



ЛЕКЦИЯ №4.  
ЭЛЕКТРОСТАТИКА.  
ПОСТОЯННЫЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

# ЭЛЕКТРОСТАТИКА

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

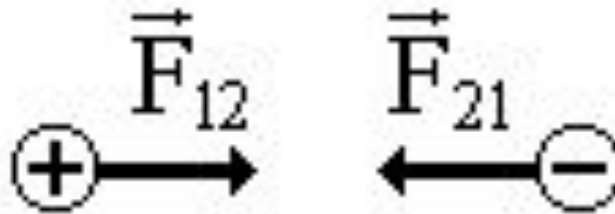
$$q = n^+ \cdot e^+ + n^- \cdot e^-$$

$q > 0$ , если  $n^+ > n^-$

$q < 0$ , если  $n^+ < n^-$

$q = 0$ , если  $n^+ = n^-$

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ



# ЗАКОН ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ (ЗАКОН КУЛОНА)

$$\vec{F} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{\epsilon r_{12}^3} \cdot \vec{r}_{12}$$

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

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2 \text{ – коэффициент пропорциональности}$$

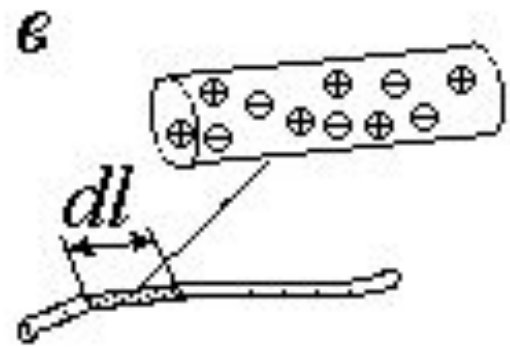
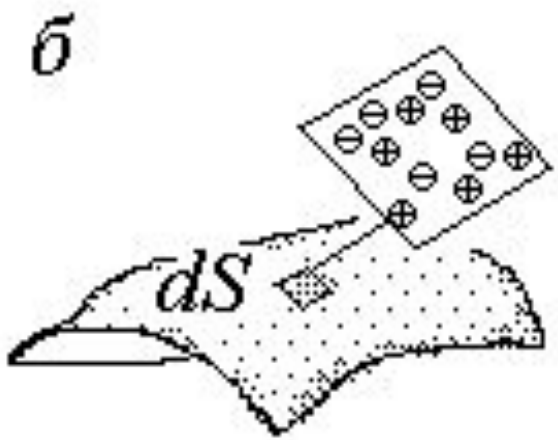
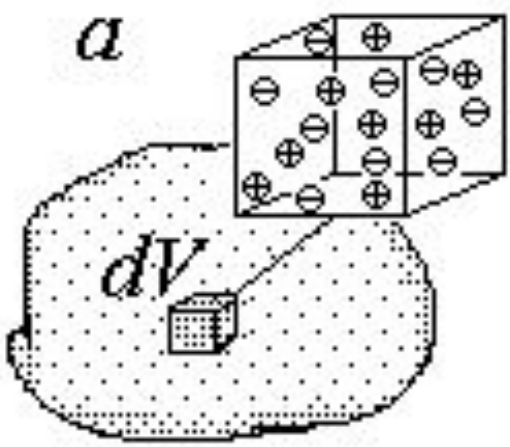
в законе Кулона

## ЗАКОН КУЛОНА В СКАЛЯРНОЙ ФОРМЕ

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

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

6



**а) Объемная плотность заряда:**

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

**Средняя объемная плотность заряда:**

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{q}{V}$$

$$\left[ \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3} \right]$$



б) Поверхностная плотность заряда:

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

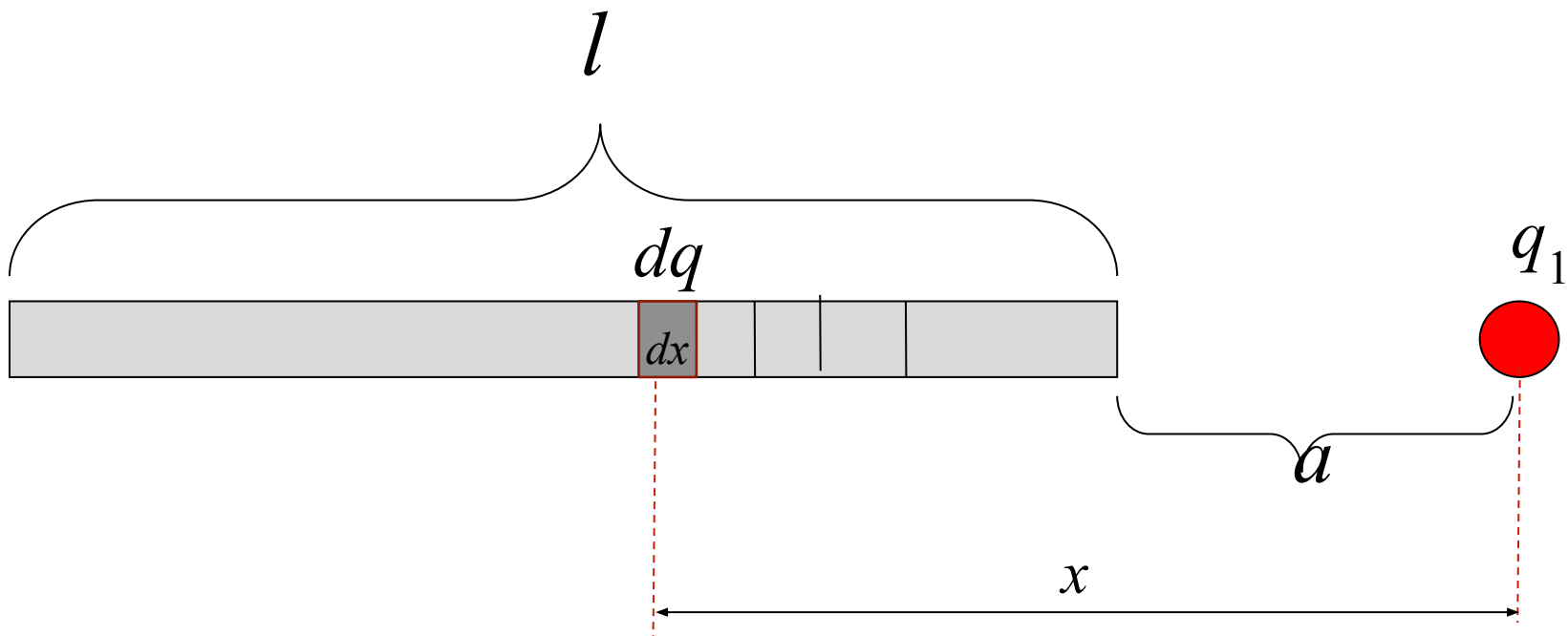
$$\sigma_{cp} = \frac{q}{S}$$

## в) линейная плотность заряда

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

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{q}{l}$$

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



Результирующая сила взаимодействия  
заряда  $q$  и проволоки :

$$\boxed{\otimes} F = \sum_{i=1}^n \boxed{\otimes} F_i$$

По закону Кулона:

13

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

ЛИНЕЙНАЯ ПЛОТНОСТЬ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА: <sup>14</sup>

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

$$dq = \tau \cdot dx$$

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

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

# 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

18



# НАПРЯЖЕННОСТЬ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \left( \frac{\vec{r}}{r} \right)$$

$$[1\text{В/м}] = [1\text{Кл}] / [1\text{м}^2].$$

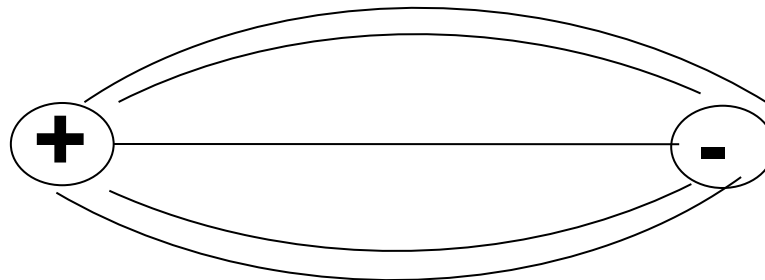
НАПРЯЖЕННОСТЬ  
ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА  
В СКАЛЯРНОЙ ФОРМЕ

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

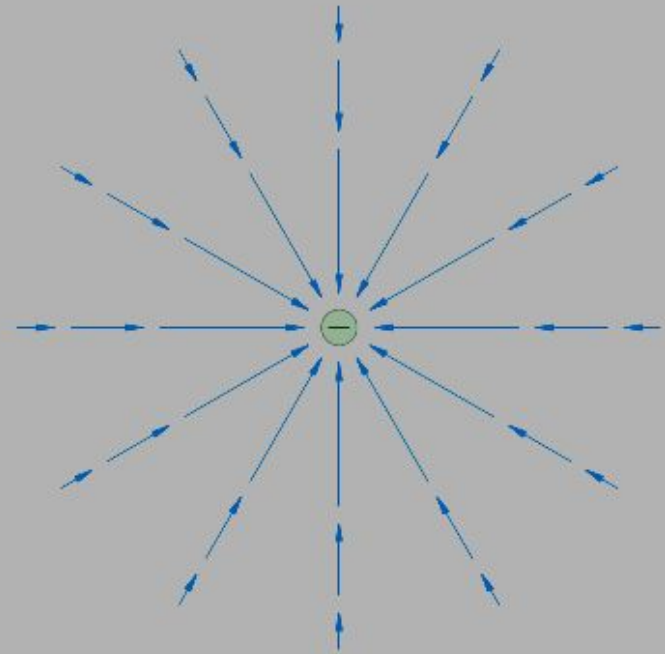
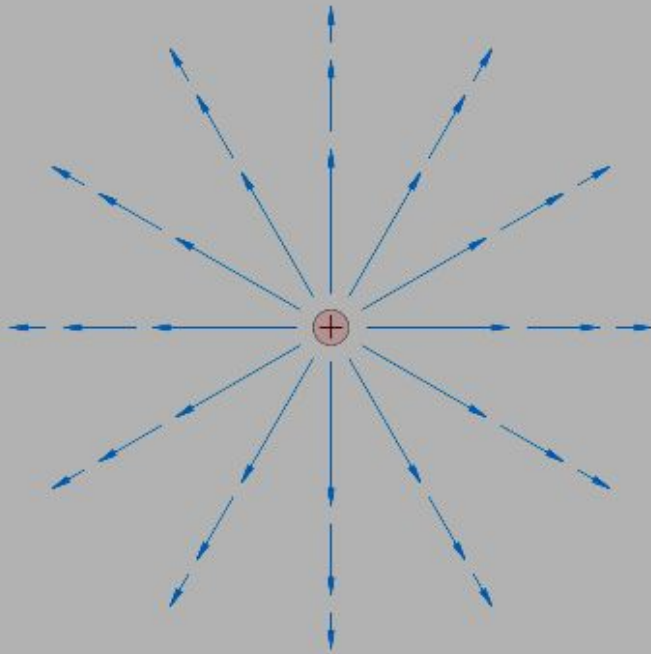
# ГРАФИЧЕСКОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ:

