

### От составителя задания

Среди множества явлений, изучаемых в физике, достойное место занимают электрические явления. В настоящем Задании на начальном ознакомительном уровне будут рассмотрены лишь некоторые отдельные темы, касающиеся свойств электрических зарядов и электрического тока.

При изложении теоретического материала в Задании не ставилось целью заменить соответствующие параграфы школьного учебника физики. Здесь приводятся лишь основные понятия, определения и законы, касающиеся круга рассматриваемых явлений. Основное внимание уделяется решению задач.

Надеюсь, что работа над Заданием поможет Вам систематизировать знания, полученные в школе, и успешно справиться с контрольной частью Задания.

### Введение

Слово «электричество» может вызвать представление о сложной современной технике: компьютерах, телевизорах, электродвигателях и т.д. Но электричество играет в нашей жизни гораздо более серьезную роль. Действительно, согласно современной теории строения вещества, силы, действующие между атомами и молекулами, в результате чего возникают жидкие и твердые тела, – это электрические силы. Они ответственны и за обмен веществ, происходящий в человеческом организме. Даже когда мы что-нибудь тянем или толкаем, это оказывается результатом действия электрических сил между молекулами руки и того предмета, на который мы воздействуем. И вообще, большинство сил (например, силы упругости, силы реакции опоры), сегодня принято считать электрическими силами, действующими между атомами. Сила тяжести, однако, не относится к электрическим силам.

Электрические явления известны с древних времен, но лишь в последние два столетия они были досконально изучены. По современным представлениям вся совокупность электрических и магнитных явлений есть проявление существования, движения и взаимодействия электрических зарядов. В настоящем Задании мы познакомимся с основными понятиями, определениями и законами, утвердившимися при описании электрических явлений.

## § 1. Электрический заряд и электрическое поле

### 1.1 Статическое электричество.

#### Электрический заряд и его свойства

Слово *электричество* происходит от греческого названия янтаря *электрон*. Янтарь – это окаменевшая смола хвойных деревьев; древние заметили, что если натереть янтарь куском шерстяной ткани, то он будет притягивать легкие предметы и пыль. В конце XVI века английский ученый У. Гильберт обнаружил, что таким же свойством обладают стекло и ряд других веществ, натертых шелком. Теперь мы говорим, что в этих случаях тела, благодаря трению, приобретают *электрический заряд*, а сами тела называем *заряженными*.

Все ли электрические заряды одинаковы или существуют различные их виды? Опыт показывает, что существует два и только два вида зарядов, причем заряды одного вида отталкиваются, а заряды разных видов притягиваются. Мы говорим, что *одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются*.

Американский ученый Б.Франклин (XVIII век) назвал эти два вида зарядов *положительными* и *отрицательными*. Какой заряд как назвать было совершенно безразлично; Франклин предложил считать заряд наэлектризованной стеклянной палочки положительным. В таком случае заряд, появляющийся на янтаре, потертом о шерсть, будет отрицательным. Этого соглашения придерживаются и по сей день.

О заряженных телах говорят, что одни тела наэлектризованы сильнее, а другие слабее. Для того чтобы такие утверждения имели смысл, следует установить количественную меру, позволяющую сравнивать степени наэлектризованности тел. Мерой наэлектризованности любого тела является *электрический заряд  $Q$*  этого тела (латинские буквы  $q$  и  $Q$  традиционно используются для обозначения заряда). В свою очередь

незаряженные тела называют *электронейтральными* или просто нейтральными, их заряд равен нулю.

Величины зарядов тел и частиц измеряют различными способами. В Международной системе единиц (сокращенно СИ) единицей измерения заряда служит *Кулон* (Кл) (в честь французского ученого Шарля Кулона, установившего в 1785 г. закон взаимодействия точечных зарядов). Определение этой единицы в СИ дается через единицу измерения силы тока и будет представлено ниже.

