

Лекция 1

Электрическое поле в вакууме. Электрические свойства тел. Закон Кулона. Электрическое поле. Напряженность. Принцип суперпозиции полей. Силовые линии электрического поля. Заряд в электрическом поле.

Электрические свойства тел

Все тела в природе образованы из атомов или молекул, которые, в свою очередь, состоят из ядер и электронов, обладающих электрическим зарядом. Существуют два типа электрических зарядов, условно называемых отрицательными и положительными. Электроны являются отрицательно заряженными частицами, а ядра атомов заряжены положительно. Силы электрического взаимодействия связывают ядро и электроны в единую систему — атом. Наименьший по величине электрический заряд, экспериментально обнаруженный в природе, — заряд электрона:

$$q_e = -e, \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Электрический заряд, равный e , называют элементарным зарядом. Отметим, что приведенное значение элементарного заряда обычно используется при решении стандартных школьных и вузовских задач. На самом деле физики-экспериментаторы определили его с гораздо большей точностью. В настоящее время в таблицах приводится значение

$$e = (1,6021892 \pm 0,0000046) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Положительный заряд атомных ядер образован входящими в их состав протонами. Заряд протона положителен и по величине равен заряду электрона $q_p = +e$. В каждом атоме суммы положительных и отрицательных зарядов равны по абсолютной величине, и поэтому обычно тела оказываются электронейтральными. Однако, прилагая некоторые усилия, можно оторвать электроны от одних тел, которые становятся при этом положительно заряженными, и передать их другим телам, которые заряжаются отрицательно. Такие тела являются макроскопически заряженными. Электрический заряд любого тела кратен элементарному заряду e , т. е. изменяется дискретно на величину $\Delta q = \pm Ne$, где N — целое число. В чем причина подобного «квантования» электрического заряда, никому пока неизвестно. Но никогда еще не наблюдались частицы с дробным (в единицах e) зарядом. Правда, современная теория фундаментальных взаимодействий — так называемая Стандартная модель — рассматривает в качестве основных составляющих вещества кварки с дробными зарядами $\pm e/3$ и $\pm 2e/3$, но, согласно этой теории, кварки прочно заперты внутри элементарных частиц и в свободном состоянии наблюдаться не могут.

Многочисленные эксперименты доказали, что электрический заряд сохраняется, т. е. алгебраическая сумма всех зарядов q_i замкнутой системы остается постоянной:

$$\sum_i q_i = \text{const.}$$

Закон Кулона

Пусть имеются два заряженных макроскопических тела, размеры которых пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними. В этом случае каждое тело можно считать материальной точкой или точечным зарядом.

Французский физик Ш. Кулон экспериментально определил (1785), что сила взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов в пустоте пропорциональна величине каждого из зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по прямой, соединяющей эти заряды.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$
$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r}, \quad |\vec{r}_{12}| = r$$

Надо сказать, что Кулон не был первым ученым, установившим закон взаимодействия зарядов, носящий теперь его имя: за 30 лет до него к такому же выводу пришел Б. Франклин. Более того, точность измерений Кулона (несколько процентов) уступала точности ранее проведенных экспериментов (Г. Кавендиш). Однако, работа Кавендиша была опубликована Максвеллом уже после

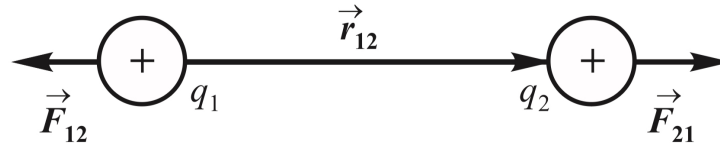


Рисунок 1

публикации результатов эксперимента Кулона.

