

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРОСТАТИКА



Электростатика — раздел электродинамики, в котором изучают взаимодействие *неподвижных* в некоторой инерциальной системе отсчёта электрически заряженных тел, распределение заряда на которых не изменяется со временем, а также электростатические поля, создаваемые зарядами таких тел.

Термин «электростатика» введён Ампером в 1822 г.

Фундаментом электростатики являются экспериментальные научные факты, отражающие поведение заряженных тел при их электрическом взаимодействии. Ядро электростатики составляют закон сохранения электрического заряда, опытным путём установленный в 1759 г. петербургским академиком Францем Эпинусом (1724–1802), и закон взаимодействия покоящихся точечных зарядов, экспериментально открытый в 1785 г. французским учёным Шарлем Кулоном (1736–1806).

§ 16. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда

Что означает наличие электрического заряда у тела или частицы? Как взаимодействуют электрически заряженные тела?

Электрический заряд. О том, что янтарь, потёртый о шерсть, приобретает свойство притягивать лёгкие предметы (рис. 94), знали ещё древние греки. Однако только в 1600 г. лейб-медик королевы Англии доктор медицины Уильям Гильберт в книге «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле»



Рис. 94

дал первое систематизированное описание свойств электрических и магнитных материалов. Гильберт продемонстрировал, что кроме янтаря свойством притягивать лёгкие предметы обладают после натирания алмаз, сера, фарфор и многие другие тела. Он назвал их «электрически-ми» (*электрон* по-гречески — янтарь). Теперь мы говорим, что такие тела электрически заряжены, т. е. им сообщён *электрический заряд*.

Электрический заряд — физическая скалярная величина, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия тел (частиц).

Электрический заряд, как и масса, не существует без тела или частицы, а заряд любой системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему.



Существуют два вида электрических зарядов, которые условились называть положительными и отрицательными. Причём при взаимодействии одноимённо заряженные тела (частицы) отталкивают друг друга (рис. 95, а), а разноимённо заряженные — притягивают друг друга (рис. 95, б).

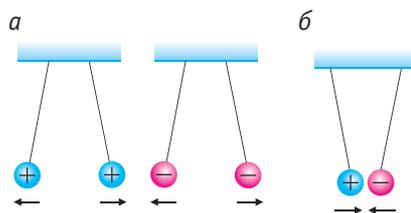


Рис. 95

Заряды разных тел (частиц) могут отличаться не только знаками, но и числовыми значениями.

За единицу электрического заряда в СИ принят кулон (Кл). Эта единица названа в честь Шарля Кулона (1736–1806). 1 Кл — величина электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за промежуток времени 1 с при силе постоянного тока 1 А.

Интересно знать

Один кулон — очень большая величина заряда. Расчёты показывают, что на удалённом от всех остальных тел металлическом шаре, находящемся в сухом воздухе, может находиться избыточный заряд 1 Кл, если его диаметр не менее 110 м. Вместе с тем при включении автомобильных фар сила тока в цепи приблизительно 10 А, т. е. ежесекундно через поперечное сечение проводников, подсоединённых к фарам, проходит заряд приблизительно 10 Кл.

Элементарный заряд. На рубеже XIX и XX столетий учёные экспериментально установили, что в природе существует электрический заряд, модуль которого минимален. Этот заряд называли *элементарным*. Вы знаете, что ядра всех атомов содержат протоны, которые являются носителями положительного элементарного заряда, а сами атомы содержат электроны, являющиеся носителями отрицательного элементарного заряда. Учёные с точностью порядка $\sim 10^{-20}$ установили равенство модулей зарядов электрона и протона.

Модуль элементарного электрического заряда $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл. Обычно ограничиваются двумя значащими цифрами $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электроны, протоны и нейтроны входят в состав всех тел, так как из них состоят атомы и молекулы любого вещества*. В электрически нейтральном теле алгебраическая сумма зарядов всех частиц равна нулю. Если каким-нибудь образом создать в таком теле избыток зарядов одного знака, то оно окажется заряженным. Заряд тела q образуется совокупностью элементарных зарядов и всегда кратен элементарному заряду e (электрический заряд дискретен):

$$q = e(N_p - N_e),$$

где N_p и N_e — числа протонов и электронов в данном теле.

