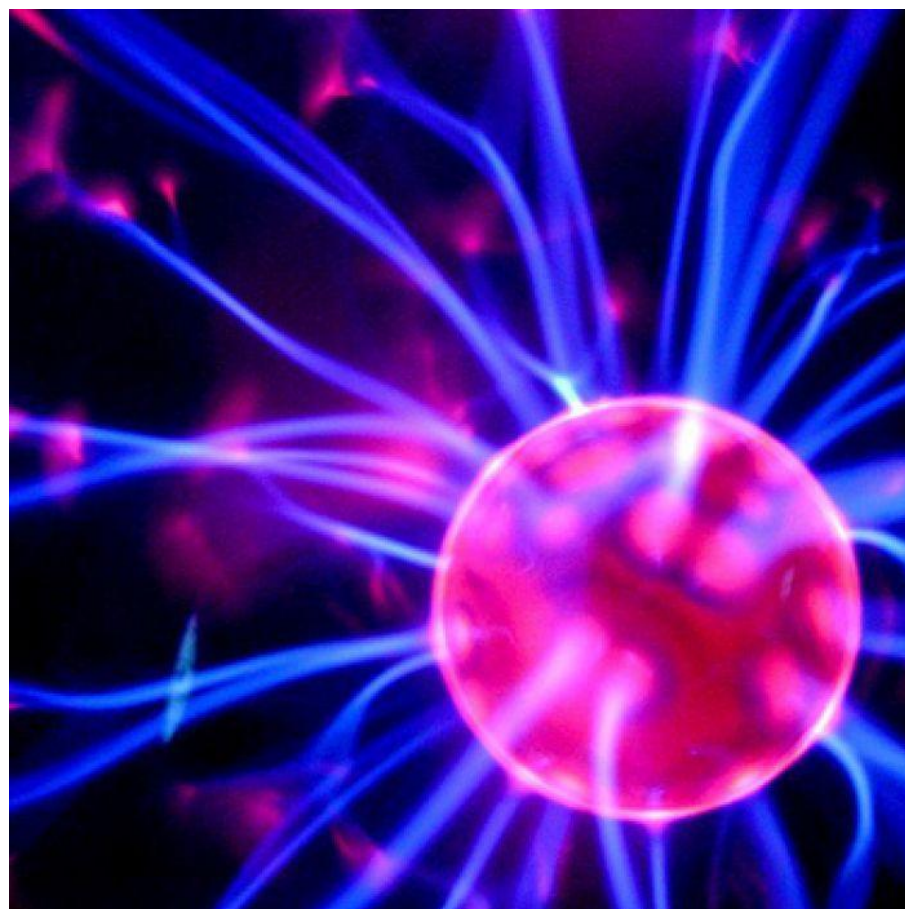
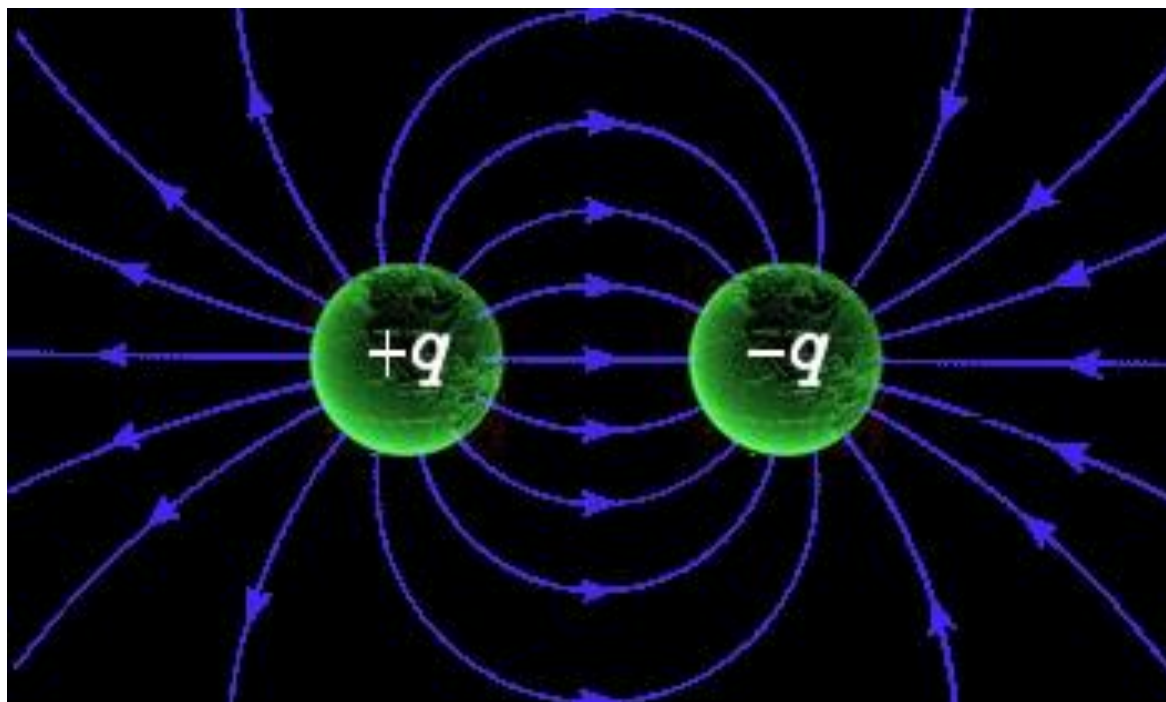


