

**Классическая теория  
электропроводности.**

**Законы постоянного тока**

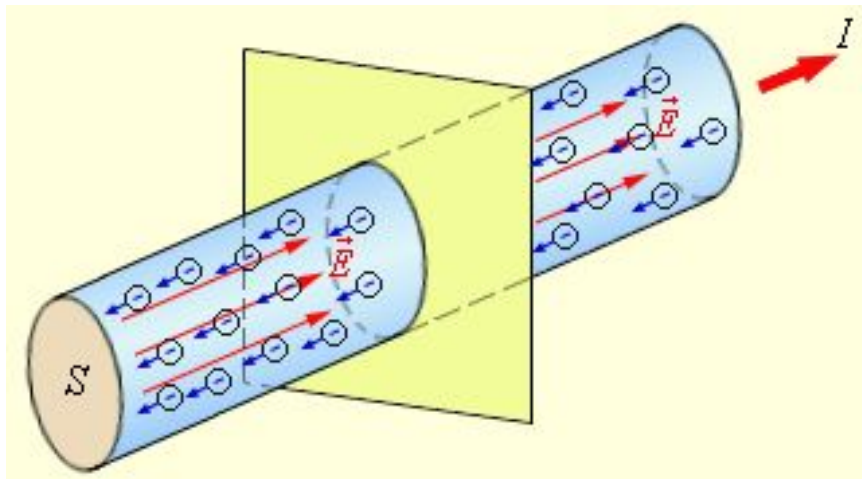
**А. А. Детлаф, Б. М. Яворский,**

**18.1 – 18.3; 19.1 – 19.3**

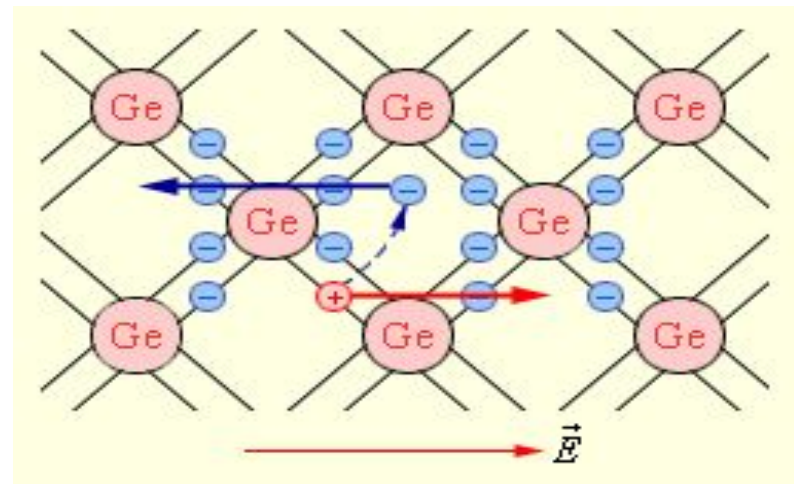
**Н.П.Калашников, Н.М. Кожевников.**

**Интернет-тестирование базовых  
знаний, 3 ДЕ, задания 11, 13, 15.**

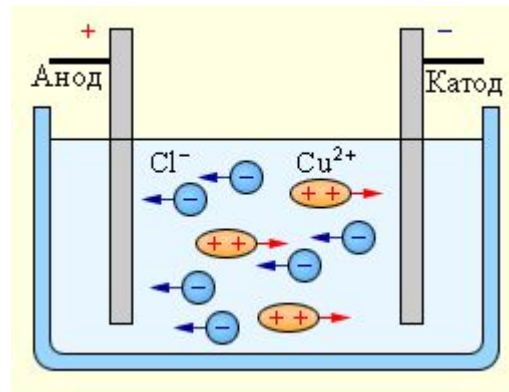
# Носители тока:



**свободные электроны в металлах,**



**электроны и дырки в полупроводниках,**



**ионы в электролитах.**

# Ток проводимости

-упорядоченное движение  
заряженных частиц:

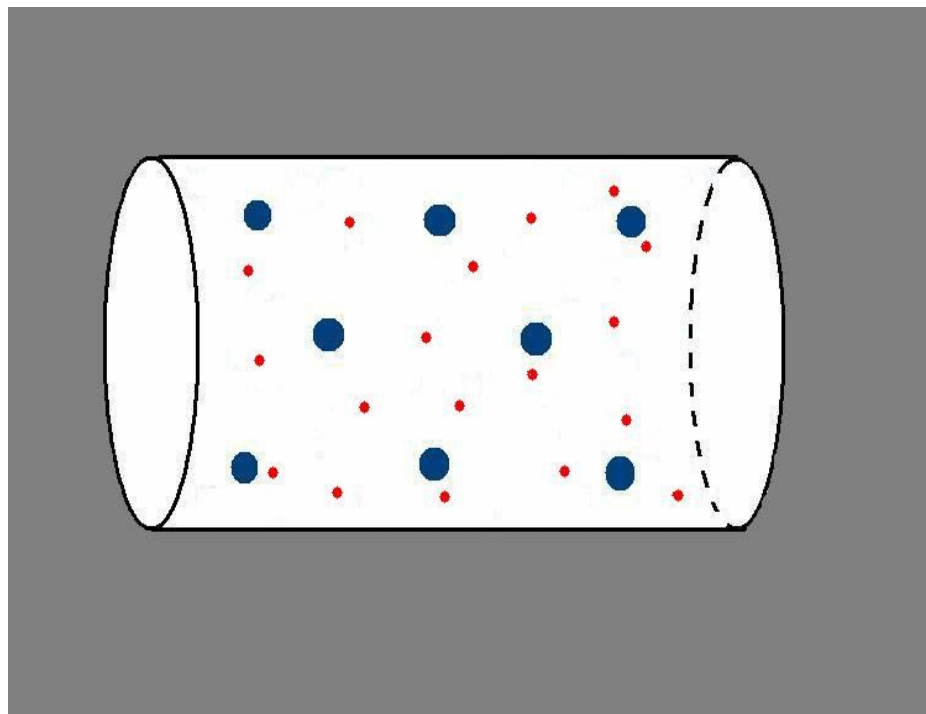
электронов, ионов (вакуум, ионизованные газы, плазма); электронов проводимости (металлы); электронов проводимости и дырок (полупроводники), ионов (электролиты).