**Источник  
электростатического поля**

**Сток  
электростатического  
поля**



# ГРАФИЧЕСКОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ:



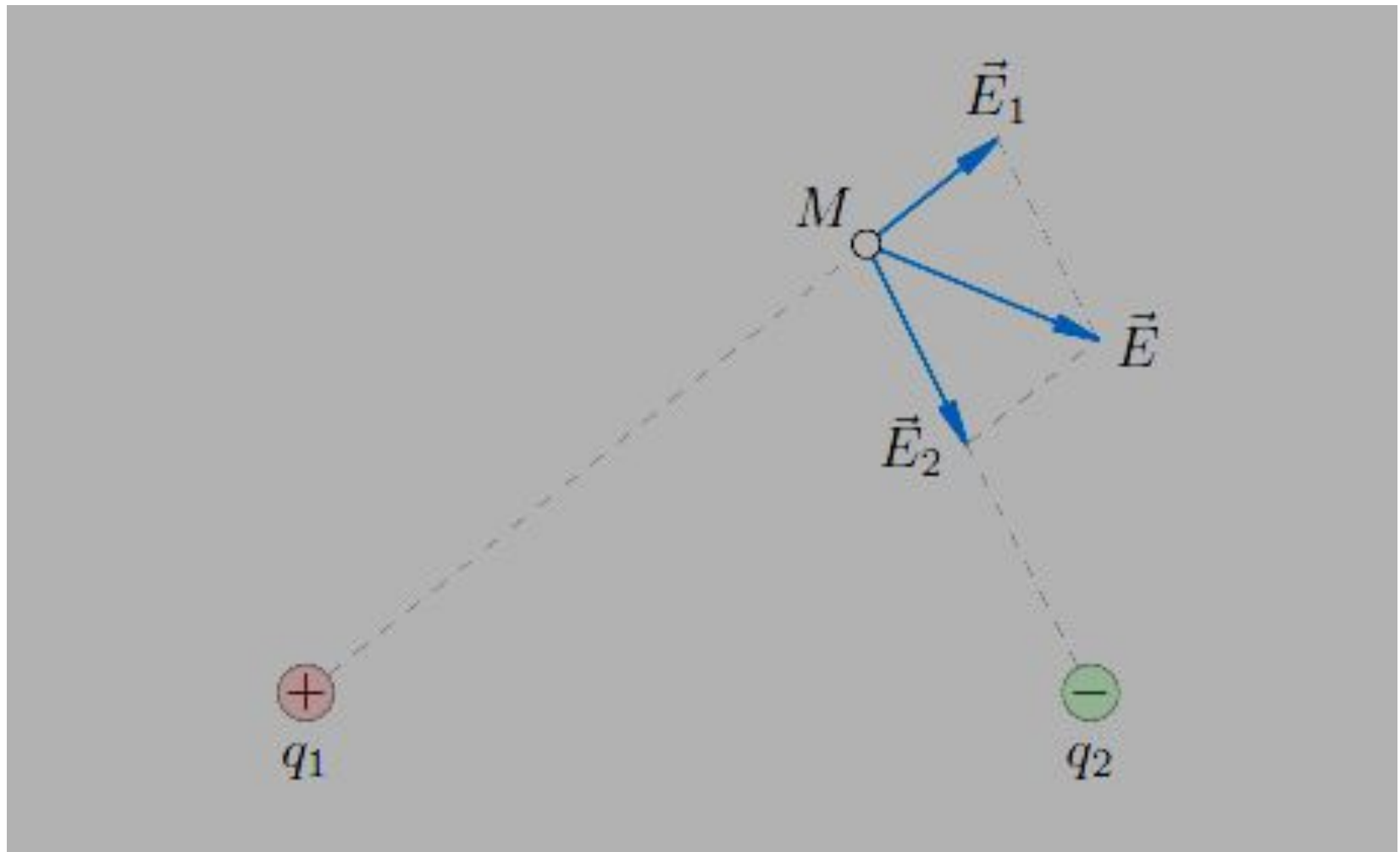
# Принцип суперпозиции электростатических полей:

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

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

# РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ СИСТЕМЫ ТОЧЕЧНЫХ ЗАРЯДОВ МЕТОДОМ СУПЕРПОЗИЦИИ

24





$$\mathbb{W} \quad \mathbb{W} \quad \mathbb{W}$$
$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$$

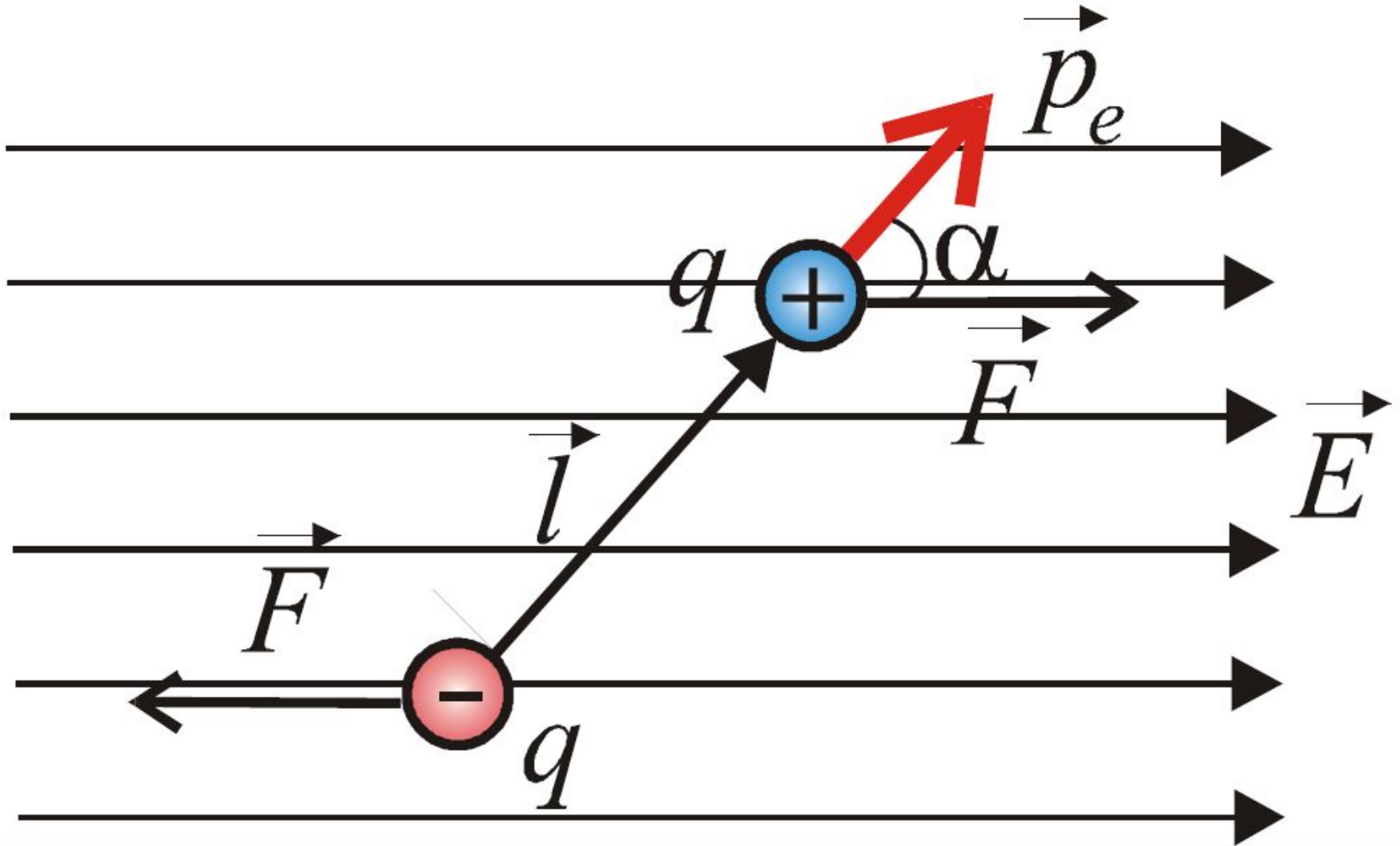
---

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

$$E_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1^2}$$

$$E_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2^2}$$

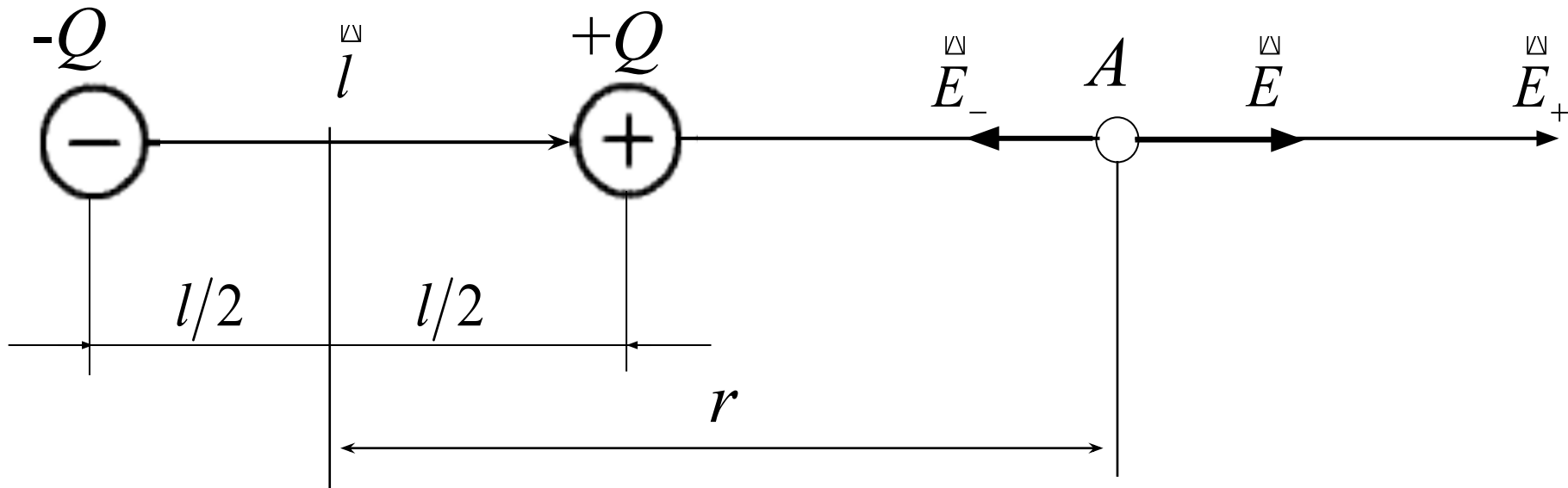
# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ



# ДИПОЛЬНЫЙ МОМЕНТ

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

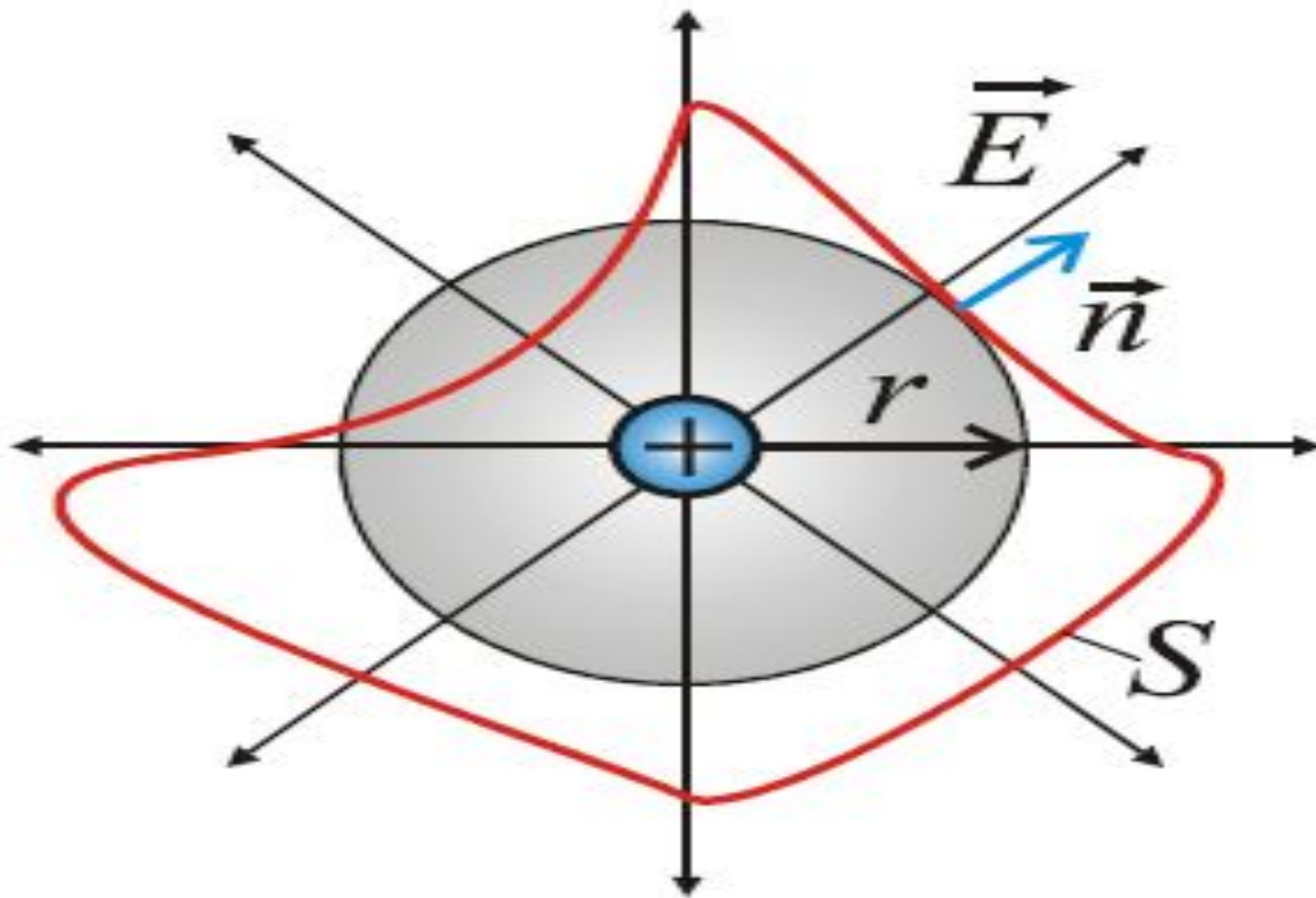
## НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ТОЧКЕ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ОСИ ДИПОЛЯ