В СИ единица силы тока - ампер (А) - является основной, следовательно, единица заряда q определяется производной. Как мы увидим в дальнейшем, сила тока I определяется как заряд, протекающий через поперечное сечение проводника в единицу времени: $I = dq/dt$. В СИ за единицу заряда принимается кулон (Кл) - электрический заряд, переносимый за 1 с через поперечное сечение проводника с током в 1 А. Используя связь между размерностями заряда и силы тока $[q] = [I][t]$, получаем для единицы заряда: $1\text{Кл} = 1\text{А} \cdot 1\text{с}$. Коэффициент пропорциональности в законе Кулона имеет вид:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}.$$

Параметр ϵ_0 называют электрической постоянной. Численное значение электрической постоянной

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

Поскольку ϵ_0 всегда входит в уравнения в комбинации $k = 1/4\pi\epsilon_0$, удобнее запомнить численное значение

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,988 \cdot 10^9 \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

Как и в случае элементарного заряда, величина электрической постоянной определена экспериментально с высокой точностью:

$$\epsilon_0 = (8,854187817 \pm 0,000000007) \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

Кулон - слишком большая единица для использования на практике. Например, два заряда в 1 Кл каждый, расположенные в вакууме на расстоянии 100 м друг от друга, отталкиваются с силой

$$F \approx 9 \cdot 10^9 \frac{1 \times 1}{100^2} = 900000 \text{ Н}.$$

Для сравнения: с такой силой давит на землю масса $m = F/g \approx 90 \text{ т}$.

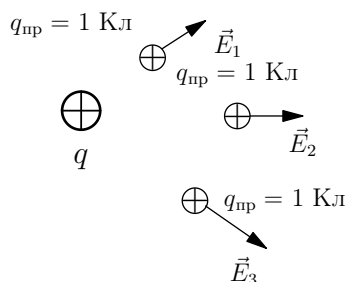
Электрическое поле. Напряженность

Вокруг отдельного электрического заряда всегда существует электрическое поле. Электрическое поле, созданное неподвижным зарядом (или системой неподвижных зарядов), называется электростатическим. Посредством электростатического поля осуществляется взаимодействие между зарядами. Само понятие поля оказалось весьма плодотворным и широко используется в современной физике. Появление поля означает, что что-то изменилось в окружающем нас пространстве. Математически поле описывается какой-то величиной, меняющейся от точки к точке. Например, можно рассмотреть поле скоростей в текущей жидкости. В каждой точке объема жидкости задан вектор скорости, который может меняться со временем (нестационарное течение), а может и быть постоянным (стационарное течение). Это пример векторного поля. К этому же типу полей относится и поле неподвижных электрических зарядов.

Если в некоторую точку пространства на расстоянии \vec{r} от заряда q внести другой заряд $q_{\text{пр}}$ (назовем его «пробным» зарядом), то на него будет действовать электростатическая сила Кулона со стороны заряда q , обусловленная взаимодействием зарядов q и $q_{\text{пр}}$:

$$\vec{F} = q_{\text{пр}} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \right).$$

Силы, действующие на один и тот же пробный заряд, помещенный в различные точки пространства, будут отличаться и по величине, и по направлению. Легко видеть, что электрическое поле будет полностью охарактеризовано по величине и по направлению, если найти в каждой точке поля силу, действующую на единичный положительный пробный заряд $q_{пр}$.



Принцип суперпозиции полей

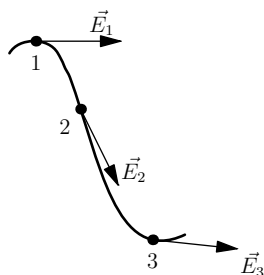
Сила, с которой данная система зарядов действует на некоторый точечный заряд, равна векторной сумме сил, с которыми действует на него каждый из зарядов системы. Отсюда следует, что электрическое поле системы зарядов определяется векторной суммой напряженности полей, создаваемых отдельными зарядами системы, т. е.

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i$$

Сложение напряженностей электрических полей по правилу сложения векторов выражает так называемый принцип суперпозиции (термин «суперпозиция» означает «наложение»). В сущности свойство суперпозиции полей является следствием линейности уравнений электромагнетизма (уравнений Максвелла). Физический смысл этого свойства заключается в том, что электромагнитное поле создается покоящимися или движущимися электрическими зарядами, но само по себе «не заряжено» в том смысле, что оно не создает какого-либо дополнительного поля вокруг себя. Значит, поля различных зарядов «не мешают» друг другу, и поэтому суммарное поле системы зарядов можно подсчитать как векторную сумму полей от каждого из них в отдельности. «Заряженные» поля, для которых принцип суперпозиции не действует, также имеются в природе, примером может служить поле цветовых зарядов в квантовой хромодинамике — современной теории сильных взаимодействий элементарных частиц. Но такие теории намного сложнее электродинамики.