**Конвекционный электрический ток обусловлен движением заряженных макротел.**

**Ток проводимости возникает под действием электрического поля.**

**Направление электрического тока – направление движения положительных зарядов.**

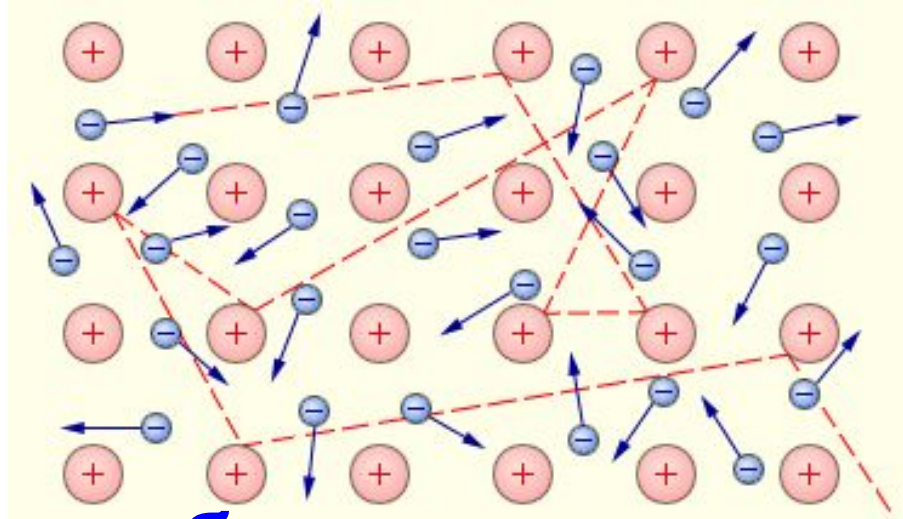
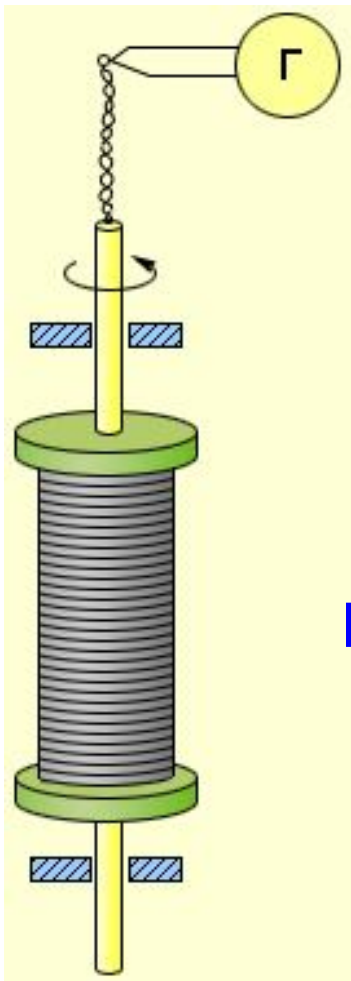
Носители тока в проводнике –  
**ЭЛЕКТРОНЫ** проводимости.



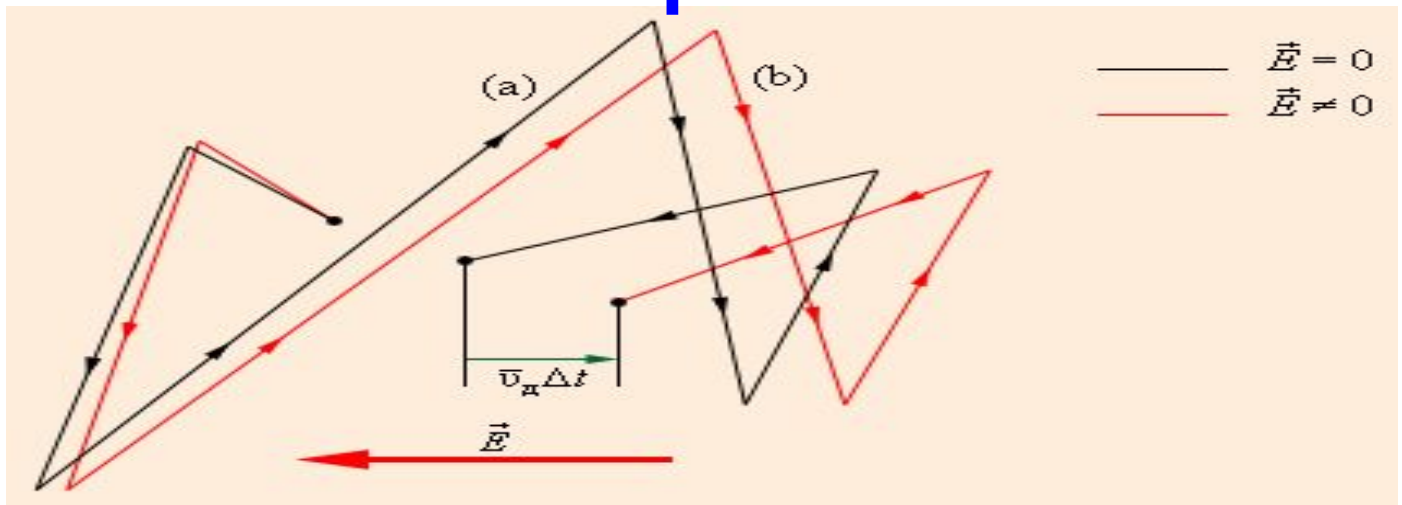
**Скорость  
теплового  
движения  
электронов  
при**

**$T=273K$**

**$\langle u \rangle \sim 100 \text{ км/с}$**



## Газ свободных электронов в кристаллической решетке металла



Р.Толмен,  
Б.Стюарт,  
1916г.