Электростатика



Электродинамика – раздел физики, изучающий электромагнитное взаимодействие электрически заряженных частиц и тел.

Электростатика – раздел электродинамики, в котором изучаются взаимодействие и свойства неподвижных электрически заряженных частиц и тел, а так же их полей.



Электрический заряд Q, q – скалярная физическая величина, характеризующая свойство некоторых частиц или тел вступать при определенных условиях в электромагнитное взаимодействие и определяющая значения силы и энергий этих взаимодействий.

Единица измерения – 1 Кл (кулон) = 1 А · с.

Электромагнитные силы – силы притяжения и отталкивания, возникающие между электрически заряженными частицами и телами.

Фундаментальные свойства электрического заряда

1. Существуют два вида электрических зарядов (**положительные** и **отрицательные**). Одноименные заряды **отталкиваются**, разноименные – **притягиваются**.
2. Электрический заряд **инвариантен** – его величина не зависит от системы отсчета, т.е. не зависит от того, движется он или покоится.
3. Электрический заряд **дискретен** - заряд любого тела составляет целое число, кратное элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл .
4. Электрический заряд **аддитивен** заряд любой системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему.

Закон сохранения заряда

Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы не происходили внутри данной системы.

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \text{const}$$

Под **замкнутой системой** в данном случае понимают систему, которая не обменивается зарядами с внешними телами.

Электрон – носитель элементарного отрицательного заряда:

$$Q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

Протон – носитель элементарного положительного заряда:

$$Q = +e = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

$$m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Обычно тела **электронейтральны**.

Электризация - процесс заряжения тела.



Точечный заряд – заряженное тело, размеры которого много меньше расстояний до других заряженных тел, с которыми оно взаимодействует.

Закон Кулона

Сила взаимодействия F между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению величин зарядов Q_1 и Q_2 , обратно пропорциональна квадрату расстояния r^2 между ними и направлена вдоль линии, соединяющей заряды:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

В СИ коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \left(\frac{Н \cdot м^2}{Кл^2} \right)$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left(\frac{Кл^2}{Н \cdot м^2} \right) \quad - \text{электрическая постоянная}$$

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

Закон Кулона для точечных зарядов, находящихся в диэлектрической среде (веществе)

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\varepsilon \cdot r^2} \quad , \quad F = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad ,$$

где ε - диэлектрическая проницаемость среды – безразмерная величина, показывающая во сколько раз сила взаимодействия зарядов в среде F меньше, чем в вакууме F_0 :

$$\varepsilon = F_0 / F .$$

Электрическое (электромагнитное) поле – особый вид материи, посредством которого электрические заряды взаимодействуют друг с другом.

Электростатическое поле – электрическое поле, созданное неподвижными электрическими зарядами и не изменяющееся со временем.

