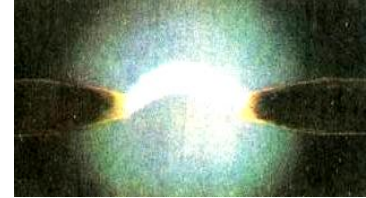
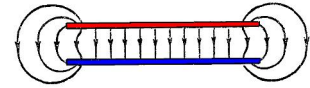
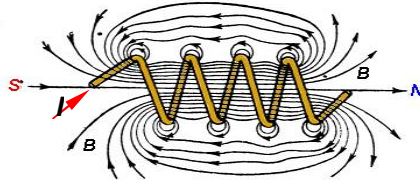
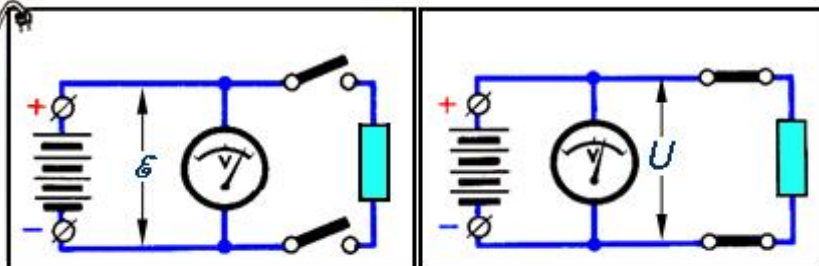
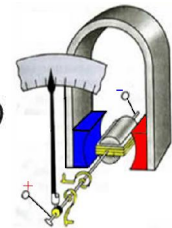
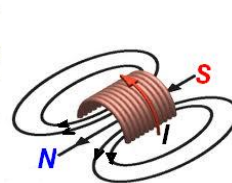
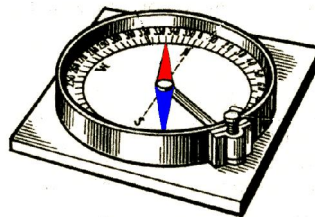
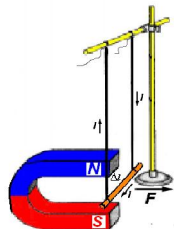
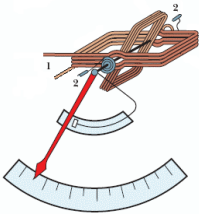
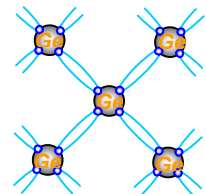
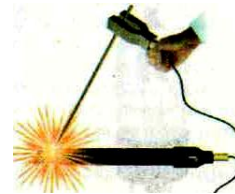
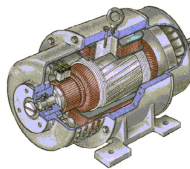
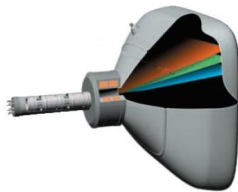
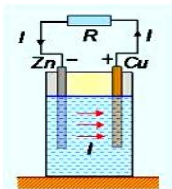
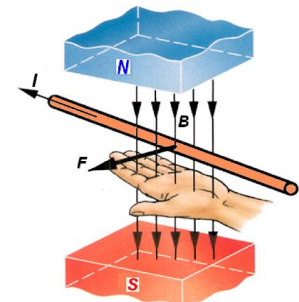
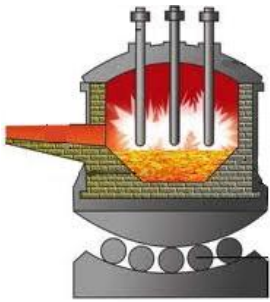


Раздел 2



ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ (1)





Слабое
Гравитационное
Фундаментальные взаимодействия
Электромагнитное
Сильное

Предисловие

1⁰. Среди четырёх типов известных фундаментальных физических взаимодействий, – *гравитационных, электромагнитных, слабых и сильных (ядерных)* – именно электромагнитные взаимодействия занимают первое место по широте и разнообразию проявлений. В повседневной жизни и технике мы чаще всего встречаемся с различными видами электромагнитных сил. Это силы упругости, трения, силы мышц. Электромагнитные взаимодействия позволяют видеть книгу, которую вы читаете, так как свет одна из форм электромагнитного поля.

Живые существа и человек, как показали полеты в космос, способны длительное время находиться в состоянии невесомости, когда гравитационные силы обеспечивают их движение по орбите вокруг Земли, но не оказывают никакого влияния на их жизнедеятельность. Но если бы на мгновение прекратилось действие электромагнитных сил, то сразу исчезла бы и жизнь.

При взаимодействии частиц в самых малых системах природы – в атомных ядрах – и при взаимодействии космических тел электромагнитные силы играют очень важную роль. Строение атомной оболочки, сцепление атомов в молекулы (химические силы) и образование макроскопических тел определяются электромагнитными силами. В то же время *сильные* и *слабые* фундаментальные взаимодействия определяют процессы только в очень малых масштабах, а гравитационные – только в космических (по крайней мере одно из тел должно иметь космические размеры).

Невозможно указать явления, которые не были бы связаны с действием электромагнитных сил.

2⁰. Без их повседневного использования человеком невозможно представить современную цивилизацию. Сегодня трудно было бы обойтись без электрических лампочек, компьютера, мобильных телефонов, телевидения, электродвигателей, заставляющих работать пылесос, лифт, электропоезда метро и многое, многое другое. Электрическую энергию можно передавать по проводам на большие расстояния и распределять между потребителями. Её легко преобразовать в другие виды энергии и, что очень важно, эти преобразования осуществляются с малыми потерями. Мы привыкли к этому, и нам кажется, что это существовало вечно. Но всё это было создано всего лишь за последние два столетия настойчивым трудом талантливейших учёных и инженеров.

