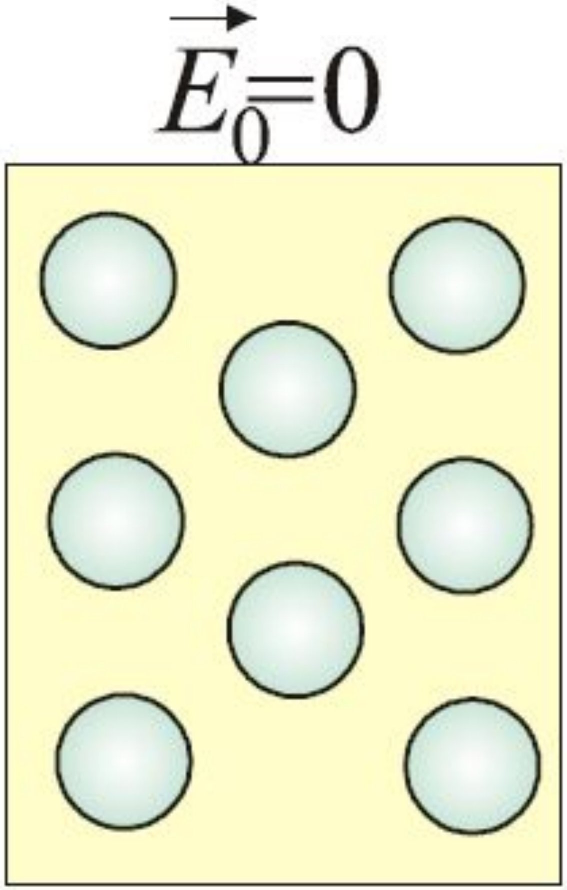


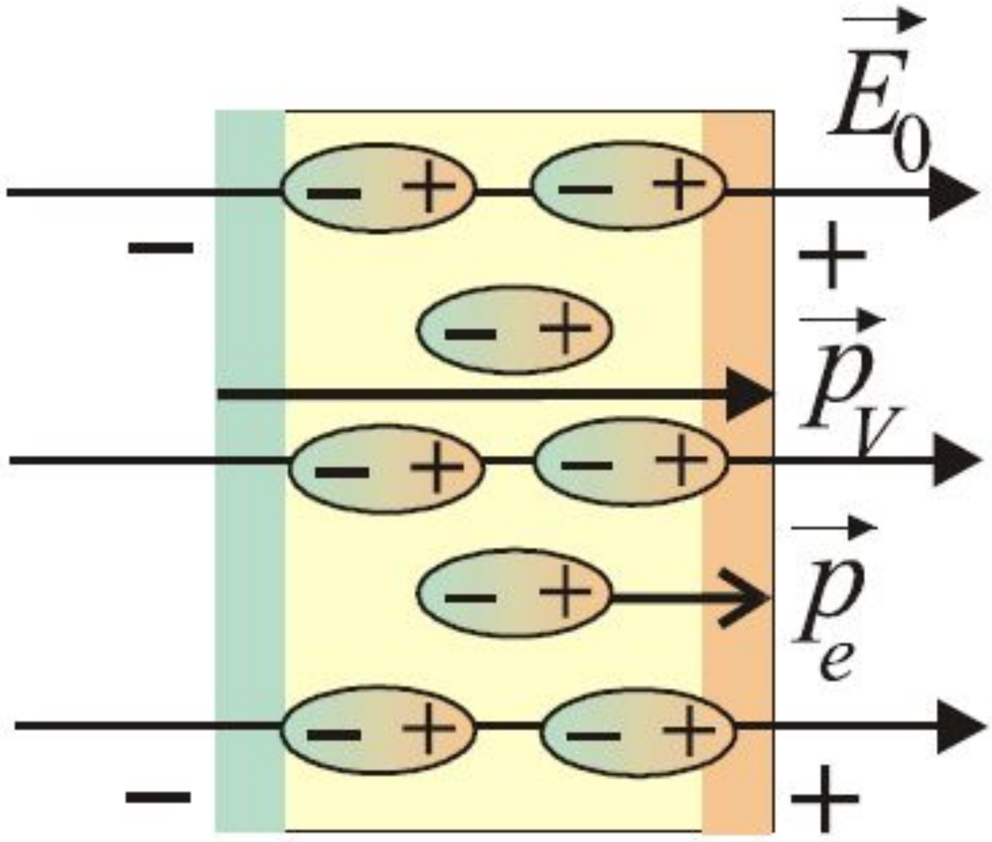


ОРИЕНТАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПОЛЯРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА



ДЕФОРМАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ НЕПОЛЯРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА





ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. СИЛА И ПЛОТНОСТЬ ТОКА. УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТОКА В ЦЕПИ. СТОРОННИЕ СИЛЫ. ЭДС.

УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТОКА В ЦЕПИ:

