

§ 8. Проводники

Проводниками называют тела, в которых находится достаточно много заряженных частиц, имеющих возможность перемещаться по всему проводнику под действием электрического поля. Эти частицы называются свободными зарядами, так как могут относительно свободно перемещаться по телу проводника. В металлах такими частицами являются электроны, в электролитах – ионы.

Пусть есть заряженный проводник, помещенный во внешнее электростатическое поле. Под действием внешнего поля и собственного поля свободных зарядов свободные заряды будут перемещаться по телу проводника и перераспределяться до тех пор, пока не наступит равновесие и движение зарядов не прекратится. Явление перераспределения зарядов проводника, вызванное влиянием внешнего электростатического поля, называется *электростатической индукцией*. Для заряженных проводников во внешнем электростатическом поле в равновесном состоянии справедливы следующие утверждения:

1. Электростатическое поле внутри проводника отсутствует. Доказательство от противного: при наличии поля свободные заряды придут в движение и нарушится равновесие.

2. Напряженность поля вблизи поверхности проводника и снаружи проводника перпендикулярна поверхности. Другими словами, силовые линии входят в проводник и выходят из него перпендикулярно поверхности проводника. Доказательство от противного: в противном случае появится составляющая силы вдоль поверхности, действующая на свободные заряды на поверхности проводника, заряды придут в движение и равновесие нарушится.

3. Плотность объемного заряда (объемная плотность заряда), т.е. заряд единицы объема, внутри проводника равна нулю. Доказательство от противного: пусть сколь угодно малый макроскопический объем внутри проводника заряжен положительно (отрицательно), тогда из него выходят (входят) силовые линии, т.е. вблизи этого объема есть электрическое поле – противоречие с тем, что поле внутри проводника отсутствует.

4. Внутренность проводника не заряжена, весь заряд проводника сосредоточен на его поверхности. Это утверждение следует из равенства нулю плотности объемного заряда.

5. Разность потенциалов любых двух точек проводника, включая точки поверхности, равна нулю. Это значит, что потенциал всех точек проводника один и тот же. Поэтому говорят о потенциале проводника, не указывая конкретной точки проводника.

Для доказательства возьмем две произвольные точки проводника и перенесем пробный заряд из одной точки в другую по произвольной траектории, лежащей внутри проводника. Поля внутри проводника нет, на пробный заряд со стороны поля сила не действует, работа сил поля над зарядом равна нулю. Тогда, согласно (5.1), разность потенциалов между этими точками тоже равна нулю.

6. Сделаем внутри проводника полость, изъяв содержимое. Изъятие нейтрального содержимого полости не вызовет изменения поля во всех точках вне и внутри проводника и в полости. Значит, не изменится распределение зарядов по поверхности проводника, а напряженность поля внутри проводника и в полости будет равна нулю. Итак, полые проводники ведут себя как и сплошные.

Задача 8.1. Снаружи проводящего шара с зарядом $Q > 0$ находится точечный заряд $q > 0$ на расстоянии R от центра шара. Можно ли найти силу взаимодействия зарядов по формуле $F = kQq / R^2$?

Решение. Из-за явления электростатической индукции заряды на поверхности шара перераспределятся, удалившись от q . Сила станет меньше, чем рассчитанная по предложенной формуле! Этой формулой можно было бы воспользоваться, если бы заряд на поверхности шара остался равномерно распределенным.

Задача 8.2. Две проводящие пластины с зарядами Q и $3Q$ расположены параллельно и напротив друг друга. Площади пластин одинаковы, их размеры велики по сравнению с расстоянием между ними и можно считать, что заряды распределены по каждой поверхности пластин равномерно. Найти заряды на поверхностях пластин.

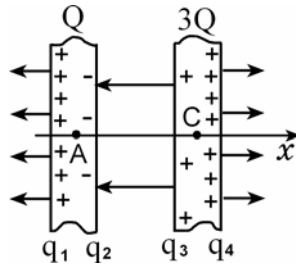


Рис. 8.1

Решение. Пусть площадь пластин S , а заряды на поверхностях пластин q_1, q_2, q_3, q_4 (рис. 8.1). Внутри проводящих пластин зарядов нет, заряды Q и $3Q$ распределены по поверхностям пластин:

$$q_1 + q_2 = Q, \quad q_3 + q_4 = 3Q.$$

Направим ось x перпендикулярно пластинам. Для любой точки вне и внутри пластин сумма напряженностей полей, созданных зарядами q_1, q_2, q_3