При развитии электромагнетизма впервые научные исследования предшествовали техническим применениям. Если паровая машина была построена задолго до создания теории тепловых процессов, то сконструировать электродвигатель или радиоприемник оказалось возможным только после открытия и изучения законов электромагнетизма.

3⁰. Обратите внимание, что слова «электричество» и «магнетизм» соседствуют друг с другом. К этому есть серьёзные основания. Как вы узнаете в будущем, электрические и магнитные явления – это одни и те же явления, но наблюдаемые в различных системах координат. Просто пока их нам удобнее рассматривать отдельно.

4⁰. В механике мы рассматривали взаимодействия тел и частиц, имеющих определённую массу m . теперь мы будем рассматривать тела и частицы, несущие на себе ещё и *электрические заряды q* , которые, как вам известно, могут быть *положительными* и *отрицательными* (см. Пособие для 7 класса; Приложение к главе 1, которое *рекомендуется повторить*).

5⁰. При изучении электромагнитных явлений мы в большинстве случаев будем использовать метод, которым часто пользовались и до сих пор. Суть его в следующем.

Исследователь не интересуется «природой вещей». Он не пытается объяснить, а лишь описывает наблюдаемые явления. Потом среди многочисленных фактов он пытается найти общее, сохраняющееся, инвариантное и сформулировать обобщающий вывод, закон (обычно словами или формулой). При этом он вынужден использовать некоторые *новые термины*.

Такой метод называется **феноменологическим методом изучения природы**. Слово «*феномен*» в переводе означает «*явление*». В естествознании он играет огромную роль, особенно на первых стадиях изучения явлений, до построения научной теории. Очень важная роль принадлежит ему и в истории изучения электрических явлений.

Наша задача состоит в изучении основных законов электромагнитных взаимодействий, а также в знакомстве с основными способами получения электрической энергии и использования ее на практике.

Глава 4. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

Раздел, посвященный изучению взаимодействий покоящихся электрически заряженных тел, называют **электростатикой**.

§ 25. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД.

Учитель: «Что такое электричество?»
Ученик: «Э... Я это хорошо знал, но забыл»
Учитель (восклицает): «Какая потеря для человечества, был один человек, который знал, что такое электричество, и тот забыл!»

1⁰. Электричество, электрический ток, электрический заряд, электрическая энергия – эти слова знакомы сейчас каждому. Но что такое электричество? Какова его природа? Чтобы ответить на эти вопросы надо ознакомиться с многообразными и сложными явлениями, которые называют **электрическими**. Начнём с самого простого.

2⁰. Рассмотрим происхождение термина «**электричество**».

Явление притяжения натертым телом других тел было обнаружено в Древней Греции. Еще тогда люди увидели, что кусочек янтаря, потертый о шерсть, притягивает к себе маленькие тела. Это явление использовали для удаления пыли с дорогих одежд. При расчёсывании сухих волос янтарным гребнем, они встают, отталкиваясь друг от друга. Слово «янтарь» по-гречески — **электрон**.

Подобные явления, связанные с взаимодействием *разнородных* тел, которые были приведены в контакт друг с другом (расческа с волосами, янтарь с шерстью и т. д.), стали называть **электризацией** тел, а возникающие при этом силы — **электрическими силами**. Эти термины стали общепринятыми в науке.

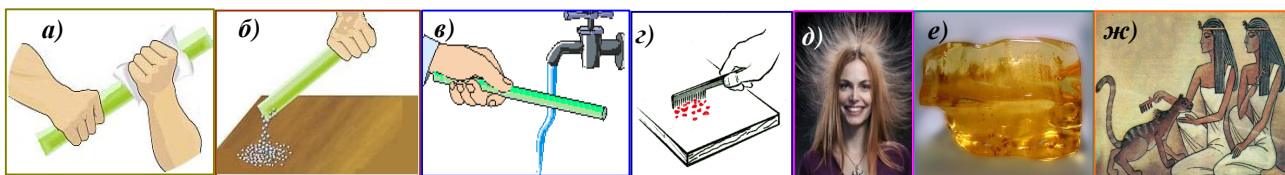


Рис. 1. Электризация при контакте двух разнородных тел. Потёртая о бумагу стеклянная палочка притягивает лёгкие предметы, а), б), струю воды, в). Подобные явления наблюдаются при расчёсывании сухих волос: расчёска притягивает мелкие бумажки, г), а волосы встают дыбом, д). Янтарь (или солнечный камень) – смола хвойных деревьев, затвердевшая около 40-50 миллионов лет назад, е). При расчёсывании животных янтарным гребнем, волоски шерсти встают, отталкиваясь друг от друга, ж).

3⁰. Электризация наблюдается всегда при контакте двух *разнородных* тел, *рис. 1*. Так, если разгладить руками на листе плексигласа лист бумаги, например лист газеты, то обнаружится: газета и плексиглас прилипают друг к другу. Следовательно, эти тела электризуются, т. е. между ними возникают электрические силы притяжения. Электризация наблюдается при контакте стекла и кожи, эбонита или резины и шерсти, плексигласа и шерсти. Электризация происходит при трении шерстяных и синтетических тканей. Снимая нейлоновую рубашку в сухом воздухе, можно слышать характерное потрескивание. Между заряженными трущимися поверхностями проскакивают мелкие искры. Трение увеличивает контакт и ускоряет электризацию тел.

4⁰. В электризации всегда участвуют **два** тела: в рассмотренных выше примерах стеклянная палочка соприкасалась с листом бумаги, кусочек янтаря - с мехом или шерстью. При этом **электризуются оба тела**: расчёска притягивает бумажки, а волосы встают дыбом, отталкиваясь друг от друга.