Масштабы дрейфа сильно преувеличены

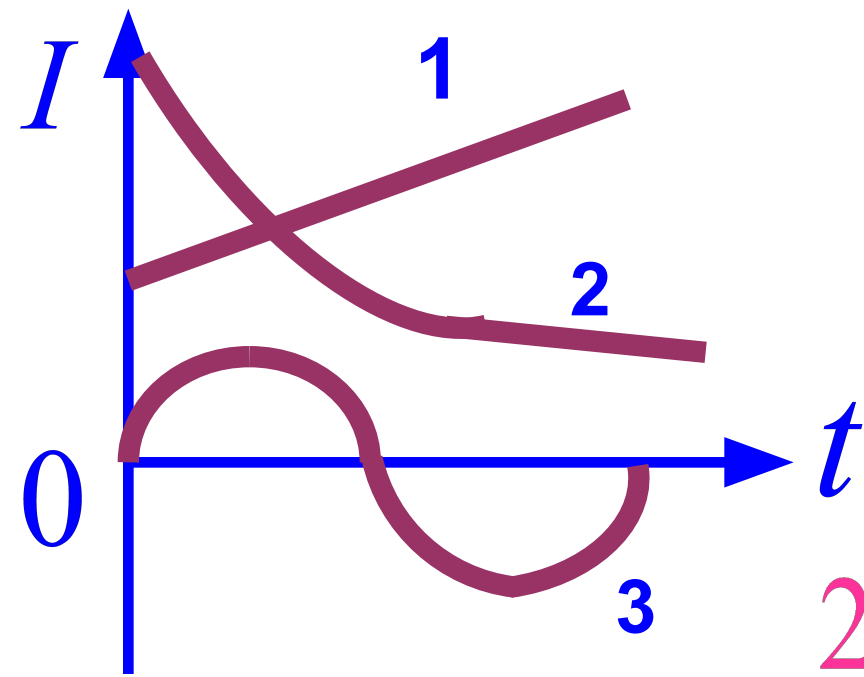
# Характеристики электрического тока

1. Сила тока  $I = \frac{dQ}{dt}$ ,  $[I] = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А}$ ,  
 $dQ$  - заряд, переносимый через  
поверхность **S**, ортогональную  
направлению тока, за время  $dt$ .

2. **Постоянный ток** не изменяется  
по величине и направлению

$$I = \text{const.}$$

### 3. Переменный ток зависит от времени $I \neq const$ :

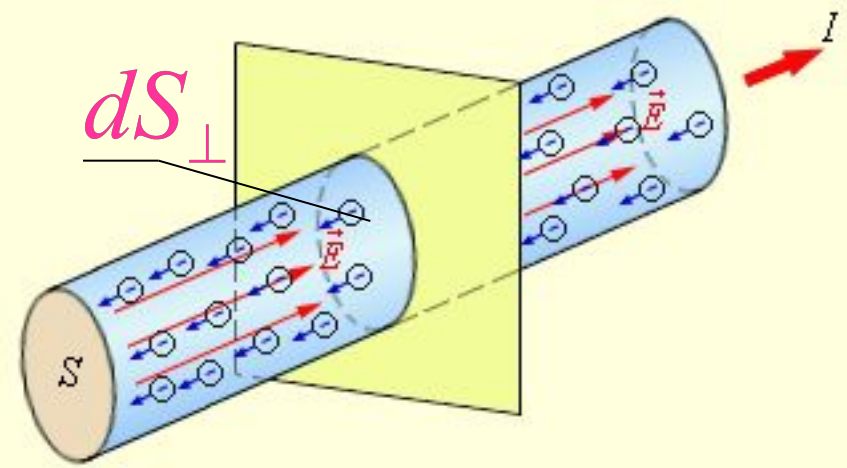


1)  $I = I_0 + kt;$

2)  $I = I_0 \exp(-Rt/L);$

3)  $I = I_0 \sin(\omega t + \varphi_0).$





## 4. Плотность тока

$j$  — вектор, совпадающий с направлением электрического тока в данной точке, численно равен

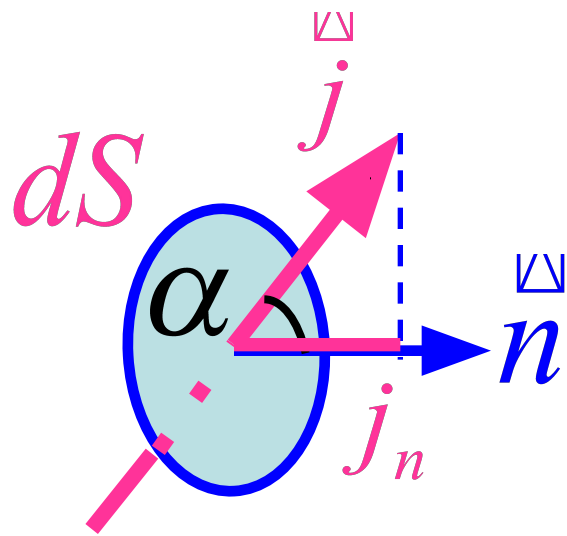
$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad [j] = \frac{A}{m^2},$$

$dS_{\perp}$  — площадь малого элемента поверхности, ортогональной направлению тока.

