Тема: Электрическое поле в вакууме

Электростатикой называется раздел физики, изучающий взаимодействие неподвижных зарядов и характеристики их электрических полей.

Электричесим зарядом q (ку) называется скалярная величина, являющаяся количественной мерой электромагнитного взаимодействия заряженных тел.

$[q] = Кл$, Кулон.

Действие одного электрически заряженного тела на другое осуществляется посредством ***электрического поля***.

Электрическим полем *называется особый вид материи, не воспринимаемый органами чувств человека, возникающий вокруг заряженных тел и оказывающий силовое воздействие на неподвижные и движущиеся электрические заряды*.

Основное свойство электрического поля – это силовое воздействие на электрические заряды.

Точечным *называется заряд, размером которого в условиях данной задачи можно пренебречь.*

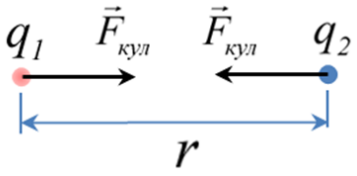
Наблюдения показывают, что в природе существует два вида зарядов: ***положительные*** $+q$ и ***отрицательные*** $-q$.

Разноимённые заряды притягиваются, а одноимённые заряды отталкиваются.

Закон Кулона

(позволяет определить силу электростатического взаимодействия двух точечных зарядов)

$$F_{кул} = k\frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2}$$



где $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\cdot 10^9 \dfrac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$;

$\varepsilon_0 = 8.85\cdot 10^{-12}\dfrac{Ф}{м}$ - электрическая постоянная, ε_0 (эпсилон нулевое),

q_1 и q_2 - точечные заряды, $Кл$ - Кулон; r – расстояние между зарядами, $м$.

$\varepsilon = \dfrac{F_{в\ вакууме}}{F_{в\ веществе}} = \dfrac{E_{в\ вакууме}}{E_{в\ веществе}}$ - диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между зарядами,

ε (эпсилон) - безразмерная (величина табличная).

Физический смысл ε: она показывает, во сколько раз вещество ослабляет внешнее электрическое поле, по сравнению с вакуумом.

Для вакуума $\varepsilon = 1$, воздуха $\varepsilon = 1.0006$, вода $\varepsilon = 81$.

Сила Кулона направлена вдоль прямой, проходящей через центры взаимодействующих электрических зарядов (см. рис.).

Закон сохранения электрического заряда

Электрически изолированной называется система, которая не обменивается с внешними телами электрическим зарядом.

Для такой системы справедлив ***закон сохранения электрического заряда*:**
Алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы не изменяется при любых процессах, происходящих в этой системе, то есть

$$\sum q_{0i} = \sum q_i$$

Основные характеристики электростатического поля

Электростатическим называется электрическое поле, характеристики которого не изменяются с течением времени.
(такое поле создаётся неподвижными электрическими зарядами).

Напряжённостью электрического поля $\vec{E}$

Основной характеристикой электрического поля является *напряжённость электрического поля* $\vec{E}$.

Напряжённостью электрического поля $\vec{E}$ (е) *называется векторная величина, равная силе* $\vec{F}_{ЭП}$, *действующей со стороны электрического поля, на положительный точечный заряд* q, *помещенный в данную точку поля.*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{ЭП}}{q} \qquad (1)$$

$[E] = \frac{Н}{Кл} \equiv \frac{В}{м}$, (Ньютон на Кулон) или (Вольт на метр).

Из уравнения (1) следует, что сила $\vec{F}_{ЭП}$, действующая со стороны электрического поля на точечный заряд q, равна: $\vec{F}_{ЭП} = q\vec{E}$.

Потенциалом электростатического поля φ

Вспомогательной характеристикой электростатического поля является *потенциал* φ.

Потенциалом электростатического поля φ (фи) *называется величина, равная потенциальной энергии* $W_П$ *положительного единичного точечного заряда* q, *помещенного в данную точку электростатического поля:*

$$\varphi = \frac{W_П}{q}, \qquad (2)$$

где φ (фи) - потенциал электростатического поля, *В*, (Вольт);

$W_П$ - потенциальная энергия заряда q в электрическом поле, *Дж*,(Джоуль);

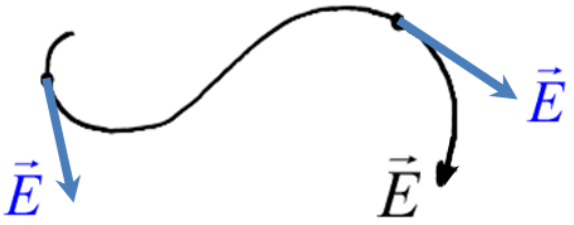
q - величина электрического заряда, *Кл*, (Кулон); $[\varphi] = \frac{Дж}{Кл} = В$, Вольт.