Электростатическое поле описывается двумя величинами : **напряженностью** (силовая векторная характеристика поля) и **потенциалом** (энергетическая скалярная характеристика поля).

Пробный заряд Q_0 – небольшой по величине, точечный положительный заряд, который не искажает исследуемое электрическое поле.

Напряженность электрического поля \vec{E} – векторная физическая величина, численно равная силе, с которой поле действует на пробный единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}$$

Направление вектора напряженности \vec{E} совпадает с направлением вектора силы \vec{F} , с которой поле действует на положительный заряд.

Единица измерения – $1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$

Напряженность поля точечного заряда Q

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

- в скалярной форме;

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

- в векторной форме ;

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{r}_0$$

\vec{r} - радиус – вектор, направленный от заряда Q в точку поля A ;

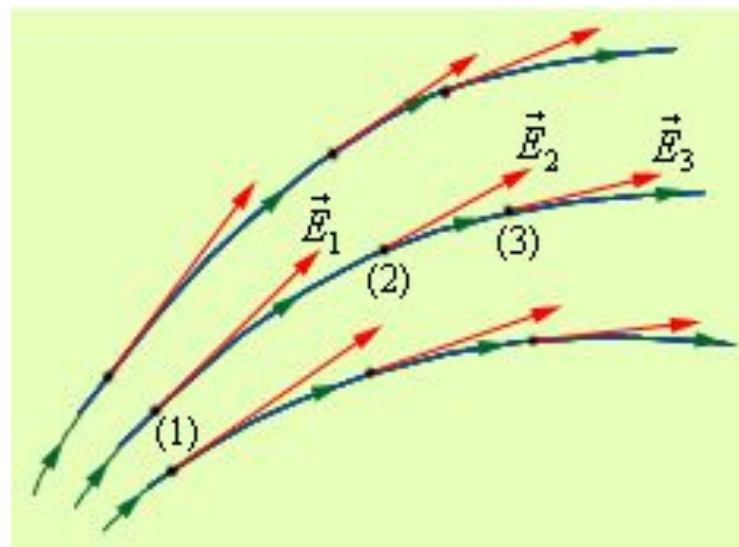
$$\vec{r}_0 = \frac{\vec{r}}{r}$$