Вопросы

1. Каково происхождение слова «электричество»?

2. Как обнаружить на опыте возникновение электрического заряда на разнородных телах, потертых друг о друга?
3. Откуда следует, что при соприкосновении электризуются оба тела?

§ 26. ДВА РОДА ЗАРЯДОВ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ



1⁰. Все наэлектризованные тела приобретают свойство притягивать к себе другие тела, например листочки бумаги. По притяжению тел нельзя отличить электрический заряд стеклянной палочки, потертой о шелк, от заряда, полученного на эбонитовой палочке, потертой о мех. Ведь обе наэлектризованные палочки притягивают листочки бумаги.

Означает ли это, что заряды, полученные на телах, сделанных из различных веществ, ничем не отличаются друг от друга?

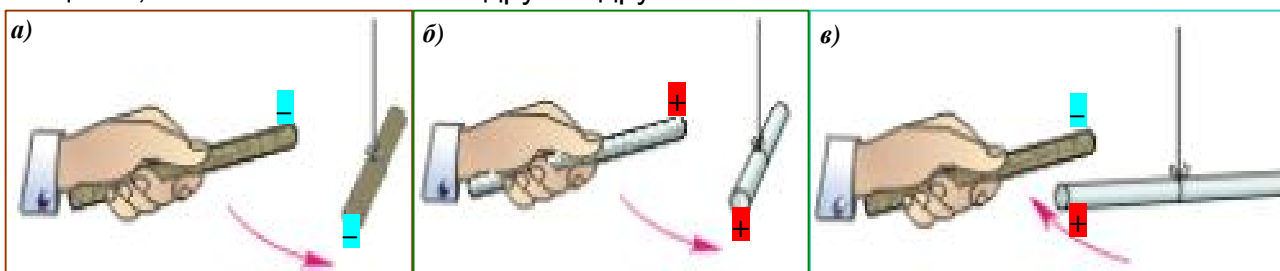


Рис. 2. Две наэлектризованные эбонитовые палочки отталкиваются друг от друга (а). То же самое происходит с наэлектризованными стеклянными палочками (б). Но если одна наэлектризованная палочка эбонитовая, а другая стеклянная, они притягиваются (в).

2⁰. Обратимся к опытам. Наэлектризуем эбонитовую палочку, подвешенную на нити. Приблизим к ней другую такую же палочку, наэлектризованную трением о тот же кусочек меха. Палочки оттолкнутся (рис. 2,а). Поскольку палочки одинаковые и наэлектризовали их трением об одно и то же тело, можно сказать, что на них были заряды одного рода. То же самое происходит с наэлектризованными стеклянными палочками, рис. 2,б.

Значит, тела, которым сообщены заряды одного рода, отталкиваются.

Теперь поднесём к наэлектризованной эбонитовой палочке стеклянную палочку, потертую о шелк. Мы увидим, что стеклянная и эбонитовая палочки взаимно притягиваются, рис. 2,в. Следовательно, заряд полученный на стекле, потертом о шелк, другого рода, чем на эбоните, потертом о мех. Значит, *существует два рода электрических зарядов.*

Тела, которым сообщены заряды разного рода, притягиваются.

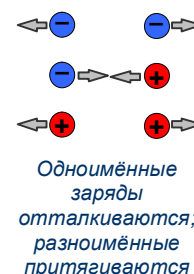
3³. Будем приближать к подвешенной наэлектризованной эбонитовой палочке другие наэлектризованные тела из различных веществ: резины, плексигласа, пластмассы, капрона. Мы увидим, что в одних случаях эбонитовая палочка отталкивается от поднесенных к ней тел, а в других – притягивается к ним. Если эбонитовая палочка оттолкнулась, значит, на поднесенном к ней теле заряд такого же рода, как и на ней. А заряд тех тел, к которым эбонитовая палочка притянулась, сходен с зарядом, полученным на стекле, потертом о шелк.

Заряд, полученный на стекле, потертом о шелк (и на всех телах, где получается заряд такого же рода), назвали **положительным**. А заряд, полученный на янтаре (а также эбоните, сере, резине), потертом о шерсть, назвали **отрицательным**, рис. 3.



Рис. 3. В электризации всегда участвуют два тела. При трении они приобретают заряды противоположных знаков.

4⁰. Итак, опыты показали, что существует **два рода электрических зарядов – положительные и отрицательные заряды**. Наэлектризованные тела по-разному взаимодействуют друг с другом: **тела, имеющие электрические заряды одинакового знака, взаимно отталкиваются, а тела, имеющие заряды противоположного знака, взаимно притягиваются.**



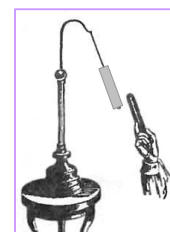
Вопросы

1. Как взаимодействуют друг с другом две эбонитовые палочки, наэлектризованные трением о мех?
2. Как показать, что заряд, полученный на стекле, потертом о шелк, является зарядом другого рода, чем заряд эбонитовой палочки, потертой о шерсть?
3. Какие два рода электрических зарядов существуют в природе? Как их называют?
4. Как взаимодействуют тела, имеющие заряды одного знака? разных знаков?



Упражнение

Оберните круглый карандаш металлической бумагой (фольгой) и осторожно снимите с карандаша образовавшуюся гильзу. Подвесьте ее на шелковой или капроновой нити, как показано на *рис. справа*. Коснитесь гильзы наэлектризованным телом, заряд которого известен. Затем наэлектризуйте другие тела и, поднося их к гильзе, определите знак их заряда.