Силовые линии электрического поля

Электрическое поле можно задать, указав для каждой точки величину и направление вектора напряженности электрического поля \vec{E} . Для наглядного изображения электрического поля используют силовые линии, или линии напряженности. Линией напряженности электрического поля (силовой линией) называется такая линия, касательная к которой в каждой точке пространства совпадает по направлению с вектором напряженности электрического поля. Число силовых линий, пронизывающих единичную площадку, перпендикулярную этим линиям, характеризует численное значение величины \vec{E} в данной области пространства. Конфигурация силовых линий позволяет судить об изменении направления и величины вектора \vec{E} . Электрическое поле считается однородным ($\vec{E} = const$), когда густота и направление силовых линий по всему объему поля сохраняются неизменными. Такое поле графически изображается равноотстоящими друг от друга параллельными прямыми линиями.



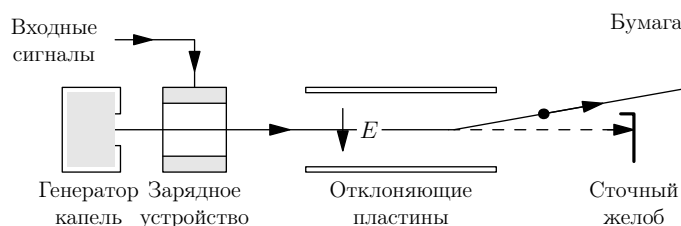
Линии напряженности электростатического поля всегда начинаются и заканчиваются на зарядах либо уходят в бесконечность: они имеют начало на положительном заряде (или в бесконечности) и конец на отрицательном заряде (или в бесконечности). Линии напряженности в пространстве нигде не касаются и не пересекаются друг с другом (в противном случае \vec{E} была бы неоднозначной величиной).

Заряд в электрическом поле

Поведение заряда в заданном электрическом поле описывается вторым законом Ньютона:

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = e \vec{E}$$

(здесь имеется в виду, что никакие другие силы на заряд не действуют; в противном случае в правую часть надо добавить соответствующие члены). Один из методов определения заряда электрона основан на наблюдении движения капелек в вертикальном электростатическом поле. Например, наблюдалась капелька радиусом $R = 1,64$ мкм и плотностью $\rho = 0,851$ г/см³. Было замечено, что она переставала падать в поле напряженностью $E = 1,95 \cdot 10^5$ В/м. Это означало, что электростатическая сила qE компенсировала силу притяжения Земли mg . Масса капельки $m = \rho (4\pi R^3/3) = 1,57 \cdot 10^{-14}$ кг. Отсюда находим заряд капельки $q = mg/E = 7,9 \cdot 10^{-19}$ Кл, т. е. капелька несла пять электронных зарядов. Именно в таких экспериментах было обнаружено квантование электрического заряда и определена его минимальная величина e . Движением заряженных частиц можно управлять, прилагая электрическое поле нужной величины. Так происходит, например, в электронно-лучевой трубке. Менее известно, что этот же принцип применен в струйных принтерах.



Сигнал, поступающий от компьютера, контролирует заряд, передаваемый капельке чернил в зарядном устройстве. Управляющие пластины создают электростатическое поле, которое отклоняет пролетающую капельку на нужный угол, так что она попадает в должное место на бумаге. Для печатания одной буквы используется около 100 капелек. Характерные диаметры капелек - 30 мкм, летят они со скоростью около 18 м/с и производятся источником в количестве 100 тыс. штук в секунду. Использование многоструйных устройств позволило довести скорость принтера до 50 тыс. знаков в секунду.

Подготовка к контрольной работе №1

ЗАДАЧА 1

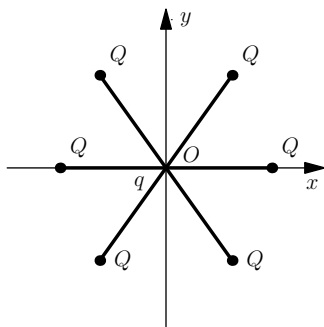
В вершинах квадрата со стороной a помещены два заряда по $+q$ и два заряда по $-q$, причем на диагоналях квадрата расположены разноименные заряды. Определить величину силы, действующей на каждый заряд.

