Лекция 5
Проводники в электрическом поле

Вопросы. *Условия равновесия и распределение зарядов в проводнике. Напряженность электрического поля вблизи поверхности проводника. Электростатический генератор Ван-де-Граафа. Проводники во внешнем электростатическом поле. Электростатическая индукция. Электризация через влияние. Расчет полей наведенных зарядов.*

5.1. Условия равновесия и распределение зарядов в проводнике

Проводники отличаются от диэлектриков наличием свободных носителей заряда. В металлических проводниках роль этих носителей выполняют свободные электроны, концентрация которых составляет приблизительно 10^{28} м$^{-3}$ и они способны перемещаться под действием самой малой силы. Для того чтобы заряды оставались в равновесии необходимо выполнение следующих условий:

1. Напряженность электрического поля внутри проводника должна быть равной нулю:

$$E = 0. \tag{5.1}$$

Согласно формуле (4.15) потенциал внутри проводника должен быть постоянным ($\varphi = \text{const}$).

2. На поверхности проводника силовые линии и вектор напряженности электрического поля должны быть направлены перпендикулярно к поверхности проводника:

$$\vec{E} = \vec{E}_n. \tag{5.2}$$

Это условие означает, что поверхность проводника в условиях равновесия является эквипотенциальной. В противном случае электроны двигались бы вдоль поверхности проводника.

При сообщении проводнику электрического заряда он распределяется в проводнике согласно условиям (5.1) и (5.2), что легко доказывается с помощью теоремы Гаусса. На рис. 5.1 изображен проводник произвольной формы (он может быть даже пустотелым). Выберем непосредственно под поверхностью проводника замкнутую поверхность S, показанную штриховой линией. Применим к этой поверхности теорему Гаусса:

$$\oint_S E_n dS = \frac{Q}{\varepsilon_0}.$$

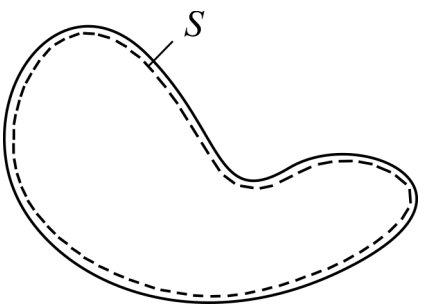


Рис. 5.1

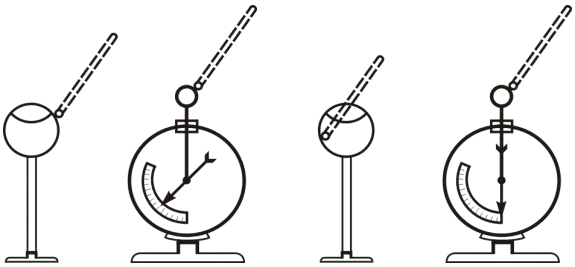


Рис. 5.2

В любой точке проводящей поверхности S поле должно быть равным нулю, – иначе электроны пришли бы в движение. Неподвижность зарядов в проводнике означает, что внутри проводника на них не действуют электрические силы, т. е. $E = 0$ на поверхности S. В этом случае

$$\oint_S E_n dS = 0 .$$

Левая часть выражения равна нулю, следовательно, и правая часть равна нулю. Таким образом $Q = 0$. Полный заряд внутри произвольной замкнутой поверхности равен нулю и, следовательно, сообщенный заряд распределился по поверхности проводника с некоторой плотностью σ. Экспериментально распределение заряда по поверхности проводника в свое время демонстрировал английский физик Майкл Фарадей (1791–1867) в опытах с так называемой клеткой Фарадея. Оклеенная листами станиоля, большая деревянная клетка изолировалась от Земли и сильно заряжалась при помощи электрической машины. В клетку с электроскопом помещался сам Фарадей. Электроскоп внутри клетки не показывал никакого отклонения. В условиях школьного кабинета физики показать распределение зарядов можно с помощью следующего опыта. Закрепим на изолированной подставке полый шар (рис. 5.2) и наэлектризуем его. Затем маленьким шариком, закрепленным на изолированной ручке, коснемся внешней поверхности полого шара, а потом стержня электрометра. В таком случае стрелка электрометра отклонится. После касания маленьким шариком внутренней стенки полого шара стрелка электрометра не отклоняется. Следовательно, все заряды сосредоточены на внешней поверхности проводника, а на поверхности полости в состоянии равновесия заряды располагаться не могут. Этот вывод вытекает и из того, что одноименные заряды отталкиваются и стремятся расположиться на наибольшем расстоянии друг от друга.

