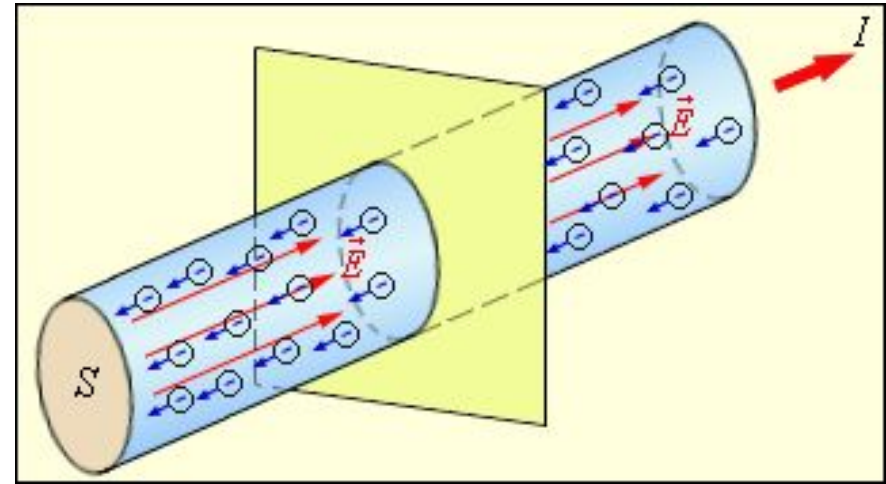




Постоянный электрически й ток

1. Электрический ток.

Электрический ток – это направленное движение электрически заряженных частиц.



Условия существования электрического тока



1. наличие свободных носителей зарядов



2. наличие электрического поля

2. Сила тока. Плотность

тока.

Количественная характеристика электрического тока – **сила тока I** .

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

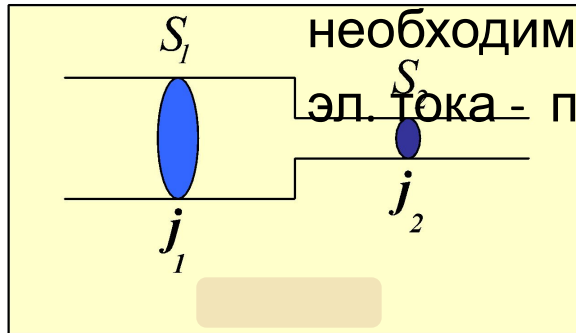
в случае $I = \text{const}$,

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

I – скаляр.

В системе СИ $[I] = \text{ампер (A)}$.

В случае неравномерного распределения I через поверхность проводника,



необходимо ввести локальную характеристику

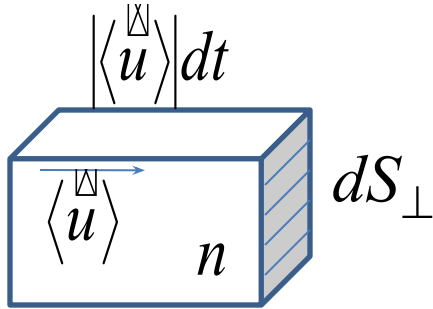
эл. тока – плотность тока – j .

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}$$

j – величина, численно равная силе тока через единичную площадку, перпендикулярную направлению переноса заряда. $[j] = \text{A/м}^2$

СВЯЗЬ ПЛОТНОСТИ ТОКА С ПАРАМЕТРАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ,

УЧАСТВУЮЩИХ В ПЕРЕНОСЕ



$\langle \vec{u} \rangle$ - средняя скорость упорядоченного движения носителя заряда

n - концентрация носителей заряда в веществе

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} = \left| dI = \frac{dq}{dt} = \frac{q_e dN}{dt} = \frac{q_e n | \langle \vec{u} \rangle | dt dS_{\perp}}{dt} \right| = q_e n | \langle \vec{u} \rangle |$$

$$\vec{j} = q_e n \langle \vec{u} \rangle$$

- вектор плотности тока,
его направление совпадает со скоростью
упорядоченного
движения положительно заряженных носителей
(частиц)