Например, тело, заряд которого $q_1 = 5e$, отличается от нейтрального тела недостатком пяти электронов, а тело, заряд которого $q_2 = -13e$, — избытком тринадцати электронов.

От теории к практике

Мы отмечали, что 1 Кл — это очень большой заряд. Какому избытку (недостатку) электронов в теле соответствует этот заряд?



Интересно знать

В одном моле вещества ($\sim 6 \cdot 10^{23}$ молекул) заряженного тела обычно содержится относительно небольшое количество электронов (до $\sim 1 \cdot 10^{10}$), избыточных или недостающих по сравнению с числом протонов. Так как масса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, то это вызывает изменение массы одного моля заряженного тела не более чем на $9 \cdot 10^{-31}$ кг $\cdot 1 \cdot 10^{10} = 9 \cdot 10^{-21}$ кг по сравнению с массой нейтрального тела. Такое изменение массы, конечно, можно не учитывать.

Закон сохранения электрического заряда. Вы знаете, что при трении соприкасающиеся тела электризуются, при этом модули противоположных по

знаку зарядов, возникших на телах, равны. Проверим это на опыте. Наэлектризуем трением соприкасающиеся друг с другом эбонитовую палочку и кусочек меха или шерстяной ткани. Поместим поочерёдно внутрь металлической сферы, укрепленной на стержне электрометра, эбонитовую палочку (рис. 96, а) и кусочек меха (рис. 96, б). Стрелка электрометра отклонится, причём, как в первом, так и во втором случаях, на одинаковые углы. Если

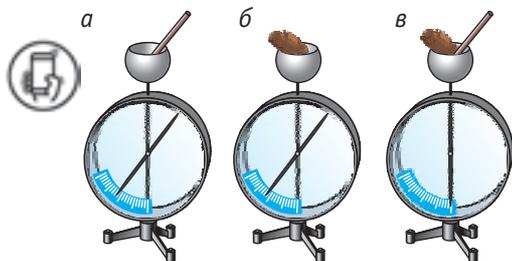


Рис. 96

* Исключением является водород, у которого ядра атомов — протоны.

же одновременно опустить внутрь сферы эбонитовую палочку и кусочек меха (рис. 96, в), то стрелка электрометра останется на месте. Следовательно, модули зарядов обоих тел равны, а их знаки противоположны.

Результаты многочисленных экспериментов позволили сформулировать утверждение, которое является фундаментальным законом природы — **законом сохранения электрического заряда**: в электрически изолированной системе при любых взаимодействиях алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const},$$

где n — число зарядов в системе.

Принято считать систему тел (частиц) *электрически изолированной*, если между ней и внешними телами нет обмена электрически заряженными частицами.

Закон сохранения электрического заряда указывает на важную особенность электрических явлений: электрические заряды всегда появляются парами. Так, например, при электризации трением тела приобретают заряды противоположных знаков, модули которых одинаковые.

От теории к практике

Можно ли при электризации трением зарядить только одно из соприкасающихся первоначально электронейтральных тел?



Электрический заряд — физическая скалярная величина, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия тел (частиц)

Электрические заряды существуют двух видов: положительные и отрицательные

Одноимённо заряженные частицы отталкиваются, а разноимённо — притягиваются

Электрический заряд дискретен, т. е. электрический заряд любой частицы или тела является целым кратным элементарному электрическому заряду

Существует заряд, модуль которого минимален, называемый элементарным: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Закон сохранения электрического заряда: в электрически изолированной системе при любых взаимодействиях алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной: $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$



Из истории физики

Закон сохранения электрического заряда впервые был сформулирован и экспериментально подтверждён М. Фарадеем в 1843 г.



1. Объясните электризацию тел при соприкосновении. Почему при электризации заряжаются оба тела?
2. Что характеризует электрический заряд?
3. Какие виды электрических зарядов существуют в природе? Как взаимодействуют одноимённо заряженные частицы? разноимённо заряженные?
4. Какой заряд называют элементарным?
5. В чём проявляется свойство дискретности электрического заряда?
6. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда. Каковы условия применимости этого закона?