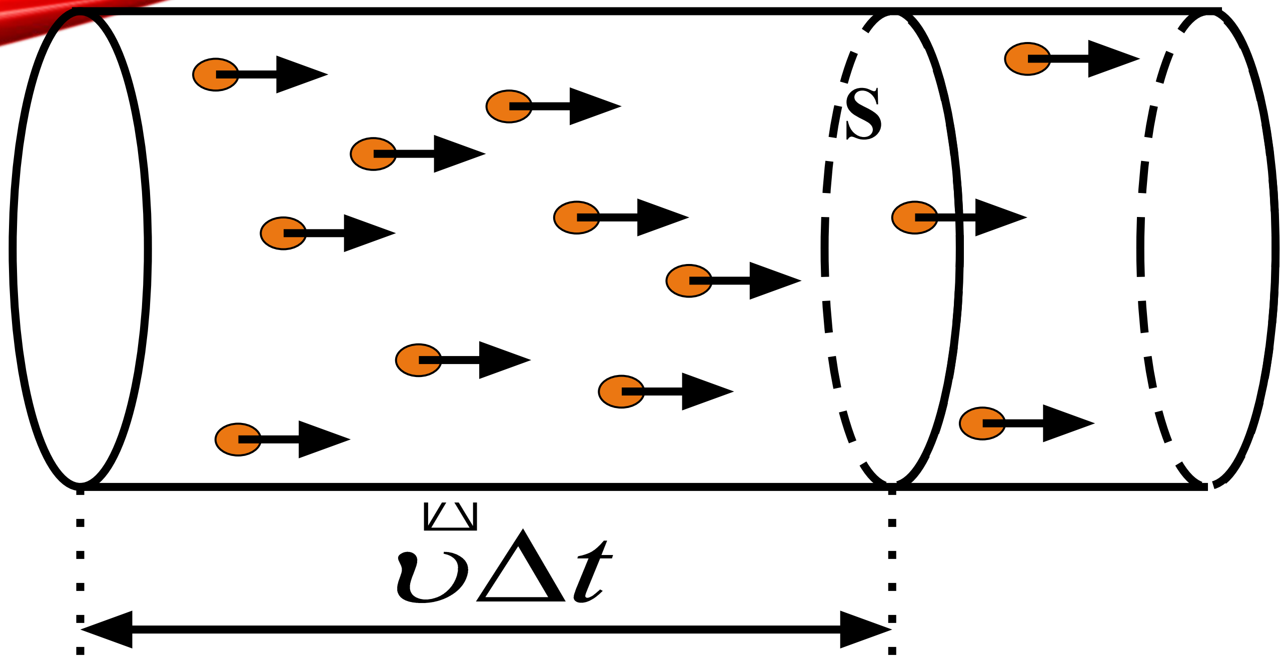
- наличие свободных носителей тока (свободного заряда);
- наличие электрической силы, вынуждающей их упорядоченно двигаться.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Сила тока

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

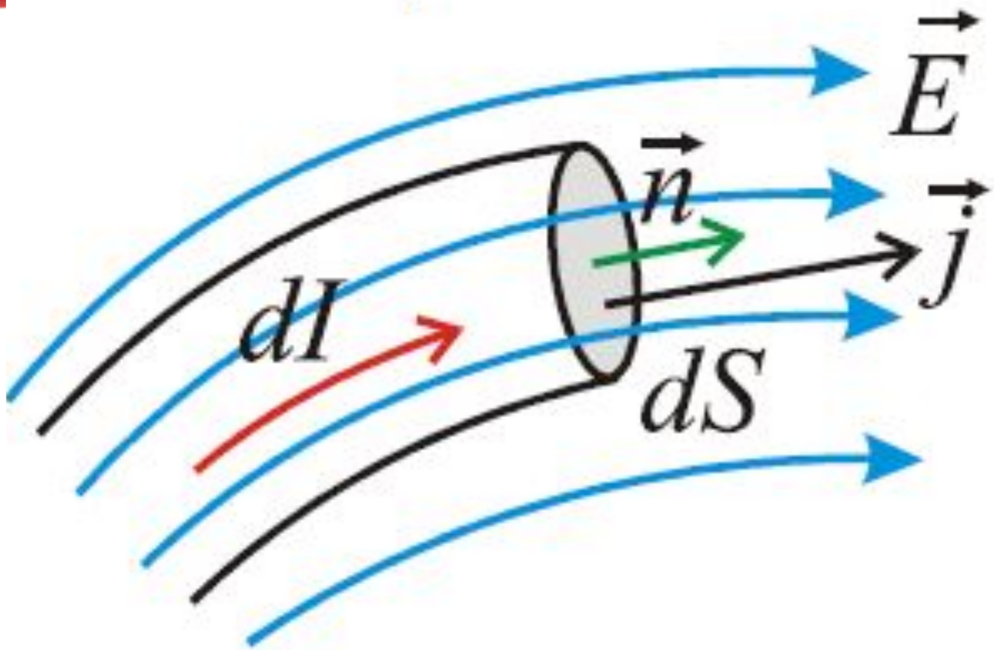
$$\left[1A = \frac{1Кл}{1c}\right]$$



$$\left.\begin{aligned} I &= \frac{\Delta q}{\Delta t} \\ \Delta q &= q_0 N \\ N &= nV \\ V &= S\upsilon\Delta t \end{aligned}\right\}$$

$$\boxed{I = q_0 n S \upsilon}$$

ПЛОТНОСТЬ ТОКА



$$j = \frac{dI}{dS}$$

$$\left[\vec{j}\right] = \left[A / м^2\right]$$

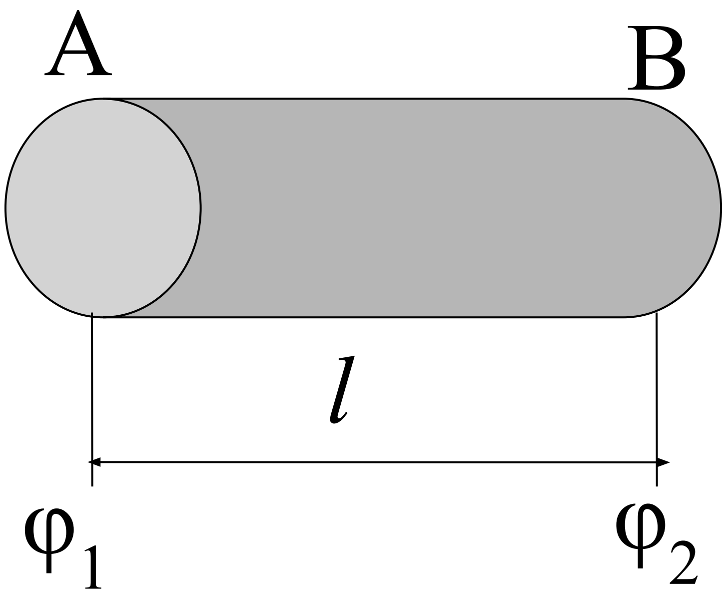
$$I = \int_S \left(\vec{j}\, d\vec{S}\right)$$