§ 27. ЭЛЕКТРОСКОП. ПРОВОДНИКИ И НЕПРОВОДНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.

1⁰. На явлении электрического отталкивания заряженных тел одного знака основано устройство **электроскопа**¹ – прибора для обнаружения электрических зарядов.

На *рис. 4,а* изображен простейший **электроскоп**. В нем через пробку пропущен металлический стержень, на конце которого укреплены два листочка из тонкой бумаги или фольги. Иногда корпус электроскопа представляет собой металлическую оправу, которая с обеих сторон закрыта стеклами, *рис. 4, б*.

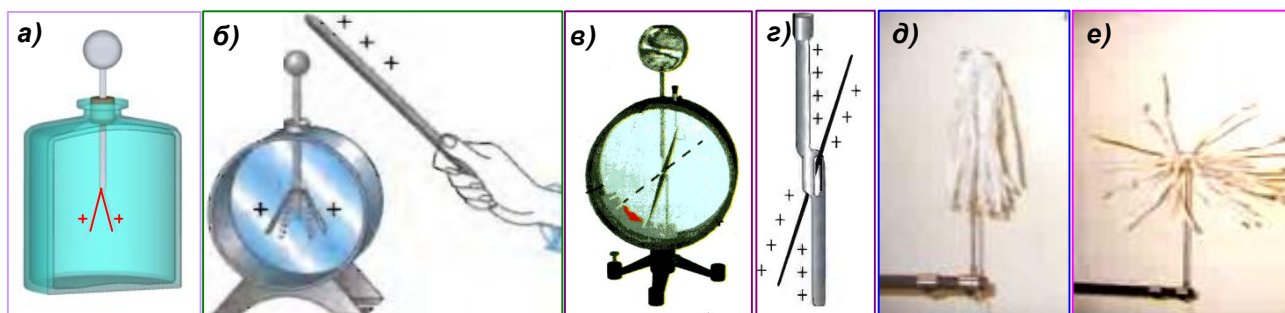


Рис. 4. На явлении отталкивания заряженных тел одного знака основано устройство **электроскопа** – прибора для определения наличия и оценки величины электрического заряда. У простейшего электроскопа имеются лёгкие лепестки, которые расходятся угол, пропорциональный имеющемуся на них заряду. Они подвешены к металлическому стержню, проходящему через пластмассовую пробку (а, б). В более сложных электроскопах имеется шкала и лёгкая стрелка, которая заряжаясь от стержня, поворачивается на угол, пропорциональный заряду (в, г). Это позволяет точнее оценить величину заряда.

Тонкие полоски бумаги, укрепленные на стеклянных подставках (т. н. «султаны»), свисают вниз при отсутствии (д) и расходятся в разные стороны при наличии (е) заряда на них. Это тоже своеобразная разновидность электроскопа, используемая в школе.

¹ От греческих слов: *электрон* и *скопио* – наблюдать, обнаруживать.

Чем больше заряд электроскопа, тем больше сила отталкивания листочков и тем на больший угол они разойдутся. Значит, по изменению угла расхождения листочков электроскопа можно судить, увеличился или уменьшился заряд электроскопа.

Для опытов с электричеством используют и другой, более совершенный прибор (рис. 4, в). Здесь легкая металлическая стрелочка, заряжаясь от стержня, отталкивается от него на некоторый угол (рис. 4, в). Так можно измерить величину заряда.

В демонстрационных целях используют так называемые «султаны». На них тонкие полоски бумаги, укрепленные на стеклянных подставках, свисают вниз при отсутствии (рис. 4, д) и расходятся в стороны при наличии (рис. 4, е) заряда на них.

2⁰. Если прикоснуться к заряженному телу (например, к электроскопу или султану) рукой, оно разрядится (рис. 5). Электрические заряды перейдут на наше тело и через него могут уйти в землю. Разрядится заряженное тело и в том случае, если соединить его с землей металлическим предметом, например медной или железной проволокой. Но если заряженное тело соединить с землей стеклянной или эбонитовой палочкой, то электрические заряды по ним не уйдут в землю. В этом случае заряженное тело не разрядится.

3⁰. По способности проводить электрические заряды вещества делятся на **проводники** и **непроводники** электричества (рис. 6). Все металлы, почва; растворы солей и кислот в воде – хорошие проводники электричества. Тело человека также хорошо проводит электричество. К непроводникам электричества, или **диэлектрикам**, относятся эбонит, стекло, янтарь, резина, шелк, капрон, керосин, пластмассы. Тела, изготовленные из диэлектриков, называются **изоляторами**.



Рис. 5. Разрядка прикосновением

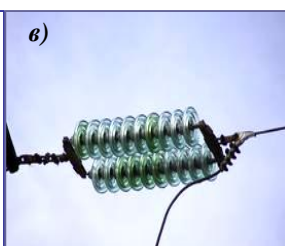
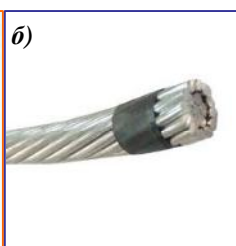


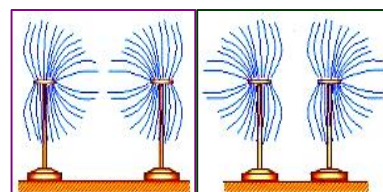
Рис. 6. Металлы медь (а) и алюминий (б) очень хорошие проводники электричества. Из таких диэлектриков, как стекло (в), фарфор (г) изготавливаются изоляторы.

Из металлических проводников изготавливаются провода, используемые для передачи электрической энергии. Они укрепляются на изоляторах. Провода всех бытовых электрических приборов также покрыты изоляцией, что вам хорошо известно.



