



**Виртуальный курс физики**  
**Электричество и магнетизм**  
**Лекция 9. Электростатика.**

---

**ТЕОРИЯ, ЗАДАЧИ, ПОДГОТОВКА К ЕГЭ**



# Электричество и магнетизм

## Электростатика

### Лекция 9

*Тема: Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда. Взаимодействие электрических зарядов. Электрическое поле и его напряженность. Принцип суперпозиции электрических полей. Потенциал. Разность потенциалов. Связь между напряженностью поля и разностью потенциалов. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле. Емкость. Конденсаторы.*

*Электростатика* изучает свойства и взаимодействия неподвижных в инерциальной системе отсчета заряженных тел или частиц.

#### **9.1. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда**

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

Различают два вида электрических зарядов – положительные и отрицательные. Единицей измерения заряда в СИ служит кулон (Кл). Наименьший по численному значению заряд, существующий в природе, называется *элементарным*. Стабильным носителем элементарного положительного заряда является протон, а отрицательного – электрон. Эти заряды равны, и их численное значение составляет  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Все другие заряды кратны элементарному:

$$q = ne,$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $e$  – элементарный заряд.

*Закон сохранения электрического заряда*: алгебраическая сумма электрических зарядов тел или частиц, образующих электрически изолированную систему, остается постоянной при любых процессах, происходящих в этой системе.

В большинстве задач, решаемых в электростатике, размеры и формы заряженных тел малы по сравнению с расстояниями между ними. Заряды, удовлетворяющие этому условию, называются *точечными зарядами*.

## 9.2. Взаимодействие электрических зарядов. Закон Кулона

Электрические заряды взаимодействуют друг с другом: разноименные заряды притягиваются, а одноименные – отталкиваются. Сила взаимодействия зарядов зависит от их численного значения, расстояния между ними и электрических свойств среды, в которой они находятся. Сила взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга в вакууме, подчиняется опытному *закону Кулона*: сила  $F$  электростатического взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся в вакууме, прямо пропорциональна произведению этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

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

Таким образом, закон Кулона можно записать следующим образом:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Численное значение коэффициента пропорциональности

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Нм}^2}{\text{Кл}^2}.$$

Как показывает опыт, сила взаимодействия зарядов в однородной жидкой или газообразной среде уменьшается по сравнению с силой взаимодействия этих зарядов в вакууме. Величина  $\epsilon$ , показывающая, во сколько раз сила электростатического взаимодействия в среде меньше, чем в вакууме, называется *относительной диэлектрической проницаемостью среды*. Закон Кулона с учетом диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  записывается следующим образом:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}.$$

### 9.3. Электрическое поле. Напряженность поля

Взаимодействие между электрически заряженными телами и частицами осуществляется с помощью *электромагнитного поля*, которое представляет собой одну из форм материи.

*Электрическое поле* является частью электромагнитного поля, создаваемого электрически заряженными телами или частицами и действующего на эти объекты. Электрическое поле, создаваемое неподвижными в инерциальной системе отсчета зарядами, называется *электростатическим полем*.

*Напряженностью  $\mathbf{E}$  электрического поля* называется физическая величина, равная силе  $\mathbf{F}$ , действующей на единичный положительный заряд  $q$ , внесенный в данную точку поля:

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

На любой заряд  $q$ , внесенный в точку поля с напряженностью  $E$ , со стороны поля будет действовать сила, модуль которой

$$F = qE.$$

Графически электрические поля изображаются с помощью силовых линий. *Силовая линия* – линия, в каждой точке которой касательная к ней совпадает с вектором напряженности  $\mathbf{E}$ . Силовые линии начинаются на положительных и оканчиваются на отрицательных зарядах.

На рис. 9.1 приведены поля уединенных точечных зарядов (*а*) и поле двух разноименных близко расположенных зарядов (*б*).