$a = 1,15$ м, $q = 5$ мкКл, $F = ?$

ЗАДАЧА 2

Шесть одинаковых зарядов Q связаны нитями одинаковой длины l с седьмым таким же зарядом $q = Q$. В результате кулоновского отталкивания они располагаются в вершинах правильного плоского шестиугольника. Определить натяжение T нитей.

$Q = 4$ мкКл, $l = 15$ см, $T = ?$.



ЗАДАЧА 3

Заряд Q равномерно распределен по кольцу радиусом R . Чему равна максимальная напряженность электрического поля на оси кольца?

$Q = 1$ мкКл, $R = 5$ см, $E_{max} = ?$

ДОПОЛНЕНИЕ

Экспериментальные основания закона Кулона

В 1772 г. (за 13 лет до открытия Кулоном его закона) британский физик и химик Г. Кавендиш экспериментально установил, что сила взаимодействия точечных зарядов обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. В своих опытах он помещал заряженный металлический шар внутрь полый металлической сферы, образованной двумя полусферами. После приведения в контакт шара со сферой и последующего удаления полусфер выяснилось, что шар стал незаряженным. Если бы в законе взаимодействия зарядов $F \sim 1/r^{2+\delta}$, $\delta \neq 0$, то поле внутри проводящего шара равнялось бы нулю при наличии части заряда внутри шара. Тщательно измеряя потенциал шара (и, следовательно, заряд), Кавендиш установил, что, по крайней мере, $|\delta| \leq 0,02$. Таким образом, Кавендиш первым экспериментально установил закон взаимодействия электрических зарядов. Однако он не обнаружил своего открытия, и оно оставалось долгое время неизвестным. О нем узнали лишь в середине XIX столетия, после того как работу Кавендиша опубликовал Максвелл. Однако к этому времени она имела уже чисто исторический интерес. Сам Максвелл с большей точностью повторил эксперимент Кавендиша и установил, что $|\delta| \leq 10^{-5}$. В 1971 г. в усовершенствованных опытах с двумя концентрическими проводящими сферами было установлено, что $|\delta| \leq 10^{-16}$. Эти эксперименты позволили установить справедливость закона Кулона в лабораторных условиях ($r \sim 1$ м).

Электризация тел

Для демонстрации многочисленных электростатических явлений тела электризуют посредством трения. При электризации тел важен тесный контакт между ними, что достигается с помощью трения. Так как поверхности тел никогда не бывают идеально гладкими, то контакт между телами устанавливается только на небольших участках поверхностей. При трении тел друг о друга число участков с тесным контактом увеличивается и тем самым увеличивается общее число заряженных частиц, переходящих от одного тела к другому. В результате имеет место пространственное разделение зарядов. После разведения трущихся тел на них появляются заряды противоположного знака. Опыт показывает, что наэлектризовать таким способом можно лишь тогда, когда хотя бы одним из контактирующих тел является диэлектрик. Металлы же после их разведения не обнаруживают какого-либо заряда. Почему же так происходит? Основное отличие металлов от диэлектриков состоит в том, что в металлах имеется большое число электронов проводимости, свободно перемещающихся внутри кристаллической решетки. Эти электроны имеют дискретные значения энергии, которые составляют электронный энергетический спектр. Максимальное значение энергии электрона вблизи абсолютного нуля температуры называется энергией Ферми. Каждый металл имеет свое собственное значение энергии Ферми. Для выхода электрона за поверхность металла необходимо затратить энергию (совершить работу), называемую работой выхода. Эта работа равна разности энергии электрона, находящегося вблизи поверхности (вне металла), и энергии Ферми. Контакт двух тел осуществляется при конечном расстоянии между крайними ионами обеих кристаллических решеток

