

Глава 9 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

9.1. Электрические заряды. Закон сохранения заряда

Электрический заряд. Все тела в природе состоят из мельчайших частиц, которые условно названы элементарными. Элементарные частицы характеризуются массой и электрическим зарядом. Сила электромагнитного взаимодействия частиц на многое порядков превышает силу их гравитационного взаимодействия. Значение силы электромагнитного взаимодействия частиц определяется их электрическими зарядами.

По современным представлениям, **электрический заряд** является физической величиной, характеризующей интенсивность электромагнитных взаимодействий.

Два знака электрических зарядов. В природе существуют частицы с электрическими зарядами противоположных знаков. Заряд электрона считают отрицательным, а заряд протона — элементарной частицы, которая входит в состав ядра атома, — положительным. Большинство тел **электрически нейтральны**; число электронов в них равно числу протонов. Нейтрален атом любого вещества. Если нарушить каким-то образом электрическую нейтральность тела, то оно становится **наэлектризованным**. Тело, имеющее избыток электронов, заряжено отрицательно. Тело, в котором электронов меньше, чем положительно заряженных частиц, заряжено положительно. Положительный заряд образуется, например, на стекле, потертом кожей, отрицательный — на янтаре, потертом шерстью.

Элементарный заряд. При электризации электрический заряд изменяется не непрерывным и произвольным образом, а только на строго определенное значение, равное или кратное минимальному количеству электричества, называемому элементарным электрическим зарядом.

■ Электрический заряд имеет дискретный характер и изменяется на целую кратную величину (квантуется).

Наименьшая по массе стабильная частица, обладающая элементарным электрическим отрицательным зарядом, называется **электроном**. Заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса электрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг. Заряд **протона** положителен и по модулю равен заряду электрона, его масса $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Заряд тела, состоящего из N заряженных частиц, кратен целым значениям заряда электрона: $Q = \pm Ne$. Элементарный заряд впервые был измерен Р. Э. Милликеном в 1909 г.

Существуют ли дробные заряды? Это предположение возникло в связи с предсказанием существования **кварков** — частиц, из которых построено большинство тяжелых элементарных частиц, например протонов. Заряд кварков предполагали равным $\pm 1/3 e$, $\pm 2/3 e$. Поиски кварков проводились многими учеными различными методами, но все они дали отрицательный результат. Таким образом, настоящее время экспериментально с большой точностью установлено, что

■ дробных зарядов в свободном состоянии не существует.

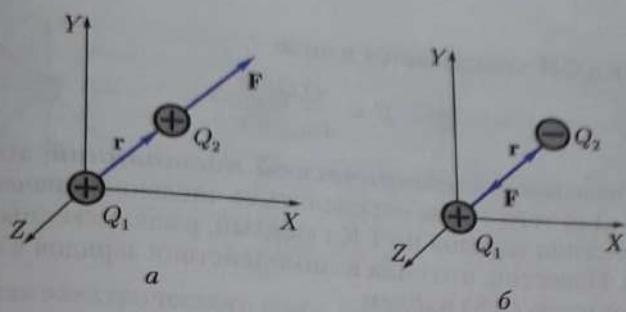


Рис. 9.2

ра распределения зарядов на них. В случае неподвижных точечных зарядов, т.е. зарядов, распределенных на телах, линейные размеры которых малы по сравнению с расстояниями между ними, справедлив закон Кулона.

Формулировка закона Кулона. Опытным путем Кулоном было установлено, что если заряд вносимого шарика увеличивать в n раз, оставляя заряд шарика, закрепленного на стеклянной палочке, постоянным, то сила их взаимодействия увеличивается в n раз. Если расстояние между шариками увеличивать в n раз, то сила их взаимодействия уменьшится в n^2 раз.

Закон Кулона: сила электрического взаимодействия F между двумя неподвижными точечными электрически заряженными телами Q_1 и Q_2 в вакууме пропорциональна произведению их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F = k \frac{|Q_1||Q_2|}{r^2}, \quad (9.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц физических величин.

При взаимодействии одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются. Силы Кулона направлены по прямой, соединяющей заряды.