Сила тока  $dI$  сквозь участок  
поверхности  $dS$

$$dI = j dS_{\perp} = j dS \cos \alpha = j d\vec{S},$$

где  $d\vec{S} = \vec{n} dS$ .



Сила тока  $I$  через  
поверхность  $S$

$$I = \int_S j d\vec{S} = \int_S j_n dS,$$

$j_n = j \cos \alpha$  - проекция вектора  
плотности тока на  $\vec{n}$ .

# Вектор плотности тока в металле

$$\vec{j} = -en_0 \langle \vec{v} \rangle,$$

где  $-e$  - заряд электрона;  $n_0$  - концентрация электронов проводимости;  $\langle \vec{v} \rangle$  - средняя скорость их дрейфа (направленного движения).

При максимально допустимых токах

$$\langle v \rangle \approx 10^{-3} \text{ м/с.}$$

# КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

П. Друде, Г. Лоренц; электроны

Гендрик Антон Лоренц (1853–1928г.)  
проводимости образуют элект-

ронный газ (одноатомный иде-  
альный):

1) концентрация электронов

$$n_0 \approx 10^{28} - 10^{29} \text{ м}^3;$$

2) длина свободного пробега

$$\langle \lambda \rangle \approx 10^{-10} \text{ м};$$

### 3) скорость теплового движения

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle \approx 10^5 \text{ м/с (при } T = 273\text{К)};$$

### 4) уравнение движения электрона в электрическом поле

$$m \frac{dv}{dt} = eE, \quad \int_0^{\langle v_m \rangle} dv = \frac{eE}{m} \int_0^{\langle \tau \rangle} dt,$$

$$\langle v \rangle = \frac{\langle v_m \rangle}{2}, \quad \langle v \rangle = \frac{eE \langle \tau \rangle}{2m}, \quad \langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle u \rangle},$$

$$\langle v \rangle = \frac{eE\langle \lambda \rangle}{2m\langle u \rangle}, j = \frac{n_0 e^2 \langle \lambda \rangle}{2m\langle u \rangle} E = \gamma E = \frac{1}{\rho} E$$

где  $\gamma$  - удельная проводимость;

$\rho = \frac{1}{\gamma}$  - удельное сопротивление.

Так как  $j$  и  $E$  одного направления, то

$$j = \gamma E = \frac{E}{\rho} \text{ - закон Ома для...}$$

# Закон Джоуля - Ленца

При столкновении с ионами кристаллической решетки электрон теряет кинетическую энергию, полученную под действием электрического поля

$$\langle \Delta W \rangle = \frac{1}{2} m \langle v_{\max} \rangle^2.$$

Эта энергия передается иону кристаллической решетки.

**Во внутреннюю энергию в единице объема за 1 с преобразуется энергия электрического тока**

$$w = \frac{n_0 \langle u \rangle m \langle v_m \rangle^2}{2 \langle \lambda \rangle},$$

**$w$  - объемная плотность тепловой мощности тока,**

**$n_0$  - число электронов в единице объема,**

**$\langle u \rangle / \langle \lambda \rangle$  - число столкновений за 1с.**



**Учитывая, что**

$$\langle v_m \rangle = \frac{eE \langle \tau \rangle}{m} ; \quad \langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle}{\langle u \rangle}, \quad \text{получим}$$

$$w = \frac{n_0 e^2 \langle \lambda \rangle}{2m \langle u \rangle} E^2, \quad \gamma \text{ - удельная проводимость.}$$

$\gamma$

$$w = \gamma E^2 = \overline{jE} = \frac{1}{2} \gamma j^2 = \rho j^2$$

**- закон Джоуля – Ленца в...**

# Закон Видемана-Франца (1853г.)

Для всех металлов при  $T = \text{const}$   
отношение теплопроводности к  
удельной электропроводности  
одинаково:

$$\frac{K}{\gamma} = \text{const.}$$

Уточен Л. Лоренцом (1882г.)

$$\frac{K}{\gamma} = CT.$$

**Идея:** теплопроводность металлов осуществляется электронным газом (одноатомный идеальный)

$$K = \frac{1}{3} \rho c_V \langle \lambda \rangle \langle u \rangle = \frac{1}{2} n_0 k \langle \lambda \rangle \langle u \rangle$$

$\frac{3}{2} n_0 k$   $\sqrt{\frac{3kT}{m}}$

$$\frac{K}{\gamma} = \frac{3k^2}{e^2} T = CT \quad C = 2,28 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Джс}^2}{\text{Кл} \cdot \text{К}}$$

# Разногласия выводов классической теории электропроводности металлов и эксперимента:

теория

эксперимент

$$\rho \sim \sqrt{T}$$

$$\rho \sim T$$

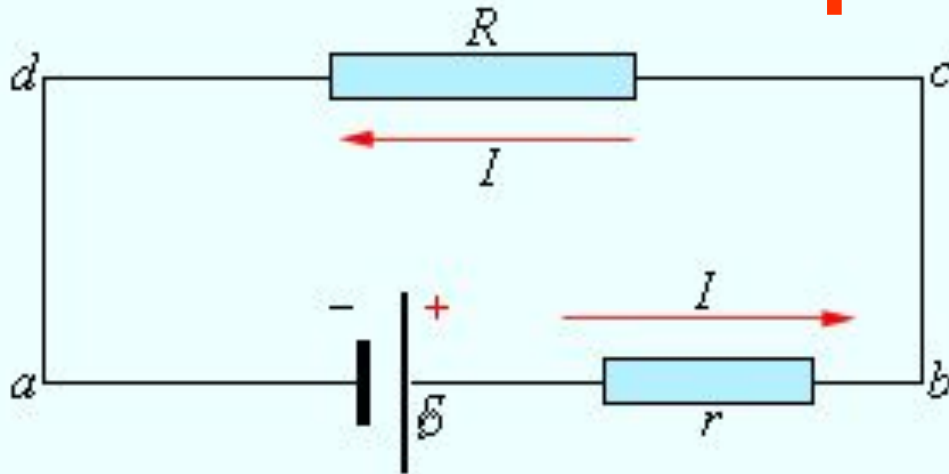
Молярная теплоемкость

$$4,5R$$

$$\sim 3R$$

Классическая теория заменена **квантовой** теорией .

