

## Литература:

Трофимова Т.И. – Курс Физики

Савельев И.В. – Курс общей физики, том 2 – Электричество

Савченко Н.Е. – Решение задач по физике

Фирганг Е.В. - Руководство к решению задач по курсу общей физике

**Электрический заряд** – физическая величина, определяющая интенсивность электромагнитных взаимодействий, т.е. взаимодействий между заряженными частицами и телами



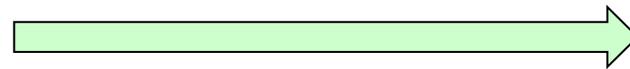
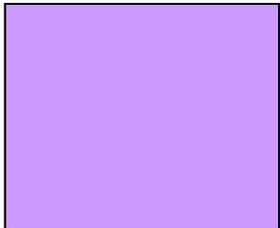
Положительный заряд :  
Протон, позитрон, ион атома металла



Отрицательный заряд :  
Электрон, антипротон



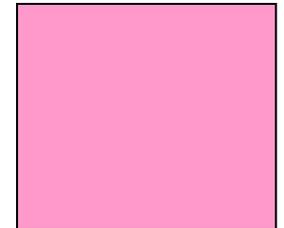
Нейтральное тело



**Электризация**

- 1) Соприкосновение
- 2) Трение
- 3) Электростатическая индукция
- 4) Фотоэффект

Наэлектризованные тела



**Закон сохранения заряда:** алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (системы, не обменивающейся зарядами с внешними телами) остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри этой системы.

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$$

В зависимости от концентрации свободных зарядов тела делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники.

**Проводники** — тела, в которых электрический заряд может перемещаться по всему его объему.



**Проводники первого рода (металлы)**

Перенос зарядов (свободных электронов) не сопровождается химическими превращениями;



**Проводники второго рода**

(расплавленные соли, растворы кислот)

Перенос зарядов (положительных и отрицательных ионов) ведет к химическим изменениям.

**Полупроводники**

(германий, кремний)

**Диэлектрики** (стекло, пластмассы)

— тела, в которых практически отсутствуют свободные заряды.

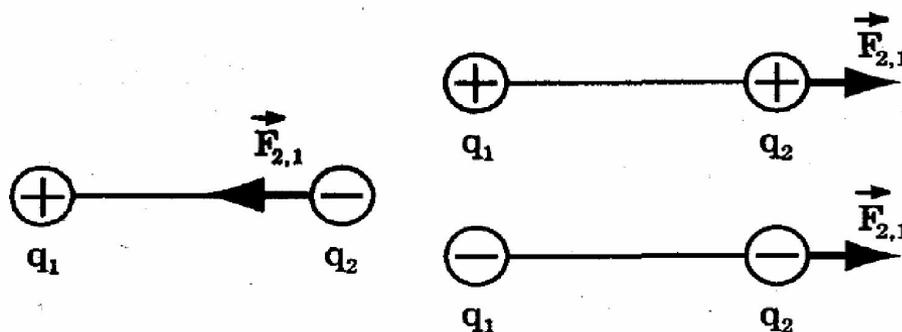
**Точечный заряд** – заряд, сосредоточенный на теле, линейные размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других заряженных тел, с которыми он взаимодействует.

Закон Кулона: сила взаимодействия  $F$  между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, пропорциональна зарядам  $q_1$  и  $q_2$  и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними:

$$F = k \frac{|q_1| \times |q_2|}{r^2}$$

В СИ коэффициент пропорциональности  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$

Электрическая постоянная



Кулоновская сила  $F$  направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды, т. е. является центральной, и соответствует притяжению ( $F < 0$ ) в случае разноименных зарядов и отталкиванию ( $F > 0$ ) в случае одноименных зарядов.

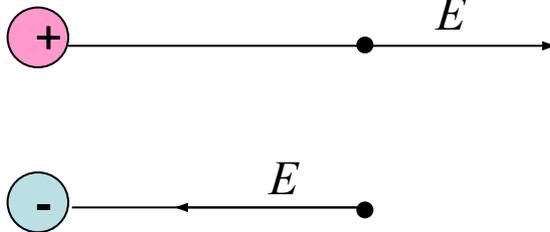
Если в пространство, окружающее электрический заряд, внести другой заряд, то на него будет действовать кулоновская сила; значит, в пространстве, окружающем электрические заряды, существует **силовое поле**.

**Электрическое поле** — особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между электрически заряженными частицами. Электрические поля, которые создаются неподвижными электрическими зарядами называются *электростатическими*.

**Напряженность** электростатического поля в данной точке — силовая характеристика поля, физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{|q|}$$

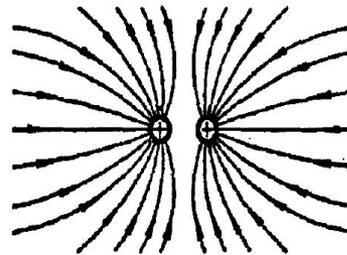
*линии напряженности* (силовые линии) — линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора  $E$