Сила отталкивания \mathbf{F} , действующая на заряд Q_2 со стороны одноименного заряда Q_1 , совпадает по направлению с радиусом-вектором \mathbf{r} , проведенным из Q_1 к этому заряду (рис. 9.2, а). Сила притяжения, действующая на заряд Q_2 со стороны разноименного заряда Q_1 , имеет противоположное направление (рис. 9.2, б). Силы отталкивания принято считать положительными, силы притяжения – отрицательными.

Знак модуля в обозначении заряда в дальнейшем будем опускать.

В СИ заряд – производная величина, определяемая через основную величину – силу тока. Единица электрического заряда в СИ – кулон (Кл).

Кулон равен электрическому заряду, проходящему за 1 с через перечное сечение проводника при силе тока 1 А.

Коэффициент пропорциональности в законе Кулона (9.2) в СИ определяется по формуле

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (9.3)$$

Выбор точки с нулевым потенциалом обычно определяется в зависимости от условий задачи. При решении задач целесообразно полагать равным нулю потенциал Земли, а не бесконечно удаленных точек электрического поля. Выбор нулевого уровня потенциала не влияет на значение разности потенциалов.

При решении задач часто необходимо знать потенциал электростатического поля точечного заряда Q в точке, удаленной на расстояние r от заряда:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (9.17)$$

Эта формула справедлива при условии, что потенциал стремится к нулю при $r \rightarrow \infty$.

Формулой (9.17) можно пользоваться и для определения потенциала поля шара радиусом R и зарядом Q , равномерно распределенным по его поверхности ($r > R$). Внутри шара имеется постоянный потенциал поля, равный

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}. \quad (9.18)$$

Эквипотенциальные поверхности. Графически электрическое поле можно изображать не только с помощью линий напряженности, но и с помощью **эквипотенциальных поверхностей** — совокупностей точек, имеющих одинаковый потенциал. Пересекаясь с плоскостью чертежа, эквипотенциальные поверхности дают **эквипотенциальные линии**.

На рис. 9.11 показаны эквипотенциальные линии поля точечного положительного заряда. Вокруг этого заряда можно провести бесконечное множество эквипотенциальных линий. Их чертят таким образом, чтобы разность потенциалов для двух любых соседних линий была одна и та же (например, 1 В). Такое изображение эквипотенциальных линий дает наглядное представление о том, как меняется разность потенциалов в данном поле.

На рис. 9.12 показан участок эквипотенциальной линии. В точке 1 помещен заряд Q . В однородном электрическом поле перенесем этот заряд Q на расстояние x из точки 1 в точку 2 вдоль линии равного потенциала ($\varphi = \text{const}$). В этом случае работа определяется по формуле $A = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$. В то же время $A = Fx \cos \alpha = QE x \cos \alpha$; следовательно, $Q(\varphi_1 - \varphi_2) = QE x \cos \alpha$. Так как $\varphi = \text{const}$,

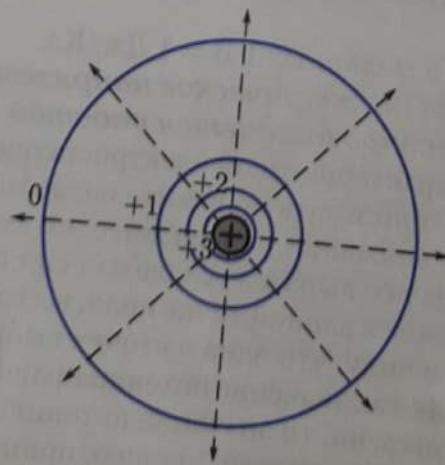


Рис. 9.11

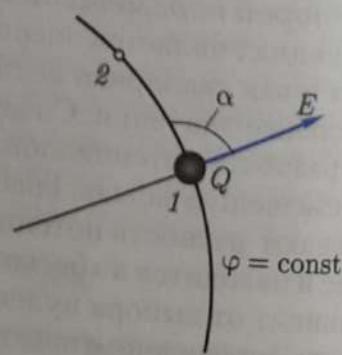


Рис. 9.12

то $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ (левая часть уравнения равна нулю, а следовательно, и правая часть должна быть равна нулю). Так как Q , x и E не могут быть равны нулю, то $\cos \alpha = 0$, т. е. $\alpha = 90^\circ$, откуда следует вывод:

вектор напряженности электрического поля E всегда перпендикулярен поверхности равного потенциала.

