



УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ОПОРНЫЙ ВУЗ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# Постоянный ток. Сила и плотность тока. Электродвижущая сила Сопротивление. Закон Ома

Лекция 8

Ст. преп., к. ф.-м. н. Бачурина Ольга  
Владимировна

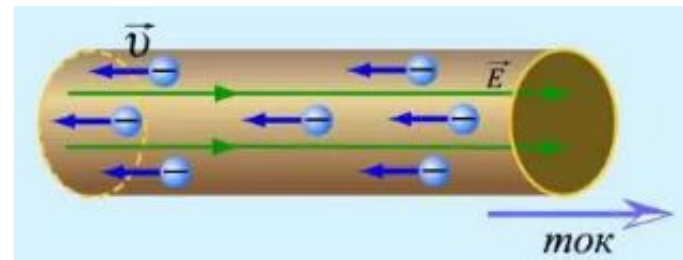
# Темы для СРС

---

## □ Сверхпроводимость

# 1.1 Электрический ток

- В электростатике изучались явления, обусловленные неподвижными зарядами. Если по какой-либо причине возникает упорядоченное движение зарядов и через поверхность переносится заряд, отличный от нуля, то говорят, что возникает электрический ток.
- Электрический ток - упорядоченное движение электрических зарядов – носителей тока, заряд которых будем обозначать  $e$ .
- В металлах и полупроводниках – это электроны, в электролитах и ионизированных газах – положительные и отрицательные ионы.
- Ток, возникающий в проводнике, называют **током проводимости**. Для его появления и существования необходимо:
  1. наличие носителей тока
  2. наличие в среде электрического поля, за счет которого осуществлялось бы направленное движение зарядов.

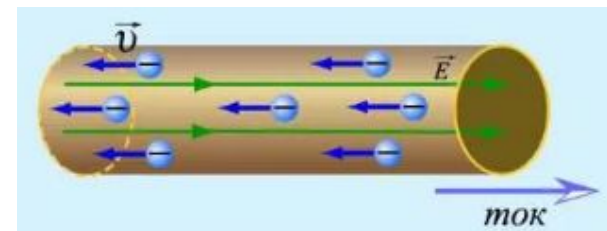


# 1.1 Электрический ток

□ Электрический ток может быть вызван также перемещением в пространстве микроскопического заряженного тела – проводника или диэлектрика. Такой ток называют конвекционным.

□ **За направление тока условно принимают направление движения положительных зарядов.** Основные свойства электрического тока следующие:

1. прохождение электрического тока во всех проводниках сопровождается выделением тепла (эффект Джоуля-Ленца);
2. прохождение тока приводит к химическим эффектам (перенос ионов в растворе или электролиз);
3. электрический ток создает магнитное поле.

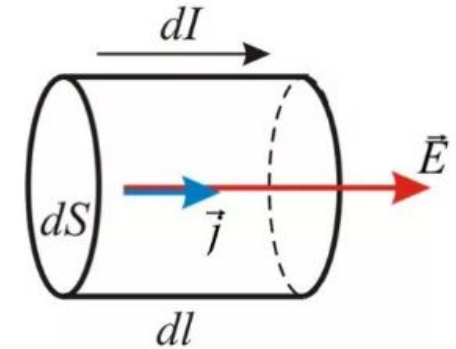


## 1.2. Сила и плотность тока

▣ **Количественной мерой электрического тока является сила тока ( $i, I$ )** – количество электричества, переносимое через сечение проводника за единицу времени:

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

▣ Если сила тока и его направление  $i = \frac{q}{t}$  не меняются, то ток называют постоянным:



▣ Единица силы тока в СИ – ампер (1 А), 1 А = 1 Кл/с.