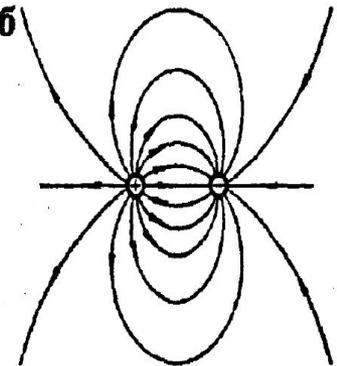
Напряженность поля точечного заряда

$$E = k \frac{|q_0|}{r^2}$$

**а**



**б**

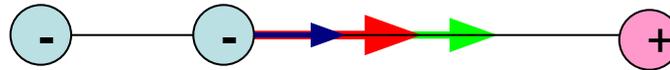


Сила, действующая на заряд, помещенный в электрическое поле

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

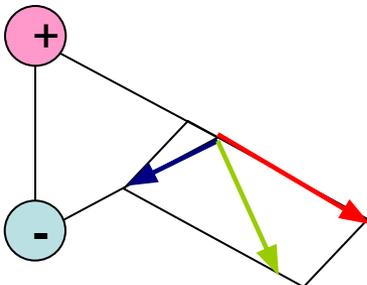
Если электрическое поле образовано несколькими зарядами, то результирующая сила, действующая со стороны поля на пробный заряд, равна векторной сумме сил приложенных к нему со стороны каждого из зарядов

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i.$$

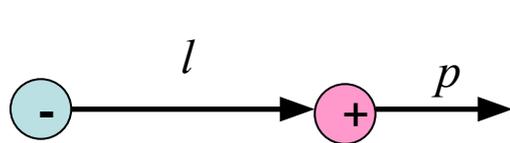


**Принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей**, согласно которому напряженность  $E$  результирующего поля, создаваемого системой зарядов, равна геометрической сумме напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$$



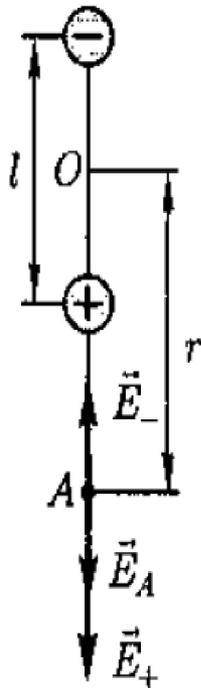
Электрический диполь - система двух равных по модулю разноименных точечных зарядов  $(+q, -q)$ , расстояние  $l$  (плечо диполя) между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля.



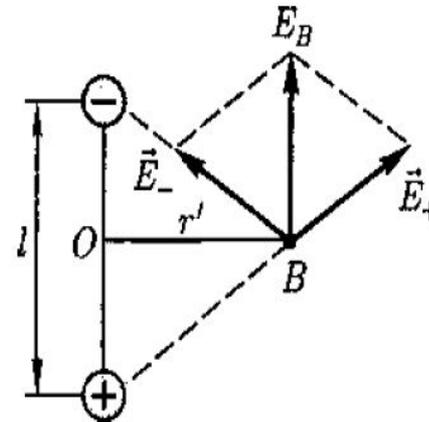
$$\vec{p} = |q|\vec{l}$$

Электрический момент диполя или дипольным моментом

напряженность поля диполя в произвольной точке  $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$ ,

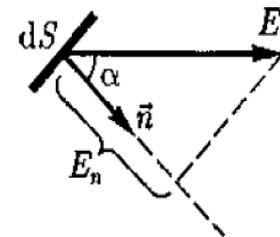


$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}$$



$$E_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ql}{(r')^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{(r')^3}$$

Поток вектора напряженности через площадку  $dS$   $d\Phi = E dS$



Для произвольной замкнутой поверхности  $S$  поток вектора  $E$  через эту поверхность

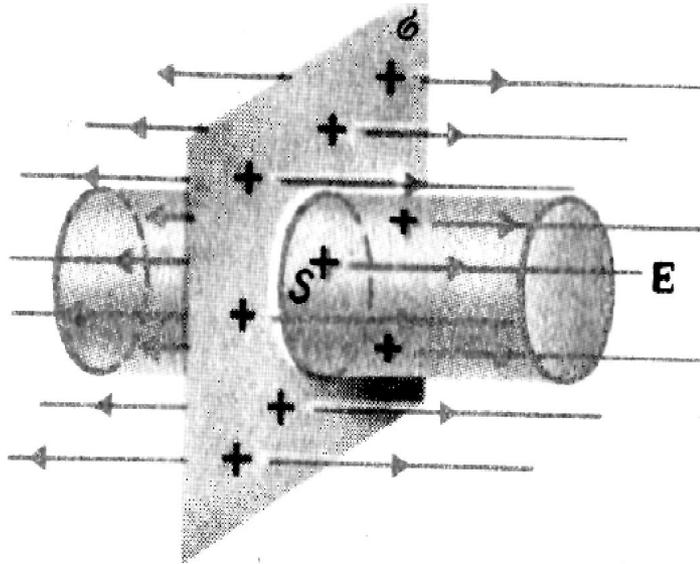
$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S \vec{E} d\vec{S},$$

*Теорема Остроградского - Гаусса для электростатического поля в вакууме:* поток вектора напряженности электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленной на  $\epsilon_0$ .