# Участки электрической цепи:



$ab$  - неоднородный,  
 $cd$  – однородный

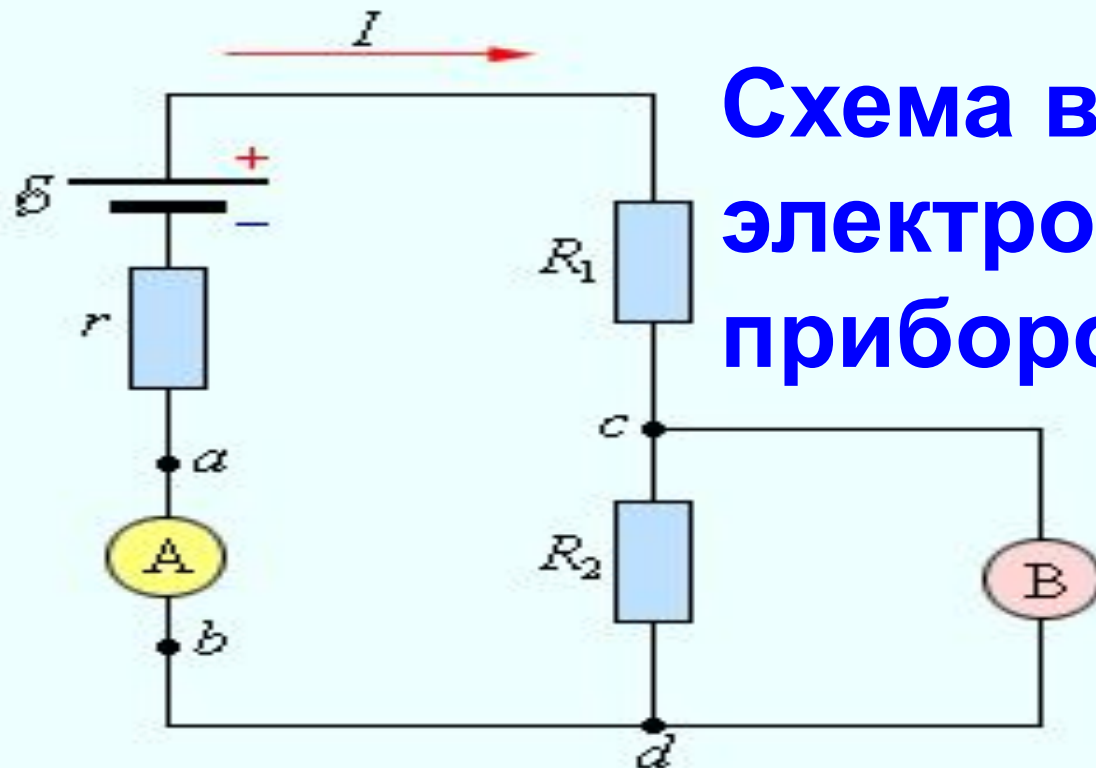


Схема включения  
электроизмерительных  
приборов

# Закон Ома для участка цепи

Ток в цепи создают источники тока за счет работы сторонних сил (силы химической природы).

$$\mathcal{E} = \frac{A}{Q} \left[ \frac{Дж}{Кл} = V \right]$$

- электродвижущая сила (ЭДС), равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда.

# Закон Ома для участка с ЭДС

(неоднородный)

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} (\vec{E}_{кул} + \vec{E}_{ст})$$

Умножим скалярно на  $d\vec{l}$

$$\rho \vec{j} d\vec{l} = \vec{E}_{кул} d\vec{l} + \vec{E}_{ст} d\vec{l},$$

$$U_{12} = \int_1^2 \rho \frac{d\vec{l}}{S} = \int_1^2 \vec{E}_{кул} d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{ст} d\vec{l} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

# Напряжение на участке 1-2

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}$$

- численно равно работе кулоновских и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда по участку цепи 1-2;

$\varphi_1 - \varphi_2$  - падение потенциала на участке 1-2;

$\mathcal{E}_{12}$  - электродвижущая сила на 1-2.