Отметим два важных свойства эквипотенциальных поверхностей:

- 1) в каждой точке эквипотенциальной поверхности вектор напряженности поля перпендикулярен ей и направлен в сторону убывания потенциала;
- 2) работа по перемещению заряда по эквипотенциальной поверхности равна нулю.

Исходя из свойств эквипотенциальных поверхностей можно по известному расположению эквипотенциальных поверхностей в каждой точке поля определить направление вектора напряженности или по известному расположению линий напряженности построить эквипотенциальные поверхности.

Если электрическое поле образовано несколькими зарядами, то потенциал в какой-либо точке поля равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым зарядом:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots \quad (9.19)$$

9.7. Связь между напряженностью и разностью потенциалов электрического поля

Электрическое поле имеет две характеристики: силовую (напряженность E) и энергетическую (потенциал φ). Напряженность и потенциал — различные характеристики одной и той же точки поля; следовательно, между ними должна существовать однозначная связь.

Если известно распределение потенциала, т.е. его значение в каждой точке поля, то можно найти и напряженность этого поля в каждой точке. Рассмотрим работу электрических сил в однородном поле при перемещении положительного заряда из точки 1 в точку 2 (рис. 9.13):

$$A = QE_x \Delta x, \quad (9.20)$$

где E_x — проекция вектора напряженности E на ось X .

С другой стороны, эту работу можно выразить через разность потенциалов на концах отрезка Δx :

$$A = Q(\varphi_2 - \varphi_1) = -Q\Delta\varphi, \quad (9.21)$$

где $\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$.

Приравняв правые части формул (9.20) и (9.21), получим $QE_x \Delta x = -Q\Delta\varphi$, откуда

$$E_x = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}.$$

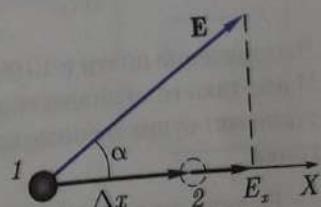


Рис. 9.13

Аналогично,

$$E_y = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta y}, \quad E_z = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta z}.$$

Следовательно, зная напряженность поля в каждой точке, можно вычислить разность потенциалов между любыми точками.

В случае однородного поля, например поля плоского конденсатора (см. рис. 9.4, б) модуль напряженности определяется по формуле

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \quad (9.22)$$

где d — расстояние; $(\varphi_1 - \varphi_2)$ — разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Разность потенциалов (электрическое напряжение) в СИ выражается в вольтах (В); напряженность электрического поля, в соответствии с (9.22), — в вольтах на метр (В/м).

9.8. Диэлектрики в электрическом поле. Поляризация диэлектриков

Диэлектрики. *Диэлектриками* называют вещества, не проводящие электрического тока. Термин «диэлектрик» был введен М. Фарадеем для обозначения среды, в которой может в отличие от металлов длительное время существовать электрическое поле. Диэлектрики используют для изоляции электрических цепей, а также для сообщения электрическим установкам особых свойств, позволяющих более полно использовать объем и массу материалов, из которых они изготовлены. Диэлектриками могут быть вещества, находящиеся в любом из трех агрегатных состояний: газообразном (азот, водород), жидком (продукты нефтепереработки), твердом (янтарь, фарфор, кварц).

■ В идеальном диэлектрике нет свободных зарядов.

Внешние электроны атомов диэлектрика крепко связаны с ядрами. При внутриатомном расстоянии порядка 10^{-10} м даже элементарный электрический заряд создает поле напряженностью

$$E = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot 10^{-20} \text{ м}^2} \approx 10^{11} \text{ В/м.}$$

Это значение почти в 10 000 раз больше, чем достигнутые в настоящее время (10^7 В/м). И все-таки если диэлектрик внести во внешнее электрическое поле, то диэлектрик претерпевает существенные изменения, что объясняется молекулярным строением диэлектрика.