5.2. Напряженность электрического поля у поверхности заряженного проводника

Рассмотрим поверхность заряженного проводника (рис. 5.3). Для расчета напряженности электрического поля у его поверхности воспользуемся теоремой Гаусса. Рассмотрим небольшой цилиндр, образованный нормалями к поверхности проводника и основаниями площадью dS, одно из которых расположено внутри проводника, другое за его пределами.

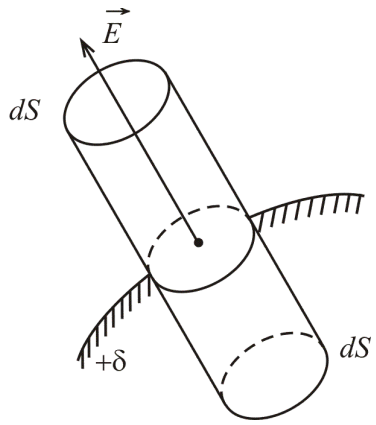


Рис. 5.3

Поток вектора напряженности через внутреннюю часть поверхности цилиндра равен нулю, так как внутри проводника электрическое поле отсутствует. Вне проводника в непосредственной близости от поверхности вектор $\vec{E}$ перпендикулярен ей (для этого высота цилиндра выбирается достаточно маленькой). В таком случае согласно теореме Гаусса поток вектора напряженности электрического заряда расположенного внутри цилиндра через его поверхность равен:

$$E\,dS = \frac{\sigma\,dS}{\varepsilon_0}.$$

Отсюда, напряженность поля вблизи поверхности проводника равна

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \tag{5.3}$$

и зависит только от плотности заряда на его поверхности.

5.3. Зависимость поверхностной плотности заряда от радиуса кривизны проводника

Два заряженных шара с радиусами R_1, R_2 и зарядами Q_1, Q_2 обладают потенциалами

$$\varphi_1 = k\frac{Q_1}{R_1} \text{ и } \varphi_2 = k\frac{Q_2}{R_2}.$$

В условиях равновесия их потенциалы должны быть равными $\varphi_1 = \varphi_2$. Для достижения равновесия шары предварительно соединили проводником.

Выразим

$$Q_1 = 4\pi R_1^2\sigma_1,\ Q_2 = 4\pi R_2^2\sigma_2.$$

Тогда

$$k\frac{4\pi R_1^2\sigma_1}{R_1} = k\frac{4\pi R_2^2\sigma_2}{R_2},$$

или

$$\sigma_1 R_1 = \sigma_2 R_2. \tag{5.4}$$

Учитывая, что поверхность проводника является эквипотенциальной из последнего выражения можно сделать вывод о том, что ***плотность зарядов на поверхности проводника тем выше, чем больше ее кривизна (чем меньше радиус кривизны поверхности)***. Особенно велика бывает плотность зарядов на остриях. Соответственно, напряженность поля вблизи остриев может быть настолько большой, что ионизируются молекулы воздуха. Ионы противоположного

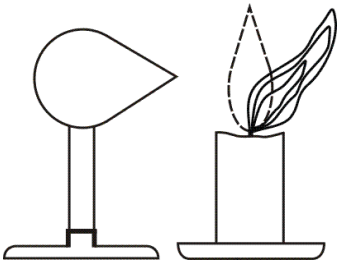


Рис. 5.4

заряду на проводнике знака притягиваются к нему, а одинакового отталкиваются. В результате начинается движение одноименных заряду ионов от проводника, которое увлекает и нейтральные молекулы. Это явление, называемое электрическим ветром, легко наблюдать на опыте (рис. 5.4). Если закрепленный на изолирующей подставке металлический шар с острием сильно наэлектризовать и поднести к зажженной свечке, то пламя отклонится.