▣ За направление тока принимается направление, в котором перемещаются положительные заряды или направление, противоположное направлению движения отрицательных зарядов. Свободные заряды, которые перемещаются в среде, называются носителями тока

▣ Электрический ток может быть распределен неравномерно по поверхности, через которую он течет. Более детально ток можно охарактеризовать с помощью вектора плотности тока. Пусть заряженные частицы движутся в определенном направлении со скоростью. Вектором плотности тока называется вектор, по направлению совпадающий с направлением скорости положительных зарядов (или против направления скорости отрицательных зарядов), а по абсолютной величине равный отношению силы тока через элементарную площадку, расположенную в данной точке пространства перпендикулярно к направлению движения носителей, к ее площади

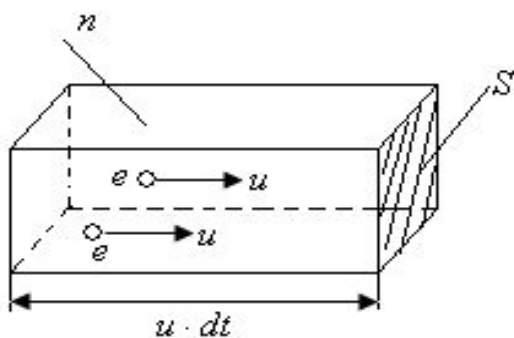
## 1.2. Плотность тока

□ Для характеристики направления тока вводят **вектор плотности тока** ( $\mathbf{j}$ ) – вектор, по направлению совпадающий с движением положительных зарядов, а по величине равный заряду, прошедшему за единицу времени через единицу площади, перпендикулярную движению зарядов:

$$\mathbf{j} = \frac{dq}{S dt}$$

□ Число носителей тока в единице объема называется плотностью носителей тока. Заряд отдельного носителя будет обозначаться  $e$ .

□ Если свободными зарядами являются, например, электроны, а положительные заряды неподвижны (это имеет место в металлах), то плотность носителей будет совпадать с числом свободных электронов в единице объема.



Вектор плотности тока можно выразить через плотность носителей тока и скорость их движения. Количество заряда, перенесенного за время  $dt$  через некоторую поверхность  $S$ , перпендикулярную к вектору скорости (рис.), равно  $dq = n \cdot e \cdot u \cdot dt \cdot S$ . За время  $dt$  площадку пересекут все свободные заряды в параллелепипеде с основанием  $S$  и длиной  $u dt$ . Если площадка достаточно мала, то плотность тока в её пределах можно считать постоянной и тогда:

$$\mathbf{j} = \frac{I}{S} = \frac{dq}{S dt} = \frac{n \cdot e \cdot u \cdot dt \cdot S}{S \cdot dt} = n \cdot e \cdot u$$

## 1.2. Плотность тока

□ В векторной форме:  $\vec{j} = n \cdot e \cdot \vec{u}$

□ Сила тока через произвольную поверхность  $I = \int_S \vec{j} d\vec{S}$

□ Электрический ток, обусловленный движением свободных зарядов в проводниках различной природы, называется током проводимости.

□ **Свободные заряды в проводнике испытывают столкновения с атомами проводника.** За время «свободного пробега» между двумя столкновениями заряд в проводнике приобретает направленную скорость вдоль внешнего электрического поля:

$$\vec{u} = \vec{w}\tau = \frac{e\vec{E}}{m_0}\tau$$

□ где  $\vec{E}$  напряженность электрического поля в проводнике. После очередного столкновения скорость теряется. Затем, до следующего столкновения, происходит новое наращивание направленной скорости.

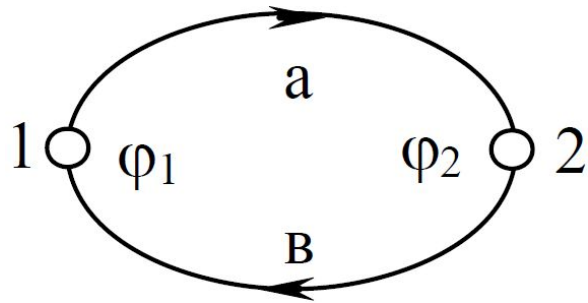
□ **Условиями существования тока** является:

□ а) **Наличие свободных зарядов;**

□ б) **Наличие электрического поля внутри проводника, чтобы поддерживать перемещение зарядов.**

## 1.2. Источники тока.

### Электродвижущая сила (ЭДС)



▣ **Электрический ток может существовать лишь в замкнутой цепи**, в которой (рис.) можно выделить два участка: 1а2, где заряды движутся от большего потенциала к меньшему ( $\varphi_1 > \varphi_2$ ) – такое движение может быть вызвано *электрическими силами*, и 2в1, где заряды движутся от меньшего потенциала к большему. Ясно, что такое движение зарядов может быть обеспечено *силами не электрического происхождения*.