Из уравнения (2) следует, что потенциальную энергию $W_П$ точечного заряда q в данной точке электростатического поля можно определить по формуле: $W_П = q\varphi$.

Графическое изображение электростатических полей

Электростатические поля можно изображать:

1. с помощью ***силовых линий,***
2. с помощью ***эквипотенциалей.***

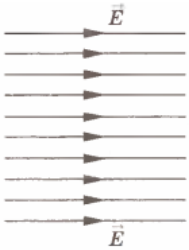


Силовой линией *электрического поля называется линия, касательная в каждой точке которой совпадает по направлению с вектором* $\vec{E}$ *в данной точке поля.*

Эквипотенциалью *называется геометрическое место точек одинакового потенциала* φ.

Принято, что:

1. силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах,
2. силовые линии нигде не пересекаются,
3. силовые линии всегда перпендикулярны к эквипотенциалям,
4. силовые линии направлены в сторону уменьшения потенциала.

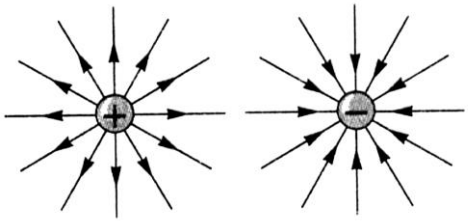


Однородным *называется электростатическое поле, в каждой точке которого вектор напряжённости* $\vec{E}$ *имеет одну и ту же величину и направление.*

Графически однородное поле изображается параллельными силовыми линиями, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга.

Напряжённость электрического поля точечного заряда

$$E = k\frac{|q|}{\varepsilon r^2}.$$



где $k = 9\cdot 10^9 \dfrac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$;

ε - диэлектрическая проницаемость среды;

q - точечный заряд, $Кл$; r – расстояние от заряда до рассматриваемой точки, $м$.

Вектор напряжённости $\vec{E}$ направлен от положительного заряда к отрицательному.

Потенциал электростатического поля точечного заряда

$$\varphi = k\frac{q}{\varepsilon r}$$

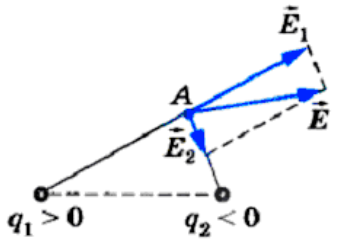
где $k = 9\cdot 10^9 \dfrac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$; ε - диэлектрическая проницаемость среды;

q - точечный заряд, $Кл$; r – расстояние от заряда до рассматриваемой точки, $м$.

Отрицательный заряд создаёт отрицательный потенциал, а положительный заряд создаёт положительный потенциал.

Принцип суперпозиции для электростатического поля

(позволяет рассчитать характеристики электростатического поля, создаваемого системой точечных зарядов)



- результирующая напряженность $\vec{E}_{рез}$ *электрического поля равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым из имеющихся зарядов:*

$$\vec{E}_{рез} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_n = \sum \vec{E}_i .$$

- результирующий потенциал $\varphi_{рез}$ *электростатического поля равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых каждым из имеющихся зарядов:*

$$\varphi_{рез} = \varphi_1 + \varphi_2 + \ldots + \varphi_n = \sum \varphi_i .$$

Связь напряжённости $\vec{E}$ и потенциала φ электростатического поля

Разность потенциалов между двумя точками поля и напряжённость поля между этими точками связаны соотношениями:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \int_1^2 \vec{E}\, d\vec{l} \qquad \text{или} \qquad \vec{E} = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z}\vec{k} \right),$$

где $\frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k} \equiv grad$ (градиент) - математический оператор, равный сумме вторых частных производных какой-либо функции по координатам x, y, z.

Выражение в скобках называется ***градиентом потенциала*** и сокращенно записывается так:

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{d\vec{r}} = -grad\,\varphi .$$

Градиент функции *- это вектор, который характеризует быстроту пространственного изменения функции, и направлен в сторону максимального её возрастания.*

Потенциальной энергией электростатического взаимодействия двух точечных зарядов.

$$W_{ЭП} = k\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r},$$

где $[W_{ЭП}] = Дж$, Джоуль;

$k = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$; ε - диэлектрическая проницаемость среды;

q_1 и q_2 - точечные заряды, $Кл$;

r – расстояние между точечными зарядами, $м$.