Вопросы

1. Как при помощи листочков бумаги обнаружить, наэлектризовано ли тело?
2. Опишите устройство школьного электроскопа.
3. Как по углу расхождения листочков электроскопа судят о его заряде?
4. Как на опыте показать, что одни вещества являются проводниками электричества, а другие – нет?



Что можно сказать о знаках зарядов на изображённых здесь султанах?

§ 27, а. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

1⁰. Вы знаете, что масса тел сохраняется. Сохраняется так же и электрический заряд. Опыты с электризацией тел доказывают, что при электризации трением

происходит перераспределение имеющихся зарядов между телами, нейтральными в первый момент. На телах образуются два равных противоположных заряда.

Используя электроскопы, можно наглядно продемонстрировать **закон сохранения электрического заряда** в этом случае.

Возьмем палочку из оргстекла и палочку из эбонита, потрем их друг о друга. При этом они наэлектризуются, получив разноименные заряды. Коснемся одной палочкой шара электроскопа. Лепестки разойдутся, свидетельствуя о том, что палочка заряжена (рис. 7, а). А теперь коснемся шара второй палочкой. Лепестки сойдутся (рис. 7, б). Значит, палочки зарядились разноименно, причем так, что их суммарный заряд равен нулю, как и до натирания палочек друг о друга.

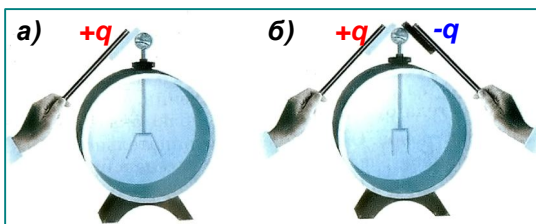


Рис. 7. Два одинаковых по величине разноименных заряда компенсируются: если $|+q| = |-q|$, то $(+q) + (-q) = 0$

2⁰. Закон сохранения заряда справедлив для любой системы, в которую не входят извне и из которой не выходят наружу заряженные частицы, т. е. для **изолированной системы**. Электрические заряды могут переходить с одного тела на другое. При этом тела будут так или иначе заряжаться, но общий их заряд будет сохраняться.

Закон сохранения заряда можно сформулировать так:

заряд изолированной системы тел при всех взаимодействиях, происходящих в этой системе, остается неизменным.

Это означает, что если заряды частиц обозначить через q_1, q_2 и т. д., то

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.} \quad [1]$$

Закон сохранения заряда относится к наиболее фундаментальным законам физики.



Вопросы

1. Как с помощью электроскопов продемонстрировать закон сохранения заряда?
2. Сформулируйте закон сохранения заряда словесно и в виде формулы. При каком условии, для каких систем выполняются законы сохранения?

§ 27, 6. СИЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ – ЗАКОН КУЛОНА

1⁰. Для того чтобы объяснить многие электрические явления, недостаточно знать, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются. Необходимо уметь *вычислять* силу взаимодействия электрических зарядов. Впервые установил закон, по которому определяется эта сила, французский ученый **Шарль Кулон** в 1785 году. Закон был выведен опытным путем. Он гласит: **сила взаимодействия двух точечных электрических зарядов прямо пропорциональна величине этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:**

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}, \quad [2]$$

где F - модуль силы взаимодействия зарядов;

q_1 и q_2 - модули зарядов;

r - расстояние между зарядами;

k - коэффициент пропорциональности.

Силу F называют *кулоновской* силой.

2⁰. Эта формула напоминает закон всемирного тяготения Ньютона



Шарль Кулон
1736-1806

(см. формулу [9.2] главы 2 Пособия для 7 класса). Только массы материальных точек заменены точечными электрическими зарядами, а вместо гравитационной постоянной γ стоит коэффициент пропорциональности k . Отличие и в том, что заряды могут быть одинаковых или разных знаков, могут отталкиваться или притягиваться. В дальнейшем будет понятно, что эти отличия означали совершенно новые взаимодействия в физике, не известные Ньютону.

Кроме того, заряженные тела часто имеют сложную геометрическую форму. Например, заряды на двух лепестках электроскопа. Допустим, удастся измерить силу взаимодействия этих зарядов. А если увеличить длину лепестков или изменить их форму, то сила взаимодействия этих зарядов изменится. Многообразие форм и размеров заряженных тел усложняет изучение их взаимодействий. Рассмотрим, каким образом Кулон вышел из этих сложностей.

3°. Кулон упростил задачу. Он определял силу взаимодействия между зарядами, расположенными на маленьких шариках. К тому же оказывается, что формула закона не изменится, если тела будут иметь произвольную форму, но размеры их будут намного меньше, чем расстояние, на которое они удалены друг от друга. В этом случае размеры и форма заряженных тел перестают иметь какое-либо значение. Такие заряды называются **точечными** (вспомните, что и закон всемирного тяготения тоже сформулирован для тел, которые можно считать материальными точками).

Чтобы с большой точностью измерить силу, Кулон использовал крутильные весы (рис. 8).

В стеклянном сосуде на тонкой упругой нити укреплен стержень с одинаковыми шариками на концах. В сосуд вводится еще один шар. Шары **A** и **B** электризуются одноименными зарядами. Шар **B** отталкивается, и нить закручивается на некоторый угол, тем больший, чем больше сила взаимодействия зарядов. Сила измеряется по углу закручивания нити. Расстояние между шарами **A** и **B** можно изменять и измерять по шкале. А вот величину заряда в то время еще не умели измерять.

