Лабораторная работа № 3-3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ВАННЫ

Студент____группа________________

Допуск____________________________________Выполнение__________________________Защита________________

Цель работы: Исследование характеристик электростатического поля.
Приборы и принадлежности: ванна с пантографом, гальванометр.

Описание лабораторной установки

Установка представляет собой прямоугольную ванну **В** с электролитом, в которую погружены два электрода 1 и 2 (см. рис. 5 и 6). Электроды присоединены к источнику постоянного напряжения. Параллельно электроду 2 и зонду 3 подключен вольтметр. Потенциометр сопротивлением *R* соединен через гальванометр с зондом 3, установленном на одном из концов пантографа **П**. Если подать на электроды постоянное напряжение, то между ними возникнет электрическое поле и вольтметр покажет разность потенциалов между электродом 2 и точкой, расположенной в ванне, в которую помещен зонд **3**. Характеристики и параметры этого поля предстоит исследовать в данной работе.

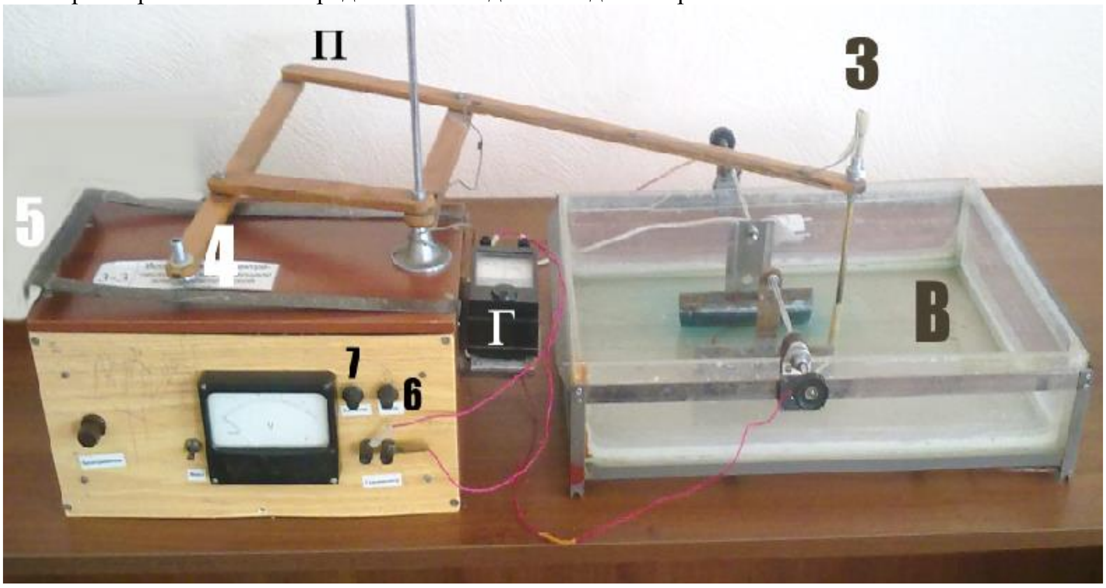


Рис. 5. Вид лабораторной установки

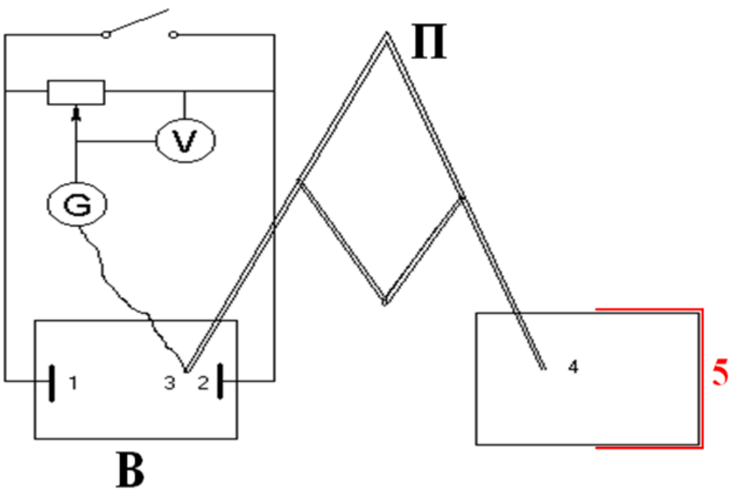


Рис. 6. Схема лабораторной установки

Упражнение № 1. ***Исследование электростатического поля между двумя заряженными прямолинейными электродами.***

1. Укрепите под зажим **5** на установке **4** лист бумаги. Обводя зондом **3** по периметру электролитической ванны **В**, убедитесь, что фиксирующий конец **4** пантографа **П** не выходит за пределы листа бумаги (рис. 5 и 6). Если выходит, то найдите такое положение листа, при котором фиксирующий конец **4** пантографа **П** всегда оставался бы на листе бумаги. Вставьте в фиксирующий конец **4** пантографа стержень от шариковой ручки. Подводя зонд **3** пантографа к металлическим электродам ванны **1** и **2** зарисуйте их положение на листе бумаги.
2. Установите зонд **3** посередине отрезка, соединяющего центры электродов. Отметьте на бумаге положение этой точки.
3. Установите регулятор «**чувствительность**» **6** в среднее положение. С помощью «**регулятора напряжения**» **7** установите стрелку гальванометра **Г** на ноль, после чего запишите показания вольтметра. В этом случае показания