Упражнение 12

1. Можно ли при электризации стеклянной палочки о шёлк сообщить ей заряд $q = 4,8 \cdot 10^{-21}$ Кл?
2. Металлический шарик имеет $N = 5,0 \cdot 10^5$ избыточных электронов. Определите его электрический заряд.
3. Два одинаковых металлических шарика закреплены так, что расстояние между ними существенно больше их размеров (рис. 97). Определите, какой заряд окажется на таком же третьем шарике, если им сначала коснуться первого шарика, а затем второго. Первоначальные заряды шариков: $q_1 = 3e$; $q_2 = -8e$ и $q_3 = 5e$.



Рис. 97

4. Определите суммарный заряд всех протонов, содержащихся в воде объёмом $V = 10 \text{ см}^3$ (две чайные ложки).

5. Два одинаковых металлических шара, электрические заряды которых $q_1 = -4,0 \cdot 10^{-14}$ Кл и $q_2 = 2,0 \cdot 10^{-13}$ Кл, привели в соприкосновение. Определите число электронов, перешедших с первого шара на второй.



§ 17. Взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона

Электрически заряженные тела (частицы) взаимодействуют друг с другом. Но как определить силу, которой одно заряженное тело притягивает или отталкивает другое?

Вы уже встречались с физическими моделями при изучении механики (материальная точка) и молекулярной физики (идеальный газ). В электростатике при изучении взаимодействия электрически заряженных тел эффективной оказывается модель «точечный заряд».

Точечный заряд — заряд такого заряженного тела, размеры которого значительно меньше расстояния от этого тела до точки наблюдения и до других тел (т. е. размерами заряженного тела в условиях данной задачи можно пренебречь).

Вспомните, закон всемирного тяготения также сформулирован для точечных тел (материальных точек).

Закон Кулона. Кулон детально исследовал взаимодействие неподвижных точечных зарядов. Он на опыте изучил зависимость сил электрического взаимодействия тел от модулей зарядов этих тел и расстояния между ними.

В своих опытах Кулон использовал специальный прибор — крутильные весы (рис. 98). Крутильные весы представляют собой два стеклянных цилиндра, внутри которых на тонкой серебряной нити подвешено лёгкое непроводящее коромысло. На одном конце коромысла закреплён проводящий шар 1, а на другом — бумажный противовес 3. Шар 1 можно заряжать с помощью такого же проводящего шара 2. Он находится на изолирующем стержне, закреплённом на крышке нижнего цилиндра. При соприкосновении шара 1 с заряженным шаром 2 заряд распределяется между ними поровну, и шары отталкиваются. По углу закручивания нити, отсчитываемому по шкале прибора, можно определить силу взаимодействия заряженных шаров.

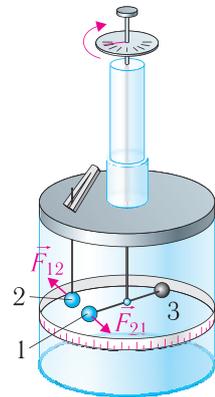


Рис. 98



Проведя большое количество опытов, Кулон установил, что модуль сил взаимодействия двух заряженных шаров $|\vec{F}_{21}| = |\vec{F}_{12}| = F$ обратно пропорционален квадрату расстояния между ними: $F \sim \frac{1}{r^2}$ и прямо пропорционален произведению модулей электрических зарядов каждого из них:

$$F \sim |q_1| \cdot |q_2|.$$

Обобщив экспериментальные данные, Кулон сформулировал закон, получивший его имя.

Закон Кулона: модули сил взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональны произведению модулей зарядов этих тел, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними, а сами силы направлены вдоль прямой, соединяющей эти тела:

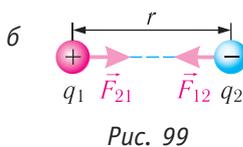
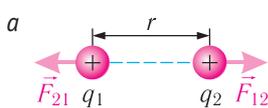
$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}, \quad (17.1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц физических величин; $|q_1|$ и $|q_2|$ — модули точечных зарядов; r — расстояние между ними.