5.4. Электрический генератор Ван-де-Граафа

Еще Фарадей указал способ полной передачи заряда от одного проводящего тела другому проводящему телу. Для этого во втором проводящем теле надо сделать полость и внести в нее первое тело. При соприкосновении вносимого тела с внутренней поверхностью полости заряд от него полностью переходит ко второму телу (рис. 5.2). Внесенное тело извлекается из полости, заряжается снова и операция повторяется многократно. Теоретически полому телу можно передать сколь угодно большой заряд. На практике величина переданного заряда ограничивается утечкой электричества из-за ионизации воздуха. На этом принципе и работает электростатический генератор Ван-де-Граафа (рис. 5.5).

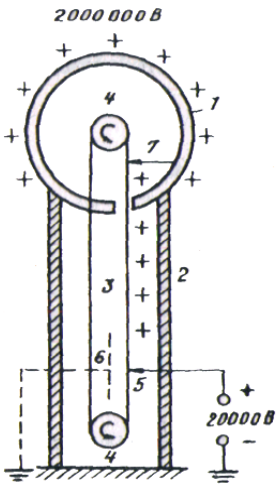


Рис. 5.5

Генератор состоит из полого металлического шара *1*, диаметром в несколько метров, укрепленного на изолирующей колонне *2*. Внутри колонны движется транспортерная лента *3*, изготовленная из прорезиненной ткани, которая заряжается от источника напряжения при помощи системы остриев *5*. С другой стороны ленты, напротив остриев, находится заземленная пластина *6*, способствующая стеканию зарядов с остриев *5* на ленту *3*. Заряд ленты передается шару *1* посредством другой системы остриев *7*, соединенных с его внутренней поверхностью. Генератор позволяет заряжать шар до потенциала 3–5 миллионов Вольт и используется для ускорения заряженных частиц.

5.5. Проводники во внешнем электрическом поле

При внесении незаряженного проводника в электрическое поле все свободные носители заряда немедленно приходят в движение: положительные в направлении вектора напряженности $\vec{E}$, отрицательные в противоположную сторону. В результате на противоположных концах проводника возникают разноименные заряды, а внутри проводника возникает дополнительное электрическое поле,

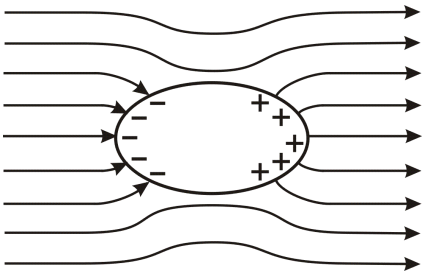


Рис. 5.6

направленное против внешнего. Перераспределение зарядов продолжается до тех пор, пока не выполняться условия (5.1) и (5.2), т. е. пока возникшее в результате перераспределения зарядов внутреннее электрическое поле полностью не скомпенсирует внешнее, а линии напряженности вне проводника не станут перпендикулярными его поверхности. Внесенный в электрическое поле нейтральный проводник искажает это поле. Часть силовых линий внешнего поля искривляются, а часть разрываются: они заканчиваются на отрицательных зарядах и вновь начинаются на положительных (рис. 5.6).

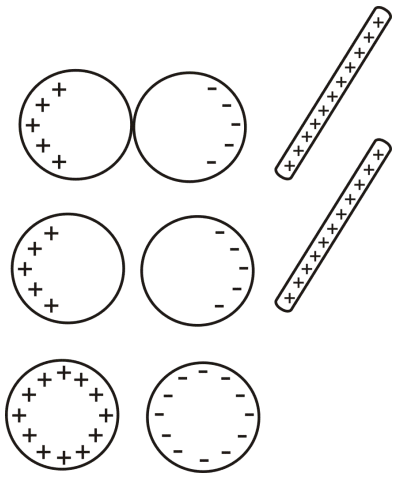


Рис. 5.7

Явление возникновения зарядов в незаряженном проводнике под действием внешнего электрического поля называется *электростатической индукцией*. Заряды, которые при этом возникают, называются *индуцированными* или *наведенными*.

С помощью явления электростатической индукции можно зарядить проводник, не приводя его в контакт с заряженным телом. Схема такого опыта представлена на рис. 5.7. При внесении во внешнее поле двух соприкасающихся проводящих шаров в них происходит перераспределение зарядов. Если, не убирая из поля, шары развести, то наведенные заряды останутся на них.