Поэтому Кулон поступил следующим образом. Он наэлектризовал шар **A**, сообщив ему некоторый заряд q . Затем Кулон ввёл шар **A** в установку и прикоснулся к шару **B**, первоначально незаряженному. Поскольку шары **A** и **B** одинаковые, то логично предположить, что заряд шара **A** разделится поровну (по $q/2$). Измерив силу взаимодействия зарядов $q/2$ и $q/2$, Кулон вынул из установки шар **A**, снял с него заряд и снова ввёл в установку, прикасаясь к шару **B**. На шаре **B** был заряд $q/2$. Теперь же он разделится пополам, и заряды на шарах стали равными $q/4$.

Так, не зная величины зарядов, Кулон смог установить **закон взаимодействия зарядов**.

4°. Кулоновские силы (отталкивания или притяжения – в зависимости от знаков зарядов), как и гравитационные силы, подчиняются третьему закону Ньютона. Они равны по модулю и направлены противоположно друг другу по прямой, соединяющей рассматриваемую пару зарядов.

5°. **Электрический заряд q** – это физическая величина. Её можно измерить.

Электрический заряд q имеет также другое название — **количество электричества**. Именем Кулона была названа единица электрического заряда.

Кулон (1 Кл) – единица электрического заряда (количества электричества)².

6°. Чтобы рассчитать силу по закону Кулона, необходимо знать коэффициент пропорциональности. Его значение получено из экспериментов и равно

$$k=9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}.$$

Определим силу, с которой будут взаимодействовать два заряда по 1 кулону на расстоянии 1 метра:

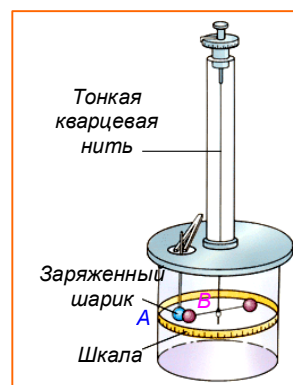


Рис. 8. Крутильные весы Кулона

² Определение этой единицы измерения заряда будет дано в следующей главе.

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{H \cdot M^2}{Kл^2} \cdot 1 \text{ Кл} \cdot 1 \text{ Кл} / 1 \text{ м}^2 = 9 \cdot 10^9 \text{ Н}.$$

Это огромная сила! В реальных ситуациях при электризации тел мы имеем дело с зарядами намного меньше, чем 1 кулон (в миллионы и миллиарды раз). Поэтому и силы взаимодействия заряженных тел намного меньше.

7⁰. Электрические и гравитационные взаимодействия относятся к фундаментальным физическим взаимодействиям, с которыми мы встречаемся постоянно. При этом электрические силы ответственны в первую очередь за свойства тел, окружающих нас: ведь все они состоят из атомов, «кирпичиками» которых являются элементарные заряды – **электроны** и **протоны**. А гравитационные силы ответственны за взаимодействия наиболее массивных тел. К ним относятся, прежде всего, планеты, галактики и другие космические объекты. Нами гравитация воспринимаются как *сила тяжести* – не только нас самих, но и моста, небоскрёба. В этих случаях космическим объектом является планета Земля – одно из взаимодействующих тел.

8⁰. Используя формулы Ньютона и Кулона, можно сравнить величину этих фундаментальных взаимодействий. Для этого подсчитаем отношение электростатического притяжения к гравитационному притяжению между протоном и электроном в атоме водорода. Нам известны (см. Пособие для 7 класса; Приложение к главе 1) их электрические заряды и массы.

Масса и заряд **протона** $m_1 = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$; $q_1 = +1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Масса и заряд **электрона** $m_2 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$; $q_2 = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Тогда для отношения электростатической $F_{эл}$ и гравитационной $F_{гр}$ сил получим:

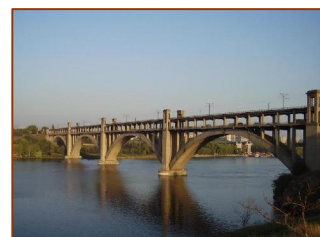
$$\frac{F_{эл}}{F_{гр}} = \frac{kq_1q_2/r^2}{\gamma m_1m_2/r^2} = \frac{kq_1q_2}{\gamma m_1m_2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \approx 2,24 \cdot 10^{39} \approx$$

$$\approx 2 \text{ 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000}.$$

Это непредставимо большая величина. Электрические силы, действующие между ядром и электроном атома водорода, превосходят гравитационные на 39 порядков!

9⁰. Если электростатическая сила во столько раз больше гравитационной, то почему мы ощущаем действие гравитационных сил, но не замечаем действия электрических сил? Причина в том, что хотя и мы сами и всё вокруг состоит из электрически заряженных частичек, но ровно половина из них заряжены положительно, а половина – отрицательно. Все электрические силы *скомпенсированы* в природе с очень высокой точностью. Даже огромные (для нас!) заряды, вызывающие молнию, в действительности связаны с незначительными (в процентном отношении) нарушениями этой компенсации.

Зато эти *скомпенсированные* электрические силы обеспечивают, например, прочность телебашни и тяжёлого железобетонного моста, на которые действуют огромные (по нашим масштабам) силы тяжести. Силы тяжести – всегда *только силы притяжения*. Поэтому мы и ощущаем свой вес.



Вопросы

1. Связь между какими величинами устанавливает закон Кулона?
2. Опишите опыт, с помощью которого Кулон вывел закон взаимодействия заряженных тел.
3. Сформулируйте закон Кулона.

4. Какие ограничения на форму и размеры зарядов предполагает закон Кулона? Приведите пример, в котором бы закон Кулона был неприменим для расчета сил взаимодействия между зарядами.
5. Пусть величина каждого из двух взаимодействующих зарядов увеличится вдвое. Как изменится сила?
6. Как изменится сила взаимодействия между зарядами, если расстояние между ними увеличится вдвое?
7. Как направлены силы взаимодействия точечных зарядов?
8. Как называется единица измерения электрических зарядов?
9. Как соотносятся силы электростатического и гравитационного притяжения между протоном и электроном в атоме водорода?
10. Почему мы замечаем действие гравитационных сил, но не замечаем действия электрических сил?