В СИ коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ — *электрическая постоянная*.



Силы \vec{F}_{21} и \vec{F}_{12} взаимодействия неподвижных точечных зарядов (рис. 99) называют *кулоновскими силами*. В соответствии с третьим законом Ньютона эти силы противоположно направлены $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, а их модули равны. Отметим, что силы электростатического взаимодействия являются силами отталкивания для одноимённых зарядов (рис. 99, а) и силами притяжения для разноимённых (рис. 99, б).

От теории к практике

Два маленьких положительно заряженных шарика закреплены на расстоянии r друг от друга. Как изменится модуль сил электростатического взаимодействия шариков, если: 1) уменьшить заряд каждого шарика в четыре раза; 2) увеличить расстояние между шариками в четыре раза; 3) увеличить заряд каждого шарика и расстояние между ними в два раза?

Как изменились бы силы электростатического взаимодействия шариков, если бы: 1) шарики были заряжены отрицательно; 2) один из шариков зарядить отрицательно, а другой положительно?



Взаимодействие системы точечных зарядов. Экспериментально установили, что силы взаимодействия двух точечных зарядов не изменяются при появлении третьего точечного заряда или любого числа точечных зарядов. В этом случае силы воздействия $\vec{F}_{21}, \vec{F}_{31}, \dots, \vec{F}_{n1}$ каждого из зарядов q_2, q_3, \dots, q_n на заряд q_1 определяют по закону Кулона. Результирующая сила является векторной суммой

сил, которыми каждый из этих зарядов в отдельности воздействует на заряд q_1 (принцип суперпозиции).

Используя принцип суперпозиции и закон Кулона, можно описать электростатическое взаимодействие любой системы точечных зарядов. На рисунке 100 представлены три взаимодействующих между собой точечных электрических заряда: $q_1 > 0$, $q_2 < 0$, $q_3 < 0$. Результирующей сил, действующих на заряд q_1 со стороны зарядов q_2 и q_3 , является сила \vec{F}_1 , которая равна векторной сумме сил \vec{F}_{21} и \vec{F}_{31} : $\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31}$. Силы \vec{F}_{21} и \vec{F}_{31} воздействия зарядов q_2 и q_3 на заряд q_1 определяют по закону Кулона.

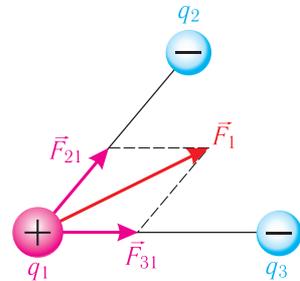


Рис. 100

От теории к практике

Точечные заряды q_1 , q_2 и q_3 закреплены в вершинах треугольника. Направление результирующей электростатической силы, действующей на отрицательный заряд q_3 со стороны зарядов q_1 и q_2 , представлено на рисунке 101. Каковы знаки зарядов q_1 и q_2 ?

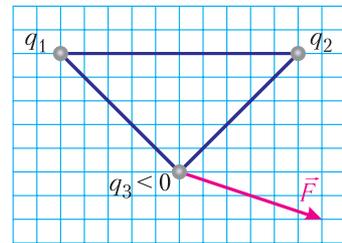


Рис. 101



Интересно знать

Понятие электрического заряда в некоторой степени сходно с понятием гравитационной массы. Электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий, а масса — гравитационных. Закон Кулона, описывающий электростатическое взаимодействие, формально похож на закон всемирного тяготения Ньютона, определяющий силы гравитационного взаимодействия:

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

В обоих случаях модуль сил взаимодействия:

- обратно пропорционален квадрату расстояния между материальными точками;
- прямо пропорционален величинам, характеризующим те свойства тел (материальных точек), которые определяют взаимодействия, — массам в одном случае и электрическим зарядам — в другом.

Для измерения сил электрического отталкивания (Ш. Кулон, 1785 г.) и гравитационной постоянной (Г. Кавендиш, 1788 г.) учёные использовали похожие по устройству экспериментальные установки.



