РАЗДЕЛ I
ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Лекция 1
Электрические заряды и их свойства

Вопросы. *Введение. Электризация тел. Электрические заряды и их свойства. Описание макроскопических заряженных тел. Модели точечного и непрерывно распределенного зарядов. Взаимодействие электрических зарядов. Закон Кулона.*

1.1. Электризация тел

Как отмечалось выше, тела, способные подобно янтарю после натирания притягивать мелкие предметы, называют наэлектризованными. Это означает, что на телах в таком состоянии имеются электрические заряды, а сами тела называются заряженными. Заметим, что трение в процессе электризации не играет принципиальной роли. Электрические заряды возникают при тесном соприкосновении различных веществ. В случае твердых тел трение позволяет увеличить площадь взаимного контакта и таким образом увеличивает возможность их электризации. Два наэлектризованных тела могут либо отталкиваться, либо притягиваться друг к другу. Способность к такому взаимодействию связана с наличием на них электрических зарядов двух видов. Ответить на вопрос: «Что такое электрический заряд?» – нельзя, но можно утверждать точно, что наличие на теле электрического заряда приводит к способности электромагнитного взаимодействия его с другими телами, которые также владеют таким свойством. Если зарядить два легких тела, подвешенных на шелковых нитях, прикасаясь к ним стеклянной палочкой, потертой о шелк, то они отталкиваются. То же самое наблюдается, если их зарядить от эбонитовой палочки, потертой о мех. Но если одно из тел зарядить от стеклянной палочки, а другое от эбонитовой, то они будут притягиваться. Когда наэлектризованные тела отталкиваются друг от друга, то говорят, что заряды на них одного рода, когда притягиваются, то заряды разного рода. Заряды разных родов принято называть положительными и отрицательными. Положительным принято считать заряд, который приобретает стекло при натирании его о шелк. Шелк при этом приобретает отрицательный заряд.

Важным явлением, которое позволяет понять процесс электризации тел, является следующее, если два тела, заряженные разноименными зарядами, привести в соприкосновение, то после этого сила взаимодействия между ними или исчезнет совсем, или уменьшится и изменит направление на противоположное. Заряды различных знаков компенсируют друг друга. Явление исчезновения с тела электрического заряда называют *нейтрализацией*. Этот факт говорит о том, что любое

нейтральное тело содержит в одинаковом количестве положительные и отрицательные заряды. Они не возникают при натирании двух тел, а перераспределяются между телами таким образом, что на первом теле (стекле) образуется излишек положительных зарядов, а на втором теле (шелк) – излишек отрицательных. Электрический заряд заряженного тела можно передать на незаряженное тело, при этом предыдущий заряд тела будет изменяться.

Каким может быть наименьший заряд? Эксперименты показывают, что ни у одной из заряженных частиц не встречается заряд меньше заряда протона или электрона. Этот элементарный заряд равен $-1{,}60\cdot10^{-19}$ Кл у электрона и $+1{,}60\cdot10^{-19}$ Кл у протона. Заряд электрона обозначается символом e, а протона – p. Масса протона, однако в 1836 раз больше массы электрона. Известно также, что электроны и протоны входят в состав каждого атома. Поскольку протоны находятся в ядрах атомов, основную роль при электризации тел играют электроны. Так называемые *валентные электроны*, наиболее слабо связанные с ядром, а часть вообще может находиться за пределами атома. При близком контакте двух нейтральных тел часть электронов может переходить с одного тела на другое. Если на теле образовывается излишек электронов, то оно владеет отрицательным зарядом. Из приведенных рассуждений следует вывод: ***заряды не создаются и не пропадают, они могут быть переданы от одного тела другому или перемещены внутри одного тела***. Это положение носит название *закона сохранения электрического заряда* и является основным в учении об электричестве. Оно никак не доказывается, а лишь подтверждается многочисленными фактами и экспериментами. Иногда его формулируют по-иному: ***в изолированной (замкнутой) системе алгебраическая сумма зарядов остается постоянной***.

Поскольку всякий заряд q образуется совокупностью элементарных зарядов, он является целым кратным e:

$$q = |n \times e|, \tag{1.1}$$

где n – количество лишних элементарных зарядов. Равенство (1.1) показывает, что электрический заряд – величина дискретная, однако элементарный заряд настолько мал, что возможную величину макроскопических зарядов можно считать изменяющейся непрерывно.

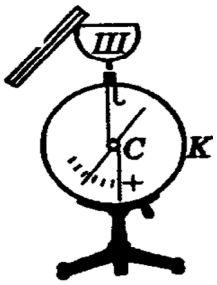

Рис. 1.1

Обычно под словом «заряд» понимают частицу или тело, которые обладают способностью к электромагнитному взаимодействию.

Заряженное тело, размеры которого в данной конкретной задаче можно не учитывать, называют точечным. На практике в большинстве случаев заряженными бывают макроскопические тела.