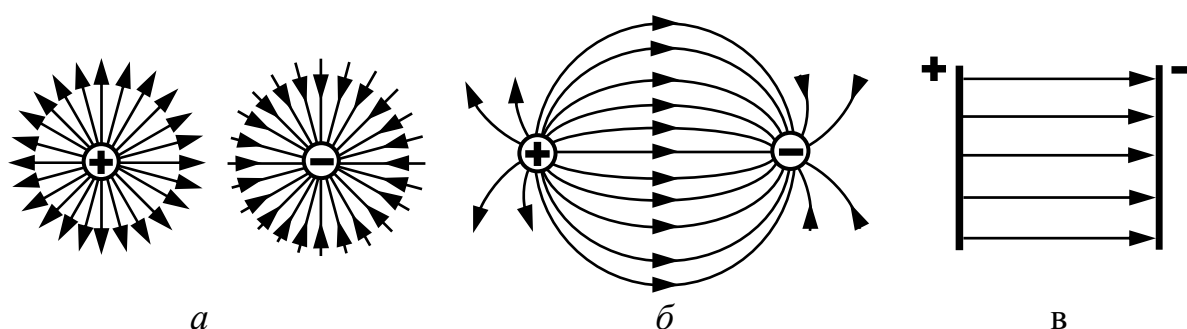


Рис. 9.1

Поле, напряженность которого во всех точках одинакова ( $\mathbf{E} = \text{const}$ ), называется *однородным*. Силовые линии однородного электростатического поля представляют собой параллельные линии (рис. 9.1, в).

Напряженность электрического поля в СИ измеряется в ньютонах на кулон  $\left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right)$ .

#### 9.4. Напряженность поля точечного заряда. Принцип суперпозиции электрических полей

Напряженность электрического поля зависит от значения зарядов, создающих поле, их пространственного распределения, координат точки, в которой определяется напряженность, и электрических свойств среды; последние характеризуются диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Величина напряженности поля, создаваемого точечным зарядом  $q$  в точке, удаленной от заряда на расстояние  $r$ ,

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

Величина напряженности поля, созданного равномерно заряженным по поверхности шаром радиусом  $R$ , в точке, расположенной на расстоянии  $r$  от центра шара:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon r^2} \text{ при } r > R \text{ (вне шара),}$$
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{\epsilon R^2} \text{ при } r = R \text{ (на поверхности шара),}$$

$$E = 0 \text{ при } r < R \text{ (внутри шара).}$$

Если электрическое поле создано системой зарядов, то его напряженность определяется согласно *принципу суперпозиции*: напряженность поля, создаваемого системой зарядов, в любой точке поля равна геометрической сумме напряженностей полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_n = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i,$$

где  $n$  – число зарядов;  $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_n$  – напряженности полей, создаваемых зарядами  $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n$  в данной точке поля.

## 9.5. Потенциал. Разность потенциалов. Работа сил электростатического поля

Работа, совершаемая электростатическими силами при перемещении заряда  $q$  из одной точки поля в другую, зависит только от начального и конечного положений заряда в этом поле. Из механики известно, что такие силы являются *потенциальными*. Следовательно, заряд, помещенный в электростатическое поле, обладает потенциальной энергией.

Энергетической характеристикой электрического поля является потенциал. *Потенциалом поля*  $\varphi$  называется физическая величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного заряда, внесенного в данную точку поля:

$$\varphi = \frac{W_n}{q},$$

где  $W_n$  – потенциальная энергия заряда  $q$  в данной точке поля.

Любой заряд  $q$ , внесенный в точку поля с потенциалом  $\varphi$ , обладает потенциальной энергией

$$W_n = q\varphi.$$

Так как электростатическое поле является потенциальным, работа, совершаемая силами этого поля при перемещении заряда  $q$  между точками поля с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , равна изменению потенциальной энергии этого заряда, взятому с противоположным знаком:

$$A_{12} = -(W_{n2} - W_{n1}) = W_{n1} - W_{n2}.$$

С учетом того, что  $W_{n1} = q\varphi_1$ , а  $W_{n2} = q\varphi_2$ , имеем

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

где  $\varphi_1 - \varphi_2$  – разность потенциалов.