3. Уравнение непрерывности.

$$dI = \vec{j} d\vec{S} \longrightarrow I = \int_S \vec{j} d\vec{S} \quad \begin{array}{l} \text{- ПОТОК ПЛОТНОСТИ ТОКА} \\ \text{через} \\ \text{выделенную поверхность} \end{array}$$

$$\Phi_j = \oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV$$

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad \left| \oint_S \vec{j} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{j} dV \right| \quad m. O - \Gamma$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \begin{array}{l} \text{- т. Гаусса. Спец название - } \textcolor{red}{\text{уравнение}} \\ \textcolor{red}{\text{непрерывности}} \text{ для плотности тока.} \end{array}$$

Свидетельствует: **источниками поля**

являются те точки среды, в которых происходит убыль

$$\text{Для } \underline{\text{постоянного тока}} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \longrightarrow \operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$\vec{j}$ ρ

4. Электродвижущая сила (ЭДС).

Напряжение

Необходимое условие существования постоянного тока – наличие ЭДС

Сторонние силы – силы неэлектростатического происхождения.

*Работа этих сил по перемещению заряда A^**

$$A_{12}^* = \int_1^2 \vec{F}^* \cdot d\vec{l} = q \int_1^2 \vec{E}^* \cdot d\vec{l}$$

$\vec{E}^*$ - напряженность поля сторонних сил $\mathcal{E}_{12} = \frac{A_{12}^*}{q} = \int_1^2 \vec{E}^* \cdot d\vec{l}$

$$A_{12} = A_{12}^* + A_{12}^{\text{эл}} = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\mathcal{E}_{12}$$

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

УЧАСТКИ ЦЕПИ

ОДНОРОДНЫЙ – не содержащий
ЭДС

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

НЕОДНОРОДНЫЙ – содержащий
ЭДС

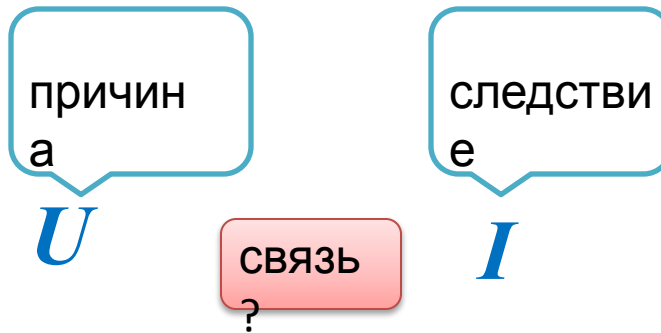
$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}$$

ЗАМКНУТЫЙ

$$U = \mathcal{E} = \oint_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l}$$

В замкнутой цепи ЭДС равна
циркуляции вектора
напряженности сторонних сил

5. Закон Ома.



Для однородного изотропного проводника

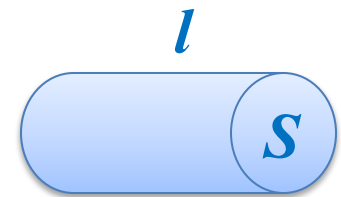
$$I = \Lambda U \quad \text{- закон Ома}$$

Λ - электрическая проводимость, $[\Lambda] = \text{См}$ (сименс)

чаще

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

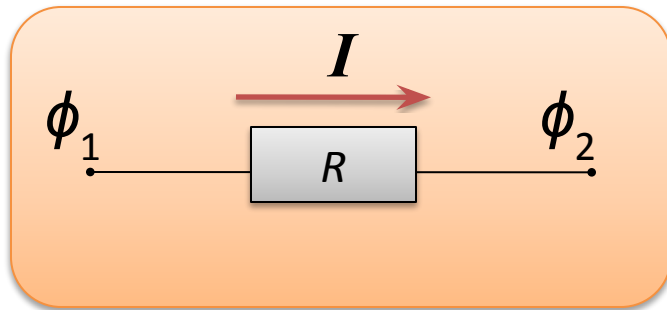
$$R = \frac{1}{\Lambda} \quad \text{- электрическое сопротивление, } [R] = \text{Ом} \quad R = \rho \frac{l}{S}$$