5.6. Электростатическая защита

Отсутствие внутри проводника электрического поля позволяет относительно просто решать проблему защиты различных приборов от воздействия внешних электрических полей. Для этого достаточно поместить прибор в металлический корпус.

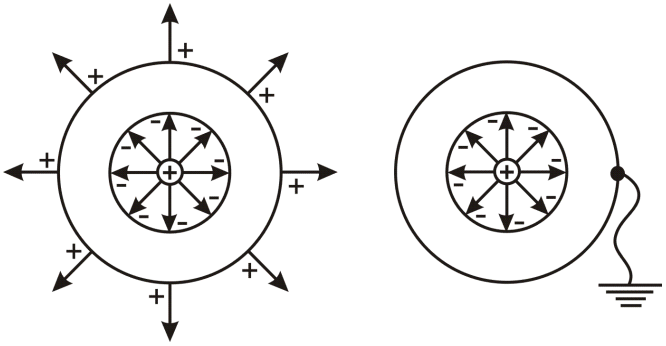


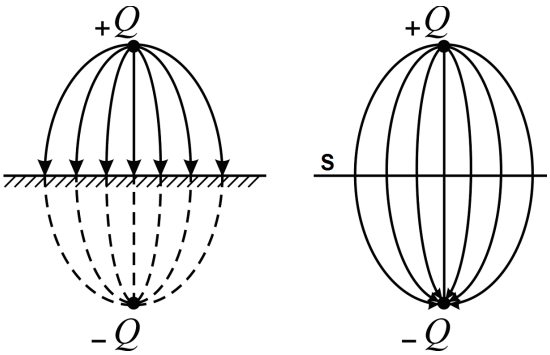
Рис. 5.8

Несколько сложнее осуществляется экранизация источника поля – электрического заряда. Поместим точечный заряд, для определенности положительный, в центр сферы. В таком случае на внутренней поверхности сферы индуцируется равный ему по величине отрицательный заряд, а на внешней – положительный (рис. 5.8). Внутри

сферы линии напряженности начинаются на положительном заряде и заканчиваются на индуцированном отрицательном, распределенном на внутренней поверхности сферы. Внутри проводника, из которого изготовлена сфера, согласно теореме Гаусса поле отсутствует. За пределами сферы поле определяется индуцированным на ее поверхности положительным зарядом. Значит, поместив заряд внутрь проводящей сферы, экранировать его нельзя. Если же сферу заземлить, то положительный заряд с ее внешней поверхности «стечет» в Землю. В результате внутри шара поле не измениться, а за ее пределами будет отсутствовать. Таким образом, через заземленный экран электрическое поле заряда, который он охватывает, не проникает.

5.7. Расчет полей наведенных зарядов. Метод зеркальных отображений

Основной задачей электростатики является расчет электрических полей, создаваемых заряженными телами различной формы. Эти тела могут по-разному размещаться в пространстве. Как правило, неизвестно распределение заряда по поверхности проводника, поэтому для решения подобных задач пользуются разными искусственными методами. Одним из таких методов является метод зеркальных отображений. Рассмотрим задачу на нахождение поля точечного заряда $+Q$, расположенного над бесконечной плоской поверхностью проводника. Линии напряженности поля, создаваемого зарядом, должны заканчиваться на индуцированных зарядах противоположного знака на поверхности проводника (рис. 5.9, *а*). Картина этого поля идентична картине поля создаваемого системой из двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов (рис. 5.9, *б*). Плоскость *S*, которая делит поле на две равных части, является эквипотенциальной, силовые линии перпендикулярны к ней, и поэтому ее можно заменить проводящей плоскостью. Картина поля от этого не измениться. Теперь, если на рис. 5.9, *а* под бесконечной плоскостью мысленно разместить заряд $-Q$, то получаться



а *б*

Рис. 5.9

две абсолютно одинаковые картины распределения полей. В таком случае говорят, что заряд $-Q$, который находится на таком же расстоянии от поверхности проводника, что и $+Q$ является его зеркальным отображением в проводящей плоскости. Теперь задача расчета поля заряда, размещенного у поверхности проводника, сводится к расчету поля, создаваемого двумя равными по величине и противоположными по знаку зарядами. А такая задача вполне разрешима.