

## 30 Электростатическое поле в пустоте

### 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

---

#### 1.1. Основные сведения об электромагнитном поле

Электромагнитное поле является одним из видов материи. Как и вещество, оно обладает массой, энергией, количеством движения и моментом количества движения, т. е. свойствами материи, которые подчиняются основным законам физики.

*Электромагнитное поле* – особый вид материи, который отличается непрерывным распределением в пространстве и обладает дискретностью структуры (фотоны), характеризуется способностью распространяться в вакууме со скоростью, близкой к скорости света, оказывает на заряженные частицы силовое воздействие, зависящее от их скорости и величины заряда.

Электромагнитное поле имеет две взаимосвязанные стороны – электрическое поле и магнитное поле.

*Электрическое поле* обусловлено электрическими зарядами и изменением магнитного поля, оказывает воздействие, в том числе на неподвижные заряженные частицы и тела, с силой, пропорциональной их заряду, и не зависит от их скорости.

*Магнитное поле* обусловлено движущимися электрическими зарядами и изменением электрического поля, оказывает воздействие на движущиеся заряженные тела и частицы с силой, пропорциональной их заряду и скорости движения.

Если электромагнитное поле неизменно во времени, то обе его стороны (электрическое поле и магнитное поле) могут рассматриваться отдельно друг от друга.

#### 1.2. Электростатическое поле. Закон Кулона

*Электрическое поле* (далее – поле) неподвижных заряженных тел при отсутствии в них электрических токов называют *электростатическим*. Примером электростатического поля является поле между электродами заряженного конденсатора.

Заряды неподвижных тел образуются совокупностью зарядов элементарных частиц, движущихся хаотически. Каждая такая частица окружена электромагнитным полем. Однако вследствие хаотического движения их результирующее магнитное поле даже в непосредственной близости от поверхности тела практически отсутствует. Электрические же поля частиц при избытке на теле частиц с зарядами того или иного знака суммируются и обнаруживаются в окружающем тело пространстве.

В основу определения электрического поля положено его механическое проявление. Оно описывается законом Кулона.

Два точечных заряда  $q_1$  и  $q_2$  в вакууме взаимодействуют друг с другом с силой  $\vec{F}$ , прямо пропорциональной произведению зарядов  $q_1$  и  $q_2$  и обратно пропорциональной квадрату расстояния  $R$  между ними:

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2 \vec{R}_0}{4\pi\epsilon_0 R^2}, \quad (1.1)$$

где  $\vec{R}_0$  – единичный вектор, направленный по линии, соединяющей заряды (рис. 1.1);

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная или диэлектрическая проницаемость вакуума (воздуха),  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Заряды с одинаковыми знаками отталкиваются, а с противоположными притягиваются.

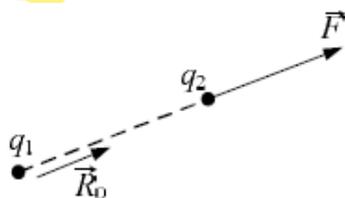


Рис. 1.1. Сила, действующая на заряд  $q_2$  со стороны заряда  $q_1$  при одинаковых знаках зарядов

Под точечными зарядами понимают следующее: линейные размеры тел, на которых расположены взаимодействующие заряды, много меньше расстояния между телами.

Если заряженные тела находятся не в вакууме, а в однородной, изотропной, т. е. обладающей одинаковыми свойствами во всех направлениях, непроводящей среде, то сила взаимодействия  $\vec{F}$  меньше в  $\epsilon_r$  раз.

Безразмерная величина  $\epsilon_r$  называется *относительной диэлектрической проницаемостью среды*, в которой находятся заряженные тела.

В СИ заряд измеряется в кулонах (Кл), расстояние – в метрах (м), а сила – в ньютонах (Н).

**Пример 1.1.** Определить, с какой силой взаимодействуют два точечных электрических заряда  $q_1 = 0,8 \cdot 10^{-6}$  Кл и  $q_2 = 3,2 \cdot 10^{-6}$  Кл, расположенных в минеральном масле на расстоянии  $R = 20$  см. Относительная диэлектрическая проницаемость минерального масла  $\epsilon_r = 2,2$ .

**Решение.** Для решения используем уравнение (1.1), подставив в него численные значения величин и значение  $\epsilon_r$  минерального масла:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r R^2} = \frac{0,8 \cdot 10^{-6} \cdot 3,2 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,2 \cdot 0,2^2} = 0,262 \text{ Н.}$$

### 1.3. Напряженность и потенциал электростатического поля

Основными величинами, характеризующими электростатическое поле, являются напряженность поля  $\vec{E}$  и потенциал  $\phi$ .