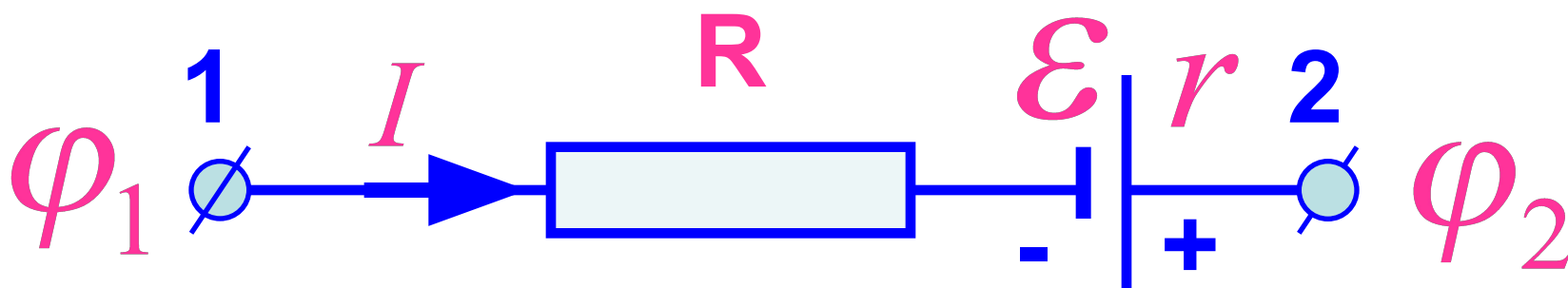


# Сопротивление участка цепи 1-2

$$R_{12} = \frac{\rho \boxtimes_{12}}{S}$$

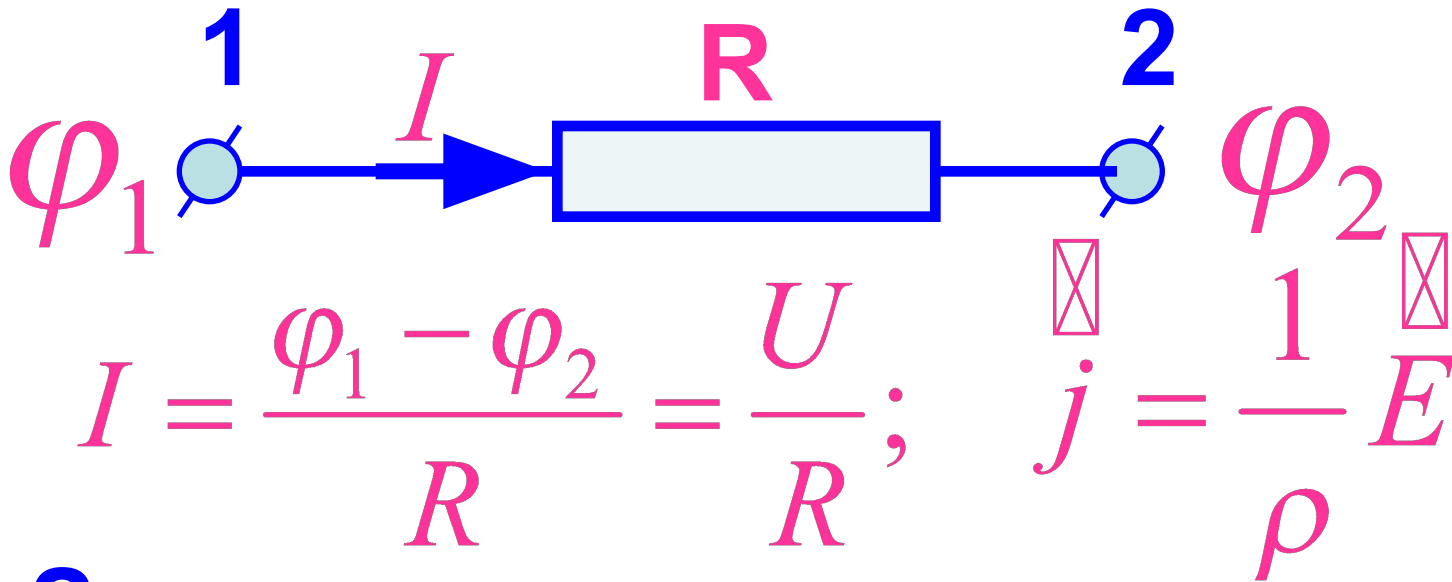
Закон Ома для участка цепи с ЭДС

$$I_{12}R = (\varphi_1 - \varphi_2) \pm \mathcal{E}_{12}$$



Неоднородный (активный) участок

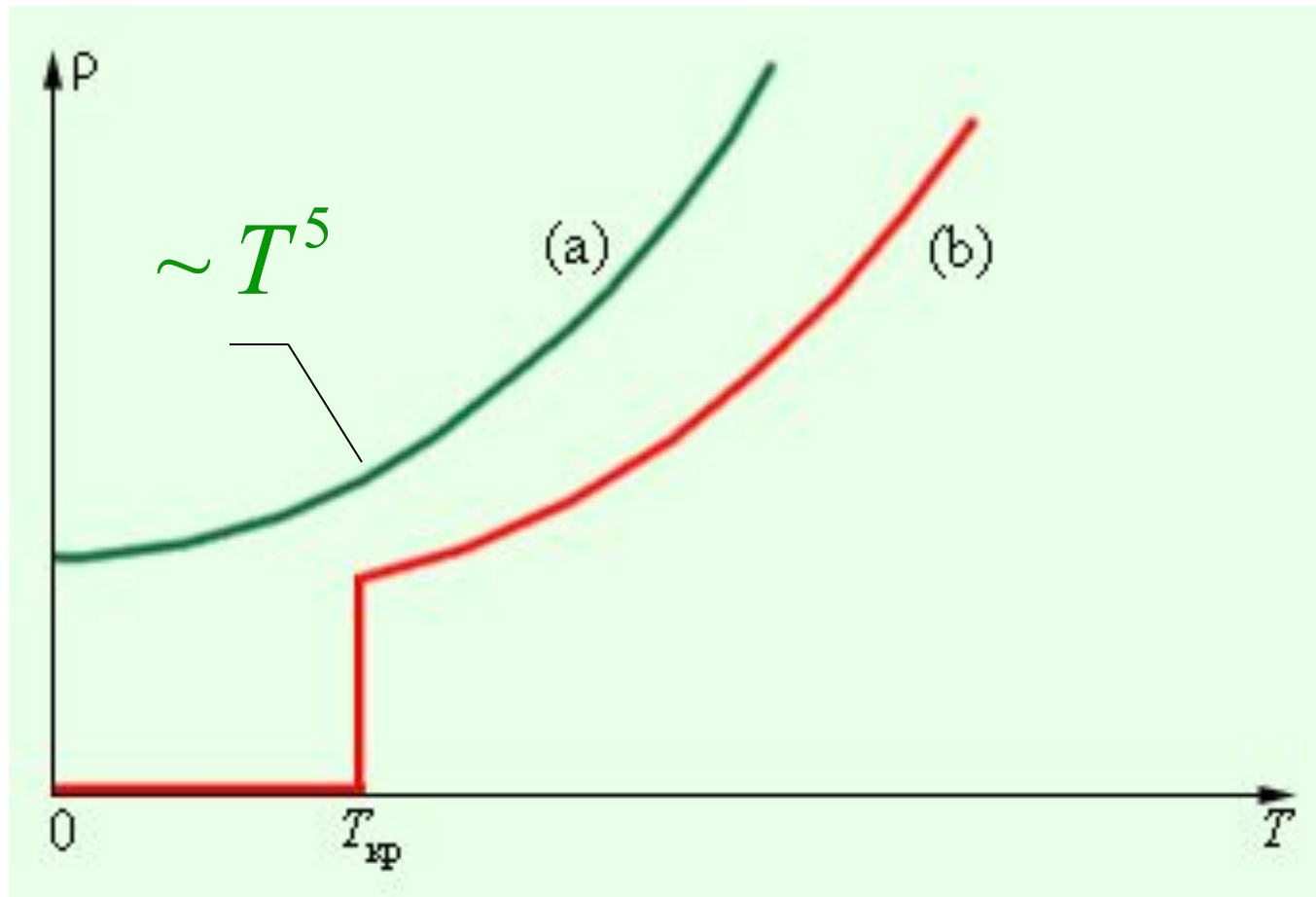
# Однородный (пассивный) участок электрической цепи