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i$$

В общем случае электрические заряды могут быть «размазаны» с некоторой объемной плотностью. Тогда теорему можно записать так

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$



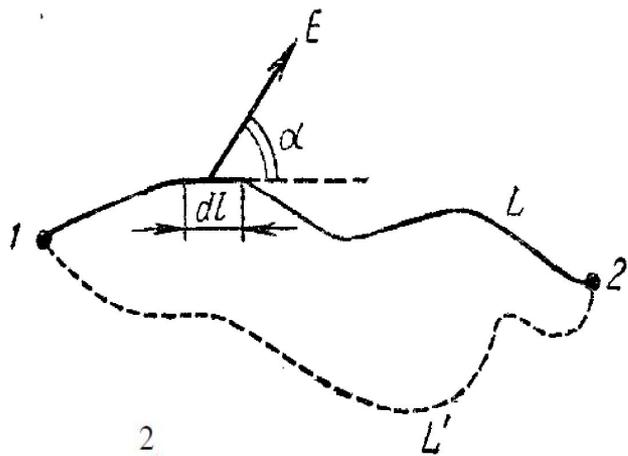
$$\sigma = \frac{q}{S}$$

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0},$$

$$2ES = \frac{\sigma S}{\epsilon_0}$$

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



Пусть в электростатическом поле точечного заряда  $q$  из точки 1 в точку 2 вдоль произвольной траектории перемещается другой точечный заряд  $q_0$ , отрезок настолько мал, что в его пределах напряженность постоянна, тогда сила, приложенная к заряду, совершает элементарную работу  $\bar{d}A = F \cdot \bar{d}l \cos \alpha$ .

$$A_{12} = \int_1^2 F dl \cos \alpha$$

Полная работа не зависит от траектории перемещения, а определяется только положениями начальной и конечной точек. Значит электростатическое поле точечного заряда потенциальное, а электростатические силы - консервативные

↓

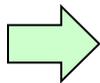
$$\oint_L dA = 0$$

работа, совершаемая при перемещении электрического заряда во внешнем электростатическом поле по любому замкнутому пути  $L$ , равна нулю,

Если заряд - единичный точечный положительный

$$dA = \vec{E} \cdot \vec{dl}$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot \vec{dl} = 0$$



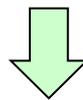
Силовые линии не могут быть замкнутыми, они начинаются и кончаются на положительных или отрицательных зарядах или же уходят в бесконечность.

циркуляция вектора напряженности.

справедливо только для электростатического поля

Тело, находящееся в потенциальном поле сил обладает потенциальной энергией, за счет которой силами поля совершается работа.

Работа консервативных совершается за счет убыли потенциальной энергии.



$$A_{12} = U_1 - U_2$$

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r}$$
 потенциальная энергия заряда  $q_0$  в поле заряда  $q$

Для одноименных зарядов потенциальная энергия их взаимодействия (отталкивания) положительна, для разноименных зарядов потенциальная энергия их взаимодействия (притяжения) отрицательна

Если поле создается системой  $n$  точечных зарядов  $q_i$  точечных зарядов, то работа электростатических сил, совершаемая над зарядом  $q_0$ , равна алгебраической сумме работ сил, обусловленных каждым из зарядов в отдельности. Тогда потенциальная энергия заряда  $q_0$

$\varphi = U / q_0$  энергетическая характеристика электростатического поля, или **потенциал**

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = q_0 \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i}$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

потенциал поля точечного заряда

Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2

$$A_{12} = U_1 - U_2 = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2)$$

Разность потенциалов двух точек 1 и 2 в электростатическом поле определяется работой, совершаемой силами поля, при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2.

Напряженность –  
силовая характеристика поля

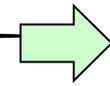
Потенциал –  
энергетическая характеристика поля

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi$$

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}, E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}.$$

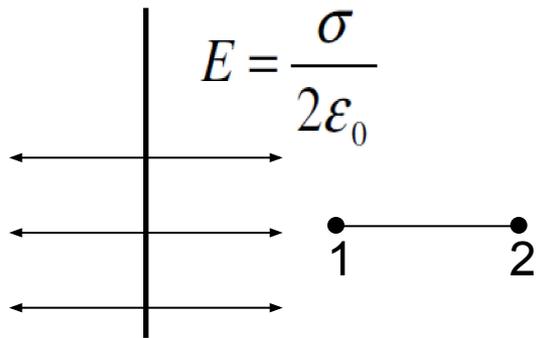
$$A_{12} = \int_1^2 Q_0 \vec{E} d\vec{l}.$$

$$A_{12} = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$$

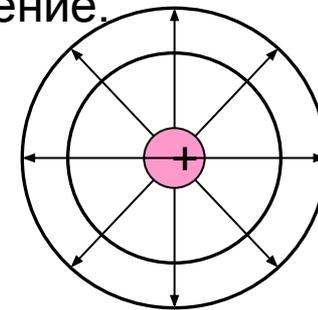


$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = \int_1^2 E_l dl,$$

**эквипотенциальные поверхности** -  
поверхности, во всех точках которых потенциал  
имеет одно и то же значение.



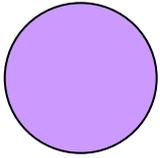
$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{x_1}^{x_2} E dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma}{2\epsilon_0} dx = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (x_2 - x_1).$$



$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

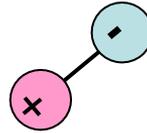
$$\vec{p} = |q|\vec{l}$$

Дипольный момент молекулы равен нулю. Молекулы называются неполярными.

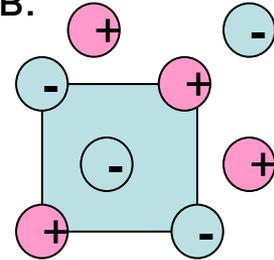


## Диэлектрики

Молекулы обладают дипольным моментом и называются полярными.