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

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

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

НАПРЯЖЕНИЕ



$$U = \frac{dA}{dq} = \varphi_1 - \varphi_2,$$

$$\left[B = \frac{Дж}{Кл} \right]$$

$$I \sim U$$

ЗАКОН ОМА В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ (ДЛЯ ОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ)

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

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА

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

$$\left[1 \quad Ом = \frac{1В}{1А} \right]$$

УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

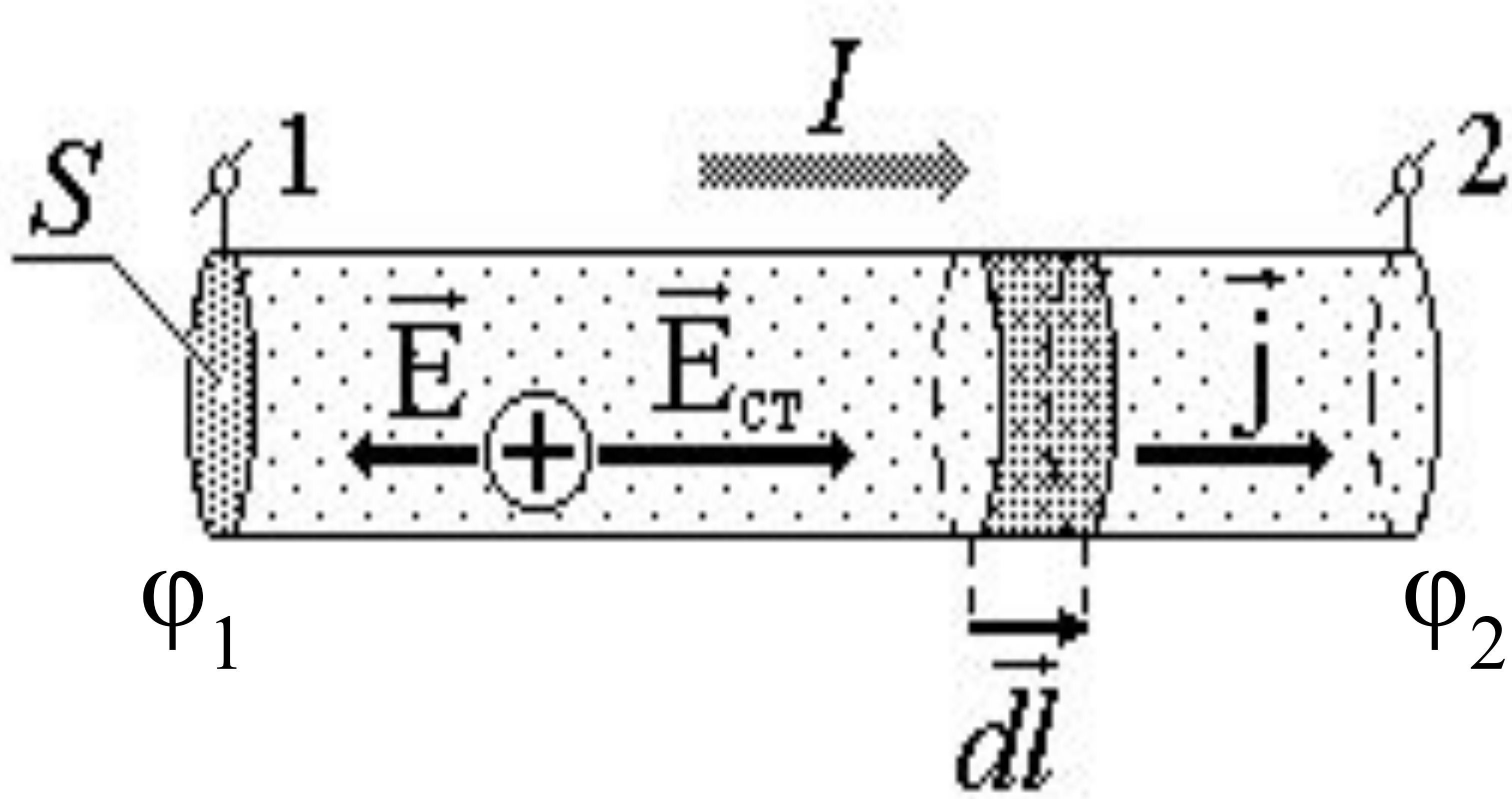
$$[\rho] = [\mathrm{Ом} \cdot \mathrm{м}]$$

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

ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

$$\boxed{R = R_0 \cdot (1 + \alpha t)}$$

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ЭДС)