Развитие науки о природе привело не только к открытию элементарных частиц (*протонов, электронов, нейтронов* и др.), но и показало, что электрический заряд не может существовать сам по себе, без элементарной частицы – носителя заряда.

Важными свойствами заряда являются его *делимость* и *независимость от скорости*.

Экспериментально установлена *делимость* электрического заряда и *существование* его *наименьшей порции*. Эту наименьшую величину электрического заряда называют *элементарным зарядом*  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Несмотря на значительные экспериментальные усилия, к настоящему времени не обнаружены в свободном состоянии носители с зарядом  $|q| < e$ , где  $e$  – элементарный заряд.

Носителями электрического заряда являются элементарные частицы, например, электроны (заряд каждого  $q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), протоны (заряд каждого  $q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл). Экспериментально установлено, что отрицательный заряд электрона равен (с высокой точностью) по абсолютному значению положительному заряду протона. Величина заряда любого тела кратна элементарному заряду.

**Пример 1.** Металлическому шару путем удаления части электронов сообщается заряд  $Q = 2,0 \cdot 10^{-6}$  Кл. Сколько электронов удалено с шара? На сколько изменится масса шара? Элементарный заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, масса электрона  $m = 0,9 \cdot 10^{-30}$  кг.

**Решение.** Количество удаленных электронов найдем из равенства

$$N = \frac{-Q}{-e} = \frac{2,0 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,25 \cdot 10^{13}.$$

Масса электронов, удаленных с шара,

$$N \cdot m_e = 1,25 \cdot 10^{13} \cdot 0,9 \cdot 10^{-30} = 1,125 \cdot 10^{-17} \text{ кг}$$

дает ответ на второй вопрос задачи. Отметим, что убыль массы шара очень мала.

Независимость элементарного заряда от скорости доказывается фактом электронейтральности атомов, в которых вследствие различия масс электрона и протона легкие электроны, видимо, движутся значительно быстрее массивных протонов. Если бы заряд зависел от скорости, нейтральность атомов не могла бы соблюдаться. Так что *независимость заряда от скорости принимается в качестве одного из экспериментальных фактов, на которых строится теория электричества*.

Лишь в XIX веке стало ясно: причина существования электрического заряда кроется в самих атомах. Позднее (в другом задании) мы обсудим строение атома и развитие представлений о нем более подробно; здесь же кратко остановимся на основных идеях, которые помогут нам лучше понять природу электричества.

## 1.2 Объяснение явления электризации

По современным представлениям атом состоит из массивного положительно заряженного ядра, состоящего из протонов и нейтронов, и движущихся вокруг ядра отрицательно заряженных электронов. В нормальном состоянии положительный заряд ядра (его носителями являются находящиеся в ядре протоны) равен по величине (т.е. по модулю) отрицательному заряду электронов, и атом в целом

электрически нейтрален. Однако атом может терять или приобретать один или несколько электронов. Тогда его заряд будет положительным или отрицательным, и такой атом называется ионом.

В твердом теле ядра атомов могут колебаться, оставаясь вблизи фиксированных положений, в то время как часть электронов движется свободно. Электризацию трением можно объяснить тем, что в различных веществах ядра удерживают электроны с различной силой. Когда пластмассовая линейка, которую натирают бумажной салфеткой, приобретает отрицательный заряд, это означает, что электроны в бумажной салфетке удерживаются слабее, чем в пластмассе, и часть их переходит с салфетки на линейку. Положительный заряд салфетки равен по величине отрицательному заряду, приобретенному линейкой. Таким образом, при электризации тел заряды не создаются, а перераспределяются. Этим и объясняется явление электризации: электроны удаляются из тела или заимствуются у атомов другого тела, но не уничтожаются и не создаются вновь. Следует заметить, что при описанном способе электризации трение не играет принципиальной роли: сдвигая тела, мы просто сближаем их поверхности, которые без этого соприкасались бы в немногих точках вследствие неровностей и выступов.