(порядка периода решетки). Этого оказывается достаточно, чтобы электроны перешли из металла с меньшей работой выхода в металл с большей работой выхода. Перемещения электронов при этом не превышают размеров межатомных расстояний (10^{-8} см). Равновесие наступает при некотором разделении зарядов, при котором появившееся контактное электрическое поле начнет возвращать электроны обратно и, тем самым уравнивает процесс перехода. Таким образом, пока есть контакт, проводники будут разноименно заряжены, при этом их заряды располагаются в непосредственной близости к поверхностям контакта. Эти поверхности будут образовывать своеобразный конденсатор, между обкладками которого разность потенциалов приблизительно равна разности энергий Ферми, деленной на заряд электрона. При разведении проводников нельзя разорвать одновременно контакт вдоль всей поверхности: площадь контакта можно только быстро уменьшать. Это значит, что уменьшается площадь пластин «контактного конденсатора». Электроны, которые могут свободно двигаться вдоль поверхности, станут возвращаться обратно в металл с меньшей работой выхода, и заряд конденсатора уменьшится. Когда площадь контакта уменьшится до нуля, металлы будут не заряжены. При контакте металла с диэлектриком и последующем их разъединении тела становятся заряженными. Если, например, по металлическому стержню, находящемуся на изолированной подставке, побить кусочком меха, то стержень приобретет положительный заряд. Это происходит вследствие того, что связь электронов с атомами диэлектрика (меха) сильнее, чем с атомами металла. В результате электроны покидают металл и удерживаются диэлектриком. Еще сильнее выражена электризация при тесном контакте разных диэлектриков. Чем сильнее различаются связи электронов с атомами обоих веществ и чем больше площадь контакта, тем сильнее электризуются диэлектрики.

Электрическое поле Земли

Опыт показывает, что вблизи поверхности Земли существует электрическое поле. Возникновение этого поля связано в основном с процессами ионизации воздуха под действием космических лучей, ультрафиолетового излучения Солнца; излучения радиоактивных веществ, имеющих на поверхности Земли и в воздухе; электрических разрядов в атмосфере и т. д. В результате происходит пространственное разделение зарядов: поверхность Земли становится заряженной отрицательно, а над ней находится положительно заряженная атмосфера, содержащая большое число ионизованных молекул. Напряженность поля вблизи поверхности Земли в среднем составляет около 100 В/м. $E = k(q/R_3^2)$, и приняв радиус Земли $R_3 = 6400$ км, то заряд Земли $q = 0,46 \cdot 10^6$ Кл. При осадках и особенно грозах, метелях, пылевых бурях и т. п. напряженность поля может резко менять направление и величину, достигая иногда 1000 В/м. Наибольшие значения E имеет в средних широтах, а к полюсам и экватору убывает. Вблизи земной поверхности в слое перемешивания толщиной 300–3000 м, где скапливаются аэрозоли, напряженность поля может даже с высотой возрастать. Выше слоя перемешивания она убывает с высотой по экспоненциальному закону и на высоте 10 км не превышает нескольких вольт на метр. Это убывание связано с тем, что в атмосфере содержатся положительные объемные заряды, плотность которых также быстро убывает с высотой.

Опыт Миллекена (1913)

В 1913 г. американским физиком Р. Миллиkenом был измерен заряд электрона. Им изучалось поведение заряженных капель масла в электрическом поле конденсатора. На рисунке показана схема его установки. При распылении пульверизатором (как и при трении) капли масла заряжались. Эти капли через отверстие попадали в пространство между обкладками плоского конденсатора. На его обкладки подавалось постоянное напряжение от мощной батареи. Капли могли облучаться рентгеновскими лучами для ионизации молекул масла, т. е. дополнительного увеличения заряда капли.

Измеряя с помощью зрительной трубы скорость падения капель при разомкнутом ключе, он определял их размер и массу. Затем включалось электрическое поле, позволяющее уравновесить силу тяжести и удерживать часть капель в подвешенном состоянии. Из условия равновесия вычислялся заряд капли. Повторяя многократно в течение пяти лет этот трудоемкий опыт, Милликен установил, что заряды капель кратны одной и той же величине $|e|$. Наградой за титанический труд стала Нобелевская премия по физике за 1923 г. Согласно современным данным, заряд электрона неделим и равен $e = -1,602176565(35) \cdot 10^{-19}$ Кл. С тех пор модуль заряда электрона считается элементарным электрическим зарядом. Эта величина служит единицей измерения электрического заряда других элементарных частиц. Масса электрона равна $m = 9,10938291(40) \cdot 10^{-31}$ кг. Электрон неделим и бесструктурен (как минимум до расстояний 10^{-17} см). Он обладает собственным