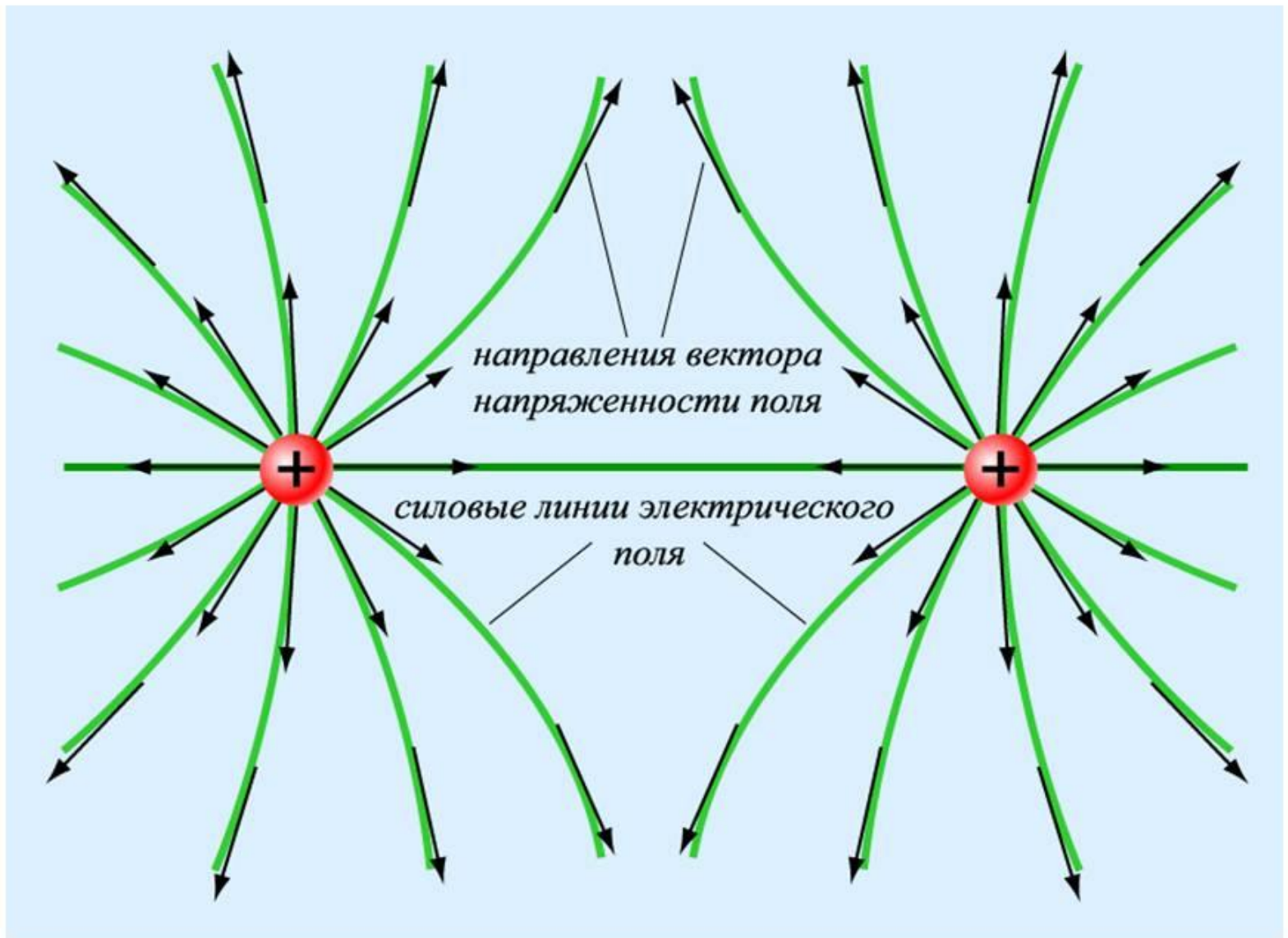
- единичный вектор.

Линии напряженности – линии, касательные к которым в каждой точке пространства (поля) совпадают с направлением вектора напряженности.

Эти линии:

- указывают направление вектора напряженности;
- напряженность поля E равна числу линий, проходящих через единичную площадку, перпендикулярную линиям;
- начинаются на положительных зарядах и заканчиваются только на отрицательных зарядах;
- никогда не пересекаются.





Принцип суперпозиции электростатических полей

Напряженность результирующего поля \vec{E} , создаваемого системой зарядов Q_i , равна векторной сумме напряженностей полей \vec{E}_i , создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

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

Поток Φ_E вектора напряженности \vec{E} электрического поля через плоскую поверхность площадью S - величина, равная произведению модуля вектора \vec{E} на площадь S и косинус угла α между векторами \vec{E} и \vec{n} (нормалью к поверхности).

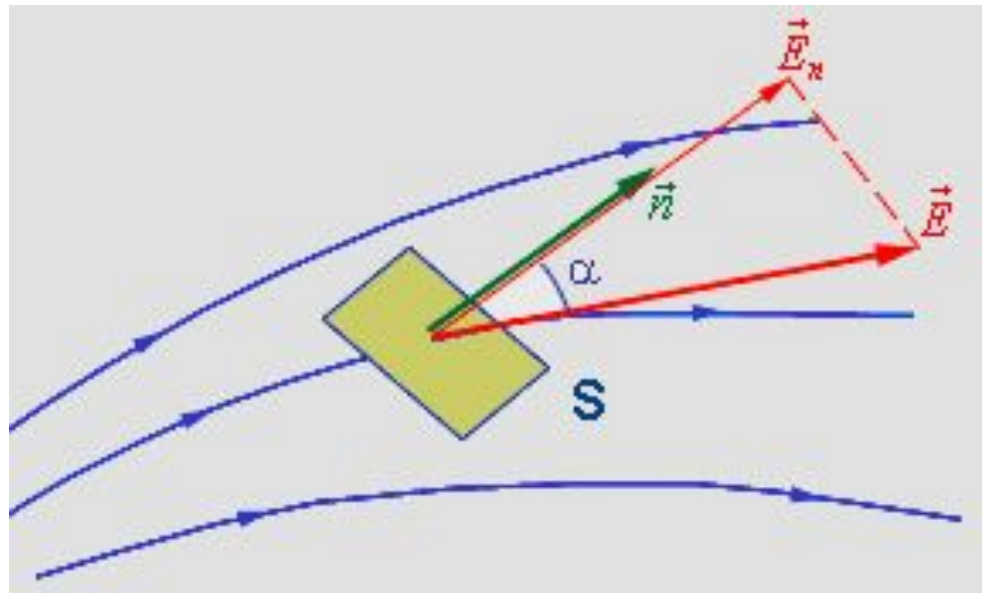
Единица измерения - 1 В · м .