вольтметра будут равны потенциалу точки в электролитической ванне, в которой находится зонд **3.** Отметьте эту точку на листе бумаги.

4. Найдите следующую точку с таким же потенциалом. Для этого, плавно передвигая зонд 3, найдите точку, в которой стрелка на гальванометре будет снова показывать ноль. Отметьте эту точку на листе бумаги. Таким же образом, найдите ещё 7 - 10 точек. Для каждой такой точки второй конец пантографа, который передвигается по листу бумаги, займет определенное положение, которое отмечается карандашом или ручкой.

5. Соедините точки, отмеченные карандашом на листе бумаги плавной линией. Отметьте на этой линии потенциал полученных точек (показания вольтметра). Таким образом, Вы нарисуете первую эквипотенциальную линию.

6. Для построения второй эквипотенциальной линии установите зонд в такое положение, при котором он будет находится посередине минимального отрезка, соединяющего точку поверхности электрода 1 и точку полученной ранее эквипотенциальной линии.

Следуя пунктам 3–5 нарисуйте на бумаге вторую эквипотенциальную линию. Отметьте на ней ее потенциал.

7. Для построения третьей эквипотенциальной линии установите зонд в такое положение, при котором он будет находится посередине минимального отрезка, соединяющего точку поверхности электрода 2 и точку эквипотенциальной линии, проходящей посередине между электродами 1 и 2. Следуя пунктам 3–5, нарисуйте на бумаге третью эквипотенциальную линию. Отметьте на ней ее потенциал.

8. Таким образом, будет изображено 3 эквипотенциальных линии.

9. Пользуясь свойством взаимного расположения силовых и эквипотенциальных линий, постройте на этом же рисунке силовые линии исследуемого электрического поля. Укажите направление этих силовых линий.

10. Пользуясь свойствами силовых линий, определите полярность электродов и обозначьте их на рисунке.

11. Измерьте расстояние между электродами (L_1) и расстояние между их изображениями (L_2) и найдите масштабный множитель по формуле $k = \dfrac{L_1}{L_2}$.