$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}$$

# ТЕОРЕМА ГАУССА

29



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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}\Phi_E &= \oint_S \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dS = \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0}\end{aligned}$$



## ТЕОРЕМА ГАУССА:

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S \left( \sum_{i=1}^N \vec{E}_i \right) \cdot d\vec{S} = \sum_{i=1}^N \left( \oint_S \vec{E}_i \cdot d\vec{S} \right) = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N Q_i .$$

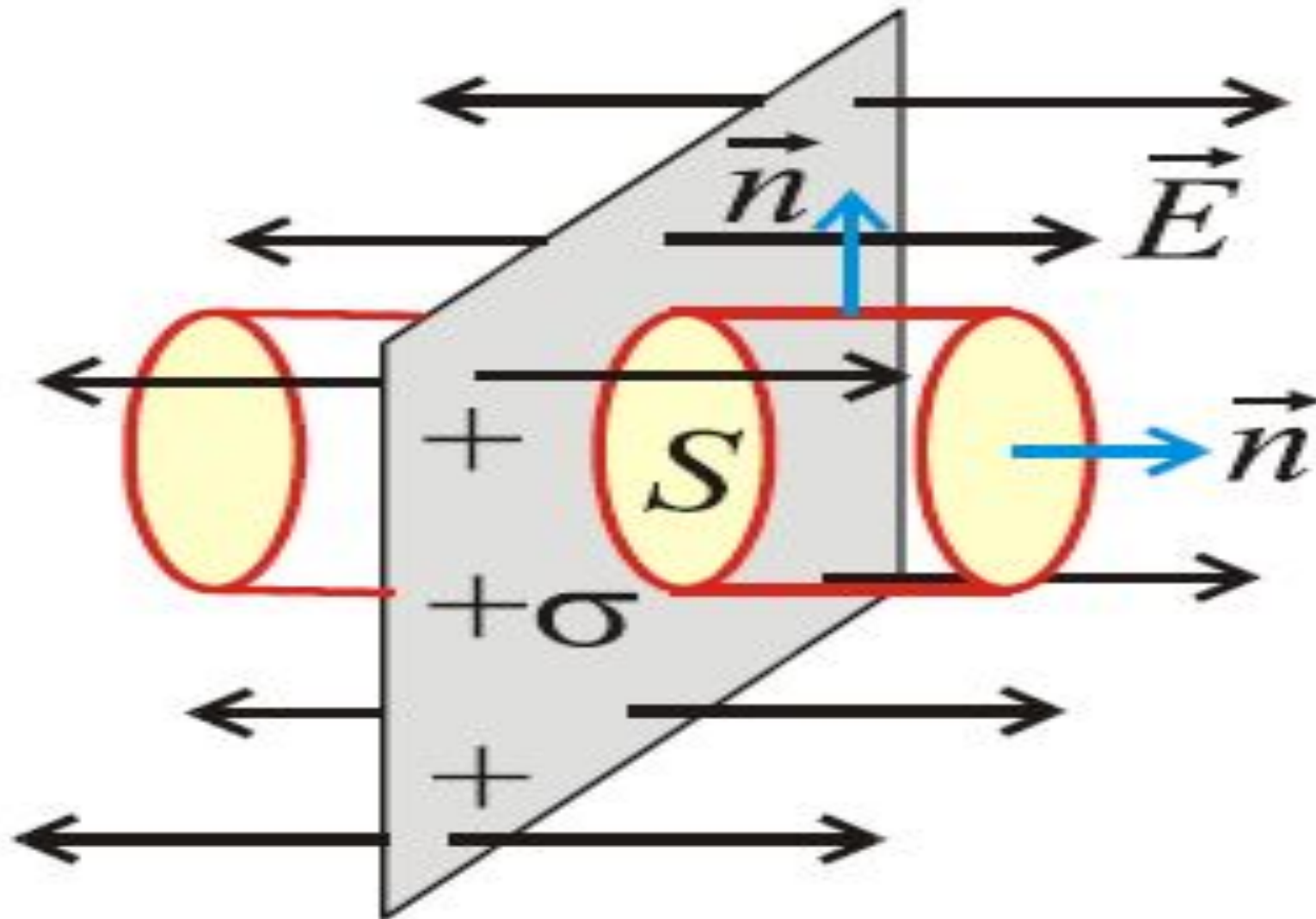
*Поток вектора напряженности электрического поля в вакууме сквозь замкнутую поверхность произвольной формы равен отношению алгебраической суммы зарядов, находящейся внутри этой поверхности, к электрической постоянной.*

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

$$\oint_S E_n \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \int_V \rho \cdot dV .$$

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
БЕСКОНЕЧНОЙ РАВНОМЕРНО  
ЗАРЯЖЕННОЙ ПЛОСКОСТИ ПРИ ПОМОЩИ  
ТЕОРЕМЫ ГАУССА

35



- Представим себе равномерно заряженную бесконечную плоскость с постоянной поверхностной плотностью заряда  $\sigma$  (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 :

$$\Phi_E = \Phi_{\text{бок}} + 2\Phi_{\text{осн}}$$

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:

$$\Phi_E = 2\Phi_{\text{осн}} = 2E \cdot S$$

По теореме Гаусса:

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

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

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

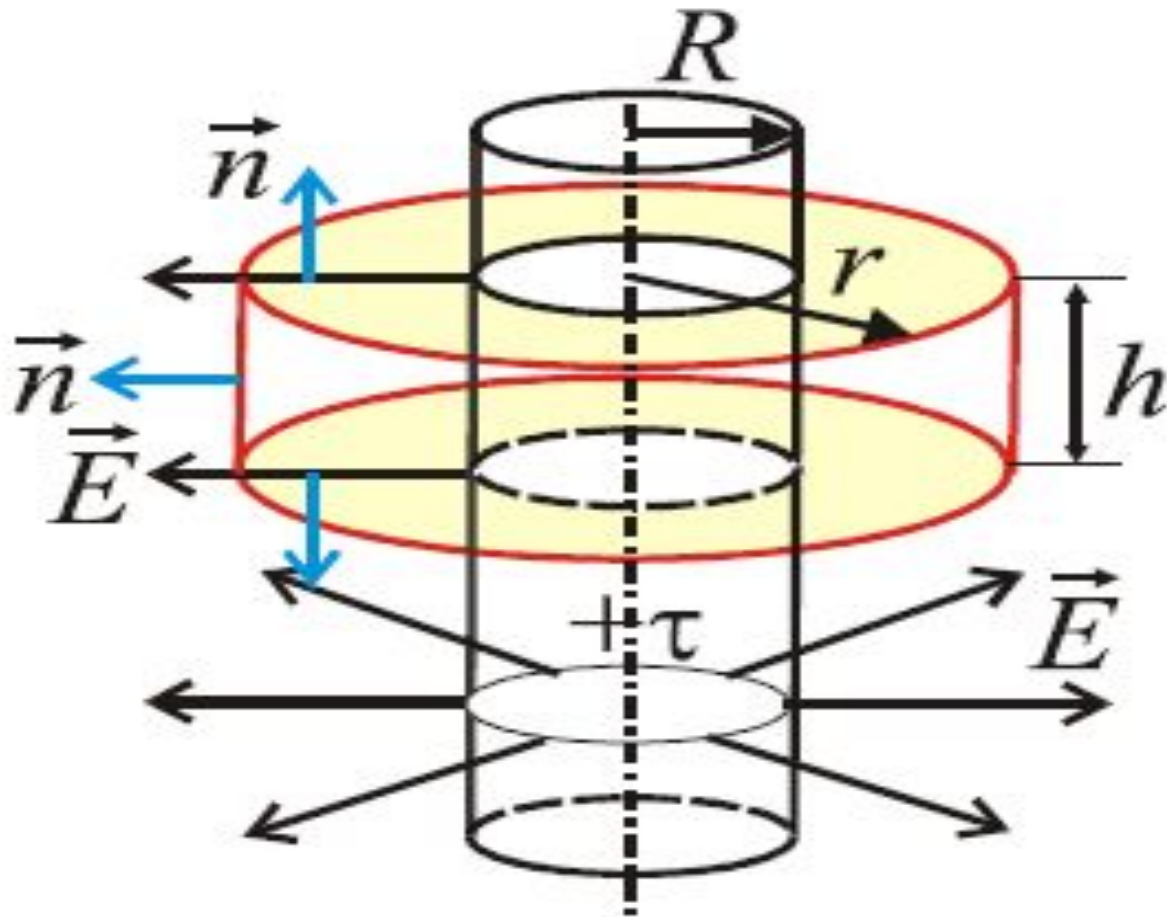
**НАПРЯЖЕННОСТЬ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
БЕСКОНЕЧНОЙ РАВНОМЕРНО  
ЗАРЯЖЕННОЙ ПЛОСКОСТИ:**

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



# ПОЛЕ РАВНОМЕРНО ЗАРЯЖЕННОГО БЕСКОНЕЧНОГО ЦИЛИНДРА (НИТИ)

41



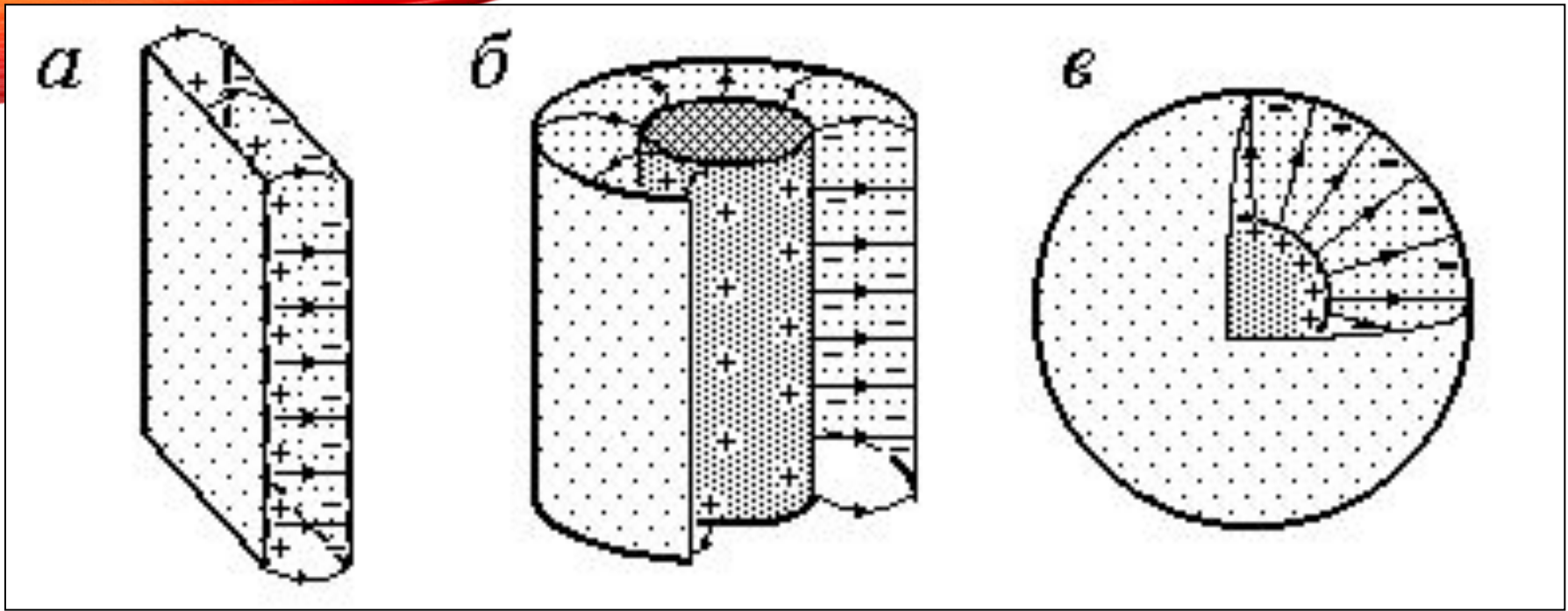
$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}$$