- ▣ Такие силы получили общее название сторонних сил. Они могут быть обусловлены химическими процессами, диффузией, магнитным полем и т.д.
- ▣ Устройство, в котором возникают сторонние силы, называют **источником тока**, например, гальванические элементы.
- ▣ Сторонние силы характеризуются работой, которую они совершают, перемещая по цепи заряды. Величина, равная работе сторонних сил по перемещению единицы положительного заряда, называется электродвижущей силой  $\varepsilon$  (ЭДС) источника тока:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q} \quad [\varepsilon] = 1 \text{ В}$$



# 1.2. Электродвижущая сила (ЭДС). Напряжение

- ▶ Действие сторонних сил характеризуют напряженностью поля сторонних сил  $E_{СТ}$ , поэтому работа, совершаемая ими по перемещению заряда на участка 1-2, может быть представлена в виде

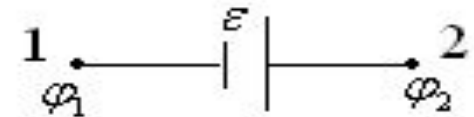
$$A = \int_1^2 F_{СТ} dl = q \int_1^2 E_{СТ} dl \quad \text{откуда} \quad \varepsilon_{12} = \int_1^2 E_{СТ} dl \quad (1)$$

- ▶ Если на участке цепи заряд перемещается как под действием сторонних, так и кулоновских сил, то полная работа при этом

$$A = A_{кул} + A_{СТ}$$

- ▶ Величина  $A/q$ , равная суммарной работе по перемещению единичного заряда, называется **напряжением** на данном участке цепи  $U$ .
- ▶ Из формул  $A_{1,2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$  и (1) следует:

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



Источник тока- устройство разделяющее положительные и отрицательные заряды

## Основные виды источников электрического тока

Механические

Электрофорная машина



Тепловые

Термоэлемент



Световые

Фотоэлемент

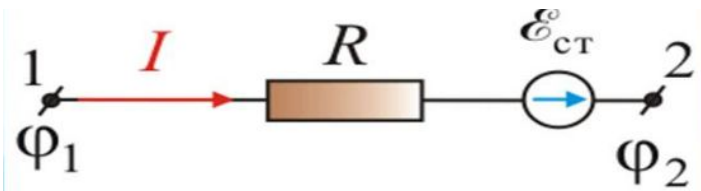


Химические

Гальванический элемент



## 1.2. Электродвижущая сила (ЭДС). Напряжение



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

- Напряжение на концах участка цепи совпадает с разностью потенциалов только в случае, если на этом участке нет ЭДС, т.е. на однородном участке цепи.  $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$

- **Обобщенный закон Ома для участка цепи содержащей источник ЭДС:**

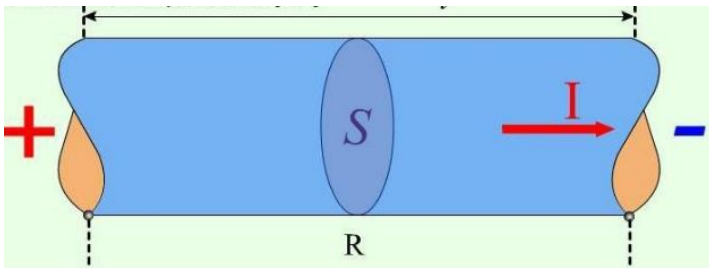
$$IR_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathbf{E}_{12}. \quad (7.5.3)$$