*Разностью потенциалов* называется физическая скалярная величина, численно равная работе, совершаемой при перемещении единичного положительного заряда между точками поля с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  :

$$-\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}.$$

Если силы электростатического поля перемещают заряд  $q$  из точки 1 в бесконечно удаленную точку, в которой  $W_{\infty} = 0$  и соответственно  $\varphi_{\infty} = 0$ , то

$$\varphi_1 = \frac{A_{1,\infty}}{q}.$$

Отсюда следует, что потенциал в данной точке электростатического поля численно равен работе, которую необходимо совершить для перемещения единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

В системе СИ потенциал (разность потенциалов) измеряется в вольтах (В):  $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$ .

Потенциал любой точки поля зависит от значения зарядов, создающих поле, положения данной точки относительно зарядов и электрических свойств среды. Потенциал поля, созданного точечным зарядом  $q$  в точке, отстоящей от заряда на расстояние  $r$ , определяется выражением

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r},$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

Потенциал электростатического поля шара радиусом  $R$  с зарядом  $q$ , равномерно распределенным по поверхности, вне шара совпадает с потенциалом точечного заряда  $q$ , помещенного в центр шара.

Геометрическое место точек электрического поля, в которых потенциал имеет одинаковое значение, называется *эквипотенциальной поверхностью* (или *линией*).

Потенциал электростатического поля, созданного системой  $n$  электрических зарядов, равен *алгебраической* сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

## 9.6. Связь между напряженностью поля и разностью потенциалов в однородном поле

В любой точке однородного поля с напряженностью  $E$  на заряд  $q$  действует сила  $F = qE$ . При перемещении заряда из точки 1 в точку 2 вдоль силовой линии совершается работа

$$A = Fd,$$



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

С учетом того, что  $F = qE$ ,

$$A = qEd.$$

Вместе с тем эту работу можно выразить через разность потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  точек 1 и 2:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Из сопоставления выражений для работы следует, что модуль вектора напряженности и разность потенциалов в однородном электростатическом поле связаны соотношением

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

Если координаты точек 1 и 2 равны соответственно  $x_1$  и  $x_2$ , то

$$d = x_2 - x_1 \text{ и } E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{x_2 - x_1} = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}.$$

Знак «минус» показывает, что вектор  $\mathbf{E}$  направлен в сторону убывания потенциала.

## 9.7. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле

При помещении любого вещества во внешнее электростатическое поле положительные и отрицательные электрические заряды частиц вещества смещаются в противоположных направлениях, т. е. происходит разделение этих зарядов. Электрическое поле в веществе получается в результате наложения (суперпозиции) внешнего поля на поле разделенных зарядов.

**Проводники в электростатическом поле.** *Проводниками* называют вещества, которые проводят электрический ток, так как в таких веществах имеются свободные носители заряда. В металлических проводниках, например, такими носителями заряда являются свободные электроны.

При помещении металлического проводника в электрическое поле свободные электроны смещаются в направлении, противоположном направлению поля. При этом на одном конце проводника образуется избыток отрицательных зарядов, в то время как на противоположном конце – избыток

положительных зарядов. Разделение зарядов происходит до тех пор, пока не установится такое их распределение, при котором во всех точках внутри проводника напряженность электрического поля станет равной нулю ( $\mathbf{E} = 0$ ).

Явление разделения положительных и отрицательных зарядов в проводнике, помещенном в электростатическое поле, называется *электростатической индукцией*.

**Диэлектрики в электрическом поле.** *Диэлектриками* называют вещества, которые не проводят электрический ток, поскольку в таких веществах отсутствуют свободные носители заряда.

Если диэлектрик поместить во внешнее электростатическое поле, происходит его *поляризация*. Механизм поляризации связан со строением молекул диэлектрика, которые могут быть *полярными* и *неполярными*. В полярных молекулах центры симметрии положительных и отрицательных зарядов разделены, в неполярных молекулах центры симметрии положительных и отрицательных зарядов совпадают.