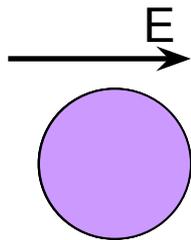


Ионные кристаллы - пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков.

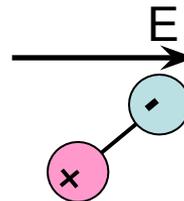


**Поляризация** диэлектрика - процесс ориентации диполей или появления под воздействием электрического поля ориентированных по полю диполей.

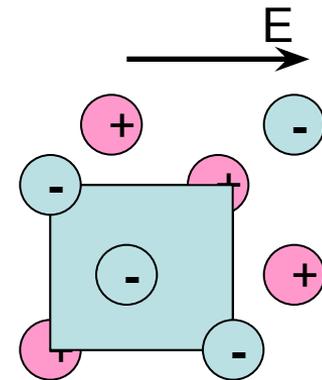
*электронная, или деформационная*



*ориентационная, или дипольная*



*ионная поляризация*



При помещении диэлектрика во внешнее электрическое поле он поляризуется, т. е. приобретает отличный от нуля дипольный момент  $\vec{p}_V = \sum_i \vec{p}_i$

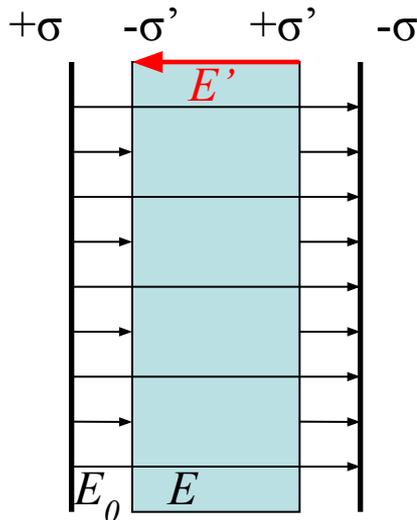
**Поляризованность** - дипольный момент единицы объема диэлектрика

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}_V}{V} = \frac{\sum_i \vec{p}_i}{V}$$

Для большого класса диэлектриков поляризованность  $P$  линейно зависит от напряженности поля  $E$

$$P = \chi \varepsilon_0 E$$

*диэлектрическая восприимчивость вещества*, характеризует свойства диэлектрика



Результирующее поле внутри диэлектрика

$$E = E_0 - E' = E_0 - \frac{\sigma'}{\varepsilon_0}$$

$$\sigma' = P$$

$$\varepsilon = 1 + \chi$$

*диэлектрическая проницаемость среды*, показывает, во сколько раз поле ослабляется диэлектриком

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon} \quad \text{или} \quad E = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0}$$

$$E = \frac{E_0}{\epsilon}$$

$E_0$

$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$  **вектор электрического смещения**  
(для электрически изотропной среды)

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

*Результирующее поле в диэлектрике описывается вектором напряженности  $E$ , и потому он зависит от свойств диэлектрика*

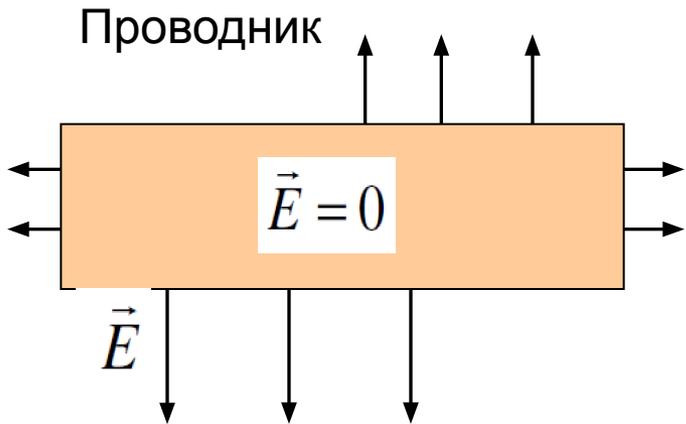
Вектором  $D$  описывается электростатическое поле, создаваемое *свободными зарядами* (т.е. в вакууме), но при таком их распределении в пространстве, какое имеется при *наличии диэлектрика*.

*Линии вектора  $E$  могут начинаться и заканчиваться на любых зарядах - свободных и связанных, в то время как линии вектора  $D$  - только на свободных зарядах*

### **Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике**

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n q_i$$

поток вектора смещения электростатического поля в диэлектрике сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности *свободных* электрических зарядов

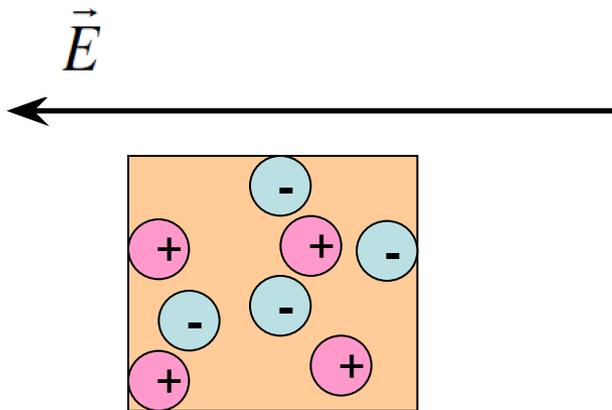


Поверхность проводника в электростатическом поле является *эквипотенциальной*, вектор напряженности поля на внешней поверхности проводника направлен по нормали к каждой точке его поверхности

Если проводнику сообщить некоторый заряд  $Q$ , то uncompensated charges are located *only on the surface* of the conductor

Смещение и напряженность электростатического поля у поверхности проводника определяется поверхностной плотностью зарядов

$$D = \sigma \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon}$$



Явление перераспределения поверхностных зарядов на проводнике во внешнем электростатическом поле называется ***электростатической индукцией***

*индуцированные заряды*

Разные проводники, будучи одинаково заряженными, принимают различные потенциалы.