# 1.2. Сопротивление проводников. Закон Ома

- Для каждого проводника существует зависимость между напряжением  $U$ , приложенным к его концам, и силой тока  $i$  в нем:  $i = f(U)$ . Для металлических проводников эта зависимость прямо пропорциональная:

$$i = \frac{1}{R} U \quad - \text{Закон Ома}$$

- Величина  $R$  называется **электрическим сопротивлением** проводника.
- В СИ единица сопротивления **1 Ом** – сопротивление проводника, в котором при напряжении 1 В течет ток 1 А:  $1 \text{ Ом} = 1 \text{ В} / 1 \text{ А}$ .
- Величина сопротивления зависит от формы, размеров и материала проводника. Для цилиндрических проводников (провода)



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

где  $l$  – длина,  $S$  – сечение проводника,  
 $\rho$  – удельное сопротивление

## 1.2. Обобщенный закон Ома

- Средний путь, проходимый свободно движущимися электронами между двумя последовательными столкновениями с ионами решетки называется средней длиной свободного пробега  $\lambda$
- Среднее время между двумя столкновениями  $\tau = \frac{\lambda}{v}$  (определяется скоростью хаотического движения). При наличии поля  $\vec{E}$  направленная скорость электронов накапливается за время свободного пробега и к моменту следующего соударения достигает максимальной величины: 
$$u_{max} = w\tau = \frac{eE\lambda}{m v}$$
- Скорость  $u$  изменяется за время пробега линейно. Поэтому ее среднее за пробег значение равно половине максимального значения. 
$$\langle u \rangle = \frac{1}{2} u_{max} = \frac{1}{2} \frac{eE\lambda}{m v}$$
- Плотность тока: 
$$j = n \cdot e \cdot \langle u \rangle = \frac{n \cdot e^2 \cdot \lambda}{2m v} E$$
- Коэффициент пропорциональности между  $j$  и  $\vec{E}$  обозначим  $\sigma = \frac{n \cdot e^2 \cdot \lambda}{2m v}$
- ( $\sigma$ - проводимость). В результате получим закон Ома в локальной форме (параметры относятся к данной точке сечения проводника). 
$$j = \sigma \cdot E$$

## 1.2. Обобщенный закон Ома

- В результате получим закон Ома в локальной форме (параметры относятся к данной точке сечения проводника).

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

- ▶ Плотность тока в проводнике пропорциональна напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . Коэффициентом пропорциональности является проводимость.  $\sigma$
- ▶ Замечание. Сравним полученную формулу с известной  $I = \frac{U}{R}$
- ▶ Проводимость  $\sigma$  обратно пропорциональна удельному сопротивлению  $\rho$ .  $\sigma = \frac{1}{\rho}$
- ▶ Плотность тока  $j = \frac{I}{S}$
- ▶ Напряженность поля  $E = \frac{U}{l}$  ( $l$ - длина проводника).
- ▶ Тогда  $\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l}$ ,
- ▶ или  $I = \frac{U}{\rho \cdot l} S = \frac{U}{R}$  что и требовалось доказать.)

# Закон Ома для участка цепи

**Закон Ома** связывает величину тока через сопротивление с величиной этого сопротивления и приложенного к нему напряжения.

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

*Сила тока на некотором участке электрической цепи прямо пропорциональна напряжению на этом участке и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка*

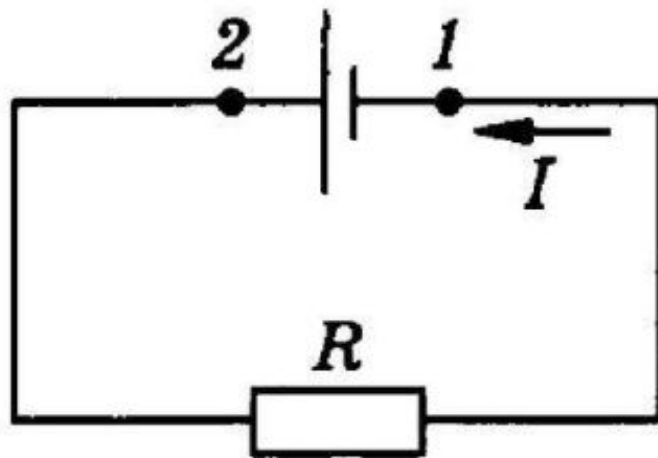
$$U = IR$$

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

# Закон Ома для полной цепи

Простейшая полная (замкнутая) электрическая цепь

Источник тока  
(гальванический  
элемент/аккумулятор)