§ 28. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЁННОСТЬ ПОЛЯ. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПОЛЕЙ

1⁰. Итак, формулы закона всемирного тяготения Ньютона и закона взаимодействия электрических зарядов Кулона очень похожи. Они позволяют вычислить силы взаимодействия материальных точек и точечных зарядов, но оставляют нерешенным вопрос о том, как осуществляется это взаимодействие.

На этот счёт со времён Ньютона и Кулона до середины XIX века существовало две точки зрения.

Первая точка зрения предполагала, что взаимодействие тел происходит *мгновенно* через «пустое» пространство: тела способны «чувствовать» присутствие друг друга на любом расстоянии без какой-либо среды между ними. В этом сущность *теории действия на расстоянии (дальнодействия)*. Во времена Ньютона это казалось неправдоподобным и вызвало поток критики. Однако последовавшие успехи в исследовании Солнечной системы на основе этой теории настолько захватили воображение ученых, что они в большинстве своем начали склоняться к мысли о её правильности. Кроме того казавшееся естественным предположение о взаимодействии электрических зарядов через воздух тоже было отвергнуто после опытов с заряженными телами в вакууме: помещая заряженные тела под колокол воздушного насоса и выкачивая из него воздух, изменений во взаимодействии зарядов не наблюдалось (рис. 9). Таким образом, получалось, что и заряды взаимодействуют «через пустоту».

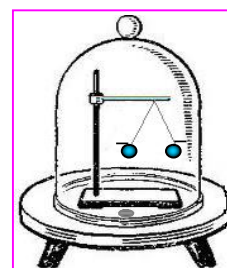


Рис.9. Заряды взаимодействуют и в вакууме!

Вторая точка зрения предполагала, что взаимодействия тел осуществляются *через посредство других тел или среды*. Причём для передачи взаимодействия *требуется какое-то время*, а промежуточные тела при этом как-то изменяются. Например, звук от источника передаётся к нашему уху через воздух со скоростью около 330 м/с благодаря тому, что в воздухе происходят деформации. В этом сущность *теории близкодействия*.

Итак, согласно *теории действия на расстоянии (дальнодействия)* одно тело действует на другое непосредственно через пустоту, и это действие передается мгновенно.

Теория близкодействия утверждает, что любое взаимодействие осуществляется с помощью промежуточных агентов и распространяется с конечной скоростью.

Долгое время казалось, что идея дальнего действия подтверждается. В действительности всё оказалось сложнее: после длительной борьбы теория ближнего действия одержала окончательную победу, приведя к понятию **силового поля**. В настоящее время физиками признано, что фундаментальные взаимодействия осуществляются через посредство **силовых полей**. Расскажем кратко, как это произошло, а также о том, что такое электрическое силовое поле.

2⁰. В §35 Пособия для 7 класса вы уже кое-что узнали о гравитационном поле. Суть изложенного там заключается в следующем.

Непосредственно из формулы закона всемирного тяготения Ньютона $F = \gamma \frac{Mm}{r^2}$

следует, что «одна масса притягивает другую» и взаимодействие это происходит **мгновенно** через «пустоту» (дальнее действие).

Однако эту формулу можно заменить двумя формулами, если предположить, что одна масса M создаёт в окружающем её пространстве **силовое поле**, которое характеризуется величиной G , называемой **напряжённостью поля** или **собственно полем**. Напряжённость поля убывает по мере удаления от источника M по закону

$$G = \gamma \frac{M}{r^2} \quad (\text{гравитационное поле}).$$

Поле существует благодаря своему источнику M . Оно, как и вещество, является **материальной средой**, действующей с силой

$$F = mG \quad (\text{действие гравитационного поля})$$

на любую другую массу m , помещённую в эту часть пространства.

3⁰. Подобным же образом можно преобразовать формулу закона Кулона

$$F = k \frac{Q}{r^2} \cdot q. \quad [2];$$

Уравнения [3] и [4] можно получить, если в формулах для гравитационного поля сделать замену: $M \rightarrow Q; m \rightarrow q; \gamma \rightarrow k; G \rightarrow E$.

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad [3]; \quad (\text{электрическое поле})$$

$$F = qE. \quad [4]. \quad (\text{действие электрического поля})$$

поля)

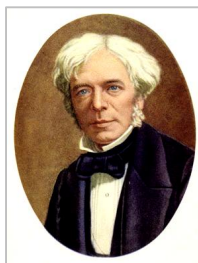
Величина E называется **напряжённостью электрического поля** или просто **электрическим полем**. Q – источник электрического поля (заряд, создающий поле E). q – электрический заряд (на который действует поле E).

Идея взаимодействия зарядов через посредство электрического поля принадлежит великому английскому физiku **Фарадею**. Теория такого взаимодействия электрических зарядов завершена **Максвеллом**.

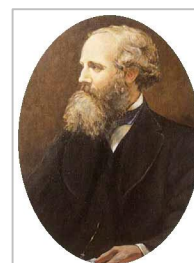
Согласно учению Фарадея и Максвелла пространство, окружающее наэлектризованное тело, отличается от пространства, вокруг ненаэлектризованных тел: **в пространстве, где находится электрический заряд, существует электрическое поле, через которое и осуществляется взаимодействие между зарядами, рис. 10.**

Поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот. По мере удаления от заряда поле ослабевает.