12. Вычислите из формулы $\Delta\varphi = \mathrm{k} \cdot \left|\vec{\mathrm{E}}\right| \cdot \left|\Delta\vec{\mathrm{r}}\right| \cdot \cos(\vec{\mathrm{E}}, \Delta\vec{\mathrm{r}})$ значение напряженности электрического поля в трех точках электролитической ванны. Точки должны быть расположены в различных местах ванны. В этой формуле:

$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ - разность потенциалов между двумя какими-либо точками 1 и 2 двух эквипотенциальных линий,

φ_1 -потенциал в точке 1, φ_2 - потенциал в точке 2,

$\Delta\vec{\mathrm{r}}$ - радиус-вектор, проведённый из точки 1 в точку 2,

$\vec{\mathrm{E}}$ - вектор напряжённости электрического поля в точке 1,

$\cos(\vec{\mathrm{E}}, \Delta\vec{\mathrm{r}})$ - косинус угла между векторами $\vec{\mathrm{E}}$ и $\Delta\vec{\mathrm{r}}$.

Контрольные вопросы

1. Электрический заряд. Виды зарядов и их взаимодействие. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона.
2. Электрическое поле, его основные физические свойства. Электростатическое поле.
3. Основные параметры электростатического поля: напряженность и потенциал, связь между ними.
4. Графическое изображение электрических полей: силовые и эквипотенциальные линии, их свойства и взаимное расположение.
5. Принцип суперпозиции для напряженности и потенциала электростатического поля. Связь напряжённости электростатического поля $\vec{\mathrm{E}}$ и потенциала φ .
6. Работа сил электрического поля по перемещения точечного заряда. Потенциальная энергия электростатического взаимодействия двух точечных зарядов, системы точечных зарядов.
7. Поток вектора *E*. Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме и в веществе.
8. Электрический диполь и его основные характеристики. Напряжённость и потенциал точечного диполя.

Основные теоретические сведения

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

Электрическим зарядом называется скалярная физическая величина, характеризующая способность некоторых частиц или тел вступать в электромагнитные силовые взаимодействия.

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

Электрический заряд обозначается буквой q и измеряется в Кулонах (Кл).

Было обнаружено, что минимальный заряд в природе неразрывно связан с очень маленькой частицей, которая была названа ***электроном***. Заряд электрона оказался равным - $1{,}6\cdot 10^{-19}$ Кл и *условно* считается *отрицательным*.

Электрический заряд любого тела дискретен, то есть составляет целое кратное от элементарного электрического заряда $e = 1.6\cdot 10^{-19}\,Кл$, то есть $q = Ne$.

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

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

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

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

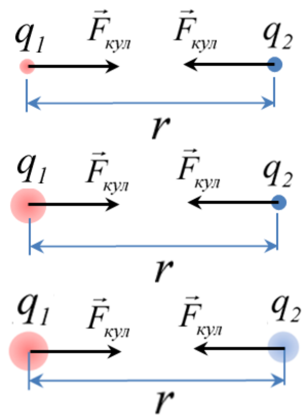
Наблюдения показывают, что разноимённые заряды притягиваются, а одноимённые заряды отталкиваются.

Силу электростатического взаимодействия между двумя точечными зарядами можно определить по закону Кулона.

Закон Кулона

Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, и направлена по прямой, соединяющей заряды.

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



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,

$\varepsilon = \dfrac{F_{в.вакууме}}{F_{в.веществе}} = \dfrac{E_{в.вакууме}}{E_{в.веществе}}$ - диэлектрическая проницаемость среды.

ε величина безразмерная

(физический смысл ε: она показывает, во сколько раз вещество ослабляет внешнее электрическое поле).

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

Для вакуума и воздуха $\varepsilon = 1$

где F - сила взаимодействия заряда с полем, $Н$; $k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\cdot 10^9\,\dfrac{Нм^2}{Кл^2}$ - коэффициент пропорциональности,

q_1 и q_2 - величины зарядов, $Кл$; r - расстояние между зарядами, $м$; ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между зарядами, $\varepsilon_0 = 8.85\cdot 10^{-12}\,\dfrac{Ф}{м}$ - электрическая постоянная.