и q_4 равна напряженности \vec{E} результирующего поля:

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 = \vec{E}.$$

Для точек A и C , в которых напряженность поля равна нулю, последнее векторное равенство, записанное в проекциях на ось x , принимает вид:

$$\frac{q_1}{2\epsilon_0 S} - \frac{q_2}{2\epsilon_0 S} - \frac{q_3}{2\epsilon_0 S} - \frac{q_4}{2\epsilon_0 S} = 0, \quad \frac{q_1}{2\epsilon_0 S} + \frac{q_2}{2\epsilon_0 S} + \frac{q_3}{2\epsilon_0 S} - \frac{q_4}{2\epsilon_0 S} = 0.$$

Решая систему из четырех записанных скалярных уравнений, находим

$$q_1 = q_4 = 2Q, \quad q_2 = -Q, \quad q_3 = Q.$$

Полученный ответ справедлив при любом знаке Q . На рис. 8.1 показана картина силовых линий и распределение зарядов для случая $Q > 0$.

Задача 8.3. Проводящий полый шар (рис. 8.2) с радиусами сферических поверхностей R и $2R$ имеет заряд $2Q$ ($Q > 0$). В центре шара находится то-

точный заряд Q . Найти напряженность и потенциал в точках A и C на расстояниях $R/2$ и $3R$ от центра шара. Найти потенциал полого шара.

Решение. Все силовые линии, вышедшие из точечного заряда Q , заканчиваются на внутренней поверхности полого шара (на рис. 8.3 показана только часть силовых линий). Поэтому заряд на внутренней поверхности равен по модулю и противоположен по знаку заряду Q , т.е. равен $-Q$. Так как заряд

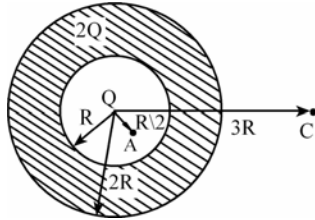


Рис. 8.2

проводника может располагаться только на его поверхностях и суммарный заряд равен $2Q$, то заряд внешней поверхности шара составит $3Q$. Итак, имеем систему зарядов, состоящую из точечного заряда Q и зарядов $-Q$ и $3Q$ на сферах радиусами R и $2R$.

Для точек A и C по принципу суперпозиции полей проекция напряженности результирующего поля на ось x , проведенную из центра шара через исследуемую точку (для точек A и C оси x различны), равна сумме проекций напряженностей полей, созданных зарядами Q , $-Q$, $3Q$:

$$E_{Ax} = k \frac{Q}{(R/2)^2} + 0 + 0 = 4k \frac{Q}{R^2} > 0,$$

$$E_{Cx} = k \frac{Q}{(3R)^2} + k \frac{-Q}{(3R)^2} + k \frac{3Q}{(3R)^2} = \frac{1}{3} k \frac{Q}{R^2} > 0.$$

Проекции получились положительные. Это значит, что напряженности поля в точках A и C направлены от центра шара и равны

$$E_A = 4k \frac{Q}{R^2}, \quad E_C = \frac{1}{3} k \frac{Q}{R^2}.$$

Найдем потенциалы. По принципу суперпозиции полей потенциал в т. A равен сумме потенциалов в этой точке от полей, созданных зарядами Q , $-Q$ и $3Q$:

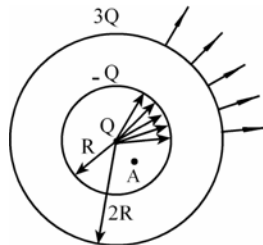


Рис. 8.3

Аналогично потенциал в т. C :

$$\varphi_A = k \frac{Q}{R/2} + k \frac{-Q}{R} + k \frac{3Q}{2R} = \frac{5}{2} k \frac{Q}{R}.$$

$$\varphi_C = k \frac{Q}{3R} + k \frac{-Q}{3R} + k \frac{3Q}{3R} = k \frac{Q}{R}.$$

Потенциал шара проще всего найти, определив потенциал наружной поверхности шара:

$$\varphi = k \frac{Q}{2R} + k \frac{-Q}{2R} + k \frac{3Q}{2R} = \frac{3}{2} k \frac{Q}{R}.$$