

Постоянный электрический ток

Электрический ток

- *Электрический ток* – упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.
- Ток проводимости (ток в проводниках) – движение микрочарядов в макротеле.
- Конвекционный ток – движение макроскопических заряженных тел в пространстве.
- Ток в вакууме – движение микрочарядов в вакууме.

Электрический ток

В проводнике под действием приложенного электрического поля **свободные** электрические заряды перемещаются:

положительные – по полю,
отрицательные – против поля.

Движение носителей заряда складывается из:

- 1) хаотического (теплого) движение со $v_{cp} \sim \sqrt{kT}$;
- 2) направленного со $v_{cp} \sim E$.

Условия появления и существования тока проводимости:

1. Наличие в среде свободных носителей заряда, т.е. заряженных частиц, способных перемещаться.

В металле это электроны проводимости;

в электролитах – положительные и отрицательные ионы;

в газах – положительные, отрицательные ионы и электроны.

2. Наличие в среде электрического поля, энергия которого затрачивалась бы на перемещение электрических зарядов.

Т.е. нужен источник электрической энергии – устройство, в котором происходит преобразование какой-либо энергии в энергию электрического поля.

Сила тока

За **направление тока** условно принято направление движения положительных зарядов.

Сила тока – количественная мера (характеристика) электрического тока.

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

– сила тока численно равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени.

В СИ: [1А = 1Кл / 1с].

Сила тока

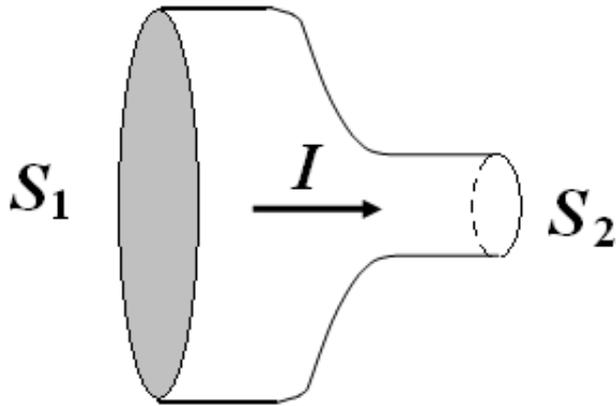
Если ток создается двумя видами носителей:

$$I = \frac{dq_+}{dt} + \frac{dq_-}{dt}$$

Для постоянного тока:

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

Плотность тока



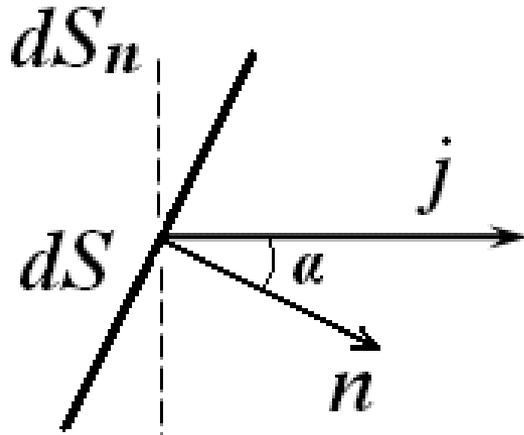
Вектор плотности тока \vec{j} вводится для характеристики распределения заряда по сечению проводника.

$$j = \frac{dq}{dS_n dt} = \frac{dI}{dS_n}$$

В СИ: [А / м²]

плотность тока численно равна **заряду**, проходящему через **единичную площадку dS_n** , расположенную перпендикулярно направлению тока, **за единицу времени**.

Связь между силой тока и плотностью тока



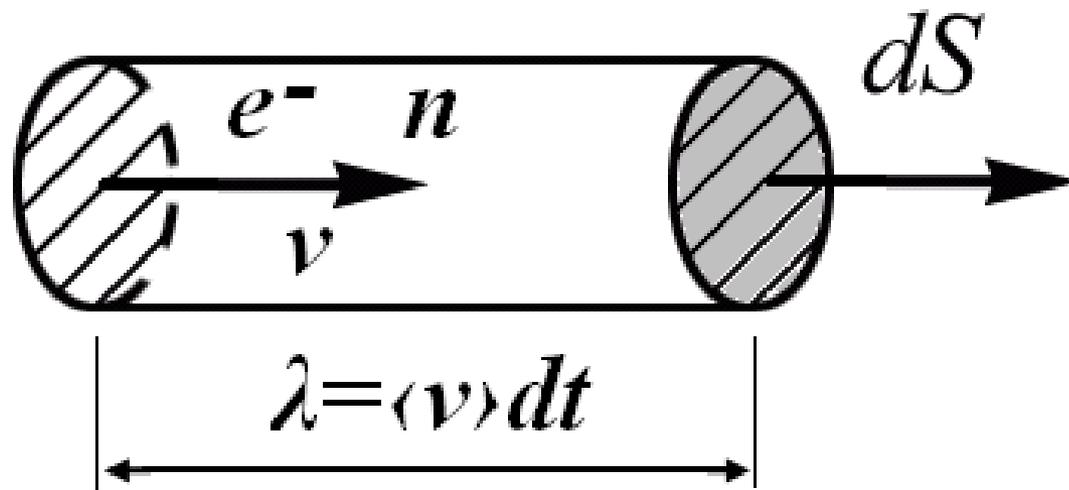
$$\begin{aligned} dI &= \vec{j} d\vec{S} = \\ &= j dS \cos(\angle \vec{j}, d\vec{S}) = \\ &= j dS \cos \alpha = j dS_n \end{aligned}$$

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}$$

$$I = \oint_S (\vec{j} d\vec{S})$$

Связь между силой тока и плотностью тока

Рассмотрим проводник сечением dS .

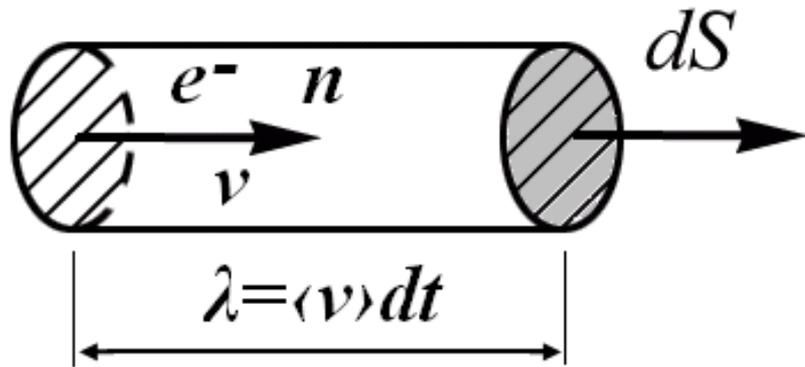


e – элементарный заряд;

n – концентрация зарядов в объеме проводника;

$\langle v \rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения зарядов.