ρ - удельное сопротивление материала проводника;
 $\sigma = 1/\rho$ - удельная проводимость материала проводника

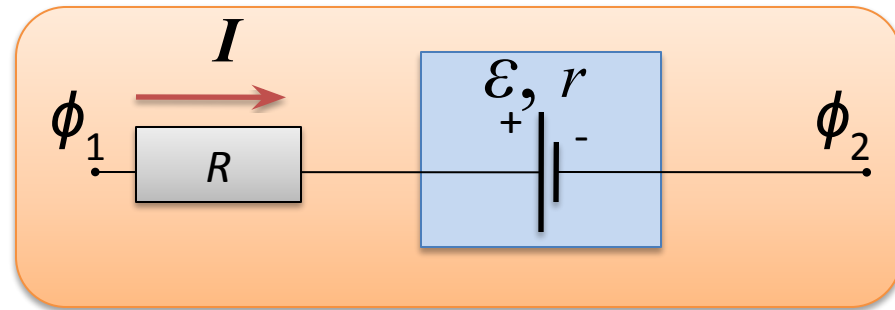
Закон Ома для УЧАСТКОВ ЦЕПИ

1. ОДНОРОДНОГО



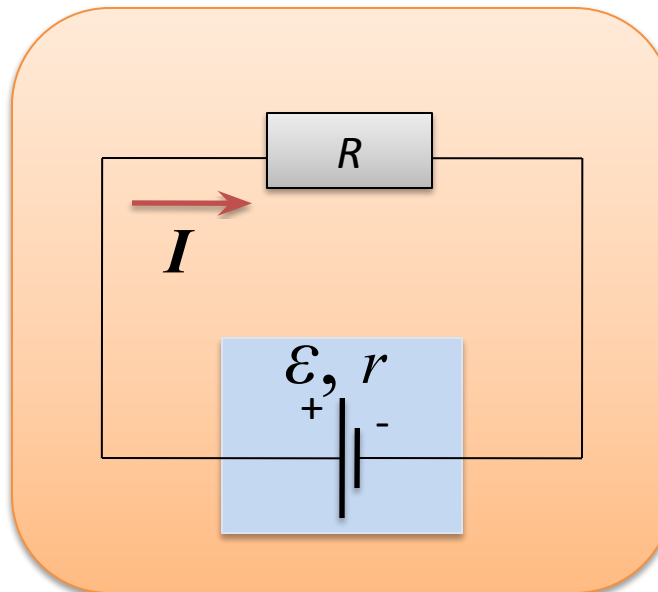
$$I = \frac{U_{12}}{R} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{R}$$