Во внешнем электростатическом поле в неполярных молекулах в пределах каждой молекулы происходит смещение электрических зарядов: положительных – в направлении поля, отрицательных – против направления поля. Полярные молекулы в отсутствие электрического поля вследствие хаотического движения ориентированы произвольно. Под действием же электрического поля полярные молекулы ориентируются преимущественно вдоль силовых линий поля: положительный заряд – в направлении поля, отрицательный – против направления поля.

В результате поляризации на двух противоположных поверхностях диэлектрика (поверхности *a* и *b* на рис. 9.2) появляются некомпенсированные заряды противоположных знаков: поверхность *a* имеет отрицательный, а поверхность *b* – положительный заряд. Эти заряды называются *связанными*, так как не могут быть отделены от молекул, в состав которых входят.

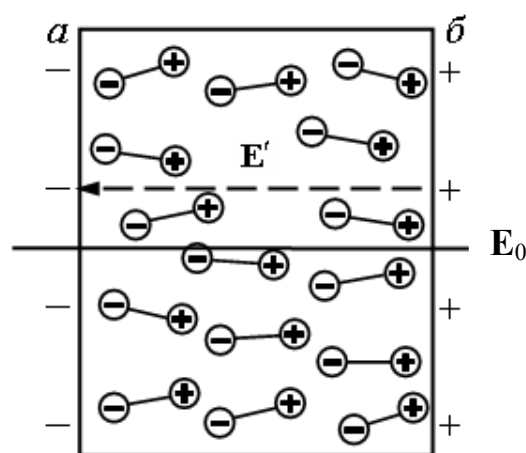


Рис. 9.2

Связанные заряды создают внутри диэлектрика собственное электрическое поле напряженностью  $\mathbf{E}'$ . В соответствии с принципом суперпозиции напряженность электрического поля  $\mathbf{E}$  внутри поляризованного диэлектрика равна геометрической сумме напряженности  $\mathbf{E}_0$  внешнего поля и напряженности  $\mathbf{E}'$  связанных зарядов:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'.$$

Модуль вектора напряженности получается равным

$$E = E_0 - E' < E_0,$$

т. е. напряженность электрического поля в диэлектрике  $E$  оказывается меньше напряженности  $E_0$  внешнего поля.

*Относительная диэлектрическая проницаемость среды  $\varepsilon$*  показывает, во сколько раз напряженность поля, образованного свободными зарядами в вакууме  $E_0$ , больше напряженности поля  $E$  в диэлектрике:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  является основной электрической характеристикой диэлектрика. Для всех веществ  $\varepsilon > 1$ , для вакуума  $\varepsilon = 1$ . Значение  $\varepsilon$  зависит от природы диэлектрика и колеблется от значений, очень мало отличающихся от единицы, до нескольких тысяч.

## 9.8. Емкость

При изменении заряда проводника его электрический потенциал также изменяется: с увеличением заряда возрастает потенциал. Способность проводника накапливать электрический заряд характеризуется емкостью.

*Емкостью (емкостью) проводника* называется отношение заряда  $q$  проводника к его потенциалу  $\varphi$ :

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Емкость проводника зависит от его формы и размеров, электрических свойств среды, в которой он находится, а также от наличия вблизи него других проводящих тел. Емкость не зависит от материала проводника и от наличия полостей внутри него (например, металлические сплошной и полый шары одинакового радиуса имеют одинаковые емкости).

Емкость уединенного проводника в форме проводящего шара или сферы радиусом  $R$  определяется выражением

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R,$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

В системе СИ емкость измеряется в фарадах (Ф). Один фарад – емкость такого проводника, потенциал которого увеличивается на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл ( $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$ ).

На практике используются кратные фараду единицы: микрофарад ( $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ), пикофарад ( $1 \text{ пкФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ).