Связь между силой тока и плотностью тока

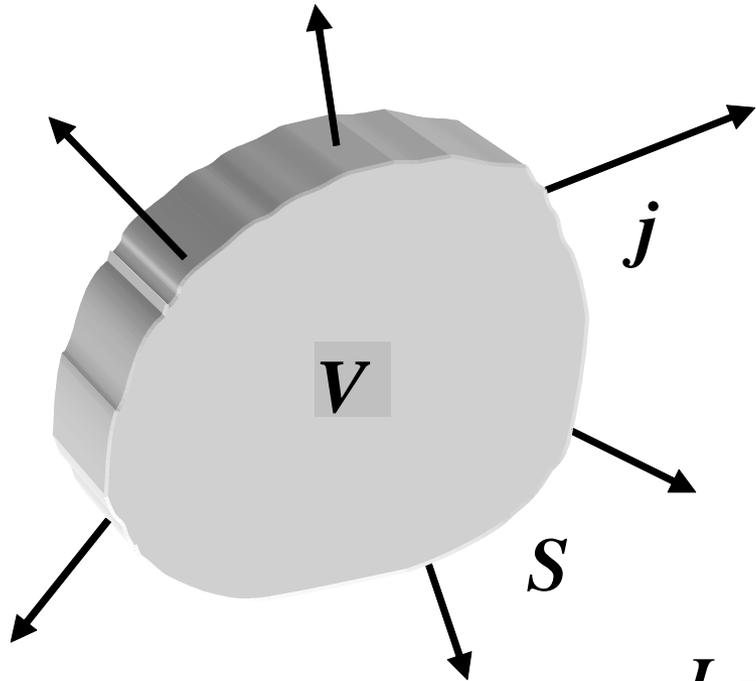


$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$I = \frac{nedV}{dt} = \frac{ne\langle\lambda\rangle dS}{dt} = \frac{ne\langle v \rangle dt dS}{dt} = ne\langle v \rangle dS$$

$$j = \frac{I}{dS} = ne\langle v \rangle$$

Уравнение непрерывности



Теорема
Остроградского-Гаусса:

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = I$$

$$I = -\frac{dq}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

Уравнение непрерывности в интегральной форме

Знак минус в уравнении означает то, что заряды уходят из объема V .

Уравнение непрерывности

$$I = \oint_S \vec{j} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{j} dV$$

$$I = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$



$$\operatorname{div} \vec{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

***Дифференциальная форма записи
уравнения непрерывности***

(закон сохранения заряда).

Знак минус в уравнении означает, что в точках, которые являются источниками тока (j), происходит ***убывание заряда***.

Уравнение непрерывности

В случае постоянного тока (стационарный ток):

Потенциал φ и плотность заряда ρ остаются неизменными, т.е. ρ не зависит от времени t .

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = I = -\frac{dq}{dt} \quad q = \text{const}$$

$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0$$

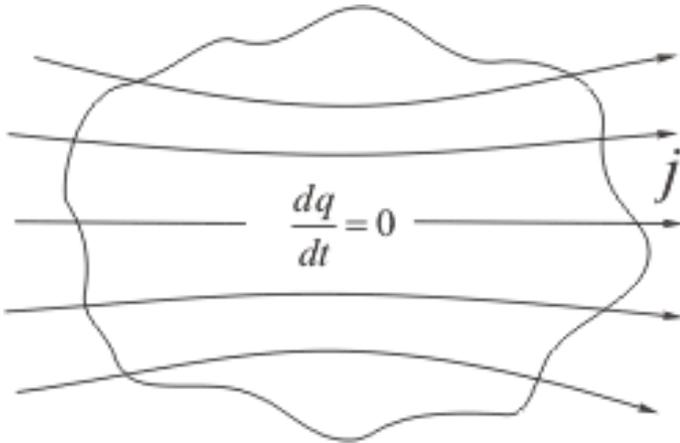
уравнение непрерывности для постоянного тока (в интегральной форме).

$$\text{div} \vec{j} = 0$$

уравнение непрерывности для постоянного тока (в дифференциальной форме).

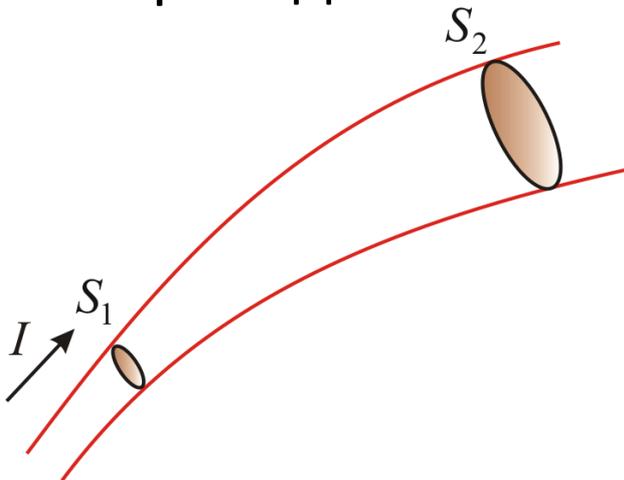
Уравнение непрерывности

Если ток постоянный, то **избыточный заряд** внутри однородного проводника **всюду равен нулю**.



$$\oint_S \vec{j} d\vec{S} = 0$$

Если проводник имеет неоднородное сечение : $I = const$



$$\frac{j_2}{j_1} = \frac{S_1}{S_2}$$

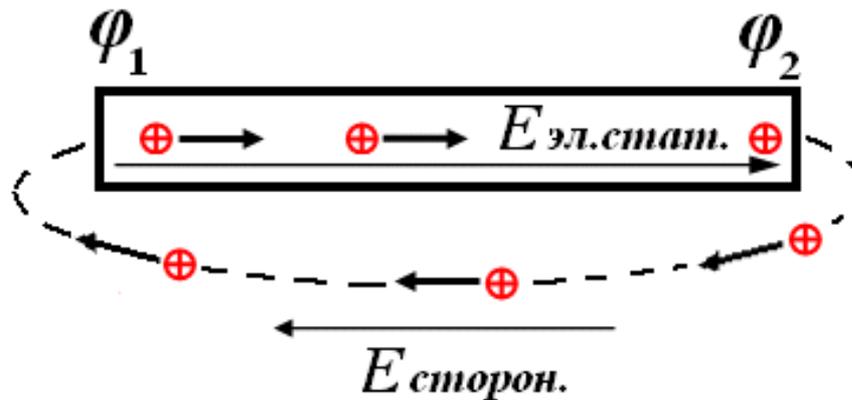
Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

Для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, которое создает и поддерживает разность потенциалов $\Delta\varphi$ за счет работы сил неэлектрического происхождения.