для уединенного проводника  $q = C\varphi$

$C = \frac{q}{\varphi}$  **емкость** (или просто емкость) уединенного проводника.

Емкость проводника зависит от его размеров и формы, но не зависит от материала, агрегатного состояния, формы и размеров полостей внутри проводника. Это связано с тем, что избыточные заряды распределяются на внешней поверхности проводника. Емкость не зависит также ни от заряда проводника, ни от его потенциала.

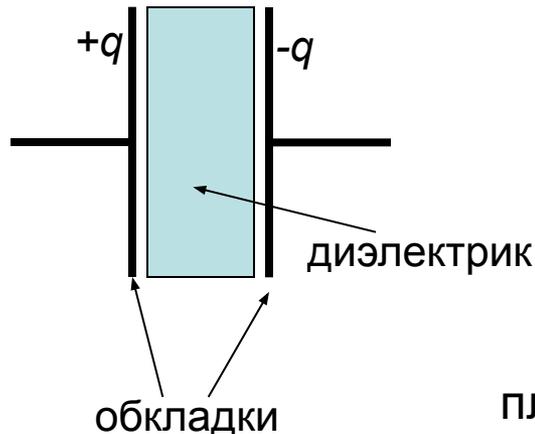
$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon R}$  потенциал уединенного шара радиуса  $R$ , находящегося в однородной среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$



$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R$  емкость этого шара

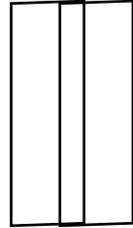
Большая емкость проводника требует очень больших размеров

**Конденсатор** - устройство, обладающее способностью при малых размерах и небольших относительно окружающих тел потенциалах накапливать значительные по величине заряды, т.е. обладающий большой емкостью

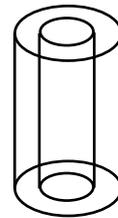


На емкость конденсатора не должны оказывать влияния окружающие тела, поэтому проводникам придают такую форму, чтобы поле, создаваемое накапливаемыми зарядами, было сосредоточено в узком зазоре между обкладками конденсатора.

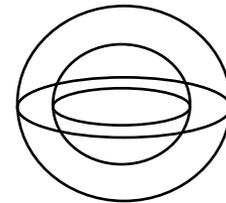
плоские, цилиндрические и сферические конденсаторы



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



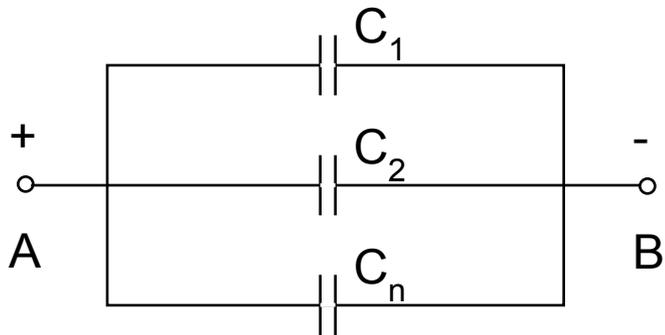
$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$



$$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2}$$

Емкость конденсатора - физическая величина, равная отношению заряда  $q$ , накопленного в конденсаторе, к разности потенциалов между его обкладками

## Параллельное соединение конденсаторов



Разность потенциалов на обкладках  $\varphi_A - \varphi_B$

$$Q_1 = C_1(\varphi_A - \varphi_B),$$

$$Q_2 = C_2(\varphi_A - \varphi_B),$$

.....

$$Q_n = C_n(\varphi_A - \varphi_B),$$

заряды отдельных конденсаторов

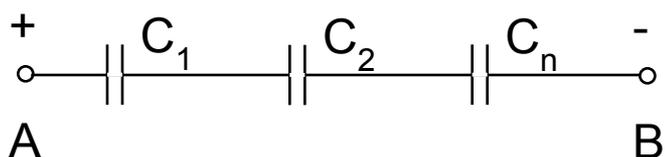
заряд батареи

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = (C_1 + C_2 + \dots + C_n)(\varphi_A - \varphi_B)$$

Полная емкость батареи

$$C = \frac{Q}{\varphi_A - \varphi_B} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i$$