$$\Phi_E = E \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$\Phi_E = E_n \cdot S$$

$$E_n = E \cdot \cos \alpha$$

- проекция вектора \vec{E} на направление вектора нормали n .



$$\Phi_E = E \cdot S$$
 - другая формула потока;

$$S = S \cdot n$$
 - вектор площади.

Поток Φ_E численно равен количеству линий напряженности, пронизывающих поверхность S , является алгебраической величиной.

Поток вектора напряженности величина скалярная. Знак потока определяется направлением положительной нормали к поверхности. За положительное направление принимается направление внешней нормали к поверхности.

Определение потока напряженности Φ_E в неоднородном электрическом поле через произвольную (искривленную) поверхность S .

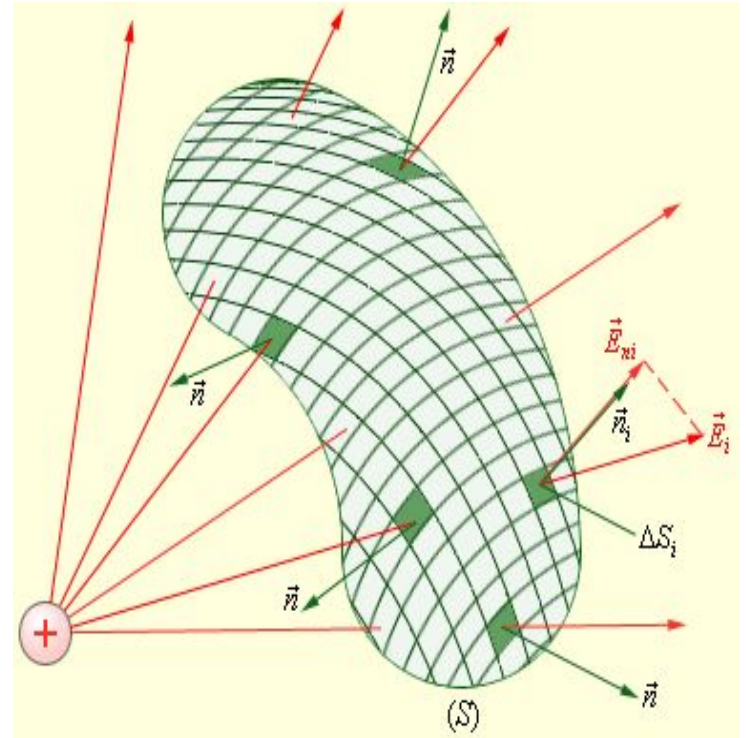
$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_S E_n \cdot dS$$

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

- поток напряженности через элементарную площадку dS ;

$$d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$$

- вектор элементарной площадки.



Теорема Остроградского – Гаусса

Поток вектора напряженности электростатического поля \vec{E} в вакууме сквозь замкнутую поверхность равен алгебраической сумме электрических зарядов, заключенных внутри этой поверхности, деленной на ϵ_0 .

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

Теорема справедлива для любого распределения зарядов внутри любой замкнутой поверхности;

заряды вне поверхности не учитываются.

Напряженность поля, образованного заряженной бесконечно длинной нитью

$$E = \frac{\tau}{2\pi \varepsilon_0 a}$$

- в вакууме;

$$E = \frac{\tau}{2\pi \varepsilon \varepsilon_0 a}$$

- в среде с ε ;

где $\tau = \frac{q}{l}$ - линейная плотность заряда;

a - расстояние от нити.