2. НЕОДНОРОДНОГО



$$I = \frac{\mathcal{E} + \phi_1 - \phi_2}{R + r}$$

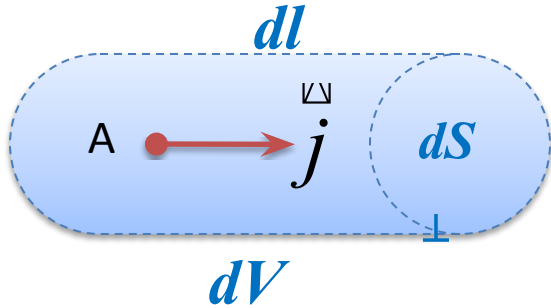
3. ЗАМКНУТОЙ ЦЕПИ



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

5.1. Закон Ома в дифференциальной форме

Для неоднородного проводника



$$\rho = \rho(\vec{r})$$

$$jdS_{\perp} = -\frac{1}{\rho \frac{dl}{dS_{\perp}}} [E_l dl + E_l^* dl]$$

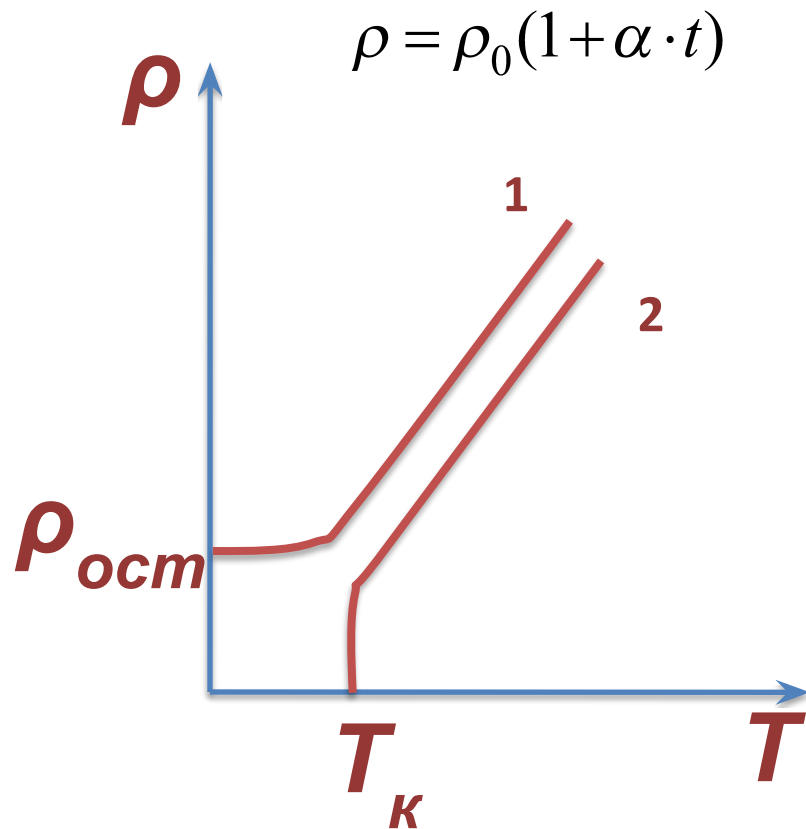


$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} [\vec{E} + \vec{E}^*] = \sigma [\vec{E} + \vec{E}^*]$$

В случае, когда на заряд в окрестности т. А сторонние силы не действуют

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

6. Температурная зависимость удельного сопротивления проводника



1- обычные проводники
2 - сверхпроводники

α – температурный коэффициент сопротивления

*диапазон параметров
сверхпроводящего состояния*

$$0 < T \leq T_{кр}$$

$$H_{кр} > H \geq 0$$

H – напряженность магнитного поля

Объяснение явления
сверхпроводимости базируется на
основе **квантовых**
представлений

7. Закон Джоуля-Ленца

$$A_{12} = qU_{12} = IU_{12}t = I^2 R_{12}t = \frac{U_{12}^2}{R_{12}} t$$

- работа постоянного тока

$$P = \frac{A_{12}}{t} = IU_{12} = I^2 R_{12} = \frac{U_{12}^2}{R_{12}}$$

- мощность, выделяемая в участке цепи

в случае неоднородного проводника
на различных dV – разная $dP \Rightarrow$

$$P_{y\partial} = \frac{dP}{dV}$$

$$dP = (jdS_{\perp})^2 \rho \frac{dl}{dS_{\perp}} = \rho j^2 dV$$

$$P_{y\partial} = \rho j^2$$

$$P_{y\partial} = \rho(\overline{jj}) = (\overline{j}(\overline{E} + \overline{E}^*))$$

- в общем
случае

$$A_{12} = Q + \Delta W_{хим} + A_{мех}$$

- в частном
случае

$$A_{12} = Q$$

Тогда, количество
теплоты,
выделяемое на данном
участке цепи $\Rightarrow$

$$Q = qU_{12} = IU_{12}t = I^2 R_{12}t = \frac{U_{12}^2}{R_{12}}t$$

и

удельная тепловая
мощность $\Rightarrow$

$$Q_{y\partial} = \rho j^2 = \rho(\overline{jj}) = (\overline{j}(\overline{E} + \overline{E}^*))$$

8. Расчет сложных цепей постоянного тока.