## Последовательное соединение конденсаторов



заряды всех обкладок равны по модулю, а разность потенциалов на зажимах батареи

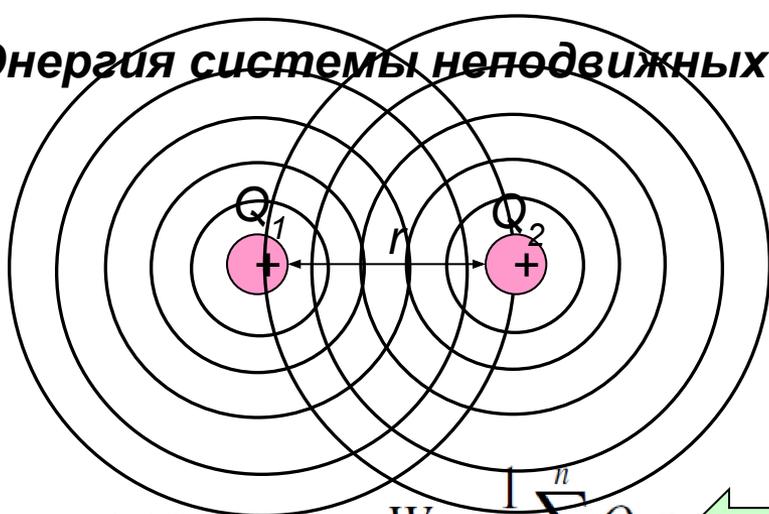
$$\Delta\varphi = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i$$

$$\Delta\varphi_i = \frac{Q}{C_i} \quad \Delta\varphi = \frac{Q}{C} = Q \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

Полная емкость батареи

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

## Энергия системы неподвижных точечных зарядов



$$\left. \begin{aligned} W_2 &= Q_2 \varphi_{21} & \varphi_{12} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2}{r} \\ W_1 &= Q_1 \varphi_{12} & \varphi_{21} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{r} \end{aligned} \right\} W_1 = W_2 = W$$

n зарядов -  $W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i \varphi_i$  ←  $W_1 = Q_1 \varphi_{12} = Q_2 \varphi_{21} = \frac{1}{2} (Q_1 \varphi_{12} + Q_2 \varphi_{21})$

## Энергия заряженного уединенного проводника

Q, C, φ

$$dA = \varphi \cdot dQ = C \varphi \cdot d\varphi \quad \Rightarrow \quad A = \int_0^\varphi C \varphi \cdot d\varphi = \frac{C \varphi^2}{2} \quad \Rightarrow \quad W = \frac{C \varphi^2}{2} = \frac{Q \varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

## Энергия заряженного конденсатора

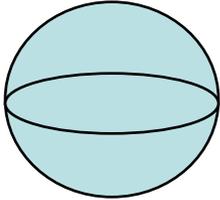
$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{Q\Delta\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C} \quad \Rightarrow \quad C = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot S}{d} \quad \Delta\varphi = Ed \quad \Rightarrow \quad W = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} Sd = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V$$

**Объемная плотность** энергии  
электростатического поля  
(энергия единицы объема)

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}$$

## Постоянный электрический ток

Электрический ток - любое упорядоченное (направленное) движение электрических зарядов.

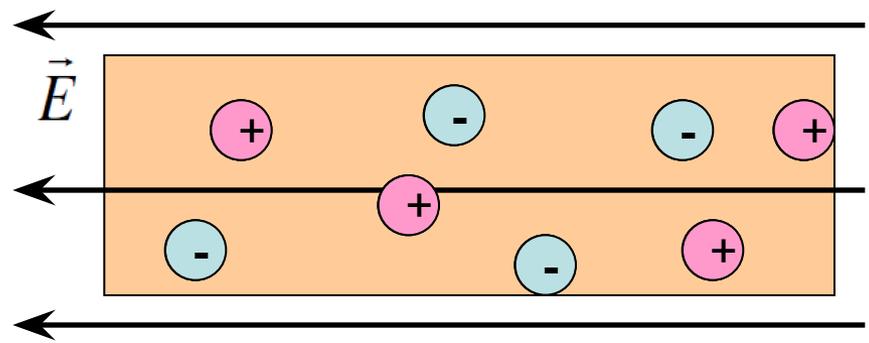


перемещение в пространстве заряженного макроскопического тела - *конвекционный ток*.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо:

- 1) свободные *носители тока* — заряженные частицы способные перемещаться упорядоченно,
- 2) *электрическое поле*, энергия которого, каким-то образом восполняясь, расходуется на их упорядоченное движение.

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



В проводнике возникает *ток проводимости*.

Количественная мера электрического - **сила тока  $I$**  - скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени

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

Если сила тока  **$i$**  и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется **постоянным**. Для постоянного тока

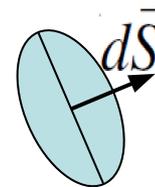
$$I = \frac{Q}{t}$$

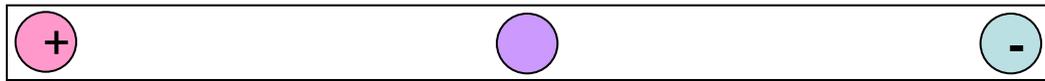
**плотность тока** - сила тока, проходящая через единицу площади поперечного сечения проводника, перпендикулярно направлению тока

$$j = \frac{dI}{dS} \quad \vec{j} = ne\langle \vec{v} \rangle \quad \begin{array}{l} v - \text{скорость упорядоченного движения} \\ \text{зарядов в проводнике. } n - \text{концентрация} \end{array}$$

Сила тока сквозь произвольную поверхность  $S$

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





Если в цепи на носители тока действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение носителей от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. Это приводит к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и к исчезновению электрического поля.

Для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счет работы сил *неэлектростатического происхождения*. Такие устройства называются **источниками тока**.

**Силы неэлектростатического происхождения**, действующие на заряды со стороны источников тока, называются **сторонними**.



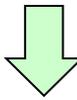
Под действием создаваемого поля сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника тока против сил электростатического поля, благодаря чему на концах цепи поддерживается разность потенциалов и в цепи течет постоянный ток.

Физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется **электродвижущей силой** (ЭДС), действующей в цепи

$$\mathcal{E} = \frac{A_c}{q}$$

Работа по перемещению заряда в цепи совершается и сторонними и кулоновскими силами  $A = A_e + A_c$

Физическая величина, определяемая работой, совершаемой суммарным полем электростатических (кулоновских) и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи - **напряжение**

$$\frac{A_e}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi,$$
$$U = \frac{A}{q}, \text{ или } U = \frac{A_e}{q} + \frac{A_c}{q}$$

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

**Закон Ома для участка цепи** (не содержащего источника тока): сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника

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

Сопротивление проводников зависит от его размеров и формы, а также от материала, из которого проводник изготовлен. Для однородного линейного проводника

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

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \begin{array}{l} \text{удельная электрическая} \\ \text{проводимость} \end{array}$$

*удельное электрическое сопротивление*

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

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

Сопротивление зависит от температуры.

$\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления

**закон Ома в дифференциальной форме** связывает плотность тока в любой точке внутри проводника с напряженностью электрического поля в этой же точке. Это соотношение справедливо и для переменных полей.

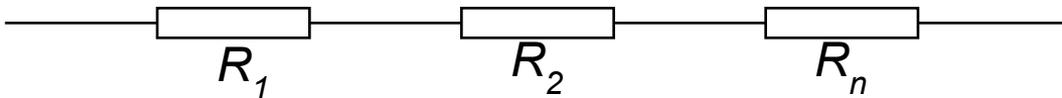
$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи (содержащего ЭДС) в интегральной форме

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R}$$

Закон Ома для замкнутой цепи:  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$

**Последовательное соединение проводников**

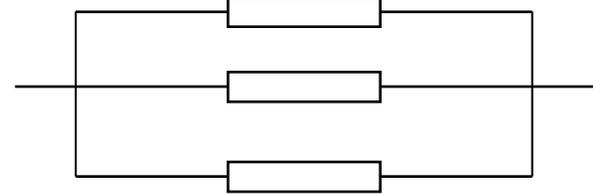


$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

**Последовательное соединение источников тока**

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n}{R + r_1 + r_2 + \dots + r_n}$$

**Параллельное соединение проводников**



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

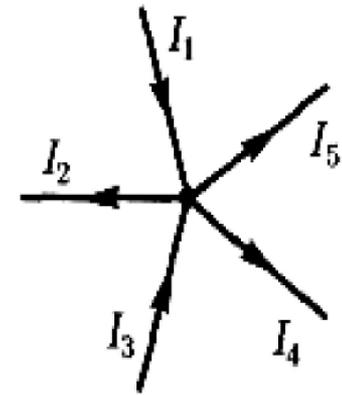
**Параллельное соединение одинаковых источников тока**

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

## Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

**Первое правило Кирхгофа:** алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю

$$\sum_k I_k = 0$$



$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$$

**Второе правило Кирхгофа:** в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС, встречающихся в этом контуре

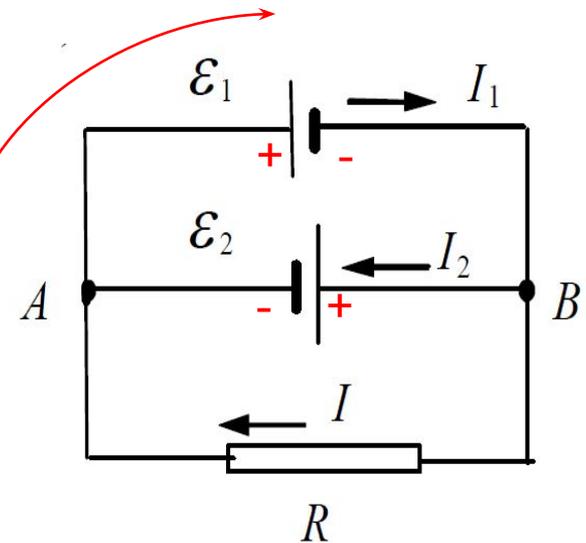
$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k$$

- 1) Выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи;
- 2) Выбрать направление обхода контура
- 3) Составить уравнения по числу участков цепи

$$I_2 + I = I_1$$

$$I_1 r_1 + IR = -\mathcal{E}_1$$

$$-I_2 r_2 + IR = \mathcal{E}_2$$



## Работа и мощность тока. Закон Джоуля - Ленца

$$dA = Udq = IUdt = I^2 Rdt = \frac{U^2}{R} dt \quad \text{Работа тока}$$

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad \text{Мощность тока}$$

Если ток проходит по *неподвижному* металлическому проводнику, то вся работа тока идет на его нагревание и, по закону сохранения энергии,