Потенциальная энергия системы точечных зарядов

$$W_{ЭП} = \frac{1}{2}\sum q_i \varphi_i ,$$

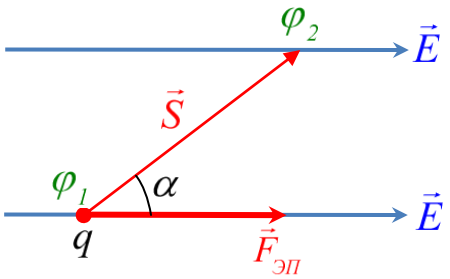
где φ_i - потенциал в точке, где находится заряд q_i, создаваемый всеми зарядами системы, кроме q_i (определяется по принципу суперпозиции).

Работа сил электростатического поля по перемещению точечного заряда

$$A_{ЭП} = F_{ЭП} S \cos\alpha$$

$$A_{ЭП} = q(\varphi_1 - \varphi_2) ,$$

$$A_{ЭП} = -(W_{ЭП2} - W_{ЭП1}),$$



где φ_1 и φ_2 - потенциал электрического поля в начальной и конечной точках траектории, $В$,

$W_{ЭП1}$ и $W_{ЭП2}$ - потенциальная энергия точечного заряда q в начальной и конечной точках траектории, $Дж$,

$\vec{S}$ - вектор перемещения точечного заряда, *м*;

$\vec{E}$ - вектор напряжённости электрического поля, $\frac{В}{м}$;

α - угол между векторами $\vec{E}$ и $\vec{S}$.

Циркуляция вектора $\vec{E}$

Циркуляцией вектора $\vec{E}$ называется криволинейный интеграл, взятый вдоль замкнутой кривой L, вида $\oint_L \vec{E} d\vec{l}$.

Теорема о циркуляции вектора $\vec{E}$ электростатического поля

Циркуляция вектора $\vec{E}$ *электростатического поля равна нулю:*

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Поток вектора $\vec{E}$ электростатического поля

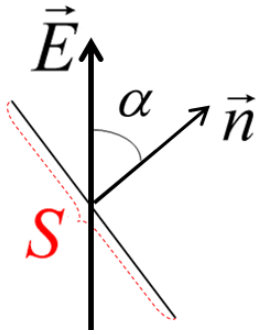
Потоком вектора $\vec{E}$ через произвольную поверхность называется поверхностный интеграл вида:

$$\Phi = \int_S \vec{E}d\vec{S} = \int_S EdS\cos\alpha = \int_S E_n dS,$$

где $E_n = E\cos\alpha$ - проекция вектора $\vec{E}$ на нормаль к поверхности $\vec{n}$.

α – угол между вектором $\vec{E}$ и нормалью $\vec{n}$ к поверхности *S*.

$[\Phi_E] = В \cdot м$, (Вольт-метр).



Если поле однородно и поверхность плоская, то поток вектора $\vec{E}$ можно рассчитать по формуле

$$\Phi_E = ES\cos\alpha,$$

где α – угол между вектором $\vec{E}$ и нормалью $\vec{n}$ к поверхности *S*.

Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме

Поток вектора напряженности $\vec{E}$ *электростатического поля в вакууме через произвольную замкнутую поверхность* S *равен алгебраической сумме зарядов* $\sum q_i$, *находящихся внутри этой поверхности, делённой на электрическую постоянную* ε_0:

$$\oint_S \vec{E}d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum q_i.$$

Электрический диполь

Диполем называется система, состоящая из двух одинаковых по величине и противоположных по знаку зарядов.

Плечом диполя называется вектор, проведенный от отрицательного заряда к положительному.

Электрическим дипольным моментом $\vec{p}$ (пэ) называется векторная величина, равная произведению положительного заряда диполя q на плечо диполя $\vec{l}$:

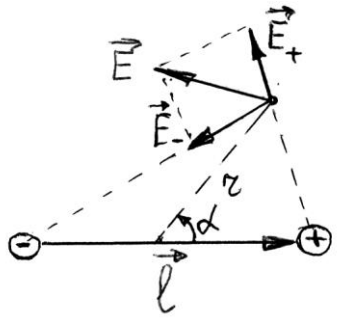
$$\vec{p} = q\vec{l},$$

где $\vec{p}$ - электрический дипольный момент, $[p] = Кл \cdot м$, (Кулон-метр);

q - положительный заряд диполя, *Кл*; $\vec{l}$ - плечо диполя, *м*.

Точечным называется диполь, расстояние от центра которого до рассматриваемой точки много больше плеча диполя.