Правила Кирхгофа

Первое правило:

$$\sum_k I_k = 0$$

Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\text{Узел A : } I_2 - I_1 - I_5 = 0$$

$$\text{Узел D : } I_6 - I_2 - I_7 = 0$$

$$\text{Узел F : } I_4 + I_5 - I_6 = 0$$

Второе правило:

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k$$

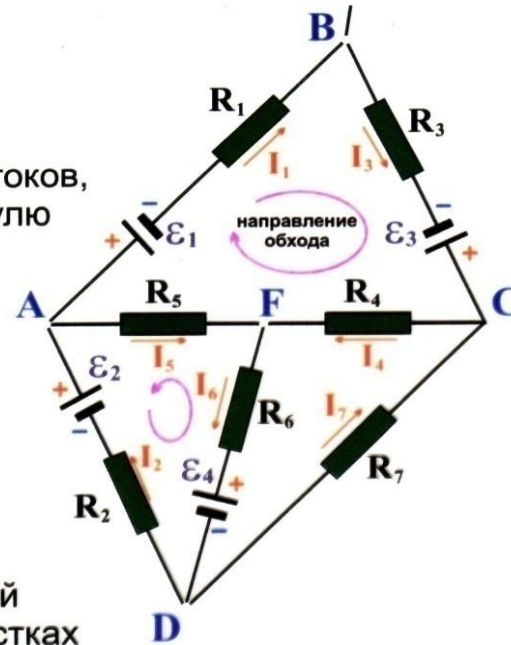
Алгебраическая сумма падений напряжений на отдельных участках замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре

$$\text{Контур ABCFA : } I_1 R_1 + I_3 R_3 + I_4 R_4 - I_5 R_5 = \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_1$$

$$\text{Контур AFDA : } I_5 R_5 + I_6 R_6 + I_2 R_2 = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_4$$

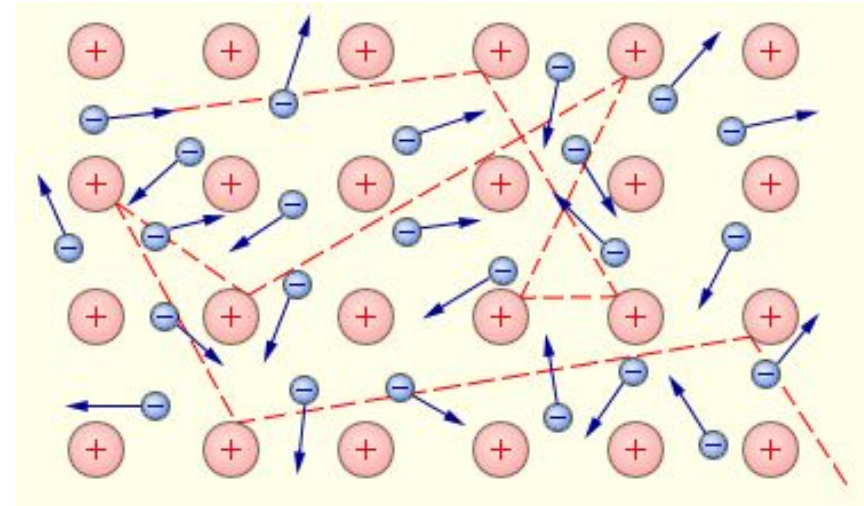
Порядок применения второго правила:

1. Показать направления токов на каждом участке цепи;
2. Показать направление стороннего поля в источнике ЭДС;
3. Выбрать направление обхода контура;
4. При совпадении силы тока или стороннего поля с направлением обхода перед падением напряжения и ЭДС ставится плюс, а при несовпадении - минус.



КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

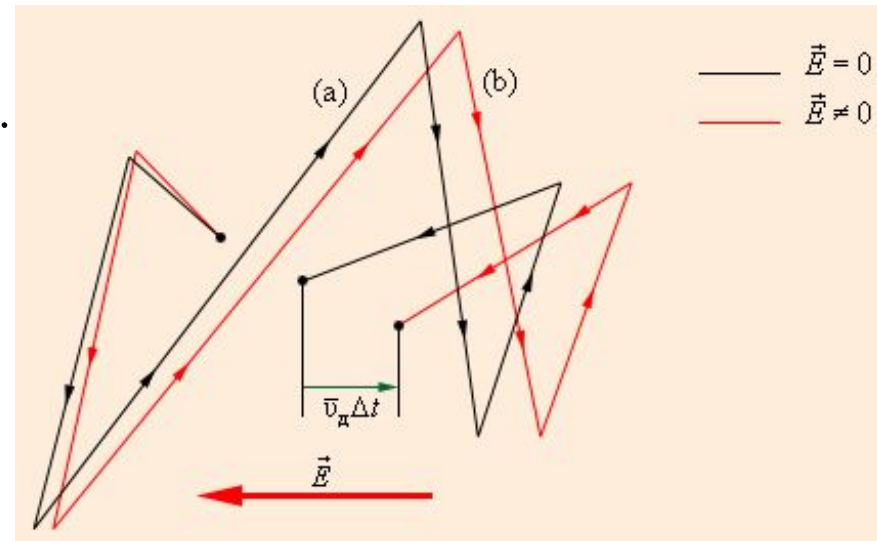
Электроны проводимости в металле ведут себя подобно молекулам газа. В промежутках между столкновениями они движутся свободно, проходя путь между столкновениями (в среднем). Электроны сталкиваются в основном не между собой, а с ионами решетки.



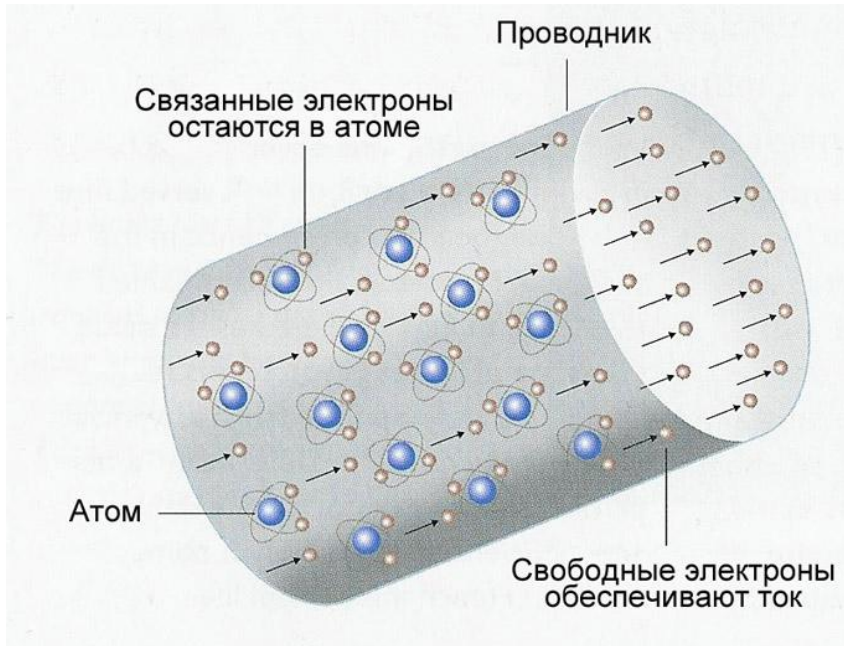
$$\bar{M}_c \in \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 1,1 \cdot 10^5 \quad / \quad .$$

$$\frac{I}{S} = en\bar{V}_d \Rightarrow \bar{V}_d = \frac{I}{enS};$$

$$\bar{M}_d \in \frac{10}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{29} \cdot 10^{-6}} \approx 6,2 \cdot 10^{-4} \quad / \quad .$$