$$dQ = dA$$

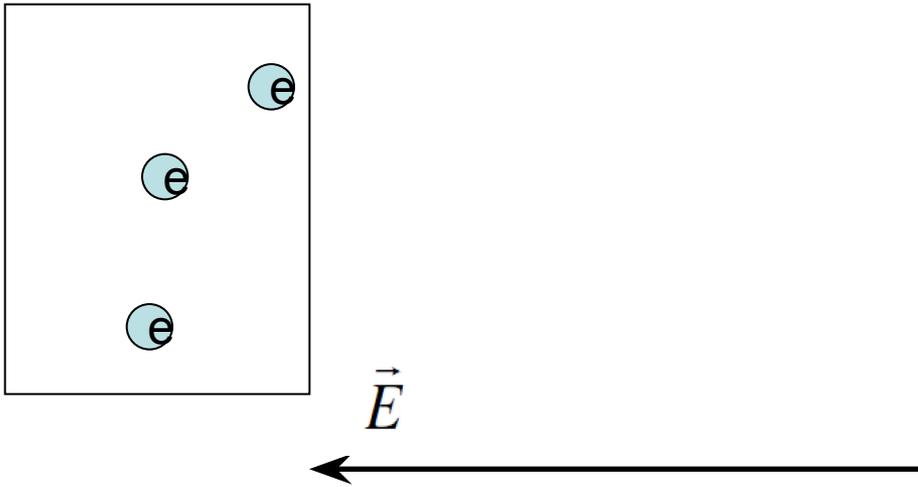
$$dQ = IUdt = I^2 Rdt = \frac{U^2}{R} dt \quad \text{закон Джоуля – Ленца.}$$

Количество теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объема, называется удельной тепловой мощностью тока

$$w = \rho j^2 = jE = \gamma E^2 \quad \text{закона Джоуля - Ленца в дифференциальной форме}$$

## Электрические токи в вакууме и газах

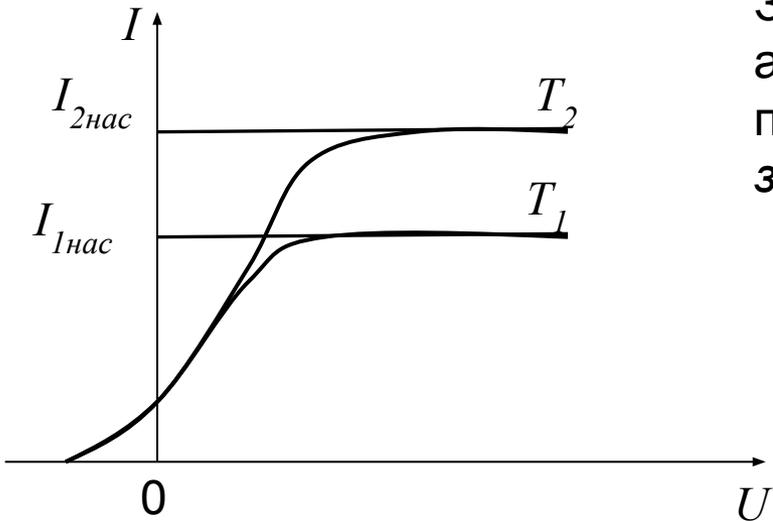
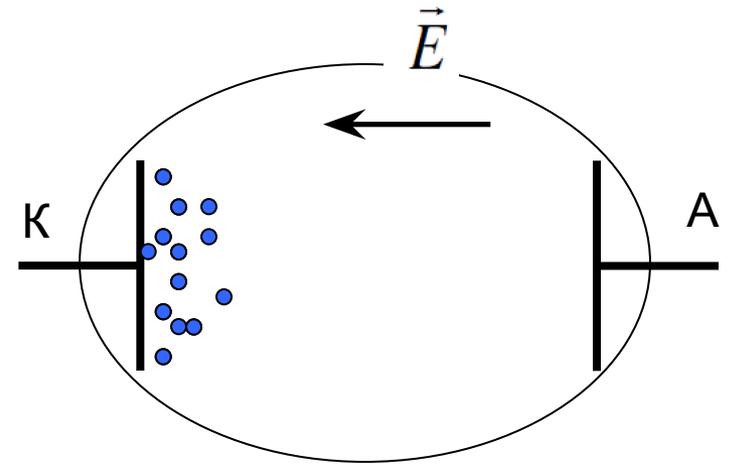
Термоэлектронная эмиссия — это испускание электронов нагретыми металлами.



## Электрические токи в вакууме и газах

Термоэлектронная эмиссия — это испускание электронов нагретыми металлами.

**вакуумный диод** - откачанный баллон, содержащий два электрода: катод К и анод А



Зависимость термоэлектронного тока  $I$  от анодного напряжения в области малых положительных значений описывается *законом трех вторых*

$$I = BU^{3/2}$$

Плотность тока насыщения определяется *формулой Ричардсона - Дешмана*

$$j_{\text{нас}} = CT^2 e^{-\frac{A}{kT}}$$

$A$  - работа выхода электронов из катода;  
 $T$  - термодинамическая температура

Газы при обычных условиях состоят из нейтральных атомов и молекул и не содержат свободных зарядов (электронов и ионов).

Газ становится проводником электричества, когда некоторая часть его молекул *ионизуется*

Прохождение электрического тока через газы называется **газовым разрядом**.

**Разряды**, существующие только под действием внешних ионизаторов, называются **несамостоятельными**.

**Разряд**, сохраняющийся после прекращения внешней ионизации, называется **самостоятельным**



Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд, называется **напряжением пробоя**.

Насыщение - ионы и электроны, создаваемые внешним ионизатором за единицу времени, за это же время достигают электродов между плоскими электродами

На участке OA выполняется закон Ома.

$$j = q n (u_+ + u_-) E$$

$$j_n = q \Delta n d$$

$q$  – заряд иона;  $d$  расстояние между электродами  
 $\Delta n$  - число пар ионов, создаваемых ионизатором в единицу времени в единице объёма газа

$$\Delta n = N/(Vt)$$

