

Тема 1. Основные понятия и законы электростатики

- 1. Электродинамика, электрические заряды, закон сохранения электрических зарядов**
- 2. Закон Кулона**
- 3. Электростатическое поле и его характеристики**
- 4. Теорема Остроградского - Гаусса**
- 5. Потенциал. Работа электростатического поля. Связь между напряжённостью и потенциалом**

Литература

- 1. Трофимова Т.И. Курс физики. – § 77 – 86.**
- 2. Савельев И. В. Курс общей физики, том 2. - § 1 – 12**
- 3. Касьянов В. А. Физика. 10 класс. - § 75 - 84**

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

- **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.
- **Электрический заряд Q, q** – физическая величина, определяющая силу электрического (электромагнитного) взаимодействия частиц или тел.
- **Единица измерения** – 1 Кл (кулон) = 1 А·с

Фундаментальные свойства зарядов

- Существуют два вида электрических зарядов (положительные и отрицательные)
- Электрический заряд инвариантен
- Дискретен. Заряд любого тела составляет целое число, кратное элементарному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
- Аддитивен
- Закон сохранения заряда

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

- **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**

Закон Кулона, 1785 г. – закон взаимодействия точечных зарядов.

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

- *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 между r^2 и направлена вдоль линии, соединяющей заряды.*

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

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

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \left(\frac{H \cdot m^2}{Kл^2} \right)$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left(\frac{Kл^2}{H \cdot m^2} \right)$$

← Электрическая постоянная

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

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

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

ε - диэлектрическая проницаемость среды. 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.
- **Основное свойство** – действовать на другие электрические заряды, находящиеся в нем.
- **Пробный заряд Q_0** – небольшой по величине, точечный положительный заряд, который не искажает исследуемое электрическое поле.

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

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

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

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

Напряженность поля точечного заряда Q

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad - \text{ в скалярной форме}$$

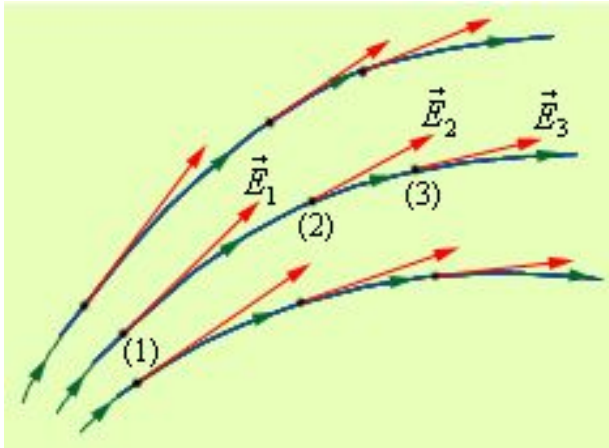
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{r}_0 \quad - \text{ в векторной форме}$$

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

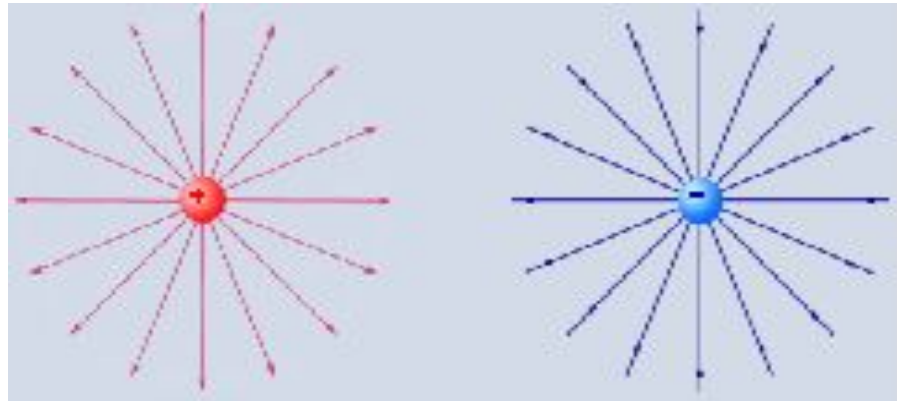
$$\vec{r}_0 = \frac{\vec{r}}{r} \quad - \text{ единичный вектор}$$

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



Линии напряженности



Линии напряженности полей, созданных точечными зарядами

Принцип суперпозиции электростатических полей

Напряженность результирующего поля E , создаваемого системой зарядов Q_i , равна векторной сумме напряженностей полей E_i , создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