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

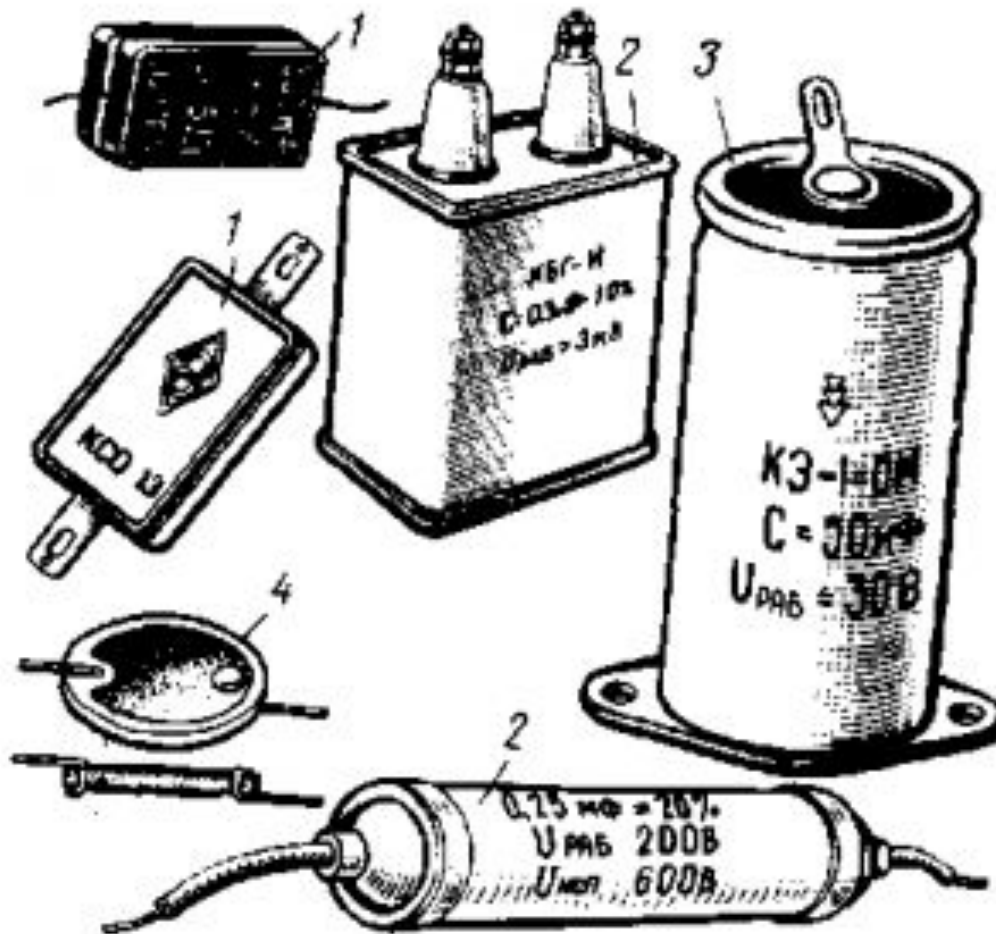
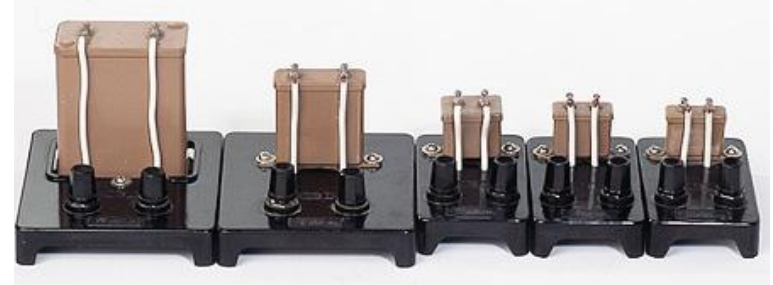


Рис. Общие виды применяемых конденсаторов: 1 — слюдяные; 2 — бумажные; 3 — электролитический; 4 — керамический



**Конденсатор переменной емк**



**Конденсатор постоянной емкости**

# ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

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

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

# ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$$



ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ СФЕРИЧЕСКОГО  
КОНДЕНСАТОРА:

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 rR}{R - r}$$

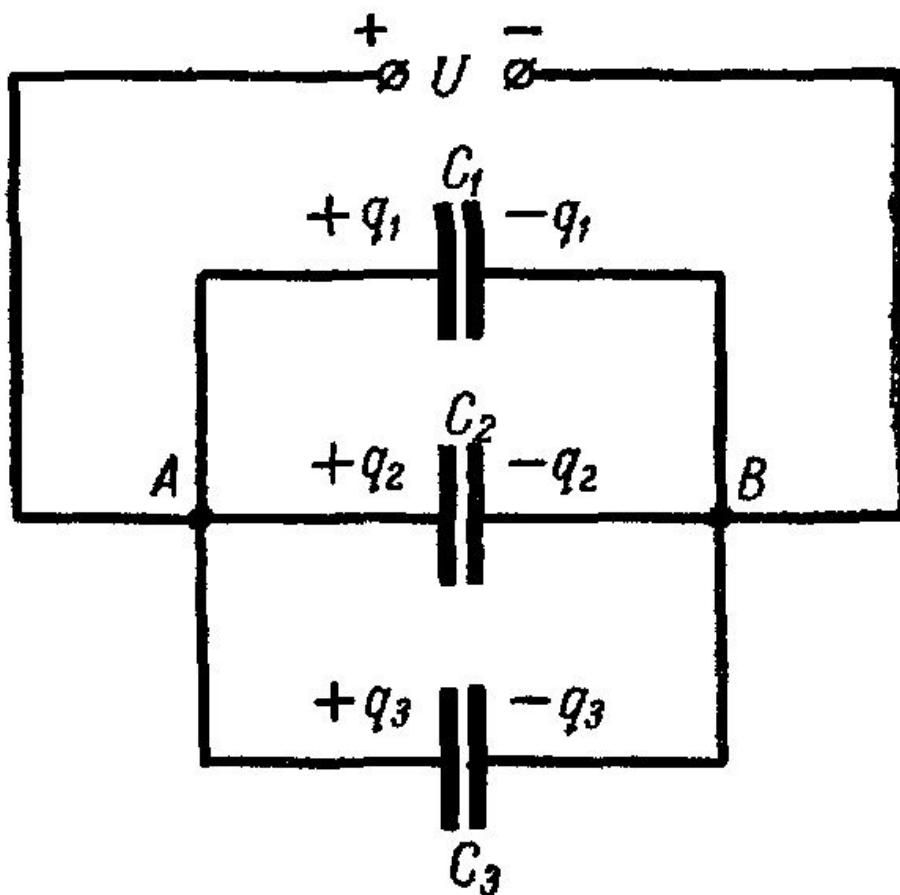
ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО  
КОНДЕНСАТОРА:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$



# ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

# ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ



$$U = \text{const}$$

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

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

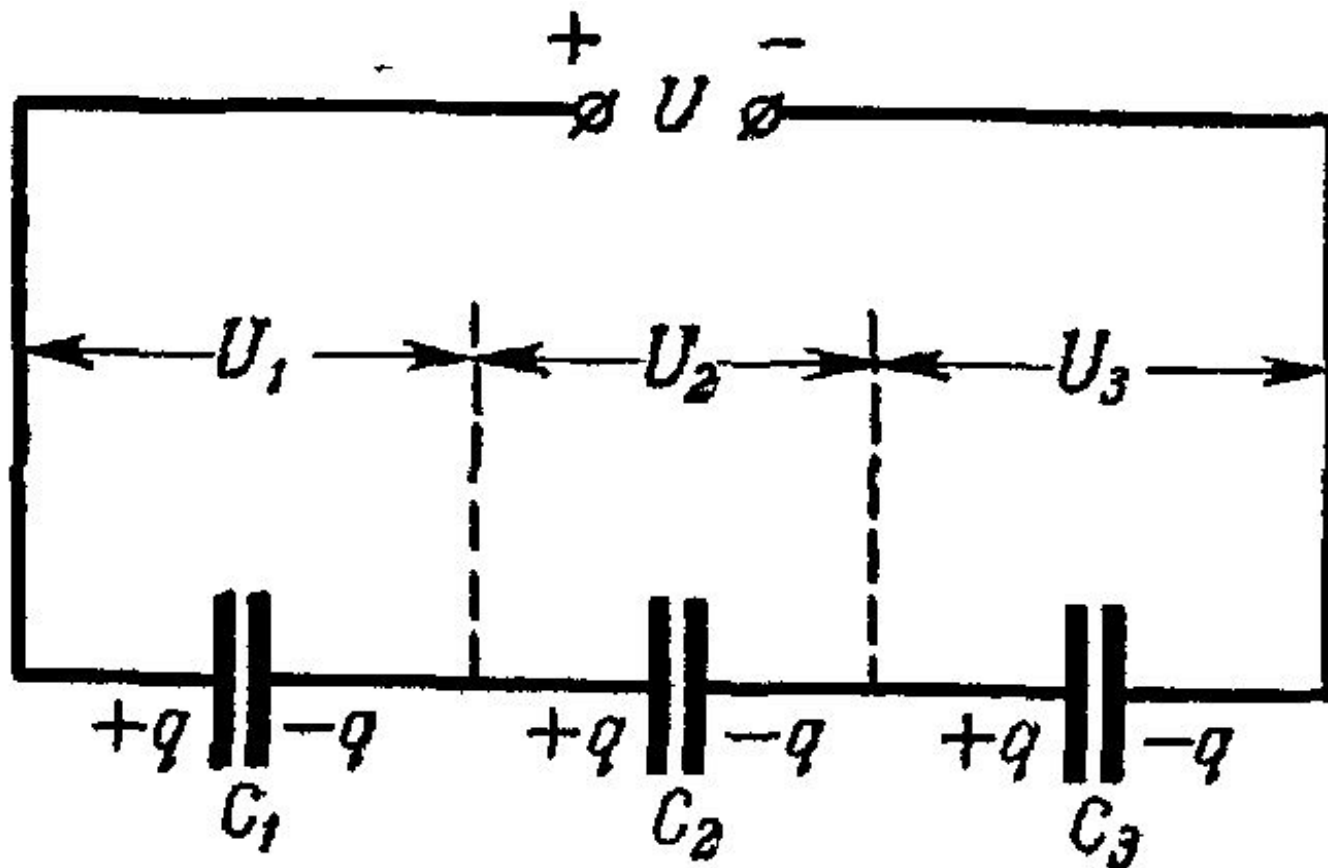
$$q = (C_1 + C_2 + \dots + C_n) \cdot U$$


$$C_{\sigma} = \frac{q}{U} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

# ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

$$C_{\text{б}} = \sum_{i=1}^n C_i$$

# ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ





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

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

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





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

$$\frac{1}{C_{\delta}} = \frac{U}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ СИСТЕМЫ  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ  
КОНДЕНСАТОРОВ