Такие устройства называются *источниками тока* (генераторы – преобразуется механическая энергия; аккумуляторы – энергия химической реакции между электродами и электролитом).

Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

Сторонние силы - силы неэлектрического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока.

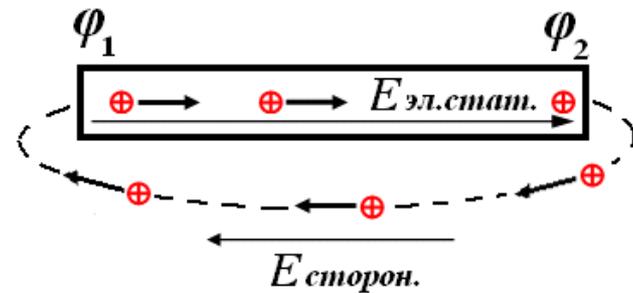


Сторонние силы совершают работу по перемещению электрических зарядов.

Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

Электродвижущая сила (э.д.с. – \mathcal{E}) – физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_{0+}}.$$



$$\mathcal{E} = \oint \vec{E}_{ст} d\vec{l}.$$

Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение.

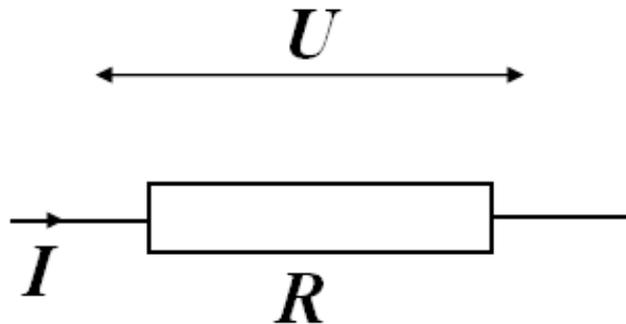
Напряжение на участке цепи-

величина, численно равная работе, совершаемой полем электростатических и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на этом участке цепи

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}.$$

Закон Ома для однородного участка цепи

- **Однородным** называется участок цепи не содержащий источника э.д.с.



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

Закон Ома в интегральной форме: сила тока прямо пропорциональна падению напряжения на однородном участке цепи и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка.

Закон Ома

Закон Ома не является универсальной связью между током и напряжением.

- а) Ток в газах и полупроводниках подчиняется закону Ома только при небольших U .
- б) Ток в вакууме не подчиняется закону Ома.

Закон Богуславского-Лэнгмюра (закон $3/2$):

$$I \sim U^{3/2}.$$

- в) в дуговом разряде – при увеличении тока напряжение падает.
- Неподчинение закону Ома обусловлено зависимостью сопротивления от тока.

Закон Ома

$$[1\text{Ом} = 1\text{В} / 1\text{А}].$$

Величина R зависит от формы и размеров проводника, а также от свойств материала, из которого он сделан.

Для цилиндрического проводника :

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

ρ – удельное электрическое сопротивление [Ом·м], для металлов его величина порядка 10^{-8} Ом·м.

Закон Ома

- Сопротивление проводника зависит от его температуры:

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

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

α – температурный коэффициент сопротивления, для чистых металлов,

ρ_0, R_0 – удельное сопротивление и сопротивление проводника при $t = 0$ °С.

$$T \uparrow \quad \Rightarrow \quad v_{\text{ср}}^{\text{ионов КР}} \sim \sqrt{kT} \uparrow, \quad v_{\text{ср}}^{\text{электронов}} \sim E \downarrow$$

Закон Ома

- Последовательное соединение.

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

- Параллельное соединение.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Закон Ома в дифференциальной форме

$$d\varphi = E dl;$$

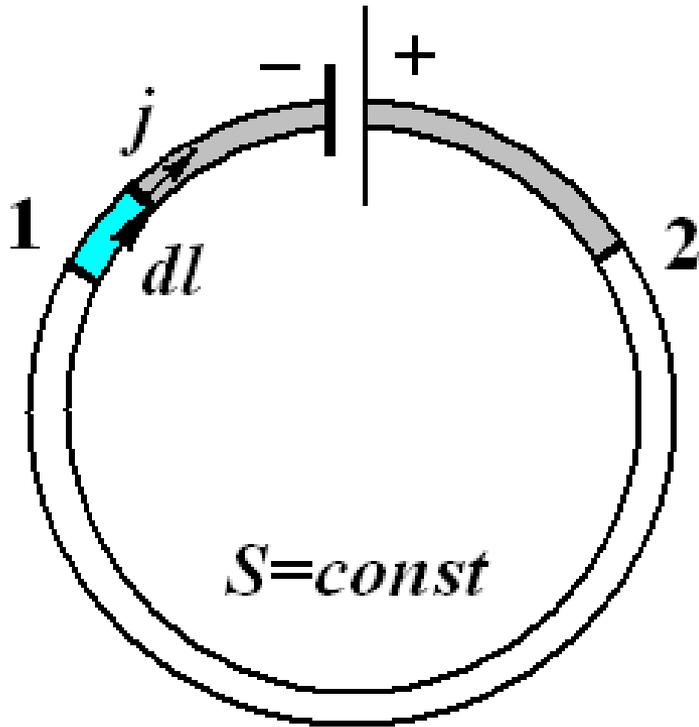
$$dI = \frac{d\varphi}{dR}, \quad jdS = \frac{E dl}{\rho dl} \cdot dS, \quad \Rightarrow \quad j = \frac{E}{\rho}.$$

$\sigma = 1/\rho$ – удельная электрическая проводимость, [сименс на метр, См/м].