**Зависимость сопротивления от температуры:**

$$R = R_0 (1 + \alpha t^0); \quad \rho = \rho_0 \alpha T.$$

**Зависимость  $\rho(T)$  при низких температурах:  
(a) – металл; (b) – сверхпроводник**



$T_{кр}$  - критическая температура (0,14 – 20)К.  
(1911г. Г.Камерлинг – Оннес , Нг )

$$w = \rho j^2$$

## Закон Джоуля-Ленца

(однородный участок)

Работа тока расходуется на нагревание проводника:

$$\delta A = \delta Q = w dV dt = w S d\ell dt;$$

$$\delta Q = \rho j^2 S d\ell dt = I^2 \rho \frac{d\ell}{S} dt;$$

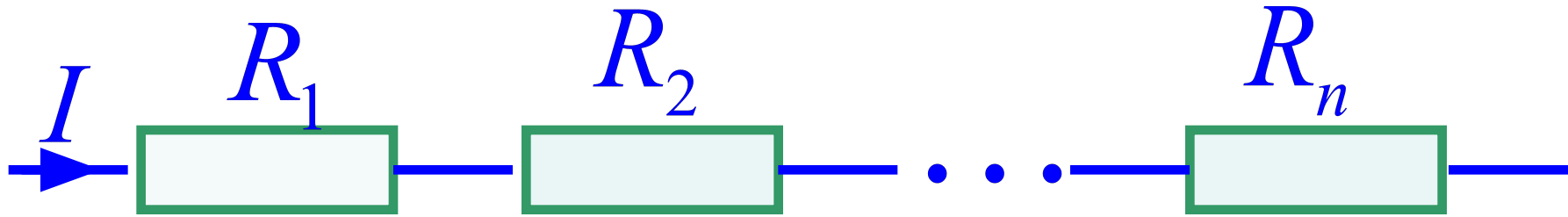
$$R = \frac{\rho}{S} \int_1^2 d\ell; \quad Q = I^2 R \int_0^t dt;$$

$$Q = I^2 R t$$

-закон Джоуля - Ленца.

# Сопротивления соединяют:

## 1) последовательно



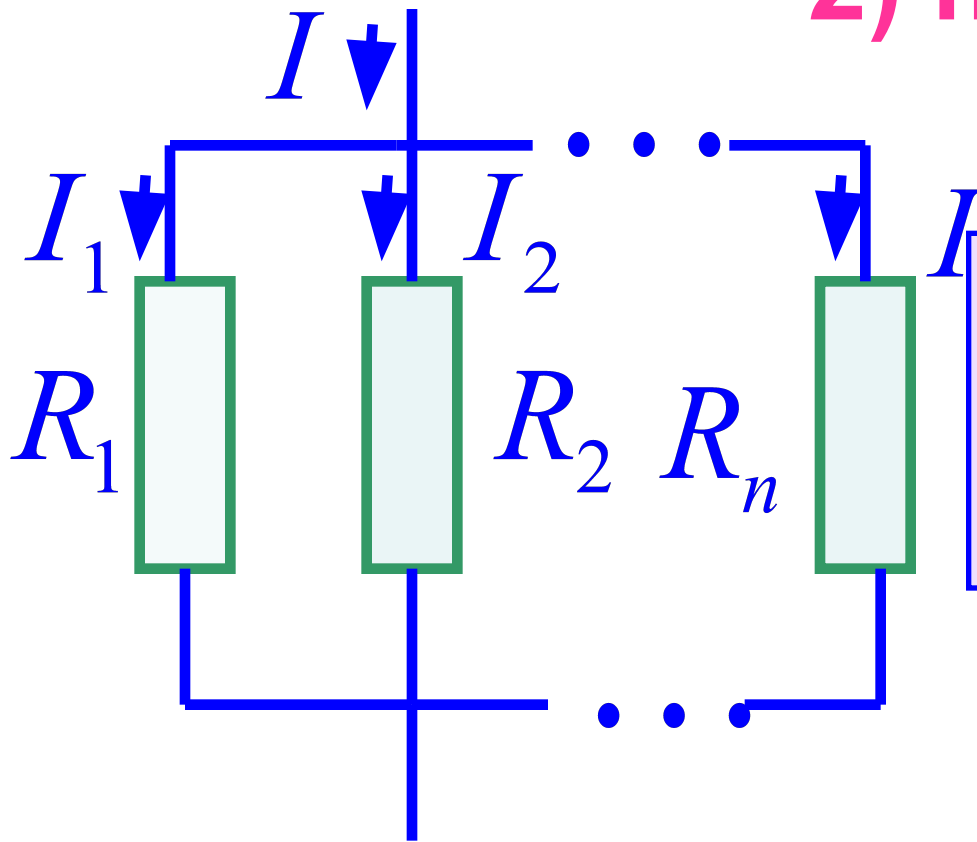
$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n,$$