Наэлектризовать тело можно и другими способами. Например, приведя незаряженное тело в соприкосновение с заряженным. Возможна электризация через влияние, т.е. без непосредственного контакта. Опыт показывает, что под действием заряженного тела на незаряженном может происходить перераспределение электронов или упорядочение молекул (или атомов), вследствие чего части незаряженного тела оказываются наэлектризованными. Это явление получило название электризации через влияние или электростатической индукции, а заряды, возникающие вследствие перераспределения (упорядочения) индуцированными.

Электризация у некоторых веществ может происходить под действием электромагнитных волн: электроны покидают облучаемую поверхность, в результате тело заряжается положительно. Это явление называется фотоэлектрическим эффектом, или кратко фотоэффектом.

**Пример 2.** В результате действия ультрафиолетового электромагнитного излучения на первоначально незаряженное тело его поверхность покинуло  $N = 4,0 \cdot 10^{10}$  электронов. Найдите заряд  $Q$  тела?

Элементарный заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Решение.** Положительный заряд тела будет обусловлен некомпенсированным электронами зарядом

$$Q = N \cdot e = 4,0 \cdot 10^{10} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 6,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

### 1.3 Проводники и изоляторы

По поведению зарядов в наэлектризованном теле все вещества делятся на *проводники* и *изоляторы* (диэлектрики). В диэлектриках сообщенный им заряд остается в том месте, куда он был помещен при электризации. В проводниках сообщенный заряд может свободно перемещаться по всему телу. Именно поэтому проводящие тела можно заряжать электризацией через влияние. Почти все природные материалы попадают в одну из этих двух резко различных категорий. Есть, однако, вещества (среди которых следует назвать кремний, германий, углерод) принадлежащие к промежуточной, но тоже резко обособленной категории. Их называют полупроводниками.

С точки зрения атомной теории электроны в изоляторах связаны с атомами очень прочно, в то время как в проводниках многие электроны связаны с атомами очень слабо и могут свободно перемещаться внутри вещества. Такие электроны называют «свободными» или электронами проводимости. Слово «свободными» взято в кавычки, так как свойства электронов в металле значительно отличаются от свойств действительно свободных электронов в вакууме. В металлических телах – проводниках электричества – число свободных электронов огромно. Проиллюстрируем это утверждение на следующем примере.

**Пример 3.** Оцените число  $n$  свободных электронов в  $V = 1 \text{ м}^3$  меди, считая, что в меди в среднем в расчете на один атом свободным является

один электрон. Плотность меди  $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , в  $M = 64 \text{ г}$  меди содержится  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  атомов.

**Решение.** Согласно условию число свободных электронов в любом объеме меди равно числу атомов в нем. Поэтому определим число атомов в объеме  $V$ . Для этого следует массу меди  $\rho V$  разделить на  $M$  и умножить на  $N_A$

$$n = \frac{\rho V}{M} N_A = \frac{8,9 \cdot 10^3 \cdot 1}{64 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ 1/м}^3.$$

Найденная величина называется концентрацией носителей.

#### 1.4 Закон сохранения электрического заряда

*Сохранение электрического заряда* представляет собой важнейшее известное из опыта его свойство: *в изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается неизменной.* Справедливость этого закона подтверждается не только в процессах электризации, но и в наблюдениях над огромным числом рождений, уничтожений и взаимных превращений элементарных частиц. Закон сохранения электрического заряда – один из самых фундаментальных законов природы.

Неизвестно ни одного случая его нарушения. Даже в тех случаях, когда происходит рождение новой заряженной частицы, обязательно одновременно рождается другая частица с равным по величине и противоположным по знаку зарядом.

Электрический заряд элементарной частицы не зависит ни от выбора системы отсчета, ни от состояния движения частицы, ни от ее взаимодействия с другими частицами. Поэтому и заряд макроскопического тела не зависит ни от движения составляющих его частиц, ни от движения тела как целого.