ЗАКОН ОМА В КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ



$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}; \quad V_{dm} = a\tau;$$

$$\tau = \frac{\lambda}{V_c} \Rightarrow V_{dm} = \frac{eE\lambda}{mV_c}.$$

$$\bar{V}_d = \frac{V_{dm}}{2} = \frac{eE\lambda}{2mV_c}; \quad j = en\bar{V}_d \Rightarrow$$

$$j = \frac{ne^2\lambda}{2mV_c} E;$$

$$j = \gamma E \Rightarrow$$

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{2mV_c}{e^2 n \lambda}.$$

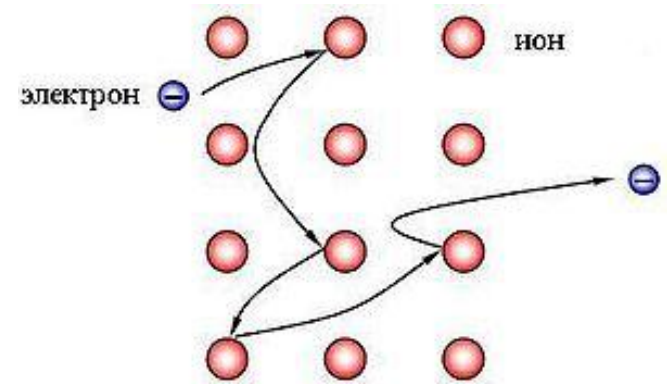
ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА В КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

К концу свободного пробега электрон приобретает дополнительную кинетическую Энергию

$$\Delta W_k = \frac{mV_{dm}^2}{2} = \frac{m}{2} \left(\frac{eE\lambda}{mV_c} \right)^2 = \frac{e^2 \lambda^2}{2mV_c^2} E^2.$$

Каждый электрон претерпевает за секунду

$$\frac{1}{\tau} = \frac{V_c}{\lambda}$$



столкновений.

$$q \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta V} = n \frac{1}{\tau} \Delta W_k = n \frac{V_c}{\lambda} \frac{e^2 \lambda^2}{2mV_c^2} E^2 = \frac{e^2 n \lambda}{2mV_c} E^2. \quad \Delta Q = I^2 R \Delta t;$$

$$I = jS = \frac{E}{\rho} S; \quad R = \rho \frac{l}{S} \Rightarrow \quad q = \frac{I^2 R}{\Delta l S} = \frac{E^2 S^2}{\rho^2 \Delta l S} \rho \frac{l}{S} = \frac{E^2}{\rho}.$$

ЗАТРУДНЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

Опыт Толмена-Стюарта

$$\frac{e}{m} = \frac{lv_0}{Rq} \quad \frac{e}{m} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

Опыт Милликена и Иоффе

$$q = \frac{mg}{E} \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Модель строения металла

Эффект Холла

Зависимость сопротивления от температуры

Сверхпроводимость

$$\rho = \frac{2mV_c}{e^2 n \lambda}; \quad V_c = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \Rightarrow$$

$$\rho = \frac{4}{e^2 n \lambda} \sqrt{\frac{2}{\pi} m k T} \Rightarrow \rho \propto \sqrt{T}.$$

Из классической теории электропроводности металлов следует, что сопротивление металлов должно возрастать как корень квадратный из абсолютной температуры. Это противоречит опытным данным, согласно которым сопротивление металлов растет пропорционально T . В рамках классической теории невозможно объяснить сверхпроводимость.