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

$$R = \sum_i R_i.$$

(1)

## 2) параллельно



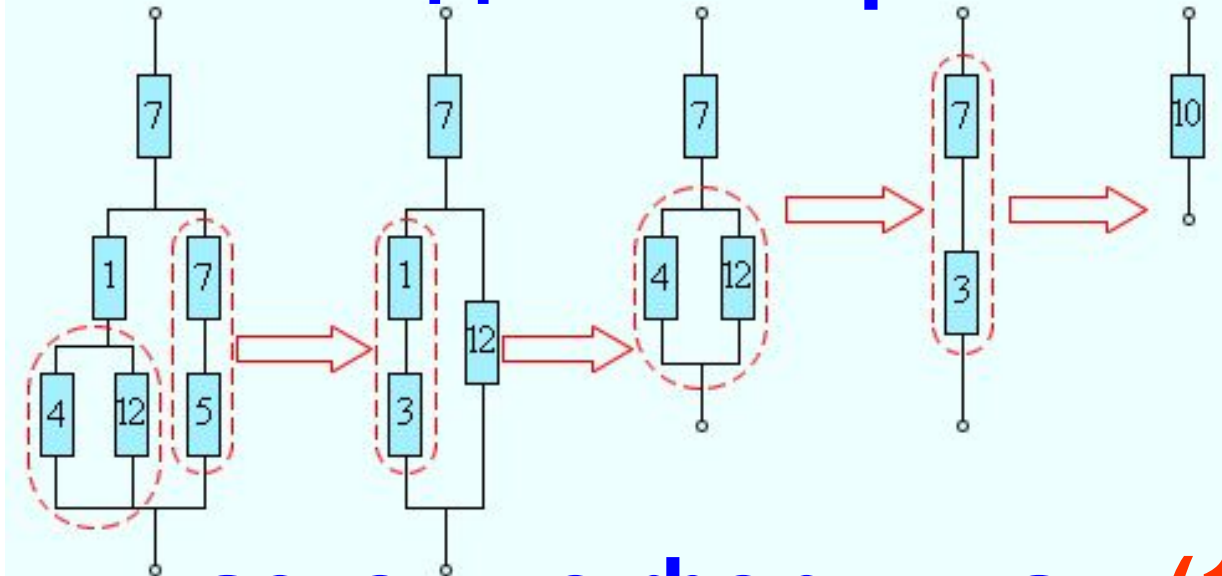
$$\frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i}, \quad (2)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

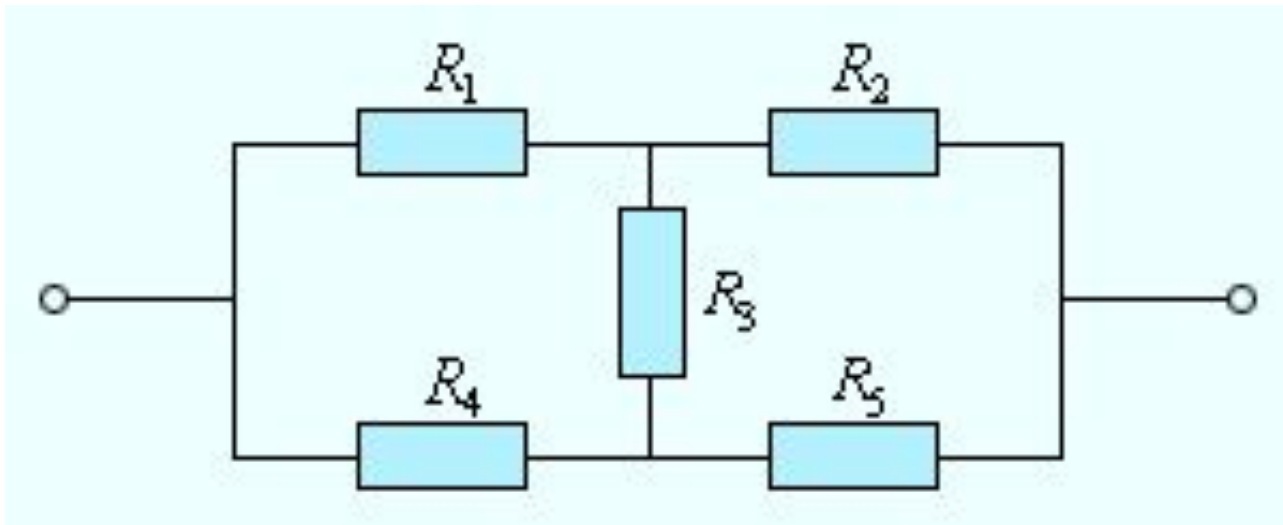
$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n,$$

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

# Смешанное соединение резисторов:



рассчитывается по формулам (1) и (2),



рассчитывается по правилам Кирхгофа.