Для измерения величины заряда на теле существует измерительный прибор – электрометр (рис. 1.1). При его соприкосновении с металлическим стержнем электрометра часть заряда

переходит на посаженную на ось, проводящую стрелку и она отклоняется. По углу отклонения определяется величина заряда.

1.2. Закон Кулона

В 1875 г. французский военный инженер Шарль Огюст Кулон установил на опыте закон взаимодействия электрических зарядов. Отметим, что подобный закон можно установить только для точечных зарядов. Для заряженных тел произвольных размеров и форм такой общий закон установить нельзя. Сила их взаимодействия будет зависеть от их размеров, ориентации в пространстве, расстояния и т. д.

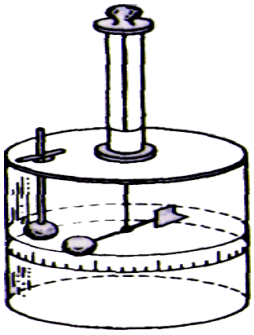

Рис. 1.2

Схема опытов Кулона изображена на рис. 1.2. На тонкой металлической нити подвешено легкое изолирующее коромысло, имеющее на одном конце шарик, а на другом – противовес. Верхний конец нити закреплен на вращающейся головке прибора, которая позволяет очень точно отсчитывать угол закручивания нити. Внутрь прибора помещен второй, точно такой же, как первый, шарик. Для установления силы взаимодействия от расстояния между зарядами шарикам сообщают произвольные заряды, касаясь их третьим заряженным шариком, посаженным на изолирующую ручку. Шарики отталкиваются и располагаются на некотором расстоянии друг от друга. Затем вращают головку прибора и закручивают нить подвеса, замеряя при этом расстояния между шариками при разных углах закручивания нити. Угол закручивания нити пропорционален моменту крутящей силы. Изменение угла закручивания нити пропорционально изменению момента силы. Таким образом, можно рассчитать изменение силы с изменением расстояния. В результате своих опытов Кулон установил, что сила взаимодействия двух точечных зарядов направлена вдоль прямой, соединяющей оба заряда, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F \sim \frac{1}{r^2}. \qquad (1.2)$$

Определение зависимости силы взаимодействия между заряженными шариками усложнялось тем, что во времена Кулона не существовало единиц для измерения электрического заряда. Тем не менее, зависимость была установлена. Третий шарик тоже был идентичен первым двум. И если таким незаряженным шариком коснуться одного из шариков, что находились в стеклянном цилиндре, то заряд в таком случае делился ровно пополам, а сила взаимодействия уменьшалась в два раза. Повторяя этот прием несколько раз, Кулон установил, что сила

прямо пропорциональна величинам зарядов шариков. Таким образом, ***сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, пропорциональна их величинам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:***

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}, \tag{1.3}$$

где q_1, q_2 – величины взаимодействующих зарядов, r – расстояние между ними, k – коэффициент пропорциональности, который зависит от выбора системы единиц. В системе СИ единица измерения электрического заряда, которая называется *кулон* ($[q]$=1 Кл), не является основной. Формально 1 кулон – это заряд, который переносится через поперечное сечение проводника за 1 секунду при силе постоянного тока в нем (проводнике) 1 *ампер*. Единица измерения «ампер» является основной и вводится через взаимодействие токов.

Коэффициент k численно равен силе взаимодействия двух зарядов величиной 1 кулон на расстоянии 1 метр в вакууме:

$$k = 9\cdot 10^9\ \text{Í}\cdot\text{ì}^2/\text{Êë}^2. \tag{1.4}$$

Во многие формулы электродинамики, если их записывать в системах СГС (в частности, в гауссовой, где коэффициент пропорциональности в законе Кулона равен единице) входят множителями 4π и так называемая постоянная c, равная скорости света в вакууме. Чтобы избавиться от них в практически наиболее важных формулах в системе СИ коэффициент пропорциональности полагают равным

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}, \tag{1.5}$$

где ε_0 – электрическая постоянная, численно равная:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8{,}85\cdot 10^{-12}\,\text{Êë}^2/(\text{Í}\cdot\text{ì}^2) = 8{,}85\cdot 10^{-12}\,\text{Ô/ì}.$$

Таким образом, закон Кулона приобретает вид:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}. \tag{1.6}$$

В векторном виде закон Кулона записывается так:

$$\vec{F}_{12} = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\vec{r}_{12}, \tag{1.7}$$

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\vec{r}_{21}, \tag{1.8}$$

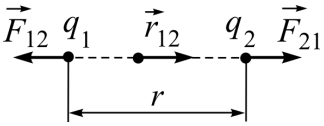

Рис. 1.3

где $\vec{F}_{12}$ – сила, с которой заряд q_1 действует на заряд q_2; $\vec{F}_{21}$ – сила, с которой заряд q_2 действует на заряд q_1; r – расстояние, соединяющее центры зарядов; $\vec{r}_{12}$, $\vec{r}_{21}$ – единичные векторы, которые показывает направление действия силы (рис. 1.3).

Одинаковый для обоих зарядов модуль силы выражается формулой:

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