$$\frac{1}{C_{\text{б}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$


$$C_6 < C_i$$

## ЭНЕРГИЯ УЕДИНЕННОГО ПРОВОДНИКА И КОНДЕНСАТОРА

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

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

## ОБЪЕМНАЯ ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

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



**ТИПЫ ДИЭЛЕКТРИКОВ.  
ПОЛЯРИЗАЦИЯ  
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

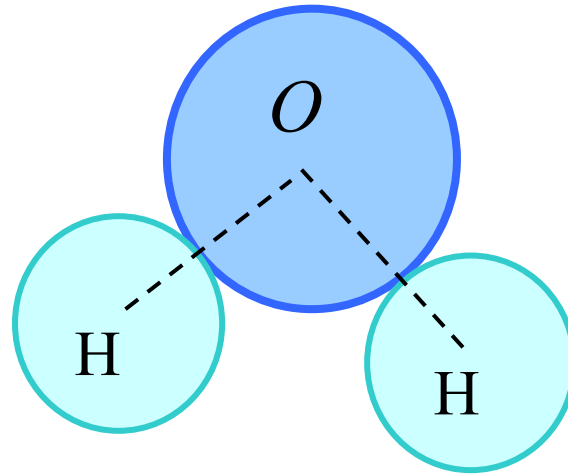
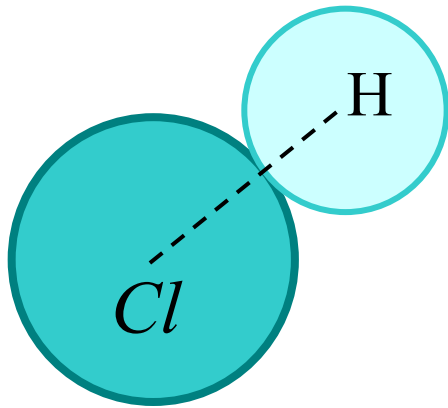
# ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Полярные

Неполярные

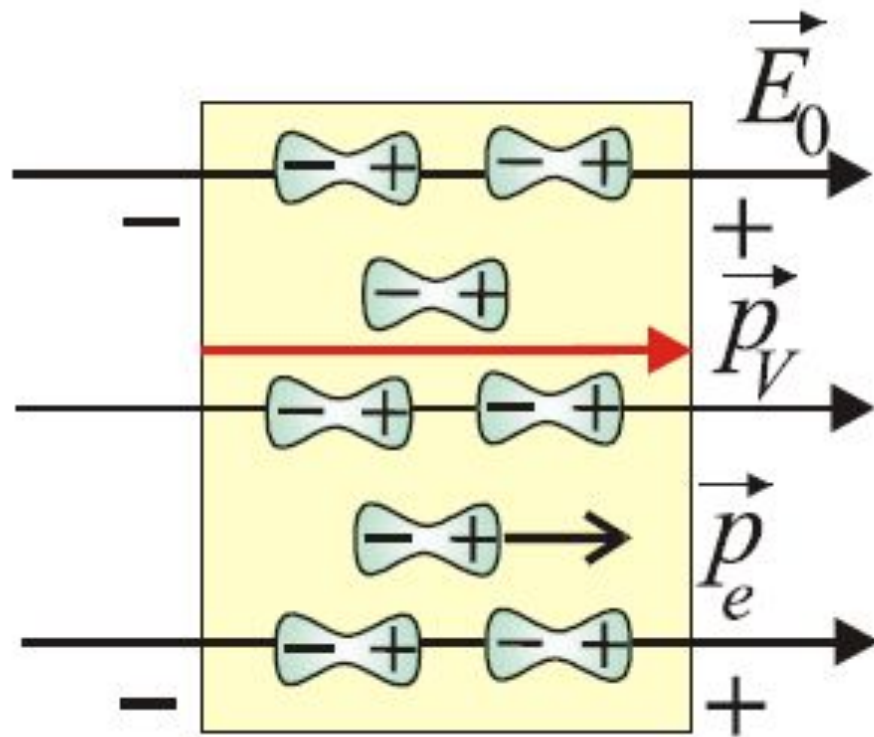
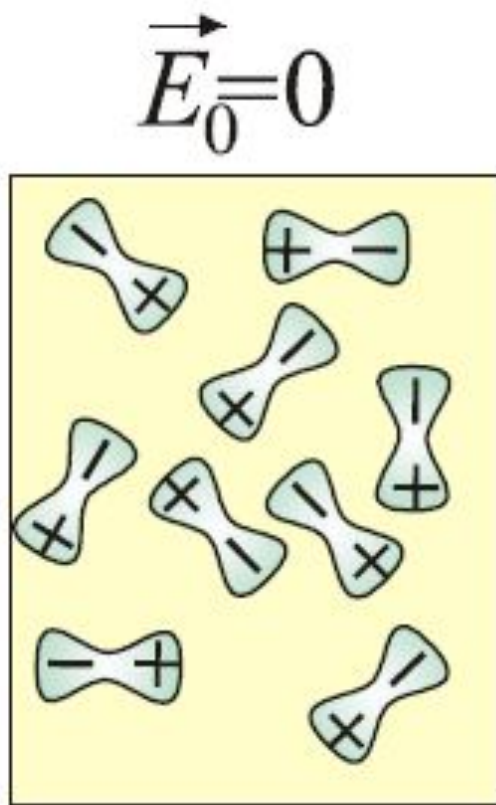
Ионные

# ПОЛЯРНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

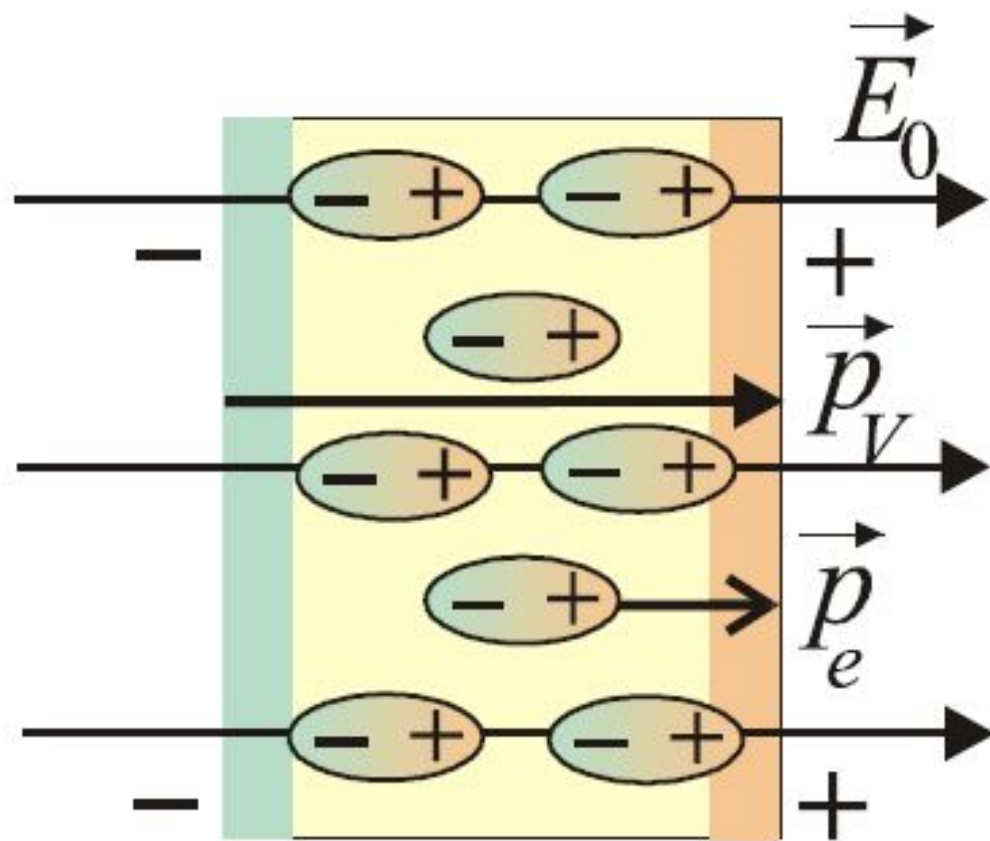
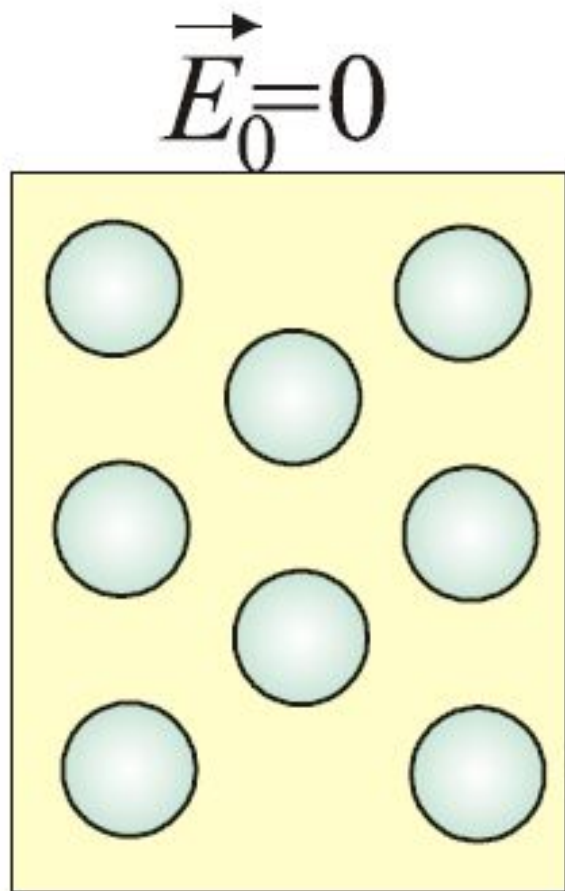




# ОРИЕНТАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПОЛЯРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА



# ДЕФОРМАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ НЕПОЛЯРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА



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

# УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТОКА В ЦЕПИ:

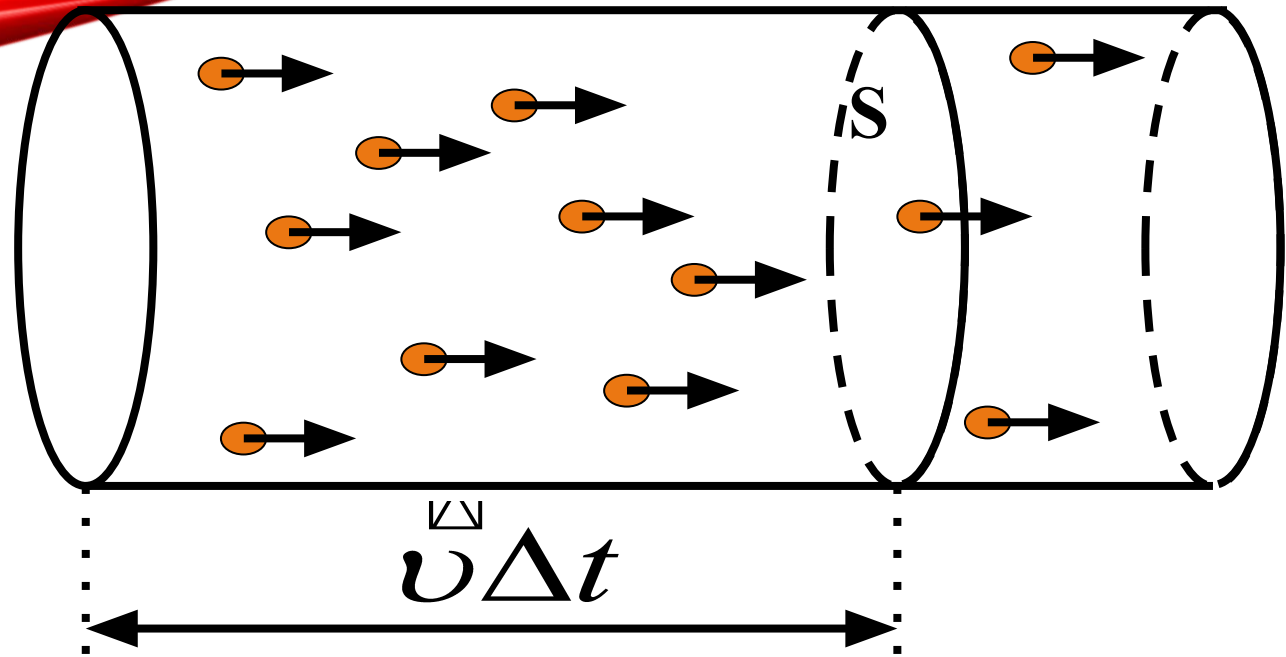
- наличие свободных носителей тока (свободного заряда);
- наличие электрической силы, вынуждающей их упорядоченно двигаться.

# ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

**Сила тока**

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

$$\left[ 1A = \frac{1Кл}{1с} \right]$$



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

$$\Delta q = q_0 N$$

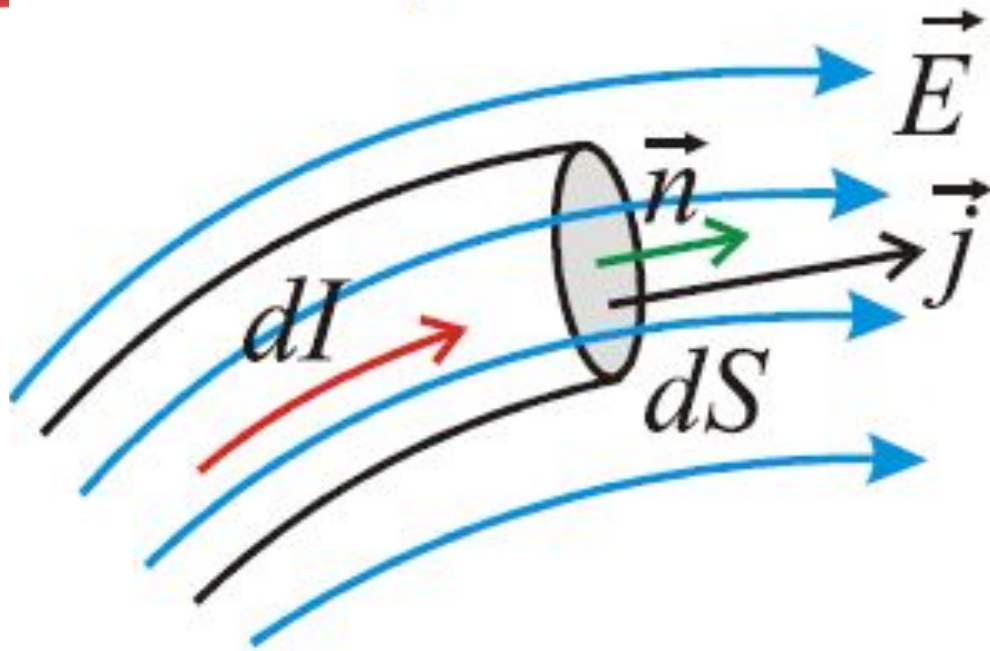
$$N = nV$$

$$V = Sv\Delta t$$

$$I = q_0 n S v$$

# ПЛОТНОСТЬ ТОКА

71



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

$$[j] = [A / m^2]$$

$$I = \int_S (j dS)$$

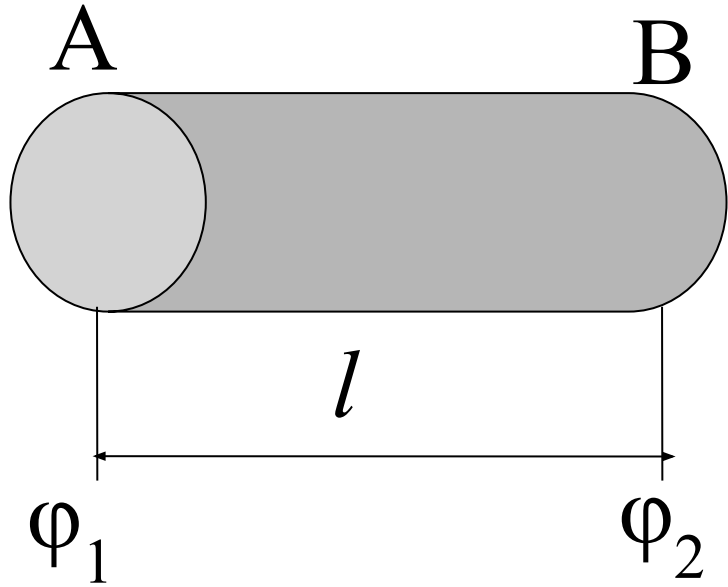
# ПОСТОЯННЫЙ ТОК

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



# **ЗАКОН ОМА ДЛЯ ОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ**

# НАПРЯЖЕНИЕ<sup>74</sup>



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

$$\left[ B = \frac{Джс}{Кл} \right]$$

$$I \sim U$$

## ЗАКОН ОМА В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ (ДЛЯ ОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ)

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

# СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА

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

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

# УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

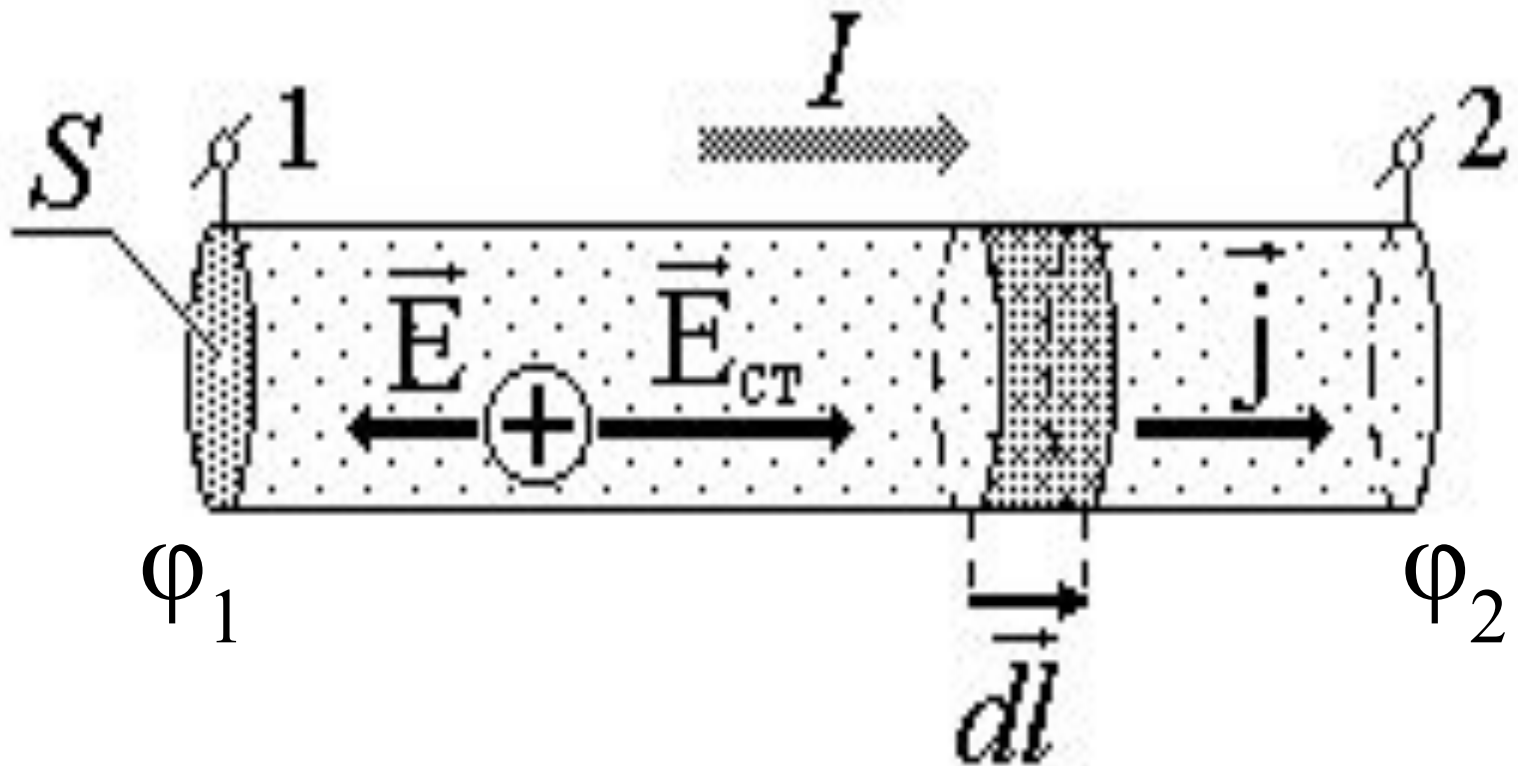
$$[\rho] = [\text{Ом} \cdot \text{м}]$$

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

# ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

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

# ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ЭДС)



## РАБОТА СТОРОННИХ СИЛ

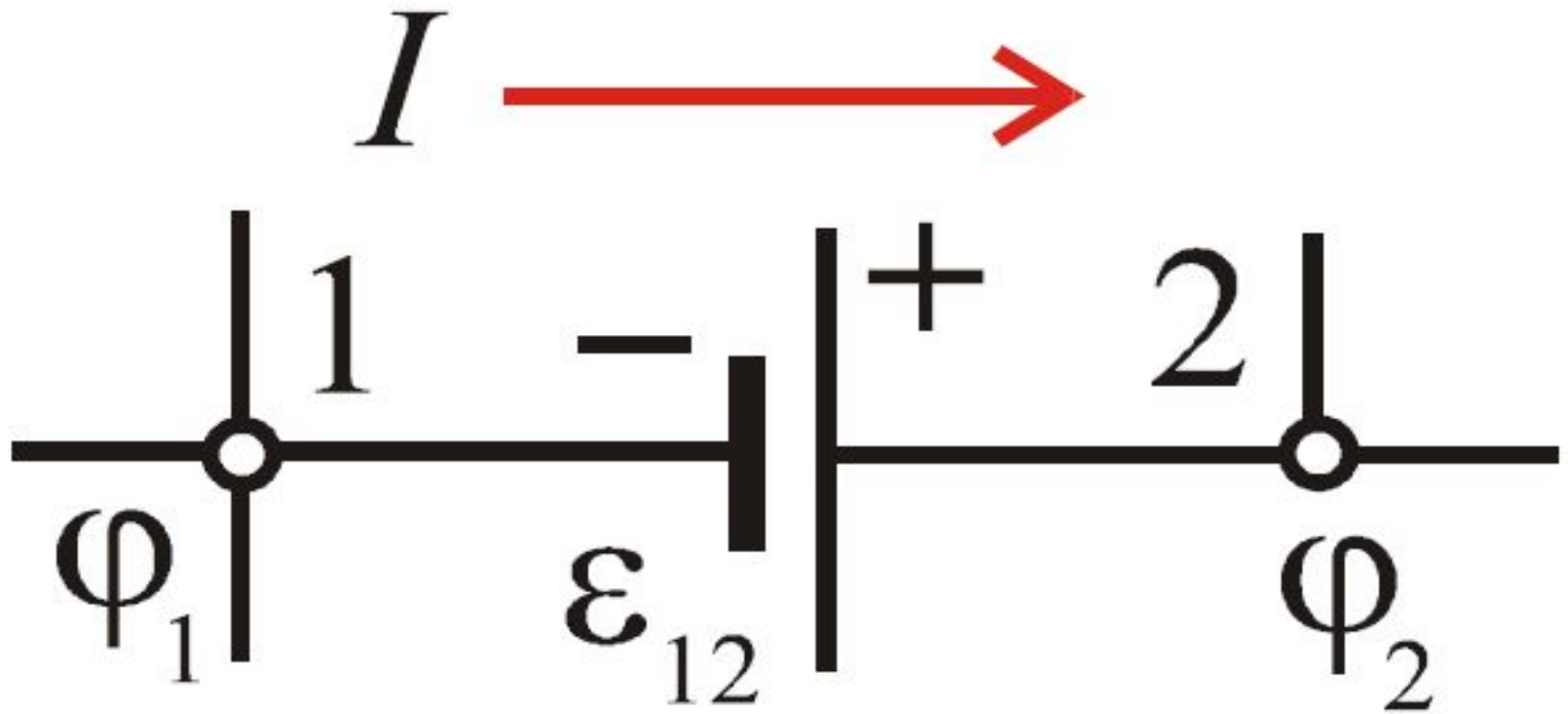
$$A_{\text{стор}} = \int_l^2 \vec{F}_{\text{стор}} \cdot d\vec{l} = q_+ \int_l^2 \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l}$$



## ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (ЭДС):

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q} = \oint_l \vec{E}_{\text{стор}} dl$$

# НЕОДНОРОДНЫЙ УЧАСТОК ЦЕПИ



$$\begin{aligned}
A_{12} &= q \int_1^2 \vec{E}_{\text{эл}} dl + q \int_1^2 \vec{E}_{\text{см}} dl = \\
&= q(\varphi_1 - \varphi_2) + q \cdot \varepsilon_{12} = \\
&= q \cdot (-\Delta\varphi + \varepsilon_{12})
\end{aligned}$$

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 \boxed{\times} \boxed{\times} E_{cm} dl$$

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

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

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

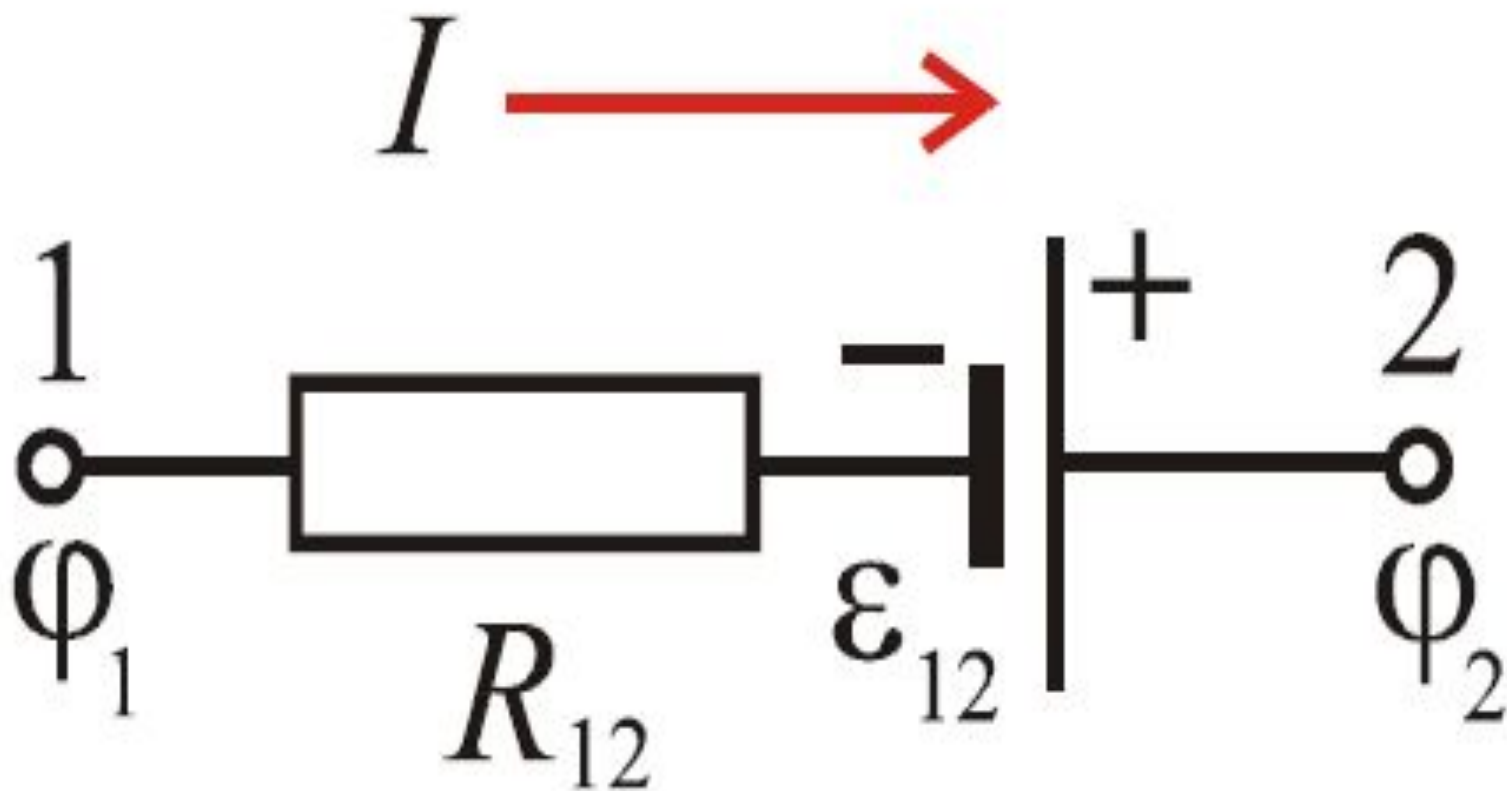
2) при  $\varepsilon \neq 0$ ,  $\varepsilon = U$ .

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

ЗАКОН ОМА В  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ  
ДЛЯ ОДНОРОДНОГО УЧАСТКА  
ЦЕПИ:

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

# ЗАКОН ОМА ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ЦЕПИ

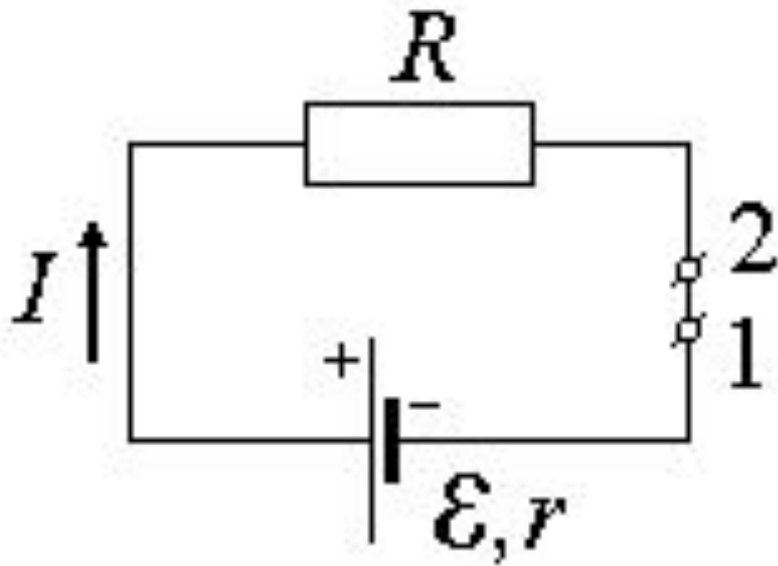




$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$$

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

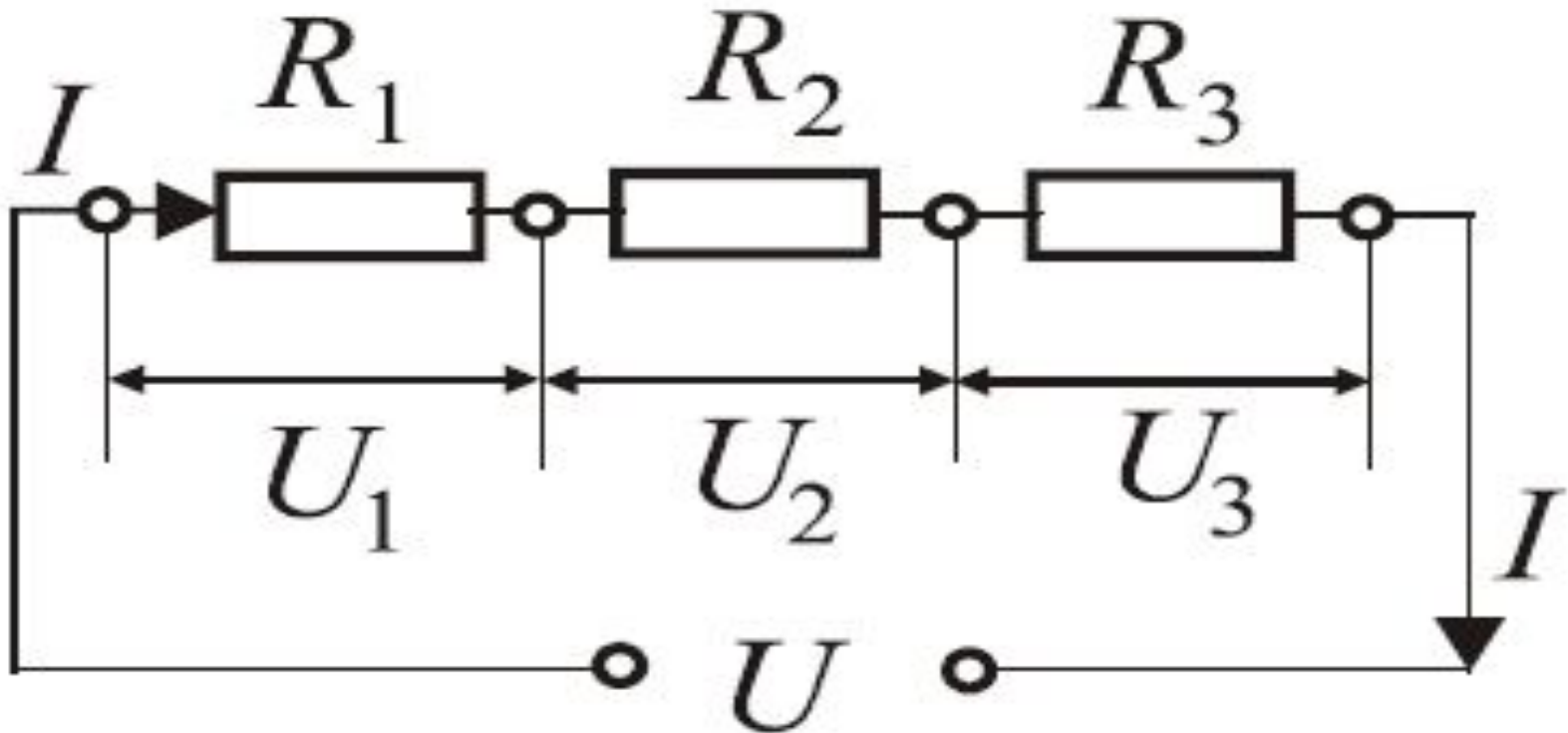
# ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ <sup>90</sup>



$$I = \frac{\mathcal{E}}{r + R}$$

# **ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ**

# ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ



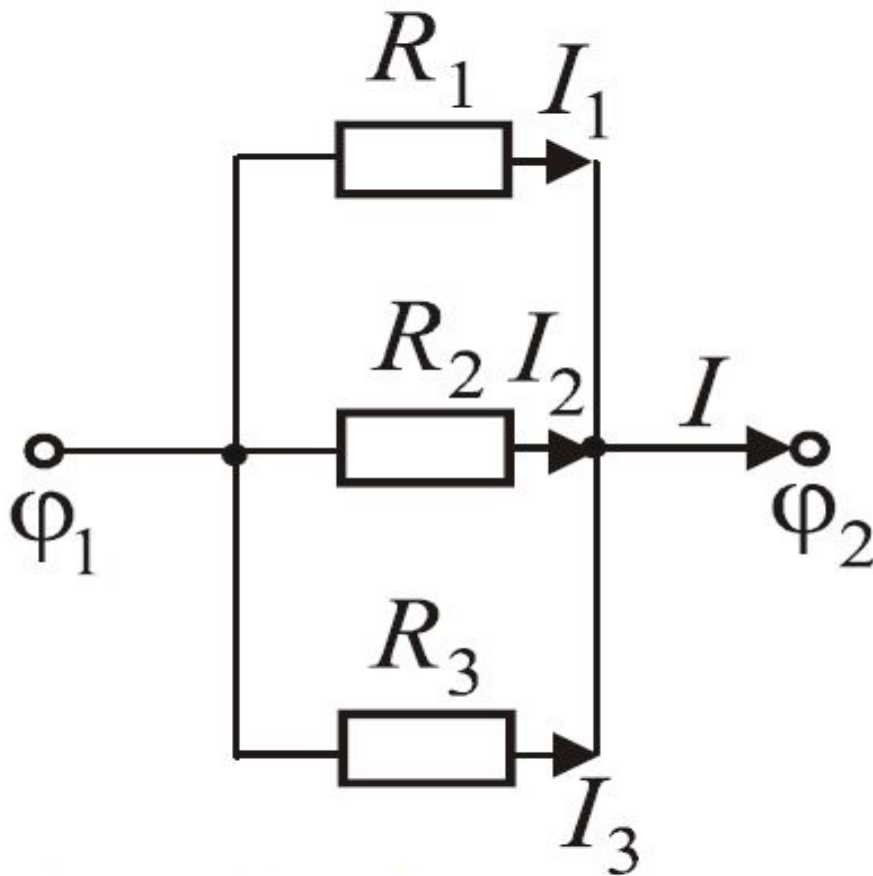
$$I = \frac{q}{t} = \text{const}, \quad U = \sum_{i=1}^n U_i$$