Для того чтобы увеличить заряд проводника, необходимо преодолеть силы отталкивания между зарядами на проводнике и зарядом, переносимым на проводник. Работа внешних сил, необходимая для того, чтобы преодолеть эти силы и сообщить проводнику заряд  $q$  и соответственно потенциал  $\varphi$ , служит мерой энергии заряженного проводника. Эта энергия называется *собственной энергией заряженного проводника* и может быть вычислена по одной из формул:

$$W_э = \frac{q\varphi}{2}, \quad W_э = \frac{q^2}{2C}, \quad W_э = \frac{C\varphi^2}{2}.$$

Емкость двух проводников называется *взаимной емкостью*. Взаимная емкость

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

где  $q$  – заряд одного из проводников;  $\varphi_1 - \varphi_2$  – разность потенциалов между ними.

Эта емкость зависит от линейных размеров и геометрической формы проводников, их взаимного расположения и диэлектрических свойств среды, в которой они находятся.

## 9.9. Конденсаторы

Конденсатор представляет собой систему из двух изолированных проводников (обкладок), находящихся вблизи друг друга и заряженных одинаковыми по модулю и противоположными по знаку зарядами ( $+q$  и  $-q$ ). При этом обкладки имеют такую геометрическую форму и располагаются таким образом относительно друг друга, что создаваемое зарядом обкладок поле практически сосредоточено между ними.

Основной характеристикой конденсатора является его емкость. *Емкостью конденсатора  $C$*  называется величина, равная отношению заряда обкладки конденсатора к разности потенциалов между обкладками  $\varphi_1 - \varphi_2$ :

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

где  $U = \varphi_1 - \varphi_2$  – напряжение между обкладками конденсатора.

Емкость конденсатора зависит от формы и размеров обкладок, расстояния между ними и электрических свойств среды между обкладками.

Простейший (плоский) конденсатор представляет собой две плоскопараллельные проводящие пластины, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Для увеличения емкости конденсатора между пластинами помещают диэлектрик. Емкость плоского конденсатора зависит от геометрических размеров конденсатора и диэлектрических свойств среды между пластинами:

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

где  $S$  – площадь одной из пластин;  $d$  – расстояние между ними;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды в пространстве между пластинами.

Для получения необходимой емкости конденсаторы соединяют в батареи.

При *параллельном соединении* конденсаторов (рис. 10.3) общая емкость батареи

$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

При таком соединении общая емкость батареи оказывается больше, чем самая большая емкость конденсатора, входящего в нее.

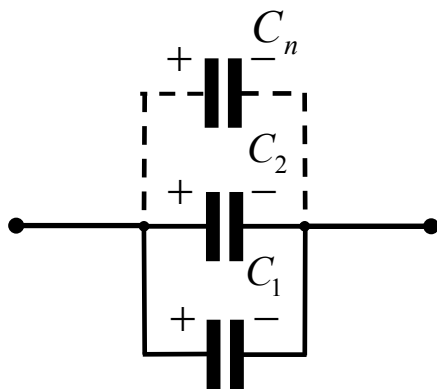


Рис. 9.3

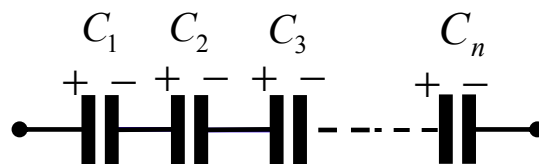


Рис. 9.4

При *последовательном соединении* (рис. 9.4) общая емкость определяется выражением

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

При этом общая емкость такой батареи оказывается меньше самой малой емкости конденсатора, входящего в батарею.

Энергию заряженного конденсатора можно определить с помощью следующих формул:

$$W_э = \frac{q(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} = \frac{qU}{2},$$
$$W_э = \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{CU^2}{2},$$
$$W_э = \frac{q^2}{2C}.$$

## **От авторов**

***Возникли трудности в усвоении теоретического курса или в его применении при решении конкретных задач, тестов – записывайтесь на наши курсы и мы поможем Вам подойти к экзамену во всеоружии.***

***Наш адрес:***

***190031, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 9, ПГУПС, факультет довузовской подготовки.***

***Наши телефоны отдела заочной формы обучения:***

***8 (931) 214-51-45;  
8 (812) 457-88-07 .***