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

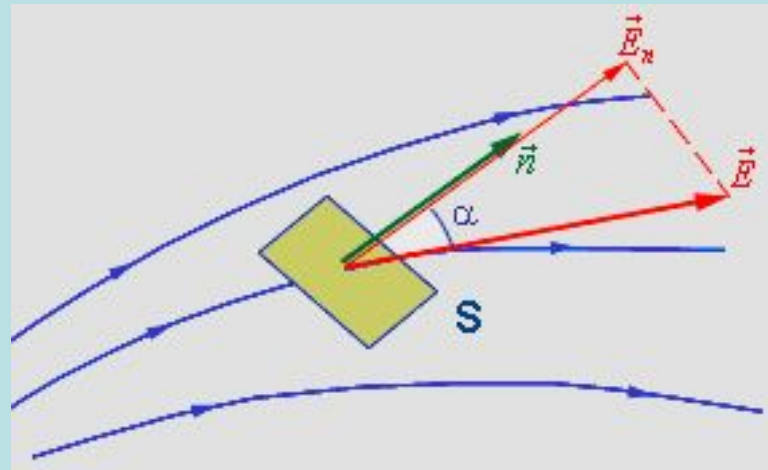
- **Поток Φ_E вектора напряженности E** электрического поля через плоскую поверхность площадью S - величина, равная произведению модуля вектора E на площадь S и косинус угла α между векторами E и n (нормалью к поверхности). Единица измерения - $1 \text{ В} \cdot \text{м}$

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

$$\Phi_E = E_n \cdot S$$

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

Проекция вектора E на направление вектора нормали n



$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{S}$$

- другая формула потока

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

- вектор площадки

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

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

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

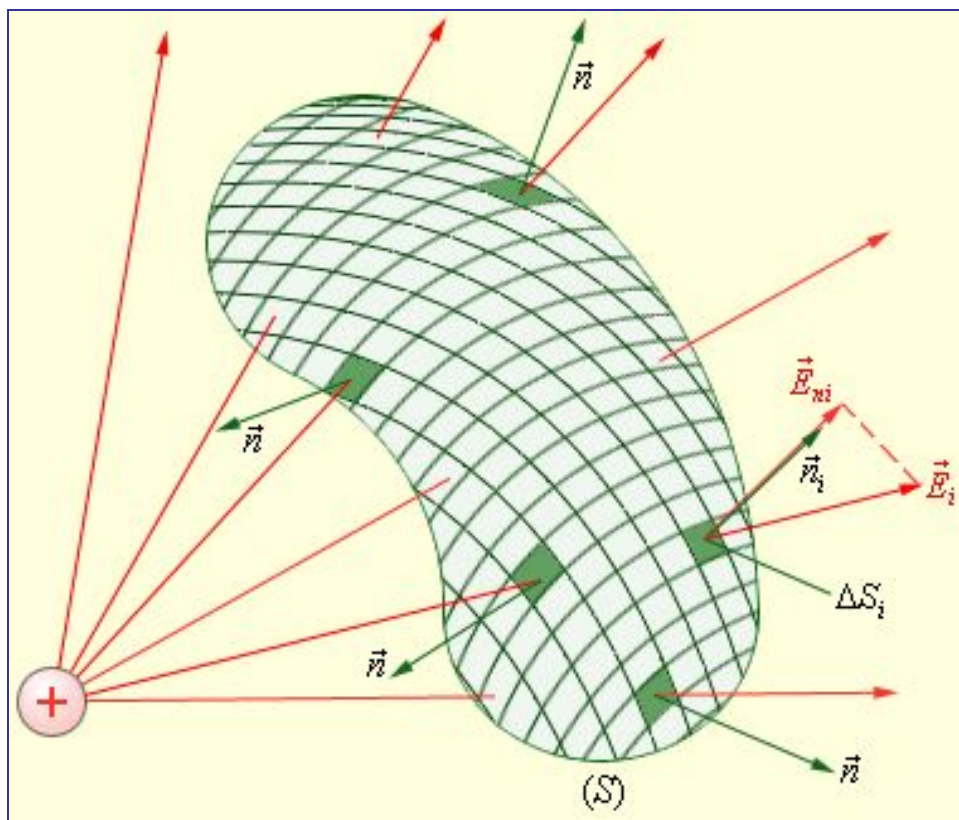
$$d\Phi_E = \vec{E} \cdot d\vec{S} = E_n \cdot dS$$

поток напряженности через
элементарную площадку dS

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

- вектор элементарной площадки

Вычисление потока Φ_E через замкнутую поверхность S



Теорема Остроградского – Гаусса

- Поток вектора напряженности электростатического поля 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.

Электрическое поле равномерно заряженной бесконечной плоскости

Вывод

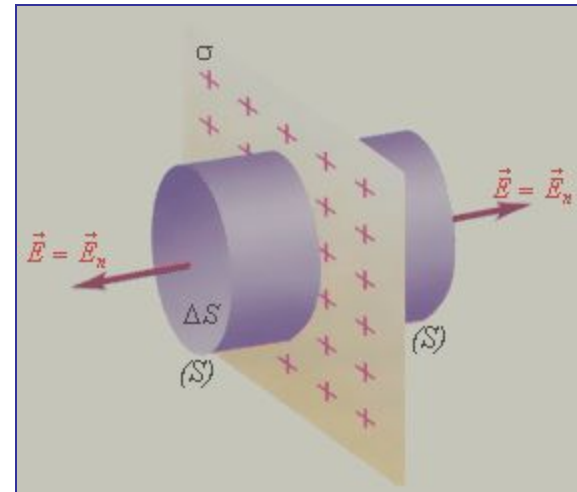
$$\Phi_E = \frac{Q}{\varepsilon_0} \Rightarrow E \cdot 2 \Delta S = \frac{\sigma \cdot \Delta S}{\varepsilon_0}$$