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

Закон Ома для неоднородного участка цепи

- **Неоднородный** – участок цепи, содержащий источник э.д.с.

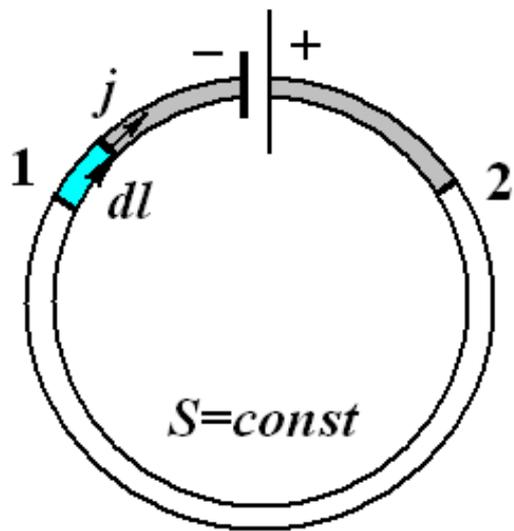


$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_{cm}),$$

E – напряженность поля
кулоновских сил,

E_{cm} – напряженность поля
сторонних сил.

Закон Ома для неоднородного участка цепи

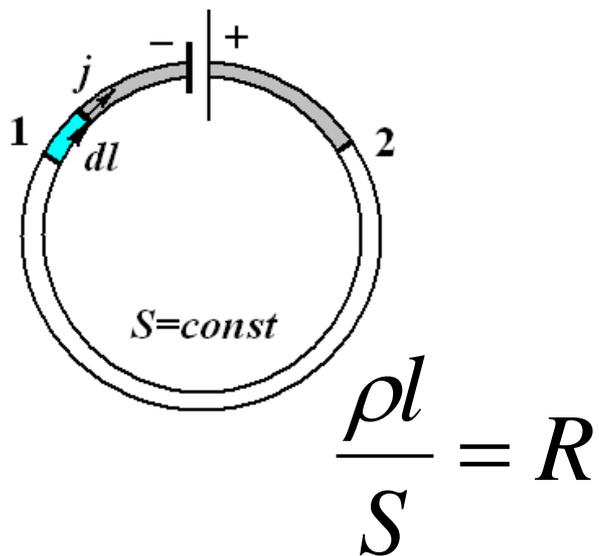


$$d\vec{l} \cdot \vec{j} = \sigma \vec{E} d\vec{l} + \sigma \vec{E}_{cm} d\vec{l}.$$

Вектор $d\vec{l}$ выбрали совпадающим по направлению с вектором плотности тока \vec{j} .

$$d\vec{l} \uparrow\uparrow \vec{j} \uparrow\uparrow \vec{E} \uparrow\uparrow \vec{E}_{cm};$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}; \quad j = \frac{I}{S}.$$



$$\int_1^2 \frac{\rho I}{S} dl = \int_1^2 E dl + \int_1^2 E_{cm} dl,$$

$$\frac{I \rho}{S} l_{21} = \int_1^2 E dl + \int_1^2 E_{cm} dl.$$

$$\int_1^2 E dl = \varphi_1 - \varphi_2$$

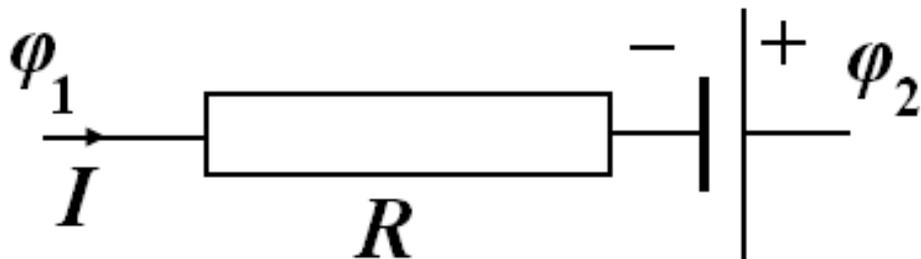
работа, совершаемая кулоновскими силами по перемещению q_{0+} из точки 1 в точку 2.

$$\int_1^2 E_{cm} dl = \mathcal{E}$$

работа, совершаемая сторонними силами по перемещению q_{0+} из точки 1 в точку 2.

- Работа, совершаемая кулоновскими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда q_{0+} – ***падение напряжения (напряжение)***.

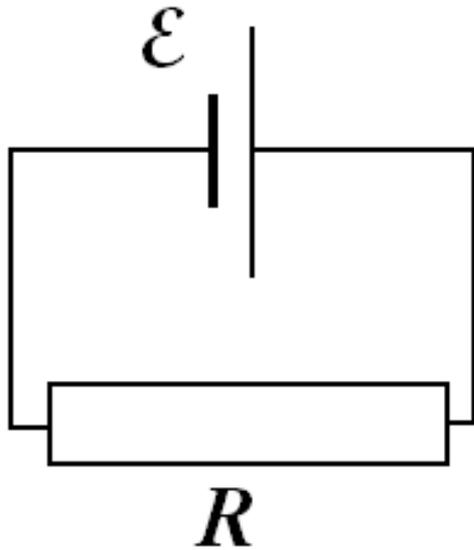
Так как точки 1, 2 были выбраны произвольно, то полученные соотношения справедливы для любых двух точек электрической цепи:



$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}}{R}.$$

Закон Ома для замкнутой цепи

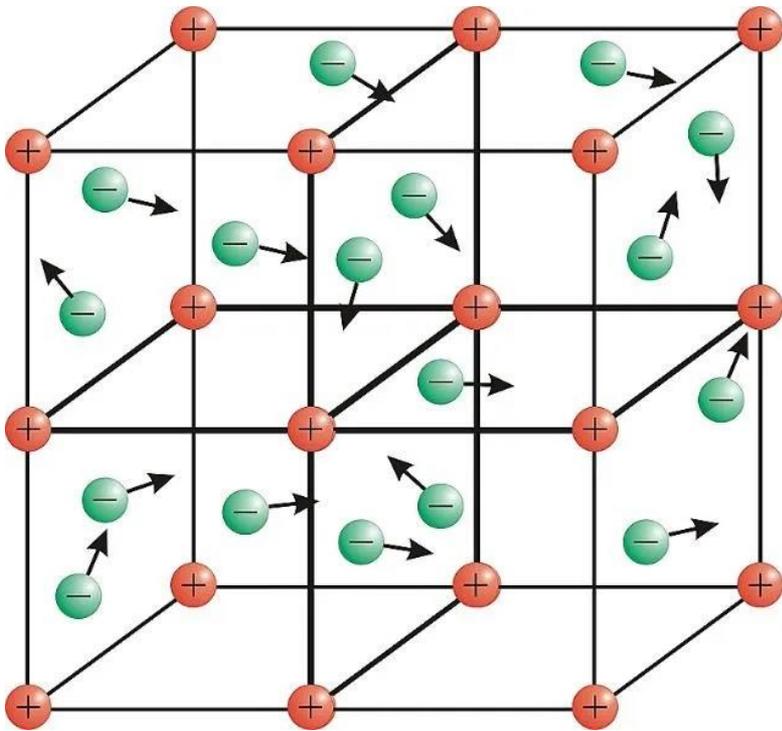
- Если цепь *замкнутая*, то $\varphi_1 = \varphi_2$.



$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{полн}}};$$

$$R_{\text{полн}} = r_{\text{внутр.ист.т.}} + R_{\text{внеш.цепи}}.$$

Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца



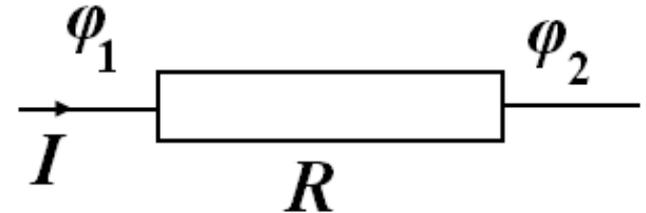
Проводник нагревается.
Выделившееся тепло Q
равно работе тока A .

Мощность
электрического тока:

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

Закон Джоуля-Ленца

- Однородный участок цепи



$$\begin{aligned} A = Q &= q(\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2)I \cdot t = \\ &= IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t. \end{aligned}$$

$$Q = I^2 Rt$$

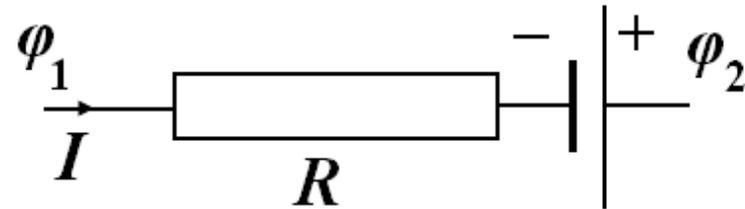
$$P = IU$$

Закон Джоуля-Ленца

- Неоднородный участок цепи

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}) =$$
$$= (\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E})I \cdot t.$$

$$P = (\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E})I.$$



Закон Джоуля-Ленца

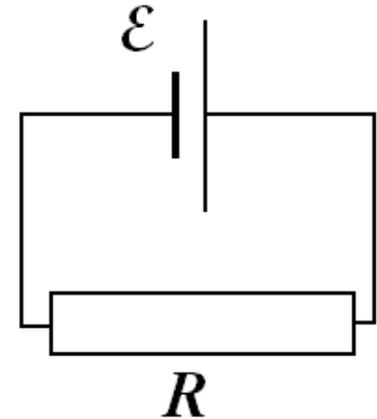
- Замкнутая цепь.

$$A = \mathcal{E}q = \mathcal{E}I \cdot t.$$

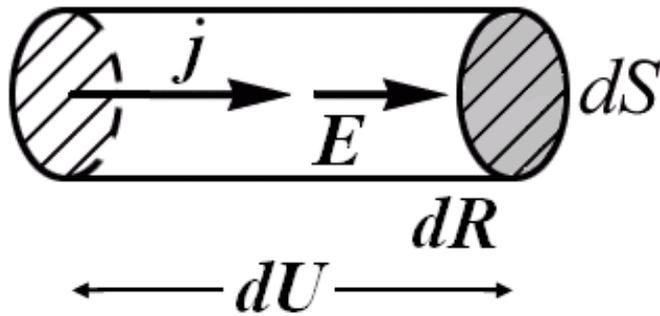
$$P = \mathcal{E}I.$$

- К.п.д. источника тока:

$$\eta = \frac{I^2 R}{I\mathcal{E}} = \frac{U}{\mathcal{E}}.$$



Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме



$$dq = Idt, \quad dA = Udq = IUdt$$

$$dA = dQ$$

$$dQ = IUdt = I^2 Rdt$$

- **Удельная тепловая мощность тока** – количество тепла, выделившееся в единичном объеме за единицу времени.

$$P_{y\partial} = \frac{dQ}{dVdt}$$

$$dQ = (dI)^2 dRdt = \frac{(jdS)^2 \rho dl}{dS} dt = j^2 \rho \underbrace{dSdl}_{dV} \cdot dt$$

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

$$dQ = (dI)^2 dR dt = \frac{(jdS)^2 \rho dl}{dS} dt = j^2 \rho \underbrace{dS dl}_{dV} \cdot dt,$$

$$j = \sigma E.$$

$$dQ = \sigma^2 E^2 \rho dV \cdot dt,$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

$$P_{y\partial} = \frac{dQ}{dV dt} = \sigma E^2.$$

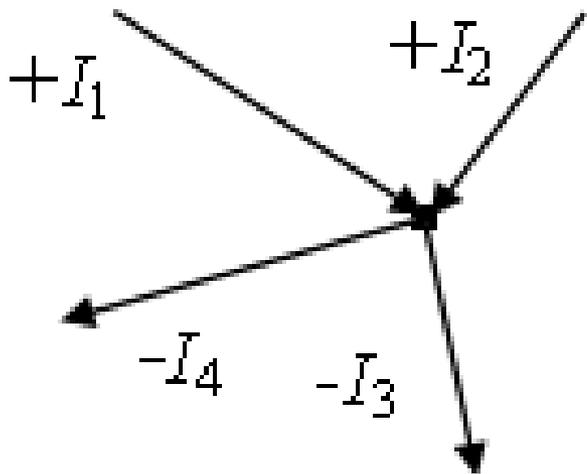
Законы Кирхгофа

Используются для расчета разветвленных цепей постоянного тока.