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

$$\sum q_i = const \quad \text{или} \quad \left(\sum q_i\right)_{начальное} = \left(\sum q_i\right)_{конечное}$$

Основные характеристики электростатического поля

Основной характеристикой электрического поля является *напряжённость электрического поля*.

Напряженность электрического поля *– это физическая величина, равная отношению силы* $\vec{F}_{эп}$*, действующей со стороны электрического поля на положительный точечный заряд* q*, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда* q*:*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{эп}}{q}. \qquad (2)$$

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

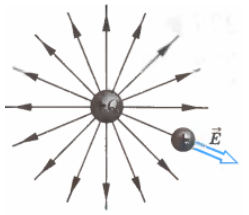
(пример: $E = 10\frac{Н}{Кл}$ означает, что на точечный заряд в 1 Кл в данной точке поля действует сила равная 10 Н).

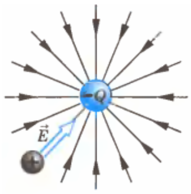
Из определения напряженности следует, что сила, действующая со стороны электрического поля на точечный заряд, равна:

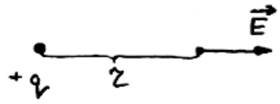
$$\vec{F}_{эп} = q\vec{E}.$$

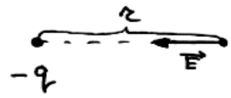
Исходя из закона Кулона (1) и определения (2), можно легко рассчитать напряженность электрического поля, создаваемого одиночным точечным зарядом в вакууме:

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









Второй характеристикой электростатического поля является *потенциал* φ.

Потенциалом *электростатического поля* φ *называется скалярная величина, равная потенциальной энергии положительного единичного точечного заряда, помещенного в данную точку поля:*

$$\varphi = \frac{П}{q}, \qquad (3)$$

где φ - потенциал, $П$ - потенциальная энергия взаимодействия электрического заряда с полем, q - величина этого заряда. $[\varphi] = \frac{Дж}{Кл} = В$, Вольт.

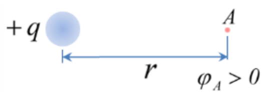
(пример: φ = 10 В означает, что точечный заряд в 1 Кл в данной точке электрического поля имеет потенциальную энергию, равную 10 Дж).

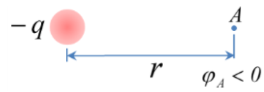
Из уравнения (3) следует, что потенциальную энергию точечного заряда в данной точке поля можно определить по формуле:

$$П = q\varphi.$$

- Потенциал электростатического поля точечного заряда можно определить по формуле:

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





Отметим, что потенциал - *скалярная* величина, которая определяется с точностью до произвольной постоянной.

Принцип суперпозиции

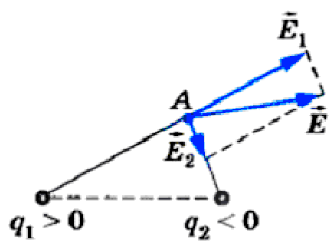
(позволяет определить характеристики результирующего электростатического поля, создаваемого системой точечных зарядов)

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

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

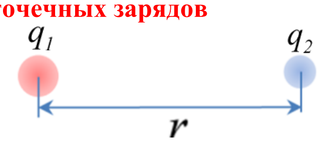
Результирующий потенциал электростатического поля $\varphi_{рез}$ *системы точечных зарядов равен алгебраической сумме потенциалов* φ_i *полей, создаваемых каждым из имеющихся зарядов:*

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



Потенциальная энергия электростатического взаимодействия двух точечных зарядов

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

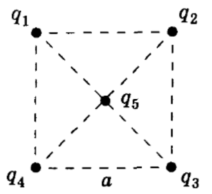


где $k = 9\cdot 10^9 \frac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$; q_1 и q_2 - точечные заряды, $Кл$;