$$Q = \sigma \cdot \Delta S$$

величина заряда
внутри цилиндра

$$\Phi_E = E \cdot 2 \Delta S$$

Поток через цилиндр



Формулы

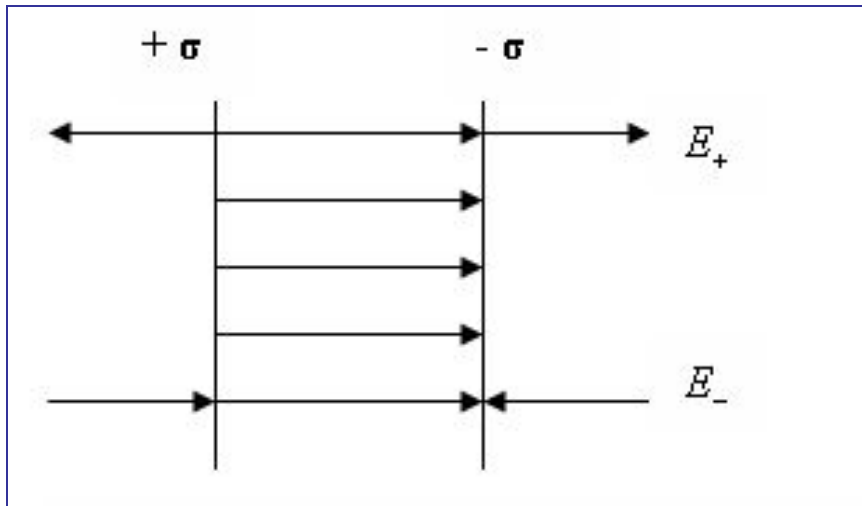
$$E = \frac{\sigma}{2 \varepsilon_0}$$

- в вакууме

$$E = \frac{\sigma}{2 \varepsilon \varepsilon_0}$$

- в среде с ε

Поле двух бесконечных параллельных плоскостей, заряженных разноимённо



Поле системы есть суперпозиция полей, создаваемых каждой из плоскостей в отдельности. Поле однородное.

$$E = E_+ + E_- = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

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

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

Поле равномерно заряженной сферической поверхности

а) 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.

б) 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 .**

р
а
б
о
т
а
н
а
э
л
е
м
е
н
т
а
р
н
ы
е

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

- работа на элементарном перемещении

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

работа по перемещению единичного заряда

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

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 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
(на расстоянии r от него)**

$$\varphi = \varphi_{\infty} = \frac{1}{Q_0} \cdot \int_r^{\infty} E dr = \frac{Q}{4\pi \varepsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$

$$\varphi = \varphi_{\infty} = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$

- Потенциал бесконечно удалённой точки считается равным нулю
- Эта формула выражает потенциал равномерно заряженного шара (или сферы) при $r \geq R$, где R - радиус шара (или сферы)

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

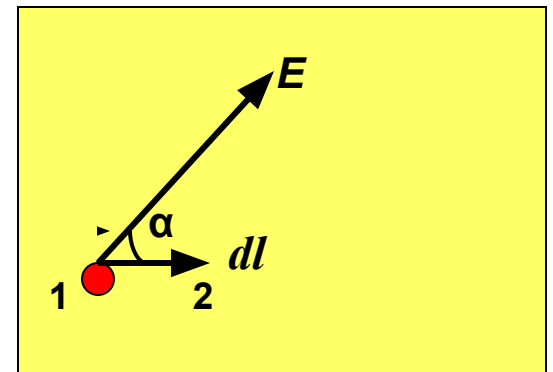
$$dA = \vec{E} \cdot d\vec{l} = E \cdot dl \cdot \cos \alpha$$

$$dA = -d\varphi$$

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

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

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



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

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

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

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

и
з
м
е
н
е
н
и
е
п
о
т
е
н
ц
и
а
л

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

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

или в декартовых координатах

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

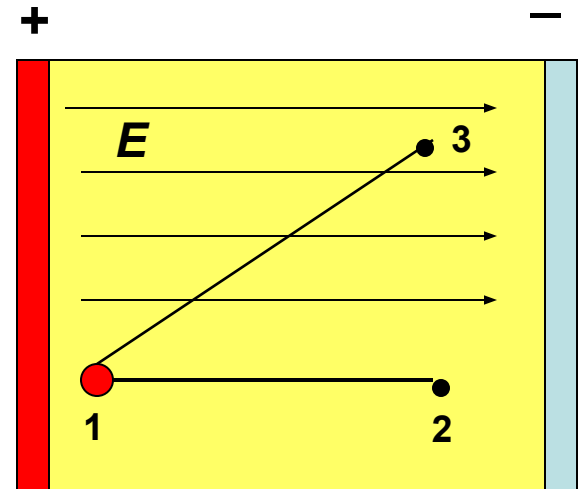
$$\text{где } grad \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \underline{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot \underline{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cdot \underline{k}$$

Физический смысл. Напряжённость поля в данной точке (месте) 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 густотой, так, чтобы разность потенциалов между любыми двумя соседними поверхностями была одинакова (через 1 В).