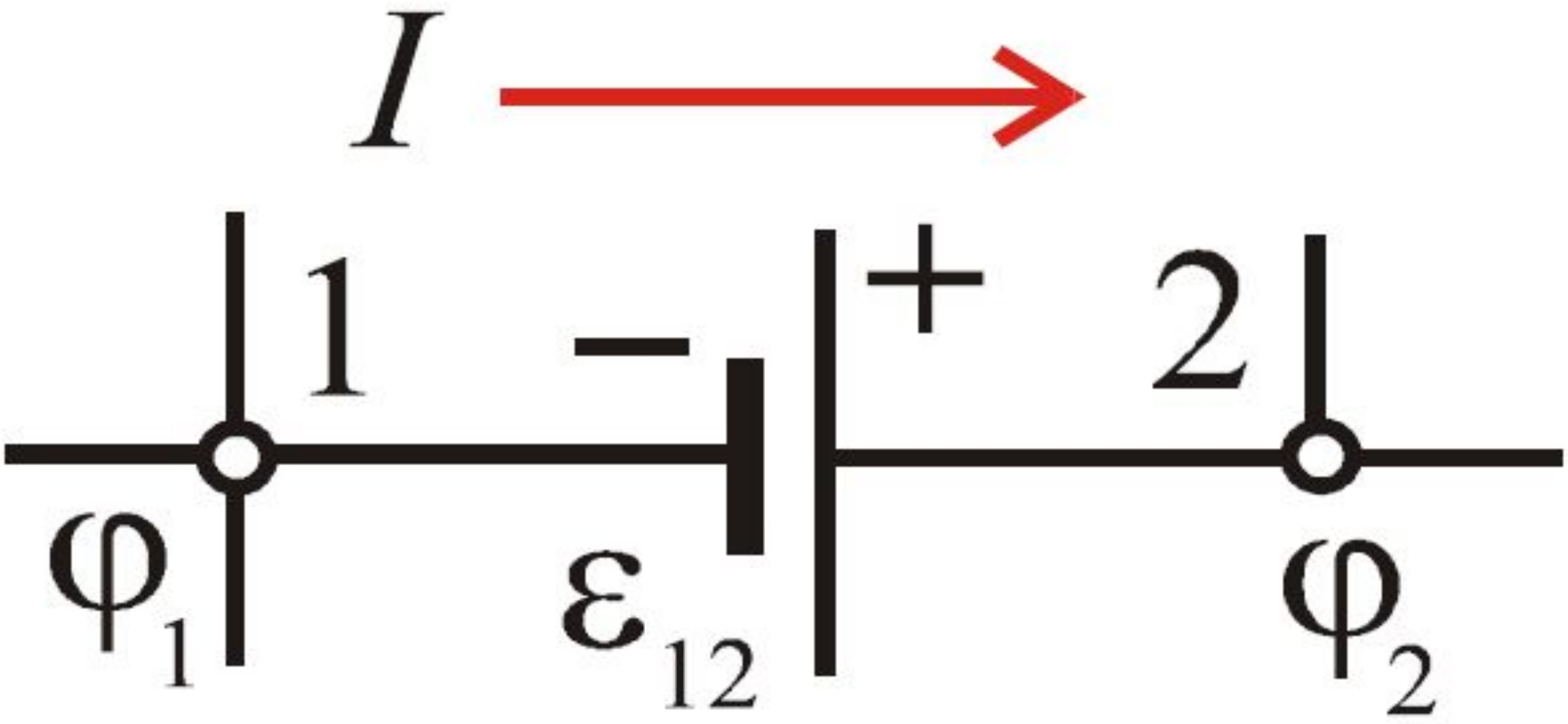
РАБОТА СТОРОННИХ СИЛ

$$A_{стор} = \int_l^2 \vec{F}_{стор} \cdot d\vec{l} = q_+ \int_l^2 \vec{E}_{стор} d\vec{l}$$

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ЭДС):