ε - диэлектрическая проницаемость среды; r - расстояние между зарядами, $м$

Потенциальная энергия электростатического взаимодействия системы точечных зарядов

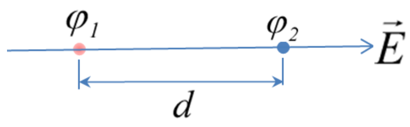
$$\Pi = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} q_i\varphi_i ,$$



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

Связь между модулем напряжённости однородного электростатического поля и разностью потенциалов

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} ,$$



где $\varphi_1 - \varphi_2$ - разность потенциалов между двумя точками, $[B]$

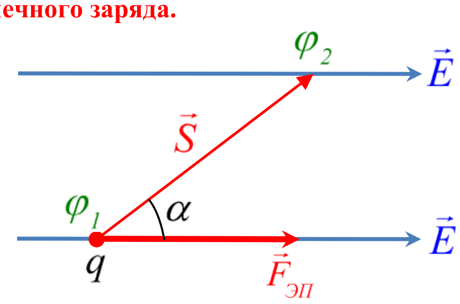
d - расстояние между этими точками, $[м]$

Работа сил электростатического поля по перемещению точечного заряда.

$$A_{ЭП} = q\left(\varphi_{начальный} - \varphi_{конечный}\right) ,$$

$$A_{ЭП} = -\left(\Pi_{начальная} - \Pi_{конечная}\right) ,$$

$$A_{ЭП} = F_{ЭП} S \cos\alpha ,$$



где $\varphi_{начальный}$ и $\varphi_{конечный}$ - потенциал электрического поля в начальной и конечной точках траектории, $[B]$,

$\Pi_{начальная}$ и $\Pi_{конечная}$ - потенциальная энергия заряда в начальной и конечной точках траектории, $[Дж]$,

$\vec{S}$ - вектор перемещения точечного заряда, $м$; $\vec{E}$ - вектор напряжённости электрического поля, $\frac{B}{м}$

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

Связь между напряжённостью $\vec{E}$ и потенциалом φ

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

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \int_1^2 \vec{E}\cdot d\vec{l} .$$

или

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

где $\frac{\partial\varphi}{\partial x}$, $\frac{\partial\varphi}{\partial y}$ и $\frac{\partial\varphi}{\partial z}$ - частные производные потенциала φ электростатического поля по координатам x, y и z,

$\vec{i}$, $\vec{j}$ и $\vec{k}$ - единичные орты координатных осей.

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

$$\vec{E} = -grad\,\varphi \text{ или } \vec{E} = -\nabla\varphi \qquad (4)$$

Градиент функции *- это вектор, характеризующий скорость пространственного изменения функции, и направлен в сторону максимального её возрастания.*

Как видно из формулы (4) , вектор напряженности электрического поля направлен в сторону, противоположную максимальному возрастанию потенциала. Зная эквипотенциальные поверхности, и используя равенство (4) можно определить направления вектора напряженности.

Графическое изображение электростатических полей

Электростатические поля можно изображать:

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

Зная вектор напряженности в каждой точке, электрическое поле наглядно можно представить с помощью линий вектора напряженности (*силовых линий*).

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

(за направление вектора $\vec{E}$ приняли направление, совпадающее с вектором силы $\vec{F}$, действующей на положительный точечный заряд в данной точке поля.)

Силовые линии могут иметь вид прямых или кривых произвольной формы. Через каждую точку пространства проходит только одна силовая линия. Условно принято, что силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах, то есть силовые линии электростатического поля незамкнуты.

На рис. 1 представлены силовые линии уединённых положительного и отрицательного точечных зарядов, а так же поле электрического диполя и поле внутри плоского конденсатора .