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

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

# ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

94



$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \text{const}$$

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

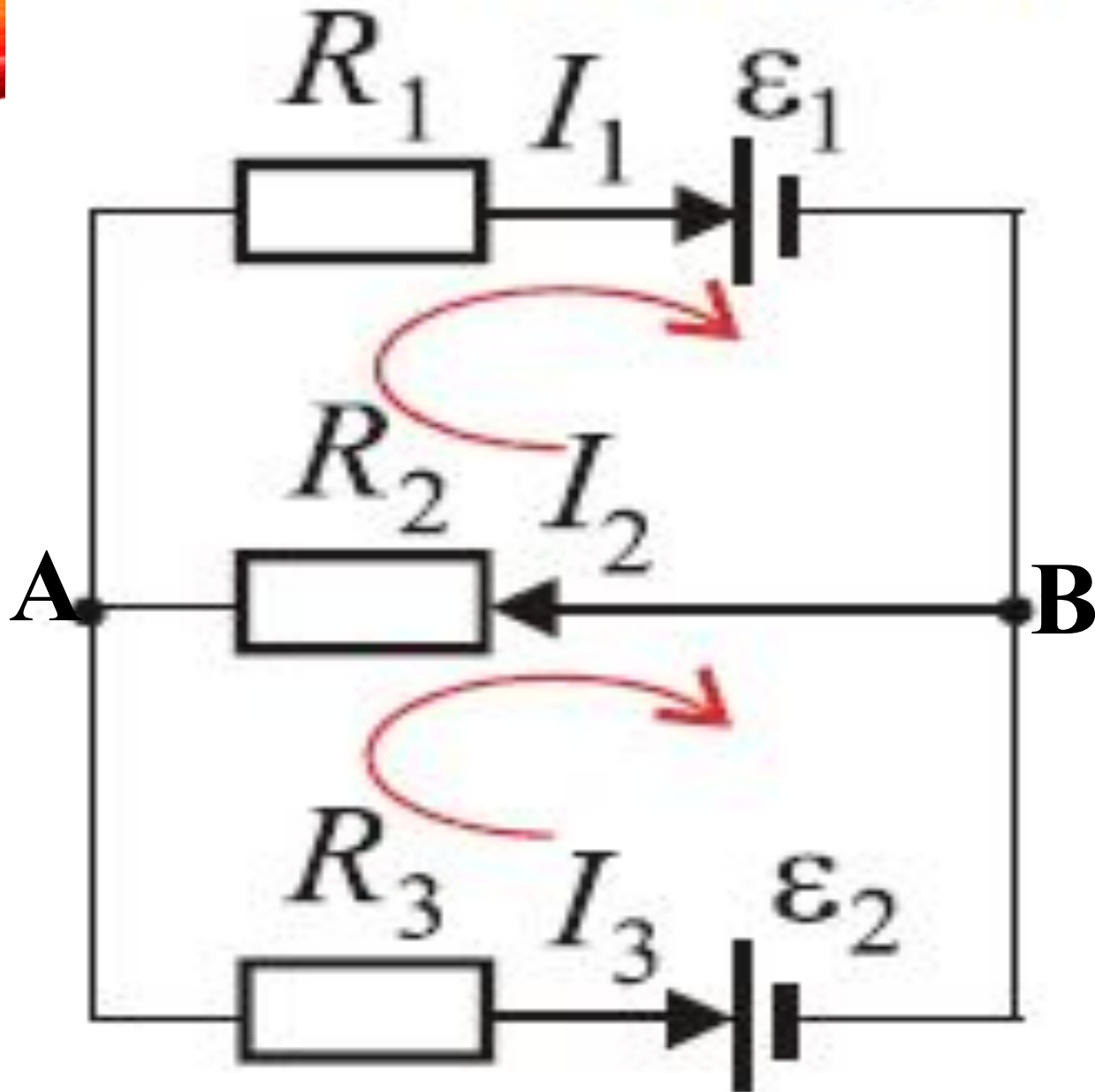
$$\frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{\sum_{k=1}^n I_k}{U}$$

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

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

**ПРАВИЛА КИРХГОФА.  
ПРИМЕР РАСЧЕТА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.**





# ПЕРВОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА

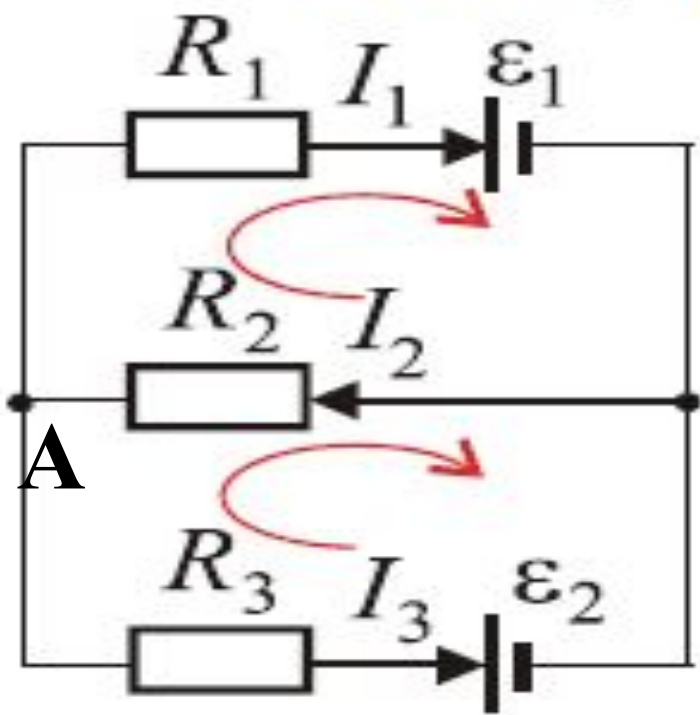
$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

# ВТОРОЕ ПРАВИЛО КИРХГОФА

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m \mathcal{E}_k$$

# 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:*

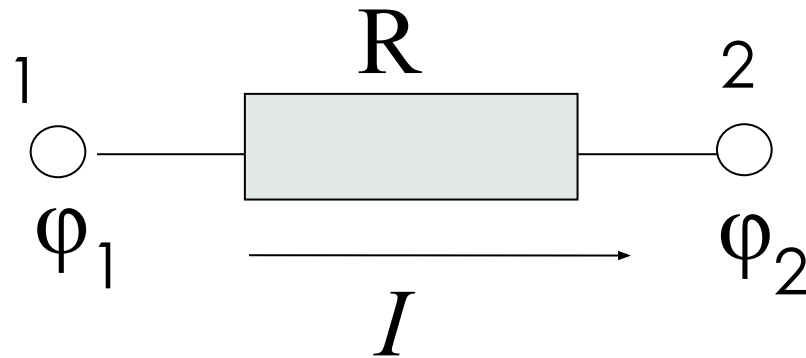
$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

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

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

**РАБОТА И МОЩНОСТЬ  
ТОКА.  
ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА**

# РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА



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

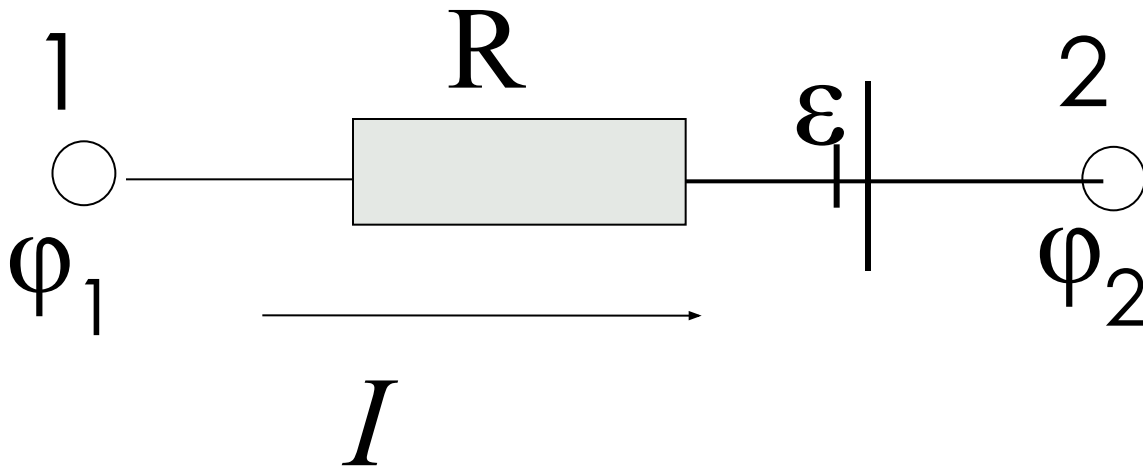
$$q = I \cdot t$$

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

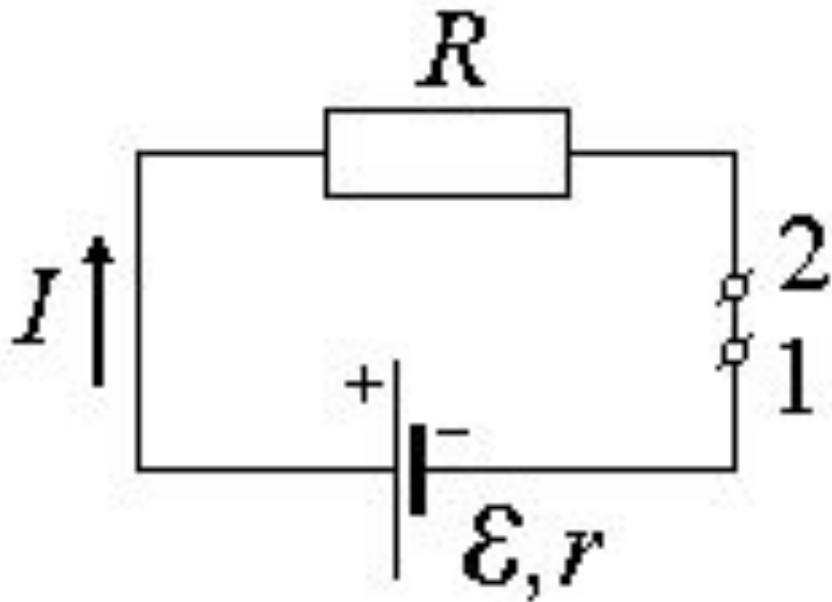
$$A = I \cdot U_{12} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U_{12}^2}{R} t$$



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



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



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

$$A = I^2 \cdot R_{\text{полн}} \cdot t$$

МОЩНОСТЬ ТОКА:

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

Для неоднородного участка цепи:

$$P = I \cdot U_{12} + \varepsilon \cdot I$$

Для полной цепи:

$$P_{\text{полн}} = \varepsilon \cdot I$$

Мощность, выделяемая во внешней цепи:

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

# ЗАКОН ДЖОУЛЯ- ЛЕНЦА

$$\begin{aligned}dQ &= dA = U \cdot I \cdot dt = \\ &= I^2 \cdot R \cdot dt = \frac{U^2}{R} \cdot dt\end{aligned}$$

# ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ:

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

# ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ <sup>110</sup>

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