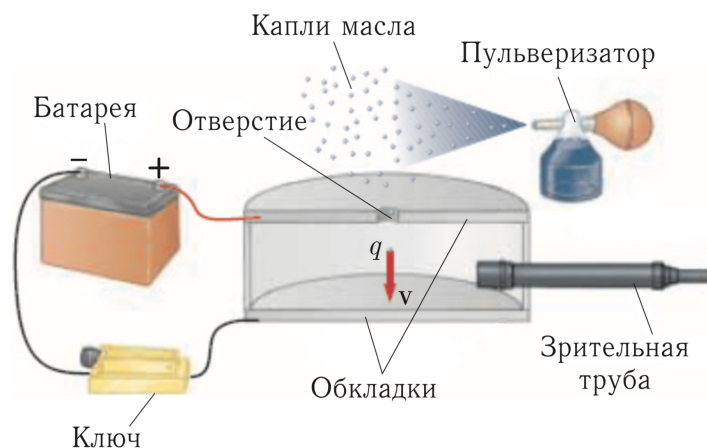


Рисунок 2

механическим моментом, или спином, равным $s = \hbar/2$.

Электроскоп

Для обнаружения электрического заряда какого-либо предмета применяется электроскоп (от греч. «skopeo» - смотрю). Электроскоп как физический прибор сыграл важную роль на ранних этапах изучения электричества. Первый электроскоп изобрел итальянский физик А. Вольта. Его прибор состоял из металлического стержня, пропущенного через каучуковую пробку, которая закрывала стеклянную бутылку. Верхний конец металлического стержня оканчивался металлическим шариком, а к нижнему концу, находящемуся внутри бутылки, привешивались 2 соломинки. Современный электроскоп состоит из металлического стержня - электрода и подвешенных к нему двух листочков фольги. Для обнаружения слабых зарядов на предметах к электроду иногда подвешиваются тонкие золотые листочки.



Рисунок 3

При прикосновении к электроду заряженным предметом заряды от предмета стекают через электрод на листочки фольги, листочки оказываются одноименно заряженными и поэтому отталкиваются друг от друга. Чем больше заряд, перешедший на электроскоп, тем больше сила отталкивания листочков и, соответственно, угол между ними. Если к заряженному электроскопу поднести тело, имеющее заряд противоположного знака, то угол между его листочками начнет уменьшаться. Следовательно, электроскоп позволяет различать знак заряда наэлектризованного тела. Для того чтобы листочки фольги не колебались от движения воздуха, их обычно помещают в стеклянный сосуд. Из сосуда при этом может быть откачан воздух для предотвращения быстрой утечки заряда с фольги.

Электростатический фильтр

Взаимодействие заряженных частиц используется в электростатическом фильтре для очистки воздуха от содержащихся в нем пыли и аэрозолей. Принцип очистки демонстрируется в лекционном эксперименте. В прямоугольной кювете, заполненной дымом, сверху и снизу находятся параллельные горизонтальные пластины (рис. 9а). При подаче на пластины высокого напряжения от электрофорной машины частички ионизируются и начинают оседать на отрицательно заряженной нижней пластине (рис. 9б). Через некоторое время воздух очищается от дыма (рис. 9с).