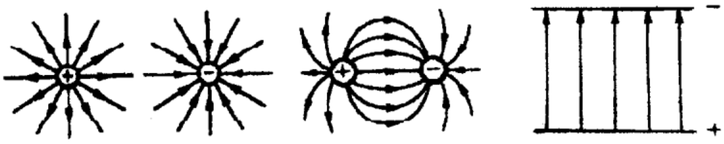


рис. 1

***Эквипотенциалью** называется геометрическое место точек одинакового потенциала.*

На рис. 2 представлены эквипотенциальные линии уединённых положительного и отрицательного точечных зарядов, а так же электрического диполя и поля внутри плоского конденсатора .

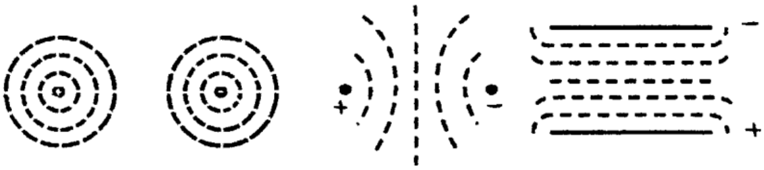


рис. 2.

Силовые линии всегда перпендикулярны в каждой точке поля к эквипотенциалям.

Эквипотенциали обычно проводить так, чтобы разность потенциалов между соседними поверхностями была одинаковой. Тогда по густоте эквипотенциальных поверхностей можно наглядно судить о значении напряженности поля в разных точках. Там, где эти поверхности расположены гуще, там напряженность поля больше. В качестве примера на рис. 3 приведено двумерное изображение электростатического поля.

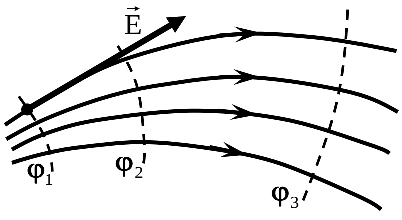


Рис. 3

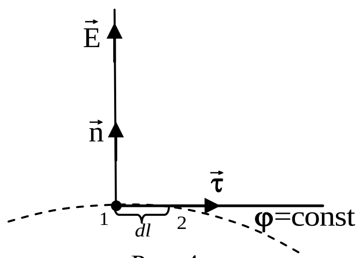


Рис. 4

Принято, что:

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

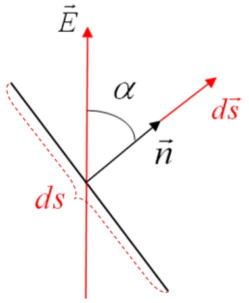
Однородным называется электростатическое поле, в каждой точке которого вектор напряжённости $\vec{E}$ имеет одну и ту же величину и направление.

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

Поток вектора $\vec{E}$

Элементарным потоком вектора $\vec{E}$ называется скалярная величина, равная скалярному произведению вектора напряжённости электрического поля $\vec{E}$ на вектор элемента площади поверхности $d\vec{s}$:

$$d\Phi_E = \vec{E}d\vec{s} = Eds \cdot cos\,\alpha\,,$$



где $[\Phi_E] = В \cdot м$, Вольт-метр; $\vec{E}$ - напряжённость электрического поля, $\frac{В}{м}$;

$d\vec{s} = ds \cdot \vec{n}$ - вектор элемента площади поверхности, $м^2$;

ds - элементарная площадь поверхности, $м^2$;

$\vec{n}$ - единичный вектор нормали к поверхности ds.

Вектор $d\vec{s}$ сонаправлен с единичным вектором нормали $\vec{n}$ этой поверхности и выбирается такой величины, чтобы элемент поверхности был плоским.