$$\varepsilon = \frac{A_{стор}}{q} = \oint_l \vec{E}_{стор} d\vec{l}$$

НЕОДНОРОДНЫЙ УЧАСТОК ЦЕПИ



$$A_{12} = q\int_1^2 \vec{E}_{эл} d\vec{l} + q\int_1^2 \vec{E}_{ст} d\vec{l} =$$

$$= q(\varphi_1 - \varphi_2) + q \cdot \varepsilon_{12} =$$

$$= q \cdot \left(-\Delta\varphi + \varepsilon_{12}\right)$$

$$\varepsilon_{12} = \int_{1}^{2} \vec{E}_{cm} d\vec{l}$$

$$U = \frac{A_{12}}{q} = \varepsilon_{12} - \Delta\varphi$$

$$U = \left(\varphi_1 - \varphi_2\right)$$

1) при ε = 0, $$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

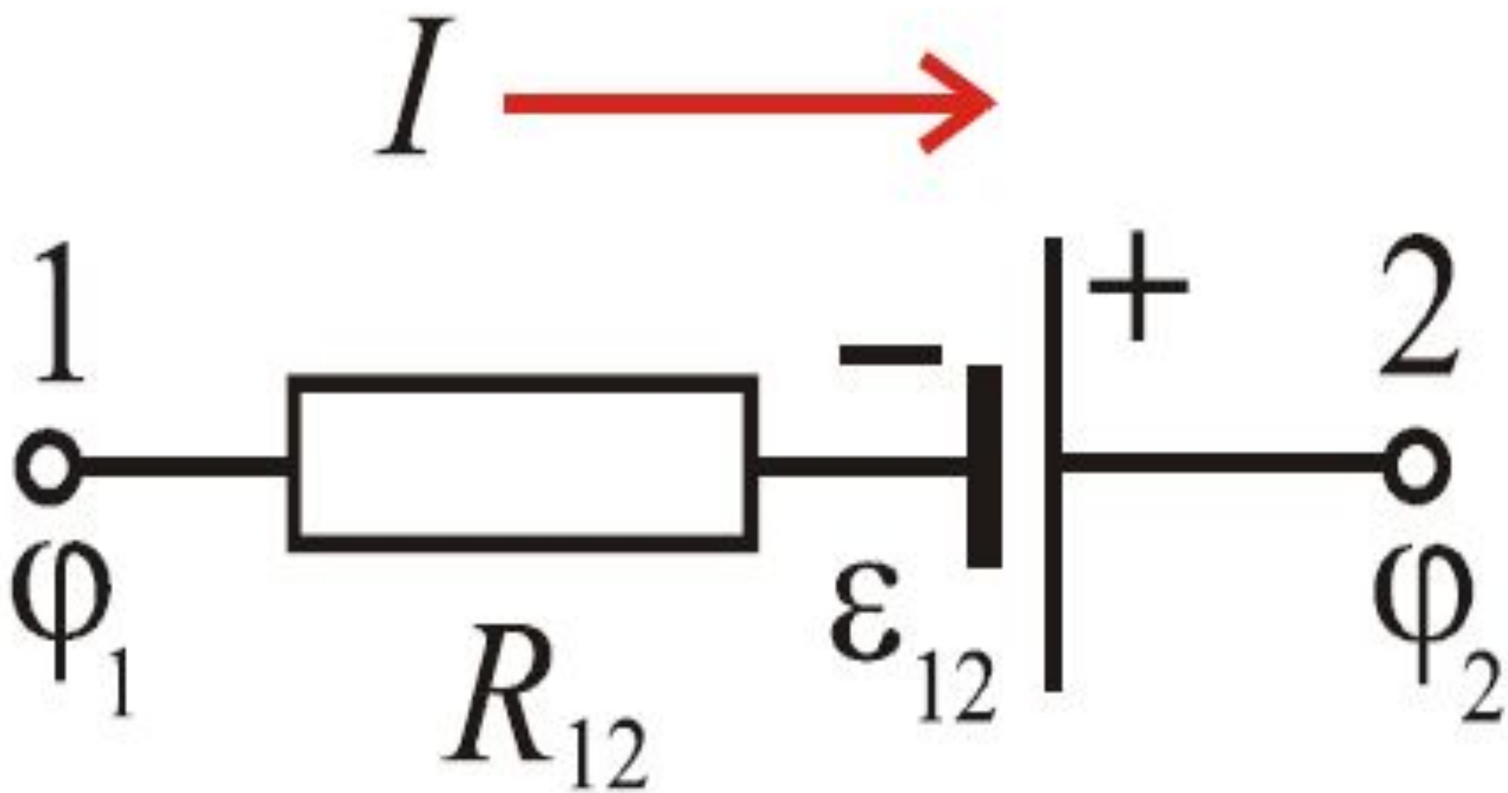
2) при ε≠0, $\varepsilon = \mathrm{U}$.

3) при U=0, $$\varphi_1 - \varphi_2 = -\varepsilon$$

ЗАКОН ОМА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ ДЛЯ ОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ:

$$\boxed{j = \frac{1}{\rho} \cdot E = \sigma \cdot E}$$

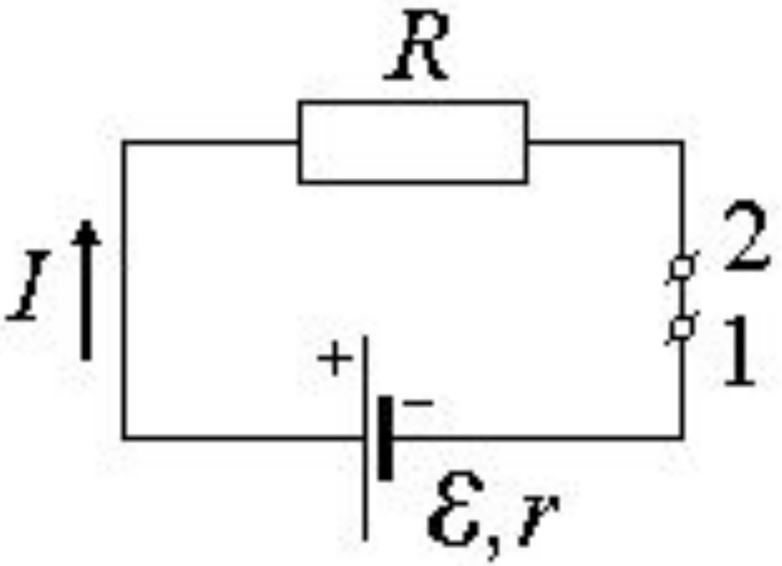
ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ



$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$$

$$\boxed{I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R}}$$

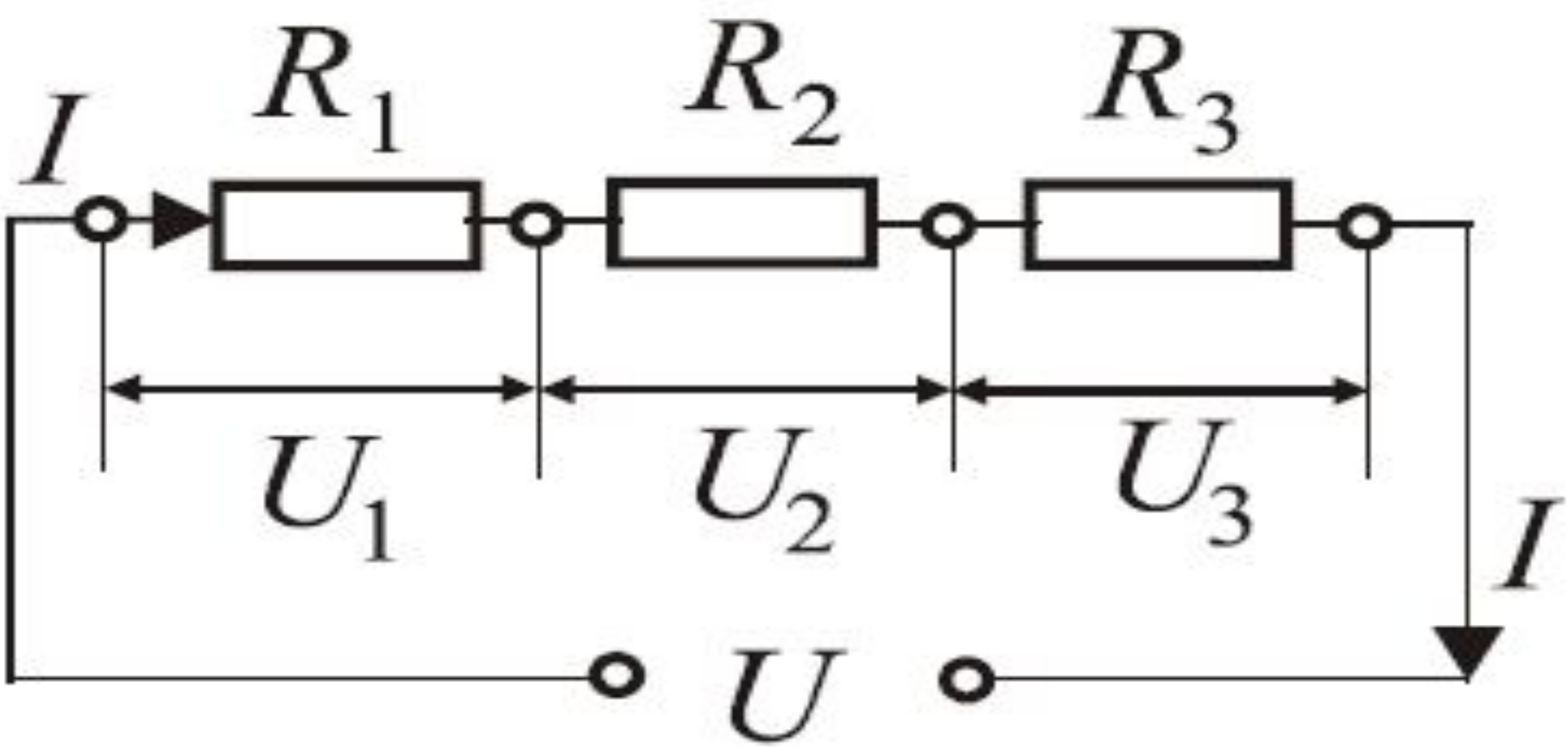
ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ



$$I = \frac{\varepsilon}{r + R}$$

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

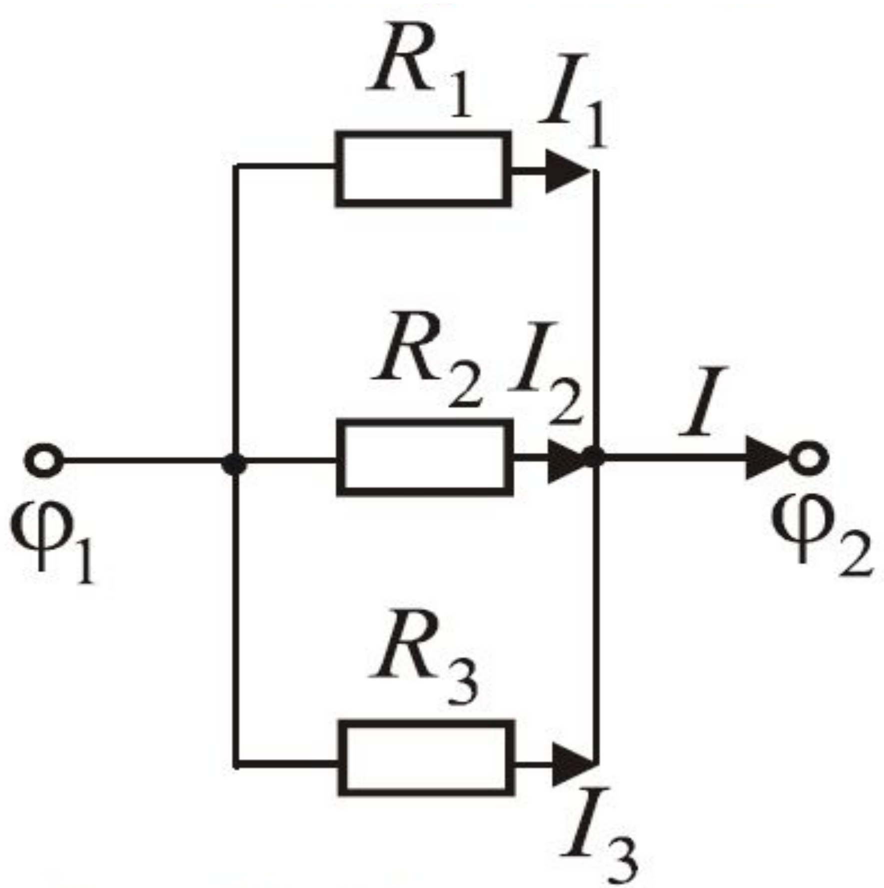


$$I = \frac{q}{t} = const, \quad U = \sum_{i=1}^{n} U_i$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i}{I}$$