Всякая молекула представляет собой систему с суммарным зарядом, равным нулю. Однако молекулы обладают электрическими свойствами и их в первом

тивоположно напряженности внешнего, поляризующего диэлектрик электрического поля E_0 (рис. 9.15). Напряженность суммарного поля внутри диэлектрика $E = E_0 + E'$. Результирующая напряженность E поля зависит от электрических свойств среды, она пропорциональна приложенной к диэлектрику напряженности E_0 внешнего поля:

$$E = \frac{E_0}{\epsilon}. \quad (9.23)$$

Диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \frac{E_0}{E}$ среды показывает, во сколько раз напряженность поля в вакууме больше, чем в диэлектрике. Это величина безразмерная. Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ приведена в табл. П.13 (см. прил.).

9.9. Проводники в электрическом поле

Проводники в электрическом поле. В зависимости от характера воздействия электрического поля тела подразделяются на проводники, диэлектрики и полупроводники. Свойства тел и поведение их в электрическом поле определяются строением и расположением атомов в телах. В состав атомов входят электрически заряженные частицы: положительные — протоны, отрицательные — электроны. В нормальном состоянии атом электрически нейтрален, так как число протонов, входящих в состав ядра атома, равно числу электронов, вращающихся вокруг ядра и образующих «электронные оболочки» атома. Электроны удерживаются в атоме силами электрического притяжения к ядру. Однако в металлах из-за особенностей их строения при внешнем воздействии электроны легко могут быть удалены за пределы «своего» атома и свободно перемещаться до тех пор, пока не будут захвачены каким-либо другим атомом. Электроны, потерявшие связь со своим атомом, называют **свободными**. Их движение имеет хаотический характер и зависит от температуры: чем выше температура, тем больше скорость движения свободных электронов. В металлических проводниках концентрация свободных электронов порядка 10^{28} м^{-3} . Движение таких электронов аналогично тепловому движению частиц газа, поэтому совокупность свободных электронов называют **электронным газом**.

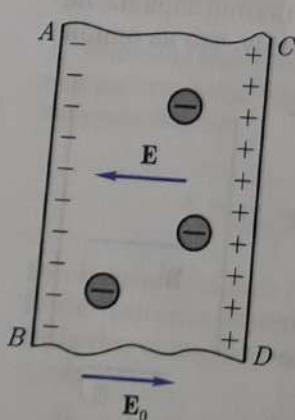


Рис. 9.16

Если металлический проводник помещен в электрическое поле, то на хаотическое движение электронов налагается упорядоченное движение в направлении, противоположном напряженности поля. Такое движение электронов называют **дрейфом**. На рис. 9.16 представлен проводник, помещенный во внешнее однородное электрическое поле E_0 . Под действием поля электроны перемещаются в направлении поверхности AB. В результате на поверхности проводника AB возникает избыточный отрицательный свободный заряд, на поверхности проводника CD — избыточный положительный заряд.



Вопросы для самоконтроля и повторения

1. Почему электрический заряд является физической величиной? 2. Что значит «электрический заряд квантуется» (дискретен)? 3. Выполняется ли закон сохранения заряда при электризации тел? 4. Почему закон Кулона является основным законом электростатики? 5. Что представляет собой электрическое поле и какими свойствами оно обладает? 6. Почему вектор напряженности электрического поля является его силовой характеристикой? 7. Зависит ли работа, совершаемая электрическим полем при перемещении заряда, от формы пути? Докажите. 8. Почему электрический потенциал в данной точке поля является его энергетической характеристикой? 9. Как расположены друг относительно друга линии напряженности электростатического поля и эквипотенциальные поверхности? 10. Как связаны напряженность и разность потенциалов электрического поля? 11. Чем отличаются диэлектрики от металлов? Где их используют? 12. В чем состоит явление поляризации диэлектриков? 13. Какие вещества относят к проводникам? 14. Где располагаются электрические заряды на зарженном проводнике? 15. Что характеризует электрическая емкость проводника, от чего она зависит? 16. Как рассчитывается электрическая емкость конденсаторов?