Однако между силами гравитационного и электростатического взаимодействий существует и важное различие. Ньютоновские силы тяготения — это всегда силы притяжения. Кулоновские же силы взаимодействия зарядов могут быть как силами притяжения (между разноимёнными зарядами), так и силами отталкивания (между одноимёнными зарядами).

Диэлектрическая проницаемость вещества. Из опытов следует, что взаимодействие электрически заряженных тел в воздухе практически не отличается от их взаимодействия в вакууме. Если заряженные тела находятся в воде, керосине, масле или какой-нибудь другой непроводящей среде, то модуль сил их взаимодействия оказывается меньше, чем в вакууме. Чтобы учесть влияние среды, ввели её специальную характеристику, называемую *диэлектрической проницаемостью*.

Диэлектрическая проницаемость вещества — физическая величина, показывающая, во сколько раз модуль сил электростатического взаимодействия зарядов в данной однородной среде меньше модуля сил взаимодействия этих же зарядов в вакууме:

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F}, \quad (17.2)$$

где F_0 и F — модули сил электростатического взаимодействия зарядов в вакууме и в однородной среде соответственно.

С учётом соотношения (17.2) закон Кулона можно записать следующим образом:

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

Диэлектрическая проницаемость вакуума равна 1. За 1 принимают и диэлектрическую проницаемость воздуха, поскольку её значение (при нормальном атмосферном давлении) 1,0006. Диэлектрические проницаемости других однородных сред всегда больше единицы. Например, у воды диэлектрическая проницаемость 81, у глицерина — 56, а у керосина — 2.

От теории к практике

Как и во сколько раз отличаются модули сил электростатического взаимодействия двух точечных зарядов, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга в воде, керосине и глицерине?

Интересно знать

Диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды при температуре 25 °С равна 78,54, а при температуре 0 °С — 88. Обычно без указания температуры диэлектрическую проницаемость воды полагают равной 81.



Точечный заряд — заряд такого заряженного тела, размеры которого значительно меньше расстояния от этого тела до точки наблюдения и до других тел (т. е. размерами заряженного тела в условиях данной задачи можно пренебречь)

Закон Кулона: модули сил взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональны произведению модулей зарядов этих тел, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними, а сами силы направлены вдоль прямой, соединяющей эти тела

В вакууме

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

В однородной среде

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

Коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

Электрическая постоянная

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз модуль сил взаимодействия зарядов в данной однородной среде меньше, чем модуль сил взаимодействия этих же зарядов в вакууме:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}$$



1. К какому виду взаимодействий относят взаимодействие неподвижных электрических зарядов (заряженных тел)?
2. Заряды каких заряженных тел можно считать точечными?
3. Опишите эксперименты Кулона по исследованию взаимодействия электрических зарядов.
4. Сформулируйте закон Кулона. Каковы условия применимости закона Кулона?
5. Чему равен в СИ коэффициент k ?
6. Математическая запись закона Кулона напоминает закон всемирного тяготения. В чём различие этих законов? Сравните физические понятия «масса» и «электрический заряд».
7. Что называют диэлектрической проницаемостью среды?



Примеры решения задач

Пример 1. Два точечных заряда находятся в керосине на расстоянии $r_1 = 42$ см. Определите, на каком расстоянии должны находиться эти заряды в глицерине, чтобы модуль сил их электростатического взаимодействия остался прежним. Диэлектрические проницаемости керосина $\epsilon_1 = 2,0$, глицерина $\epsilon_2 = 56,2$.

Дано:

$$r_1 = 42 \text{ см}$$

$$F_{к1} = F_{к2}$$

$$\epsilon_1 = 2,0$$

$$\epsilon_2 = 56,2$$

$$r_2 = ?$$

Решение. Поскольку $F_{к1} = F_{к2}$, то, воспользовавшись законом Кулона, можно записать: $k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon_1 r_1^2} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon_2 r_2^2}$.

Следовательно, $r_2 = r_1 \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}$.

$$r_2 = 42 \text{ см} \sqrt{\frac{2,0}{56,2}} = 7,9 \text{ см.}$$

Ответ: $r_2 = 7,9$ см.