**Пример 4.** Два одинаковых проводящих шарика, несущих заряды  $Q_1 = -9,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$  и  $Q_2 = 2,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ , приводят в соприкосновение и удаляют друг от друга. Какими станут заряды  $Q'_1$  и  $Q'_2$  шариков?

**Решение.** После приведения шариков в соприкосновение заряды, свободно перемещающиеся в проводниках, придут в движение и разделятся поровну между шариками. Действительно у зарядов «нет оснований предпочесть» один из шариков: «с точки зрения зарядов» шарика неотличимы. Тогда  $Q'_1 = Q'_2$ . Заряды шариков найдем по закону сохранения электрического заряда

$$Q_1 + Q_2 = 2Q'_1.$$

Отсюда

$$Q'_1 = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{-9,0 \cdot 10^{-9} + 2,0 \cdot 10^{-9}}{2} = -3,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}.$$

*Соображения симметрии*, использованные при решении задачи, являются важнейшими в физике, к ним мы будем неоднократно обращаться в дальнейшем в различных разделах курса физики.

**Пример 5.** Свободный нейтрон  $n$  – незаряженная частица распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино  $\tilde{\nu}_e$ . Схему этой реакции записывают в виде  $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ . Найдите заряд  $q$  антинейтрино.

**Решение.** По условию нейтрон – незаряженная частица. Заряды протона и электрона равны соответственно  $e$  и  $-e$ . Из закона сохранения заряда следует, что заряд нейтрона равен сумме зарядов продуктов реакции, т.е. протона, электрона и антинейтрино

$$0 = e + (-e) + q.$$

Отсюда

$$q = 0.$$

Заряд электронного антинейтрино равен нулю.

### 1.5 Взаимодействие заряженных тел. Электрическое поле

Заряженные тела воздействуют друг на друга. Сила взаимодействия двух зарядов зависит от величин этих зарядов и от расстояния между ними. Долгое время оставалось неясным, посредством чего взаимодействуют заряженные тела, если они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Кулон был убежден, что промежуточная среда, т.е. «пустота» между зарядами, никакого участия во взаимодействии не принимает.

Такая точка зрения, несомненно, была навеяна впечатляющими успехами ньютоновской теории тяготения, блестяще подтверждавшейся астрономическими наблюдениями. Однако сам Ньютон писал: «Непонятно, каким образом неодушевленная косная материя, без посредства чего-либо иного, что нематериально, могла бы действовать на другое тело без взаимного прикосновения».

В 30-ые годы XIX века английским естествоиспытателем М. Фарадеем была введена в физику идея поля как материальной среды, посредством которой осуществляется любое взаимодействие пространственно удаленных тел. М.Фарадей считал, что «материя присутствует везде, и нет промежуточного пространства, не занятого ею». Фарадей развил последовательную концепцию электромагнитного поля, основанную на идее конечной скорости распространения взаимодействия. Законченная теория электромагнитного поля в строгой математической форме была через 30 лет развита другим английским физиком Дж. Максвеллом.

По современным представлениям электрические *заряды* наделяют окружающее их пространство особыми физическими свойствами – создают *электрическое поле*. Основным свойством поля является то, что на находящуюся в этом поле заряженную частицу, действует некоторая сила, т.е. *взаимодействие электрических зарядов* осуществляется *посредством* создаваемых ими *полей*. Поле, создаваемое неподвижными зарядами, не изменяется со временем и называется электростатическим.

Таким образом, электрическое *поле* представляет собой *особый вид материи* (отличный от вещества), который *создается* электрическими *зарядами* и который обнаруживается по действию на электрические заряды. Более подробно взаимодействие электрических зарядов и электрические поля, создаваемые зарядами, будут рассмотрены в десятом классе, а мы перейдем к изучению вопросов, связанных с электрическим током.