- *Неразветвленная электрическая цепь* – цепь, в которой все элементы цепи соединены последовательно.
- *Элемент электрической цепи* – любое устройство, включенное в электрическую цепь.
- *Узел электрической цепи* – точка разветвленной цепи, в которой сходится более двух проводников.
- *Ветвь разветвленной электрической цепи* – участок цепи между двумя узлами.

- **Первый закон Кирхгофа** (следствие закона сохранения заряда): алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю.

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



Ток, подходящий к узлу – положительный.
Ток, отходящий от узла – отрицательный.

Пример: $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$.

- **Второй закон Кирхгофа** (обобщенный закон Ома): в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивление соответствующих участков R_i этого контура равна алгебраической сумме э.д.с. в контуре.

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_i.$$

Порядок расчета разветвленной цепи:

1. Произвольно выбрать и обозначить на чертеже направление тока во всех участках цепи.
2. Подсчитать число узлов в цепи (m). Записать первый закон Кирхгофа для каждого из ($m-1$) узлов.
3. Выделить произвольно замкнутые контуры в цепи, произвольно выбрать направления обхода контуров.
4. Записать для контуров второй закон Кирхгофа. Если цепь состоит из p -ветвей и m -узлов, то число независимых уравнений 2-го закона Кирхгофа равно ($p-m+1$).

Электрический ток в электролитах

Электролиты – это водные растворы солей, кислот, щелочей (проводники второго рода).

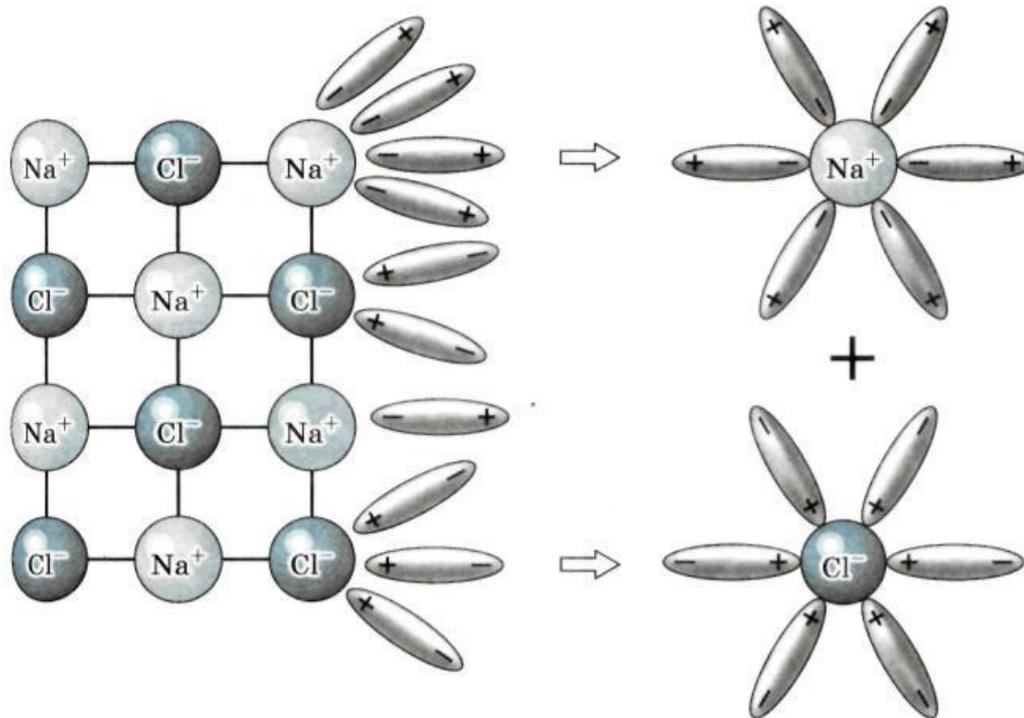
Электролитическая диссоциация – это процесс распада молекул вещества на ионы при его растворении (плавлении).

Рекомбинация – это процесс образования молекулы при столкновении положительного и отрицательного ионов.

Электрический ток в электролитах

Причины электролитической диссоциации

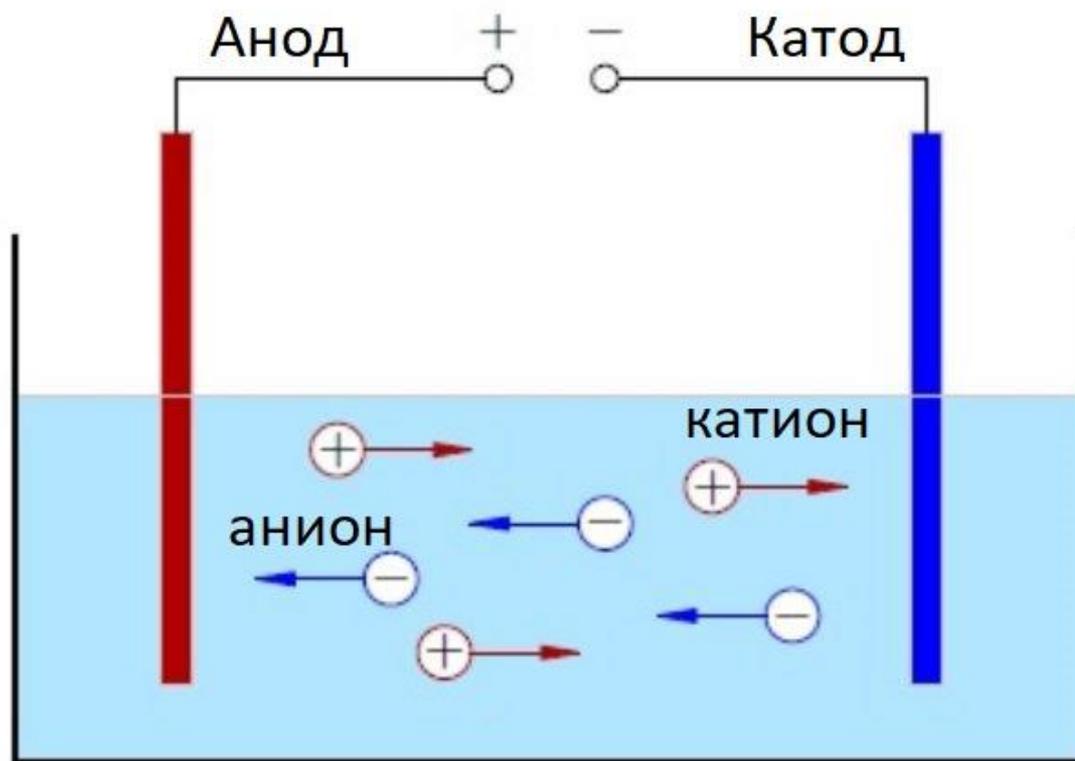
- Тепловое движение полярных молекул растворенного вещества;
- Взаимодействие этих молекул с полярными молекулами растворителя.