Резистор сопротивлением  $R$

Закон Ома для  
полной цепи:

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

Сила тока в полной цепи  
равна отношению ЭДС к  
полному сопротивлению  
цепи



## Закон Джоуля - Ленца

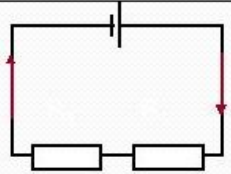
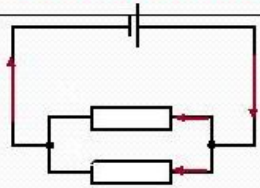
$$Q = I \cdot U \cdot \Delta t = I^2 \cdot R \cdot \Delta t = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t$$

Если на участке цепи имеют место превращения энергии в механическую или химическую, то количество теплоты, выделяемое проводником с током, меньше работы тока

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$$

# 1.2. Соединение проводников. Удельная электропроводность

- Величина, обратная удельному сопротивлению,  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  называется **удельной электропроводностью**

	<b>Последовательное соединение</b>	<b>Параллельное соединение</b>
<b>Схема</b>		
<b>Сила тока</b>	$I = I_1 = I_2$	$I = I_1 + I_2$
<b>Напряже- ние</b>	$U = U_1 + U_2$	$U = U_1 = U_2$
<b>Спротив- ление</b>	$R = R_1 + R_2$  $R = nR_1$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$  $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$  $R = \frac{R_1}{n}$

## 1.2. Сопротивление проводников. Сверхпроводимость.

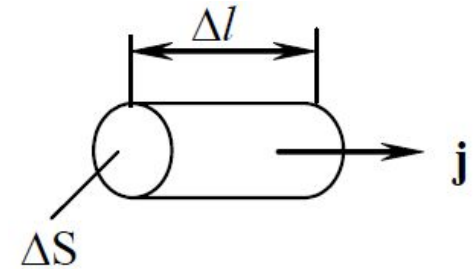
---

- Для большинства металлов сопротивление при нагревании увеличивается по закону  $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ .
- где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $0^\circ\text{C}$
- $\alpha \approx 1/273$  - температурный коэффициент сопротивления
- Однако для ряда металлов при низких температурах (критическая температура  $T_{\text{кр}}$ ) сопротивление скачком падает до нуля. Это явление называют **сверхпроводимостью** (Камерлинг-Оннес, 1911 г.).
- Значения  $T_{\text{кр}}$  для разных металлов от 0,2 до 10 К.

## 1.2. Сопротивление проводников. Сверхпроводимость.

- Для большинства металлов сопротивление при нагревании увеличивается по закону  $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$ , где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $0^\circ\text{C}$
- $\alpha \approx 1/273$  - температурный коэффициент сопротивления
- Однако для ряда металлов при низких температурах (критическая температура  $T_{\text{кр}}$ ) сопротивление скачком падает до нуля. Это явление называют **сверхпроводимостью** (Камерлинг-Оннес, 1911 г.).

- Значения  $T_{\text{кр}}$  для разных металлов от 0,2 до 10 К.
- Выделим небольшой объем проводника с током (рис.)
- Запишем для него закон Ома с учетом  $R = \rho \frac{1}{S}$  :



$$i = j\Delta S = \frac{U}{(\rho \Delta l) / \Delta S} \Rightarrow j = \frac{1}{\rho} \frac{U}{\Delta l}$$

- Т.к.  $\frac{U}{\Delta l} = E$  - напряженность поля внутри проводника, то

$$j = \frac{1}{\rho} E = \sigma E \quad - \text{Это соотношение называют}$$

**дифференциальной формой закона Ома**

---