Электрическое поле равномерно заряженной бесконечной плоскости

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \quad \text{- в вакууме;} \quad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0} \quad \text{- в среде с } \varepsilon,$$

где $\sigma = \frac{q}{S}$ - поверхностная плотность заряда.

Поле двух бесконечных параллельных плоскостей,
заряженных разноимённо
(поле плоского конденсатора)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}$$

Поле равномерно заряженной сферической поверхности

1) Область пространства на поверхности сферы и вне её:

Если $r \geq R$, то

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} .$$

Поле заряженной сферы совпадает с полем точечного заряда, равного заряду сферы и находящегося в центре сферы.

2) Область внутри сферы. Если $r < R$, то $E = 0$.

Потенциал.

Работа электростатического поля.

Электростатическое поле является потенциальным.

Работа сил электростатического поля по перемещению электрического заряда не зависит от вида (формы) траектории, а определяется только начальным и конечным положениями заряда в поле.

При перемещении в электростатическом поле заряда по замкнутой траектории работа сил поля равна нулю.

Потенциальность электростатического поля имеет математическое определение с помощью понятия циркуляция вектора напряженности .

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{l} = Q_0 \cdot \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

- работа на элементарном перемещении

$$dA = \vec{E} \cdot d\vec{l} = E \cdot dl \cdot \cos \alpha = E_{\parallel} \cdot dl$$

- работа по перемещению единичного заряда

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_L E_{\parallel} \cdot dl$$

- циркуляция вектора напряжённости электростатического поля по замкнутому контуру (кривой) L

Эта величина представляет собой полную работу A электрических сил по перемещению единичного положительного заряда $Q_0 = +1 \text{ Кл}$ по замкнутому пути (вдоль кривой L).

Циркуляция вектора напряженности электростатического поля по замкнутому контура равна нулю.

$$A = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_L E_{\parallel} \cdot dl = 0$$

Работа электростатических сил по перемещению заряда Q из одного положения (точки 1) в другое положение (точку 2) равна убыли потенциальной энергии заряда и не зависит от пути перемещения заряда.

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

Потенциал электростатического поля φ - скалярная физическая величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, помещенного в данную точку поля.

Единица измерения : 1 В = 1 Дж/Кл.

$$\varphi = \frac{U}{Q_0}$$

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

Работа сил электростатического поля A_{12} равна произведению величины перемещаемого заряда Q на разность потенциалов в начальном (1) и конечном (2) положениях заряда.

Разность потенциалов между двумя точками 1 и 2 электростатического поля равна работе, совершаемой силами поля при перемещении единичного положительного заряда из одной точки поля (начальной) в другую точку поля (конечную).

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

Второе определение потенциала.

Потенциал поля в данной точке пространства – физическая величина, определяемая работой по перемещению единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность.

$$\varphi = A_{\infty}$$

Потенциал электростатического поля точечного заряда Q в вакууме (на расстоянии r от него)

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

Единица потенциала и разности потенциалов - вольт :
1 В = 1Дж/Кл.

Принцип суперпозиции для потенциалов

Потенциал результирующего поля, созданного системой электрических зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов полей всех этих зарядов.

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i}$$

Связь между напряжённостью и потенциалом электростатического поля

Работа при перемещении заряда $Q = +1$ Кл из точки 1 в точку 2:

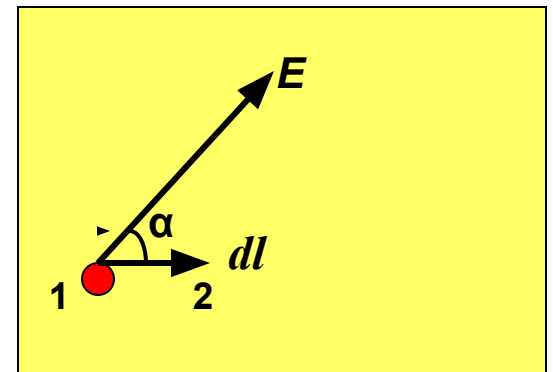
$$dA = \vec{E} \cdot d\vec{l} = E \cdot dl \cdot \cos \alpha ,$$

$$dA = -d\varphi ,$$

Приравниваем $E \cdot dl \cdot \cos \alpha = -d\varphi ,$

Отсюда $E \cdot \cos \alpha = -\frac{d\varphi}{dl} ,$

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dl} .$$



В окрестности какой - либо точки электростатического поля потенциал поля φ наиболее быстро изменяется в направлении линии напряженности.

$$E = - \frac{d\varphi}{dl} ,$$

где $d\varphi$ - изменение потенциала, вызванное перемещением единичного заряда на dl вдоль линии напряженности.