Напряженность электростатического поля – величина векторная, определяемая в каждой точке поля своей величиной и направлением. Потенциал – величина скалярная.

Электростатическое поле определено, если известен закон изменения  $\vec{E}$  и  $\phi$  во всех точках этого поля.

Если в электростатическое поле поместить настолько малый положительный заряд, что он своим присутствием не вызовет сколько-нибудь заметного перераспределения зарядов на телах, создающих поле, то отношение силы, действующей на заряд, к величине заряда  $q$  определяет напряженность поля в данной точке:

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

Отсюда следует, что сила  $\vec{F}$ , действующая на конечный точечный положительный заряд  $q$ , внесенный в поле, будет равна  $\vec{F} = q\vec{E}$ , а напряженность электрического поля численно равна силе, действующей на неподвижный заряд, равный единице (единичный заряд). Подчеркнем, что вектор напряженности  $\vec{E}$  имеет направление силы, действующей на положительный заряд.

Если поле создается несколькими зарядами ( $q_1, q_2, q_3 \dots$ ), то его напряженность равна геометрической сумме напряженностей от каждого из зарядов в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots,$$

т. е. при расчете электрического поля применим метод наложения.

Понятия потенциала и разности потенциалов связаны с работой, совершаемой силами поля при перемещении заряда.

На единичный положительный заряд в любой точке поля действует сила, равная напряженности  $\vec{E}$ . Под разностью потенциалов принято понимать работу сил поля при переносе единичного положительного заряда из одной точки поля в другую:

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

где  $d\vec{l}$  – вектор элемента пути, равный по величине элементу пути  $dl$  и направленный по касательной к пути в сторону перемещения заряженной частицы.

Потенциал измеряется в вольтах (В), элемент пути – в метрах (м), напряженность электрического поля – в вольтах на метр (В/м).

Если бы потенциал конечной точки пути 2 был равен 0, то потенциал точки 1 определился бы так:

$$\varphi_1 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l},$$

т. е. потенциал произвольной точки поля может быть определен как работа сил поля по переносу единичного положительного заряда из данной точки поля в точку поля, потенциал которой равен 0.

За точку, имеющую нулевой потенциал, можно принять любую точку поля. Если такая точка выбрана, то потенциалы всех точек поля определяют относительно этой точки.

Нередко принимают, что точка с нулевым потенциалом находится в бесконечности. Поэтому, особенно в курсе физики, распространено определение потенциала как работы, совершаемой силами поля при переносе единичного заряда из данной точки поля в бесконечность:

$$\varphi_1 = \int_1^{\infty} \vec{E} d\vec{l}.$$

Часто считают, что точка с нулевым потенциалом находится на поверхности Земли.

Таким образом, потенциал любой точки поля зависит от того, какой точке поля придан нулевой потенциал, т. е. потенциал определяется с точностью до постоянной величины. Однако это не имеет существенного значения, так как практически важен не потенциал какой-либо точки поля, а разность потенциалов и производная от потенциала по координатам.

#### 1.4. Электрическое напряжение

Работу сил электрического поля по переносу единичного положительного заряда из одной точки поля в другую называют *электрическим напряжением*  $U$ :

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}.$$

Таким образом, напряжение между двумя точками электрического поля равно разности потенциалов поля в этих точках.

Если электрическое поле между двумя точками равномерное и направление перемещения единичного заряда происходит по направлению линий напряженности, то

$$U_{12} = El, \quad (1.2)$$

где  $l$  – расстояние между точками 1 и 2.

Единица измерения электрического напряжения – вольт (В).

Применяются также производные от вольта: 1 киловольт (кВ) =  $= 10^3$  В; 1 милливольт (мВ) =  $10^{-3}$  В.

### 1.5. Электростатическое поле – поле потенциальное

В электростатическом поле интеграл  $\int_1^2 \vec{E} d\vec{l}$  не зависит от выбора пути интегрирования и является только функцией координат точек 1 и 2. Для доказательства этого положения рассмотрим работу сил поля при перемещении электрического заряда по двум разным путям: через точки 3 и 4 (рис. 1.2).