Напряжённость и потенциал электростатического поля точечного диполя



$$E = \kappa \frac{p}{\varepsilon r^3}\sqrt{3\cos\alpha + 1},$$

$$\varphi = \kappa \frac{p}{\varepsilon r^2}\cos\alpha$$

Где $k = 9 \cdot 10^9 \dfrac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$; ε - диэлектрическая проницаемость среды;

p - электрический дипольный момент, $Кл \cdot м$;

α - угол между радиус-вектором $\vec{r}$, проведённым из точечного диполя в рассматриваемую точку пространства, и вектором $\vec{p}$.

Конденсатор

(это устройство для накопления электрического заряда)

Ёмкостью (или электроёмкостью) конденсатора C (цэ) называется скалярная величина, равная отношению заряда положительной обкладки конденсатора q, к разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между положительной и отрицательной обкладками конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U},$$

Обозначение конденсатора на схеме

где C (цэ) - ёмкость конденсатора, $Ф$, Фарад

q (ку) - заряд конденсатора (он равен заряду одной его обкладки), $Кл$, Кулон,

$\varphi_1 - \varphi_2 = U$ (у) - напряжение (разность потенциалов) на конденсаторе, $В$, Вольт.

Зависимость ёмкости плоского конденсатора от его геометрических размеров

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

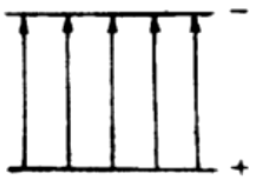
где C - ёмкость конденсатора, $Ф$ (эф), Фарад

S - площадь одной пластины (обкладки) конденсатора, $м^2$,

d - расстояние между пластинами конденсатора, $м$.

ε (эпсилон) - диэлектрическая проницаемость вещества, расположенного между обкладками конденсатора.

Особенность электрического поля плоского конденсатора



Поле плоского конденсатора

- поле однородно (краевыми эффектами обычно пренебрегают)
- напряжённость поля внутри конденсатора можно определить по формуле: $E = \dfrac{U}{d}$,

где U - напряжение на конденсаторе, $В$

d - расстояние между пластинами конденсатора, $м$.

Энергия электрического поля уединённого проводника

$$W_{ЭП} = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C},$$

где $W_{ЭП}$ - энергия электрического поля уединённого проводника, $Дж$;

C - электроёмкость уединённого проводника, $Ф$;

φ - потенциал уединённого проводника, $В$; q - заряд уединённого проводника, $Кл$.

Энергия электрического поля конденсатора

$$W_{ЭП} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C},$$

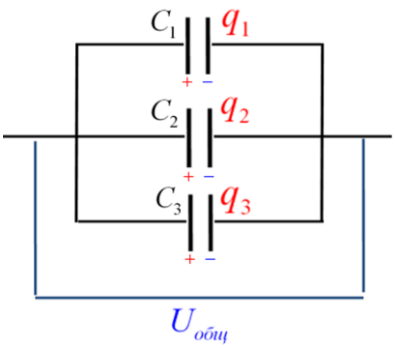
где $W_{ЭП}$ - энергия электрического поля конденсатора, $Дж$;

C - электроёмкость конденсатора, $Ф$; U - напряжение на конденсаторе, $В$;

q - заряд конденсатора (заряд его положительной обкладки) , $Кл$.

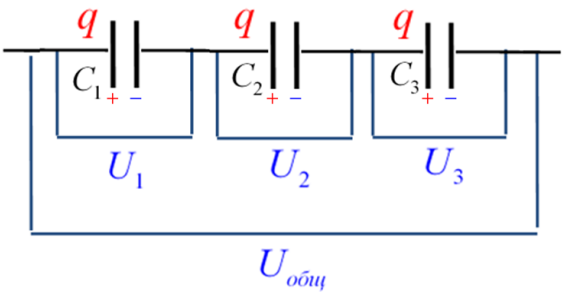
Виды соединения конденсаторов

Параллельное соединение конденсаторов



$$\begin{cases} C_{общ} = C_1 + C_2 + \ldots + C_n \\ U_{общ} = U_1 = U_2 = \ldots = U_n \\ q_{общ} = q_1 + q_2 + \ldots + q_n \\ C_i = \dfrac{q_i}{U_i} \qquad C_{общ} = \dfrac{q_{общ}}{U_{общ}} \end{cases}$$

Последовательное соединение конденсаторов



$$\begin{cases} \dfrac{1}{C_{общ}} = \dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \ldots \dfrac{1}{C_n} \\ U_{общ} = U_1 + U_2 + \ldots + U_n \\ q_{общ} = q_1 = q_2 = \ldots = q_n \\ C_i = \dfrac{q_i}{U_i} \qquad C_{общ} = \dfrac{q_{общ}}{U_{общ}} \end{cases}$$