$$\boxed{R = \sum_{i=1}^{n} R_i}$$

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ



$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = const$$

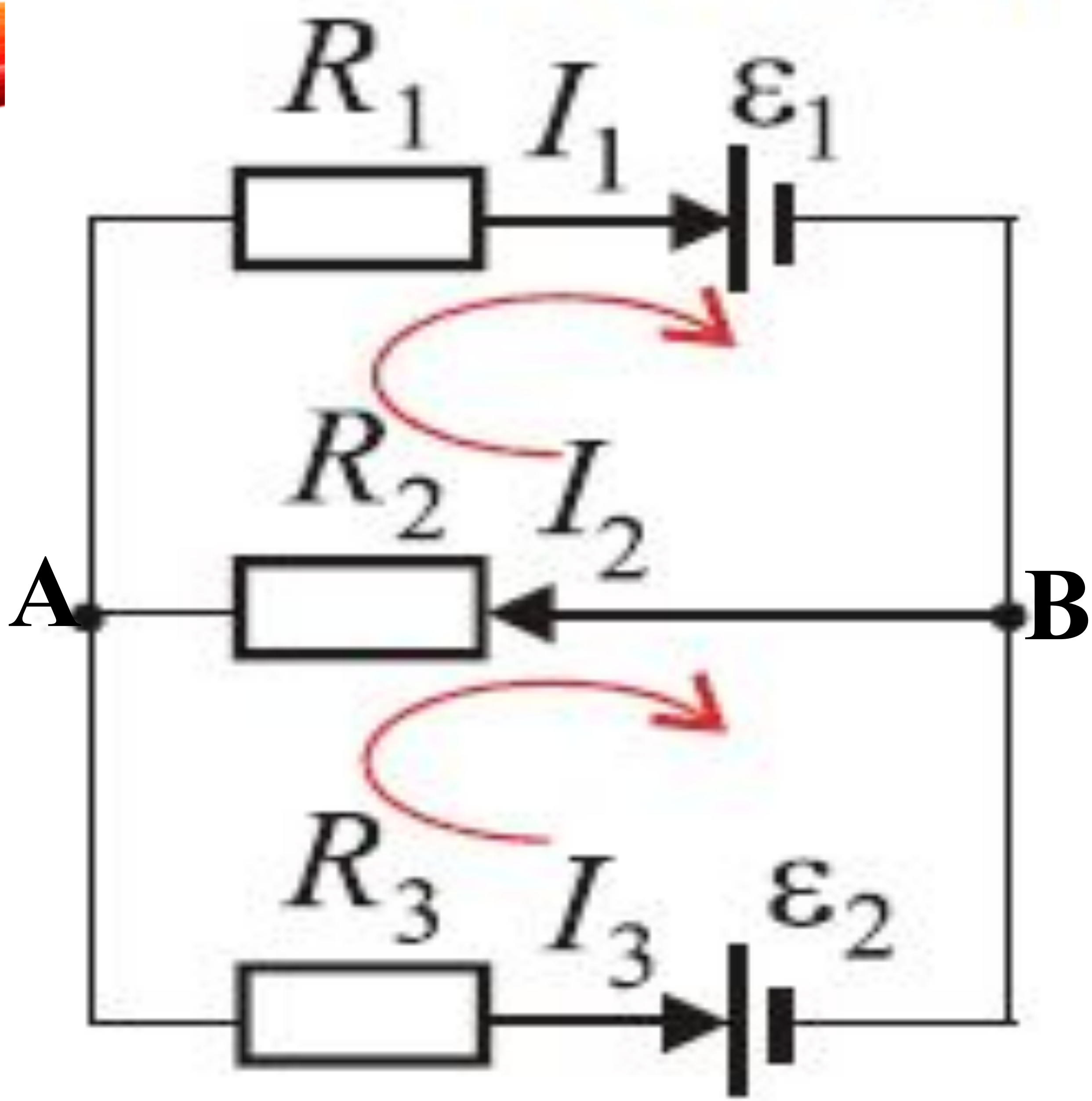
$$I = \sum_{k=1}^{n} I_k$$

$$\frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{\sum_{k=1}^{n} I_k}{U}$$

$$\frac{I_k}{U} = \frac{1}{R_k}$$

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{R_k}$$

ПРАВИЛА КИРХГОФА. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.



R_1
I_1
ε_1
R_2
I_2
A
B
R_3
I_3
ε_2

ПЕРВОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА

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

ВТОРОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА

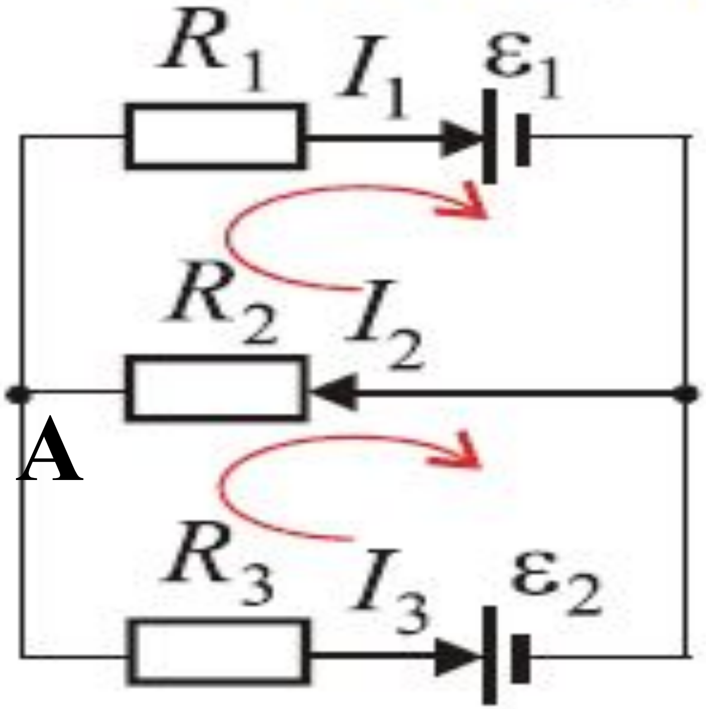
$$\sum_{i=1}^{n} I_i R_i = \sum_{\kappa=1}^{m} \varepsilon_\kappa$$

ПОРЯДОК РАСЧЕТА СЛОЖНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА:

1) произвольно выбрать и обозначить на чертеже направления токов на всех участках цепи;

2) подсчитать число узлов m и записать первое правило Кирхгофа для всех m – 1 узлов.