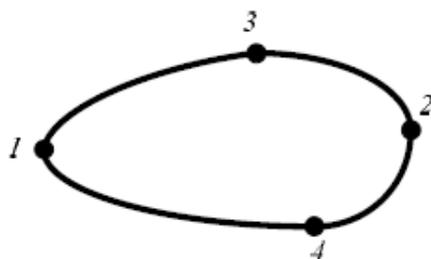


Рис. 1.2. Перемещение из одной точки поля в другую по двум разным путям

Предположим, по замкнутому пути 1, 3, 2, 4, 1 перемещается точечный единичный положительный заряд. На части замкнутого пути движение будет совершаться в направлении сил поля, и работа, затраченная силами поля, будет положительной. На другой части замкнутого пути движение будет происходить против сил поля, и работа сил поля будет отрицательной.

После обхода по замкнутому пути система, включая и точечный заряд, возвращается в исходное состояние и в соответствии с принципом сохранения энергии в электростатическом поле линейный интеграл напряженности поля по любому замкнутому контуру должен быть равен нулю:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0.$$

Отсюда непосредственно вытекает независимость линейного интеграла напряженности поля от выбора пути интегрирования при заданных начальной и конечной точках 1 и 2. Действительно:

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0 = \int_{132} \vec{E} d\vec{l} + \int_{241} \vec{E} d\vec{l} = 0,$$

откуда

$$\int_{132} \vec{E} d\vec{l} = - \int_{241} \vec{E} d\vec{l} = \int_{142} \vec{E} d\vec{l}.$$

Так как пути через точки 3 и 4 взяты произвольно, следовательно, интеграл  $\int_1^2 \vec{E} d\vec{l}$ , определяющий разность потенциалов двух точек поля, в электростатическом поле не зависит от выбора пути интегрирования и полностью определяется в заданном поле положением точек 1 и 2. Такое поле носит название *потенциального электрического поля*. Потенциальным является также электрическое поле постоянных токов, протекающих по неподвижным проводникам, при условии, что поле рассматривается вне области действия электродвижущих сил.

## 1.6. Графическое изображение электростатического поля

Электростатическое поле можно наглядно изобразить совокупностью линий напряженности электрического поля (силовых линий) и эквипотенциальных линий.

*Линия напряженности поля* – это мысленно проведенная в поле линия, начинающаяся на положительно заряженном теле и оканчивающаяся на отрицательно заряженном теле. Касательная в каждой точке линии совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в этой точке. Вдоль линии напряженности электрического поля двигался бы весьма малый положительный заряд, если бы он имел возможность свободно перемещаться в поле и не обладал инерцией.

Поскольку положительный и отрицательный заряды, создающие поле, не могут быть в одной и той же точке, то линии напряженности электрического поля не могут быть линиями, замкнутыми сами на себя.

В электростатическом поле существуют эквипотенциальные поверхности, т. е. совокупность точек поля, имеющих один и тот же потенциал. Следы эквипотенциальных поверхностей на мысленно проведенной плоскости, пересекающей электростатическое поле, образуют эквипотенциальные линии. Эквипотенциальные линии электростатического поля являются замкнутыми на себя линиями. Они пересекаются с линиями напряженности в любой точке поля под прямым углом.

На рисунке 1.3 изображены две заряженные оси с линейной плотностью зарядов  $+τ$  и  $-τ$  и картина поля в плоскости, перпендикулярной этим осям. Под заряженной осью понимают тонкий, теоретически бесконечно длинный металлический проводник (тонкая проволочка);  $τ$  – заряд на единицу длины заряженной оси.

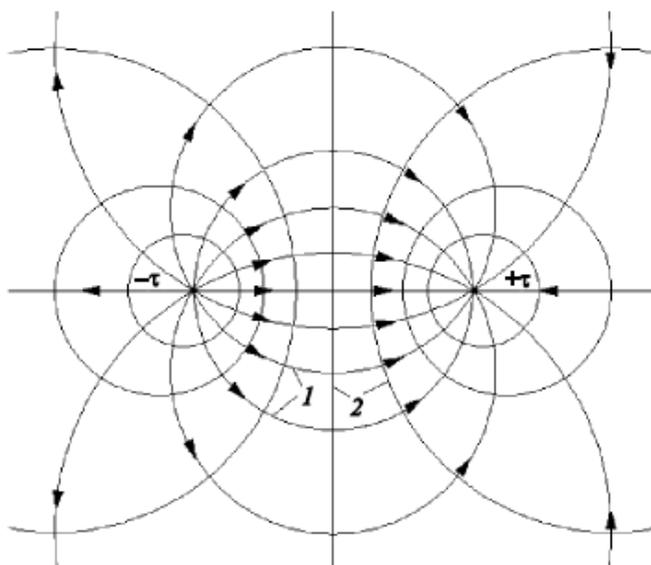


Рис. 1.3. Поле двух заряженных осей:  
1 – линии напряженности; 2 – эквипотенциальные линии