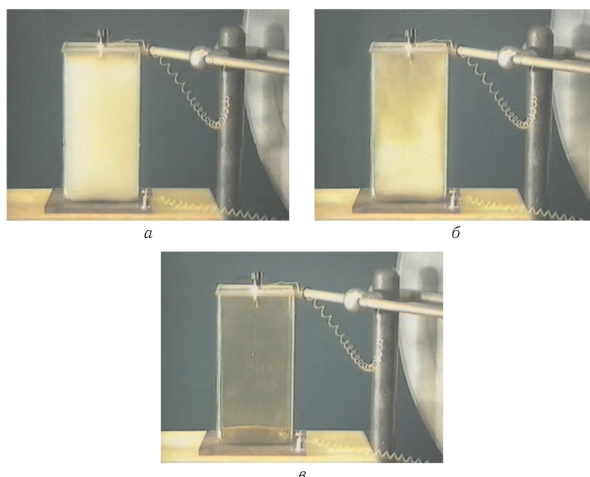


Рисунок 4

Устройство промышленного фильтра показано на рис. 10. Частицы пыли или аэрозоля, пройдя через предварительный фильтр, попадают в ионизатор, который состоит из чередующихся металлических пластин и нитей. Между нитями и пластинами за счет высокого приложенного напряжения около 10 кВ создается сильное электрическое поле и возникает коронный разряд, в котором частицы ионизируются (становятся положительно заряженными). Пройдя через разряд, они попадают в осадитель, представляющий собой систему пластин с чередующимся положительным и отрицательным значением потенциала. Разность потенциалов между соседними пластинами может достигать нескольких киловольт. Положительные ионы примеси будут оседать на пластинах с отрицательным потенциалом. Затем воздух может проходить через дополнительные фильтры (постфильтр и химкассета), подвергаясь дальнейшей очистке.

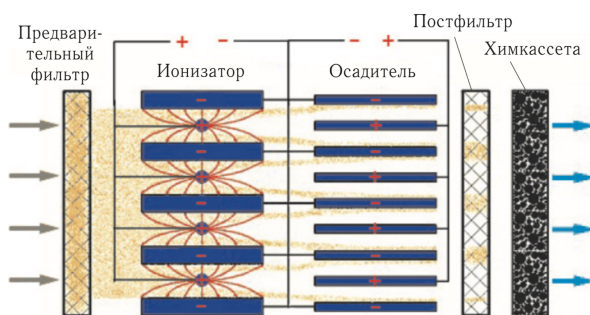


Рисунок 5

Электростатические фильтры способны эффективно очищать воздух от самой мелкой пыли (размером до 0,01 мкм), в том числе копоти и табачного дыма. С начала XX в. они стали широко применяться в промышленности. На рис. 11 показаны фотографии дымящихся заводских труб с электростатической фильтрацией и без нее.



Рисунок 6

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда. Приведите примеры.
2. Сформулируйте закон Кулона.
3. Почему экспериментаторы никогда не решаются утверждать, что параметр δ в модификации закона Кулона $F \approx 1/r^{2\pm\delta}$ в точности равен нулю? Почему мы все-таки уверены в справедливости закона Кулона?
4. Дайте определение единицы электрического заряда.
5. Дайте определение вектора \vec{E} напряженности электрического поля.
6. Каковы единицы измерения напряженности электрического поля?
7. Сформулируйте принцип суперпозиции электростатических полей.
8. Дайте определение и сформулируйте основные свойства силовых линий электростатического поля.
9. Дайте определение и изобразите графически однородное и неоднородное электростатические поля.
10. Какие ученые (кроме Кулона) пришли к выводу о законе обратных квадратов для силы электростатического взаимодействия?
11. Как осуществляется электризация макроскопических тел?
12. Опишите схему опыта Миллекена. В чем заключался результат его экспериментов?
13. Опишите принцип работы электроскопа. Для чего он используется?
14. Как работает электростатический фильтр?
15. Опишите свойства электростатического поля Земли.

Рабочие формулы

- Закон Кулона

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}},$$

где \vec{F}_{12} - сила действия первого точечного электрического заряда Q_1 на второй заряд Q_2 ; \vec{r}_{12} - вектор, соединяющий заряды и направленный от Q_1 к Q_2 ; $r_{12} = |\vec{r}_{12}|$ - расстояние между зарядами; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ - электрическая постоянная.

- Электрический заряд любого тела кратен элементарному электрическому заряду $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл (квантование электрического заряда):

$$Q = \pm Ne,$$

где N - целое число.

- Алгебраическая сумма зарядов изолированной системы постоянна (закон сохранения электрического заряда):

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \text{const.}$$

- Напряженность электрического поля является его силовой характеристикой, которая определяет величину и направление силы, действующей на единичный положительный точечный заряд (пробный) $q_{\text{пр}}$, помещенный в данную точку пространства:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}}.$$

- Напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом Q в точке наблюдения:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

где \vec{r} - радиус-вектор, проведенный из точки, где находится заряд Q , в точку наблюдения.

- Принцип суперпозиции: напряженность электрического поля системы зарядов \vec{E} равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым отдельным зарядом системы \vec{E}_i , т. е.

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i.$$

В частном случае двух зарядов $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ абсолютное значение напряженности результирующего поля определяется выражением

$$E = |\vec{E}| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos \alpha},$$

где α - угол между \vec{E}_1 и \vec{E}_2 .