3) выделить произвольные замкнутые контуры в цепи и условившись о направлении обхода записать для них второе правило Кирхгофа



Для узла A:

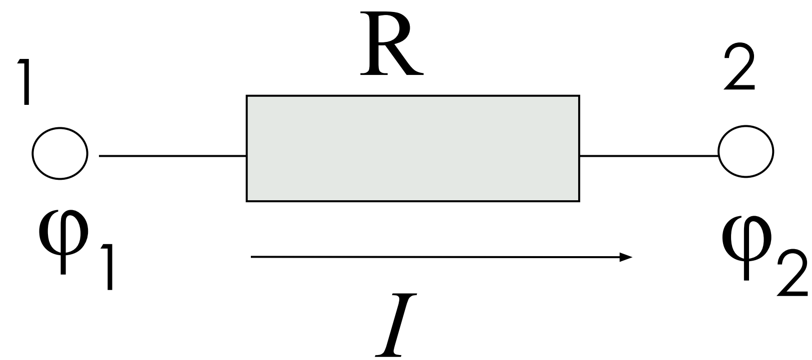
$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = \varepsilon_1$$

$$-I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 = -\varepsilon_2$$

РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА.
ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА



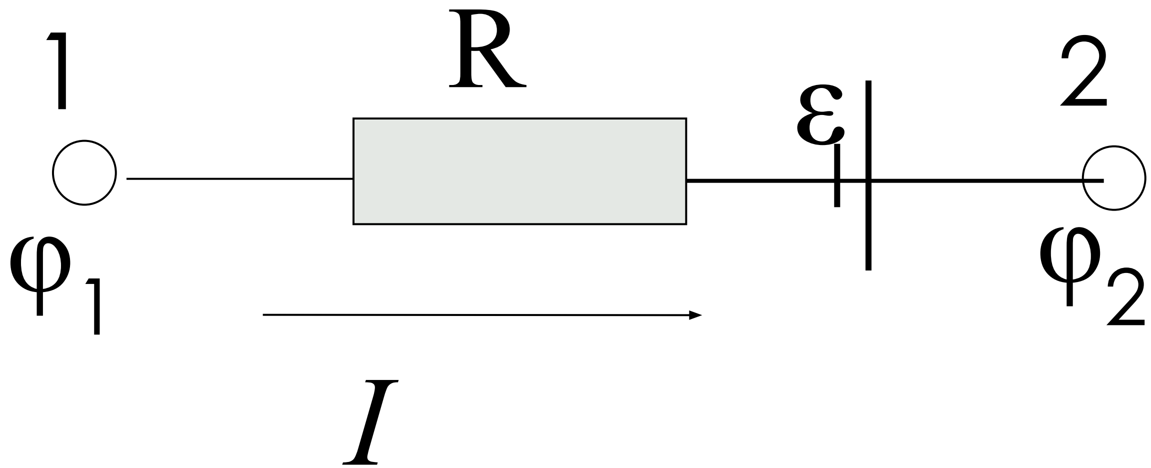
$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$q = I \cdot t$$

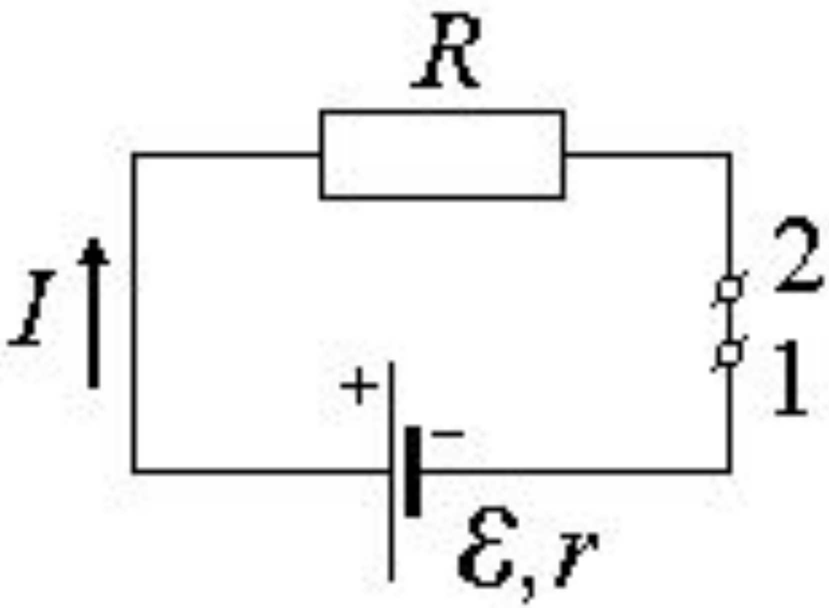
$$A = (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot q = U_{12} \cdot q = U_{12} \cdot I \cdot t$$

$$\boxed{A = I \cdot U_{12} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U_{12}^2}{R} t}$$

$$A = \left(U_{12} + \varepsilon\right) \cdot I \cdot t$$



$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$$



$$A = I \cdot \varepsilon \cdot t$$

$$A = I^2 \cdot R_{полн} \cdot t$$

МОЩНОСТЬ ТОКА: $P = \dfrac{A}{t}$

Для неоднородного участка цепи: $P = I \cdot U_{12} + \varepsilon \cdot I$

Для полной цепи: $P_{полн} = \varepsilon \cdot I$

Мощность, выделяемая во внешней цепи:

$$P_{внеш} = I \cdot U = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

$$dQ = dA = U \cdot I \cdot dt =$$

$$= I^2 \cdot R \cdot dt = \frac{U^2}{R} \cdot dt$$

ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ:

$$Q = \int_0^t I^2 \cdot R \cdot dt$$

ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

$$\boxed{\omega = \frac{E^2}{\rho} = \sigma \cdot E^2}$$