Пример 2. Точечные заряды $q_1 = 3,4$ нКл и $q_2 = -5,6$ нКл находятся в вакууме на расстоянии $r = 36$ см. Определите модуль и направление результирующей силы, действующей на заряд $q_3 = 3,2$ нКл, помещённый в точку пространства, находящуюся на середине отрезка, соединяющего эти заряды.

Дано:

$$q_1 = 3,4 \text{ нКл} =$$

$$= 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -5,6 \text{ нКл} =$$

$$= -5,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$r = 36 \text{ см} =$$

$$= 0,36 \text{ м}$$

$$q_3 = 3,2 \text{ нКл} =$$

$$= 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$\vec{F}_p = ?$$

Решение. Изобразим на рисунке силы \vec{F}_{13} и \vec{F}_{23} , действующие на точечный заряд q_3 со стороны точечных зарядов q_1 и q_2 соответственно. Построив векторную сумму сил \vec{F}_{13} и \vec{F}_{23} , определим, что результирующая \vec{F}_p этих сил направлена к заряду q_2 (рис. 102).

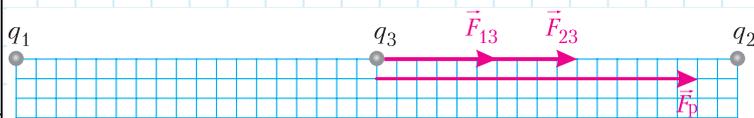


Рис. 102

Поскольку силы \vec{F}_{13} и \vec{F}_{23} направлены одинаково, то модуль результирующей силы $F_p = F_{13} + F_{23} = \frac{4kq_3}{r^2}(q_1 + |q_2|)$.

Таким образом,

$$F_p = \frac{4 \cdot 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(0,36 \text{ м})^2} \cdot (3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} + 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}) = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 8,0 \text{ мкН}.$$

Ответ: $F_p = 8,0$ мкН; сила направлена к заряду q_2 .



Упражнение 13

1. Определите модуль сил взаимодействия двух одинаковых неподвижных точечных зарядов $q_1 = q_2 = 9,0$ нКл, находящихся на расстоянии $r = 0,30$ м в вакууме. Во сколько раз уменьшится или увеличится модуль сил взаимодействия этих зарядов при помещении их в керосин, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon = 2,0$?

2. Определите, во сколько раз следует увеличить расстояние между двумя неподвижными точечными зарядами, чтобы модуль сил взаимодействия остался прежним при увеличении численного значения одного из зарядов в $\alpha = 4$ раза.

3. Два одинаковых маленьких проводящих шарика, заряды которых отличаются в два раза, находятся на расстоянии $r = 50$ см. Определите расстояние, на которое необходимо развести шарики после соприкосновения, чтобы модуль сил их взаимодействия остался прежним.

4. Точечные заряды q_1 и q_2 закреплены в вакууме (рис. 103). Определите модуль и направление результирующей силы, действующей на заряд q_3 , помещённый в точку, находящуюся на середине отрезка, соединяющего эти заряды.

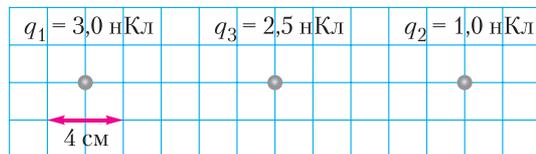


Рис. 103

5. Заряды двух одинаковых маленьких шариков массой $m = 40$ г каждый одинаковые. Расстояние между шариками существенно превышает их размеры. Определите модуль зарядов шариков, если кулоновская сила их отталкивания уравновешивает силу гравитационного притяжения этих шариков.

6. Небольшой шарик, заряд которого $q_1 = 20$ нКл и масса $m = 60$ мг, подвешен в воздухе на шёлковой нити. После того как на вертикали, проходящей через центр шарика, на расстоянии $r = 15$ см ниже его поместили другой маленький шарик, заряженный отрицательно, модуль силы упругости нити увеличился в два раза. Определите заряд второго шарика.