Сольватная
оболочка

Гидратированные ионы

Электрический ток в электролитах



Электролиз – процесс выделения на электродах составных частей растворенных веществ или веществ вторичных реакций при протекании электрического тока.

Электрический ток в электролитах

Первый закон Фарадея: масса вещества M , выделившегося на электродах, прямо пропорциональна электрическому заряду Q , прошедшему через электролит.

$$M = kQ = kIt$$

k – электрохимический эквивалент.

Электрохимический эквивалент вещества показывает, сколько (грамм или килограмм, а точнее, какая масса) вещества выделится на катоде при электролизе при прохождении через раствор одного кулона электричества.

Электрический ток в электролитах

Второй закон Фарадея: электрохимический эквивалент вещества k пропорционален отношению молярной массы A ионов этого вещества к их валентности z .

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{z}$$

где $F = 96486,7$ Кл/моль – постоянная Фарадея, определяющая соотношение между электрохимическими и физическими свойствами вещества. Для нее справедливо соотношение:

$$F = eN_A$$

Закон Ома для электролитов

Плотность тока $j = qnv$

$$j = q_+ n_+ v_+ + q_- n_- v_-$$

q и n – заряд и концентрация ионов электролита,

$$q_+ = z_+ e, \quad q_- = z_- e,$$

z – валентность ионов.

$$z_+ = z_- = z, \quad n_+ = n_- = n,$$

так как в электролите происходит диссоциация нейтральных молекул.

$$j = zne(v_+ + v_-)$$

Закон Ома для электролитов

$$z_+ e E - F_{mp} = 0$$

Закон Стокса: $F_{mp} = 6\pi\eta \cdot r_+ v_+$,

η – коэффициент вязкости среды,

r_+ – радиус иона (сольватной оболочки).

$$v_+ = \frac{z_+ e}{6\pi\eta r_+} E.$$

Введем $u_+ = \frac{z_+ e}{6\pi\eta r_+}$ – подвижность ионов

(скорость ионов при единичной напряженности E)

Закон Ома для электролитов

Плотность тока

$$j = zne(u_+ + u_-)E$$

Закон Ома для электролитов в дифференциальной форме.

Принимая во внимание, что $j = \sigma E$

Следовательно для электролитов удельная проводимость:

$$\sigma = zne(u_+ + u_-)$$

Электрический ток в газах

Ионизация атома (молекулы) – это процесс расщепления атома (молекулы) на положительные ионы и электроны.

Работа ионизации:

$$A_i = e\varphi$$

Потенциал ионизации φ – разность потенциалов, которую должен пройти электрон, чтобы приобрести энергию, необходимую для ионизации молекулы.

Закон Ома:

$$j = zne(u_+ + u_-)E$$

Электрический ток в газах

Ионизация газа вызывается внешним воздействием:

- Термическая ионизация
- Космические лучи
- Радиоактивное излучение
- Ударная ионизация: бомбардировка ускоренными электронами и ионами с энергией большей чем энергия связи электрона и ядра
- Фотоионизация – ионизация фотонами

Количественная мера ионизации:

Интенсивность ионизации α - число пар ионов противоположного знака, образовавшихся за единицу времени t в единице объема V .

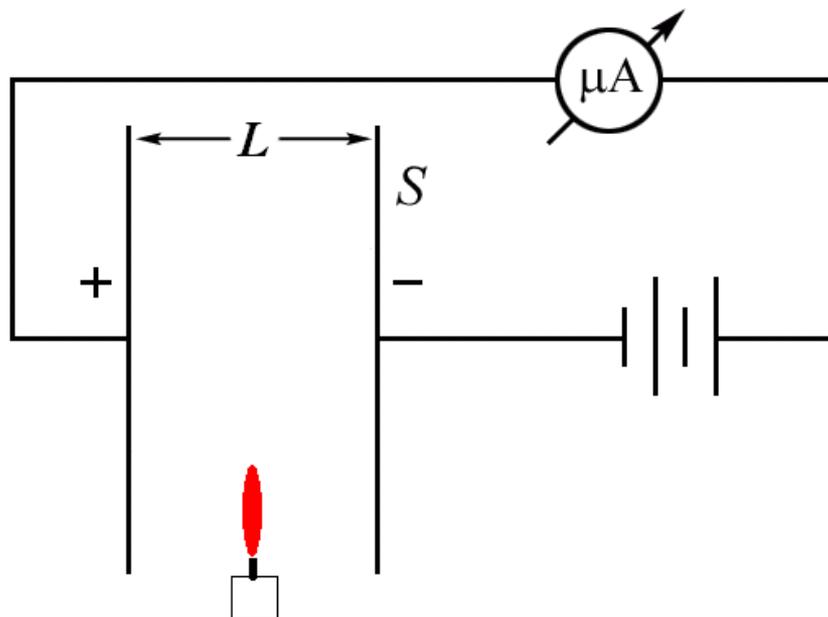
Газовый разряд

Газовый разряд – это процесс протекания электрического тока через газ.

Несамостоятельный газовый разряд – г. р-д, вызванный внешними ионизаторами, который прекращается при прекращении действия ионизатора.

Самостоятельный газовый разряд – это г. р-д, который существует после прекращения действия внешнего ионизатора.

Несамостоятельный газовый разряд



Если в газовый промежуток длиной L между двумя пластинами площадью S внести пламя свечи, то во внешней цепи будет протекать ток. Если пламя убрать – ток исчезает.

Несамостоятельный газовый разряд

Процессы, происходящие при газовом разряде:

- Ионизация – прибыль ионов;
- Рекомбинация – убыль ионов;
- Разрядка ионов на электродах – убыль ионов.

$$SL \frac{dn}{dt} = \alpha SL - \beta n^2 SL - \frac{jS}{e}$$

- уравнение баланса ионов

n - концентрация ионов,

α - интенсивность ионизации,

β - коэффициент рекомбинации.