$\frac{d\varphi}{dl}$ - это величина (модуль) градиента потенциала $grad \varphi$ электростатического поля, характеризующего быстроту изменения потенциала φ в пространстве.

В векторном виде связь между напряженностью E и потенциалом φ имеет вид:

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

или в декартовых координатах

$$\vec{E} = - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cdot \vec{k} \right),$$

где

$$grad \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cdot \vec{k}.$$

Физический смысл: Напряжённость поля в данной точке электростатического поля измеряется уменьшением потенциала поля, приходящимся на единицу длины линии напряжённости.

В случае однородного электростатического поля

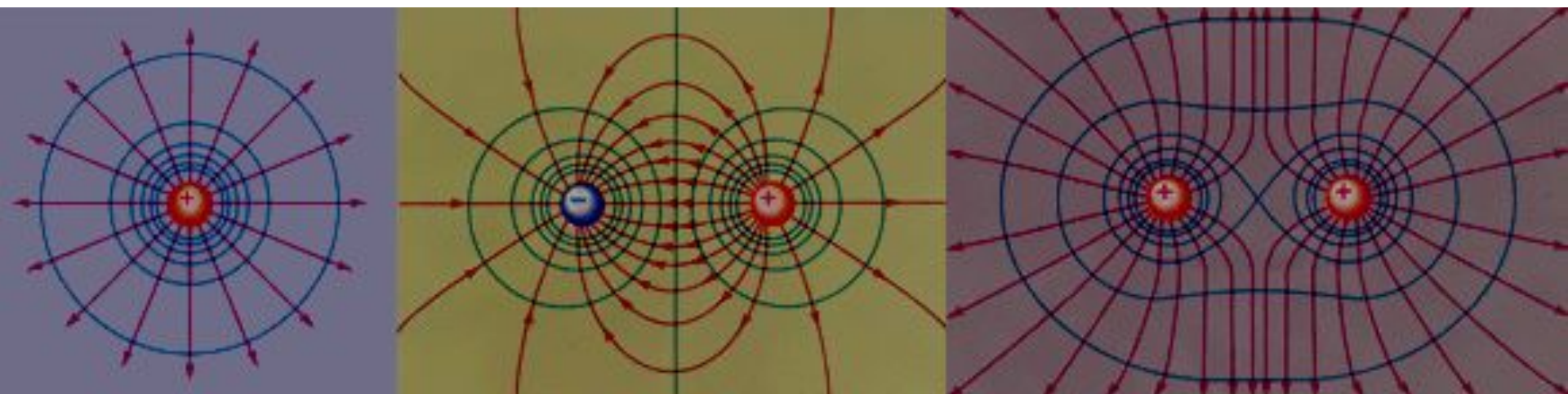
$$E = -\frac{d\varphi}{dl} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta l} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta l} ,$$

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta l} ,$$

φ_1 и φ_2 - потенциалы в точках 1 и 2 ;
 Δl - расстояние между точками 1 и 2 вдоль
линии напряжённости поля (расстояние между
эквипотенциальными поверхностями).

Эквипотенциальная поверхность - это поверхность, во всех точках которой потенциал φ имеет одинаковое значение.

1. Работа, совершаемая при перемещении заряда по одной и той же эквипотенциальной поверхности, равна нулю.
2. Линии напряжённости всегда перпендикулярны к ним.
3. Эти поверхности проводят с определённой плотностью, так, чтобы разность потенциалов между любыми двумя соседними поверхностями была одинакова (через 1 В).



**Эквипотенциальные поверхности – синие линии;
линии напряженности – красные линии.**