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

В общем случае поток вектора $\vec{E}$ через поверхность произвольной формы определяется по формуле:

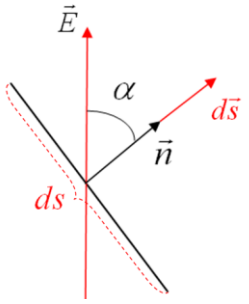
$$\Phi_E = \iint\limits_S E_n ds\,,$$

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

Поток вектора $\vec{D}$

Элементарным потоком вектора $\vec{D}$ называется скалярная величина, равная скалярному произведению вектора электрической индукции $\vec{D}$ на вектор элемента площади поверхности $d\vec{s}$:

$$d\Phi_D = \vec{D}d\vec{s} = Dds \cdot cos\,\alpha\,,$$



где $[\Phi_D] = \frac{Кл}{м^2}$, Кулон – на метр квадратный; $\vec{D}$ - вектор электрической индукции электрического поля, $\frac{Кл}{м^2}$;

$d\vec{s} = ds \cdot \vec{n}$ - вектор элемента площади поверхности, $м^2$;

ds - элементарная площадь поверхности, $м^2$;

$\vec{n}$ - единичный вектор нормали к поверхности ds.

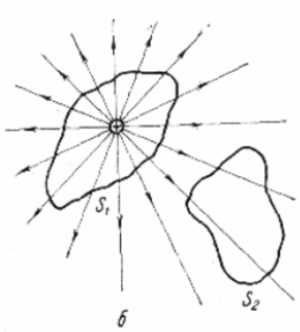
Вектор $d\vec{s}$ сонаправлен с единичным вектором нормали $\vec{n}$ этой поверхности и выбирается такой величины, чтобы элемент поверхности был плоским.

α - угол между векторами $\vec{D}$ и $d\vec{s}$.

В общем случае поток вектора $\vec{D}$ через поверхность произвольной формы определяется по формуле:

$$\Phi_D = \iint\limits_S D_n ds\,,$$

где $D_n = D\,cos\,\alpha$ - проекция вектора $\vec{D}$ на нормаль $\vec{n}$ к элементу поверхности ds.



Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме

Поток Φ вектора напряжённости электростатического поля $\vec{E}$ в вакууме через любую произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, расположенных внутри этой поверхности, делённой на ε_0

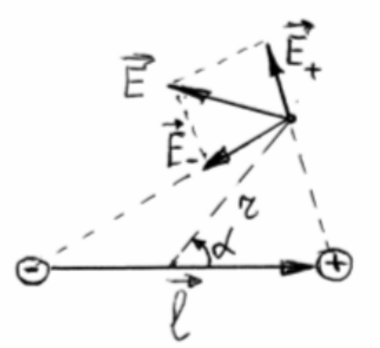
$$\Phi_E = \oint\limits_s \vec{E}d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum q_i$$

Теорема Гаусса для электростатического поля в веществе

Поток Φ вектора электрического смещения $\vec{D}$ электростатического поля в диэлектрике через любую произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме свободных зарядов, расположенных внутри этой поверхности

$$\Phi_D = \oint\limits_s \vec{D}d\vec{S} = \sum q_{iсвоб}$$

Электрический диполь



Электрическим диполем называется система, состоящая из двух одинаковых по величине разноимённых точечных зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга.

$E = k\dfrac{p}{\varepsilon r^3}\sqrt{3\cos^2\alpha + 1}$ - **напряжённость** электрического поля точечного диполя

$\varphi = k\dfrac{p}{\varepsilon r^2}\cos\alpha$ - **потенциал** электрического поля точечного диполя

где p - электрический дипольный момент, $Кл \cdot м$, r - расстояние от точечного диполя до рассматриваемой точки, $м$, α - угол между плечом диполя $\vec{l}$ и радиус-вектором $\vec{r}$ (см. рис.)

Плечом диполя $\vec{l}$ *называется вектор, проведённый от отрицательного заряда к положительному.* $[\vec{l}\,] = м$.

В качестве диполя можно рассматривать любую полярную молекулу, например, H_2O, HCl и др.

Точечным называется диполь, для которого расстояние r от рассматриваемой точки до диполя, много больше плеча диполя $\vec{l}$.

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

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

$[\vec{p}\,] = Кл \cdot м$, Кулон-метр.