Несамостоятельный газовый разряд

- В установившемся режиме: $n = const$, $dn/dt = 0$.

$$\alpha SL - \beta n^2 SL - \frac{jS}{e} = 0, \quad \alpha - \beta n^2 - \frac{j}{eL} = 0.$$

- В слабых полях рекомбинация ионов значительно интенсивнее разрядки ионов на электродах:

$$\beta n^2 \gg \frac{j}{eL}. \quad \alpha - \beta n^2 = 0 \quad \Rightarrow n = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}$$

$$j = ne(u_+ + u_-)E = e \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} (u_+ + u_-)E$$

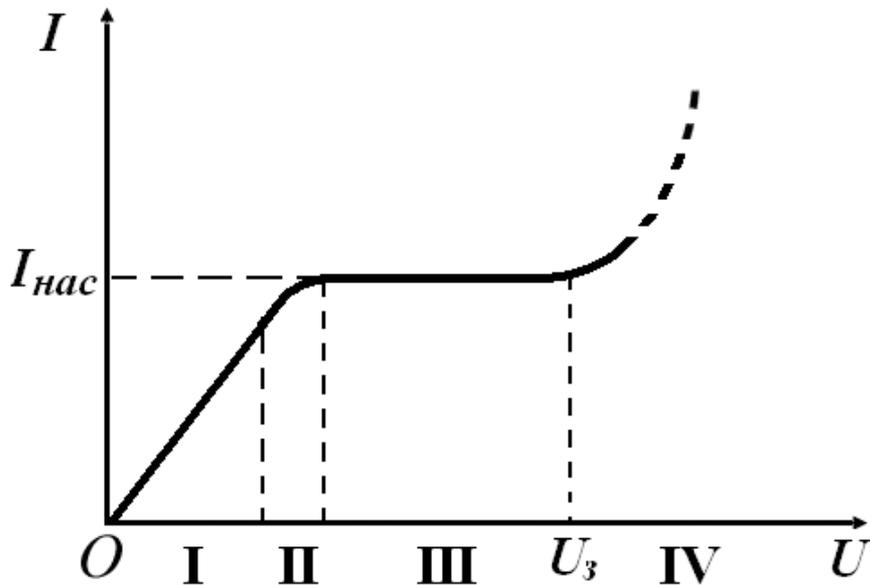
Закон Ома при слабых полях выполняется

Несамостоятельный газовый разряд

- В сильных полях практически все образующиеся ионы достигают электродов, не успев рекомбинировать.

$$\beta n^2 \ll \frac{j}{eL}. \quad \alpha - \frac{j}{eL} = 0 \quad \Rightarrow \quad j = \alpha eL$$

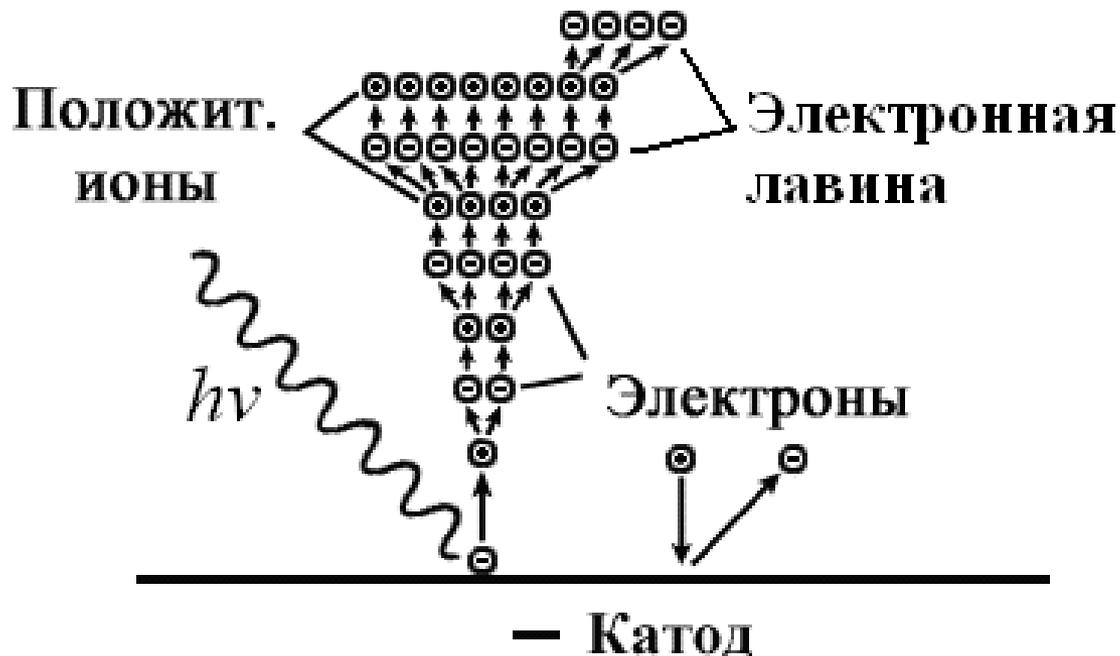
Закон Ома не выполняется



I – закон Ома выполняется,
II – сила тока растет медленнее,
III – насыщение,
IV – закон Ома не выполняется.

U_3 – напряжение зажигания.

Самостоятельный газовый разряд



Электрический пробой газа – процесс при котором несамостоятельный разряд переходит в самостоятельный .

Самостоятельный газовый разряд

Процессы, способствующие существованию самостоятельного разряда:

- *термоэлектронная эмиссия* – испускание электронов нагретыми телами,
- *фотоионизация* – ионизация молекул фотонами,
- *фотоэлектронная эмиссия* – испускание электронов под действием фотонов,
- *автоэлектронная эмиссия* – вырывание электронов из металла электрическим полем.

Самостоятельный газовый разряд

Типы самостоятельных разрядов:

- *Тлеющий разряд* наблюдается при низком давлении (порядка 0,01 мм.рт.ст.), является следствием ударной ионизации и вторичной электронной эмиссии.
- *Коронный разряд* возникает на «остриях».
- *Искровой разряд* возникает при фотоэмиссии.
- *Дуговой разряд* возникает при термоэлектронной эмиссии.

Ток в вакууме

**Закон Богуславского-Ленгмюра
«закон трех вторых»**

Самостоятельно!