Первоначально эта идея выражала лишь уверенность Фарадея в том, что действие одного тела на другое через пустоту невозможно. Но доказательства существования поля, строго говоря, не было. Такие доказательства и нельзя получить, исследуя лишь взаимодействие неподвижных зарядов. Успех к теории ближнего действия пришел после



Майкл Фарадей
1791-1867



Джеймс Максвелл
1831-1879

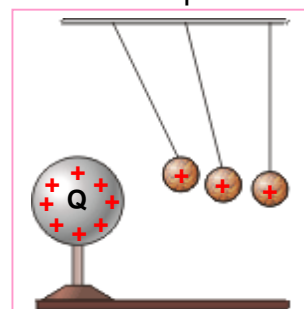


Рис. 10 Заряд Q создаёт электрическое поле E . Маленький заряженный шарик отталкивается тем сильнее, чем ближе он к заряженному телу Q .

изучения электромагнитных взаимодействий движущихся заряженных частиц. Вначале было доказано существование переменных во времени полей, и только после этого был сделан вывод о реальности электрического поля неподвижных зарядов. Постепенно стало ясно, что электрическое поле (как и гравитационное поле) представляет собой особый вид материи, отличающийся от вещества. При этом важную роль сыграло доказательство того, что распространение взаимодействий происходит не мгновенно, а с конечной скоростью.

Оказалось, что передача каких-либо взаимодействий мгновенно невозможна, а максимальная скорость передачи взаимодействий равна скорости света $c=300\,000\text{ км/с}$, рис. 11. С такой скоростью, происходит передача радиосигналов, осуществляется мобильная связь.

Таковы современные представления о механизме передачи взаимодействий непосредственно от точки к точке (близкодействию).

4⁰. **Напряжённость электрического поля E** можно определить из формулы [4], переписав её в таком виде:

$$E = \frac{F}{q}, [4]^*$$

где F – сила, действующая на положительный заряд q , помещённый в данную точку поля (при исследовании поля полагают, что пробные заряды q столь малы, что они не изменяют исследуемое поле).

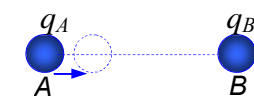


Рис. 11. Если передвинуть заряд q_A , то сила, действующая на заряд q_B изменится спустя некоторое время $\Delta t=AB/c$

Из [4]* следует, что **напряжённостью электрического поля в данной точке называется векторная величина, измеряемая отношением силы, действующей на положительный пробный заряд, помещённый в данную точку поля, к величине этого заряда. Направление напряжённости совпадает с направлением силы.**

Величина E является силовой характеристикой электрического поля.

Зная E в какой-либо точке поля, легко вычислить силу, с которой оно действует на заряд q в этой точке.

5⁰. **Напряжённость поля уединённого точечного заряда Q .** В какой-нибудь произвольной точке поля A этого заряда (рис. 12), отстоящей от него на расстоянии r_1 , поместим пробный (т. е. маленький точечный положительный) заряд q_1 и вычислим силу F_A действующую на него в этой точке.

По закону Кулона:

$$F_A = k \frac{q_1 Q}{r_1^2} [2]$$

Взяв отношение величины силы F_A к величине пробного заряда q_1 , получим численное значение (напряжённости) поля E_A в точке A :

$$E_A = k \frac{Q}{r_1^2} [3]$$

Точно так же можно найти напряжённость поля в точке B (рис. 12). Она будет равна

$$E_B = k \frac{Q}{r_1^2}$$

Отсюда видно, что **напряжённость электрического поля точечного заряда в заданной точке поля пропорциональна величине этого заряда и обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядом и этой точкой.**

6⁰. Если поле образовано несколькими, например двумя зарядами Q_1 и Q_2 (рис. 13), то напряжённость E в какой-нибудь точке A этого поля равна геометрической сумме напряжённостей E_1 и E_2 , создаваемых в этой точке отдельно зарядами Q_1 и Q_2 .

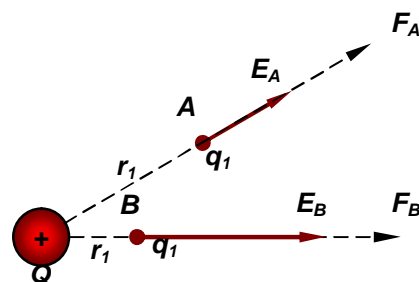


Рис. 12. К понятию напряжённости электрического поля уединённого заряда.

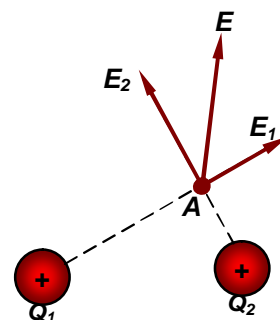


Рис. 13. Напряжённость поля двух зарядов.

Такая *независимость действия* отдельных объектов в физике встречается очень часто (это свойство так называемых *линейных систем*) и называется *принципом суперпозиции*. Этот принцип справедлив, например, и для сил в механике.

7⁰. Фарадеем был разработан метод **графического изображения электрических полей**, который широко пользуются и в настоящее время.

Фарадеи предложил изображать поле *линиями*, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряжённости поля в той же точке. Такие линии называются **силовыми линиями поля**.

Так, например, если **AB** представляет собой силовую линию, проведённую в поле, то вектор напряжённости поля **E** в какой-нибудь точке **C** совпадает с касательной **CD**, проведённой к силовой линии в этой точке (рис. 14).

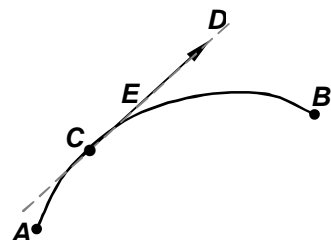


Рис. 14. Направление вектора напряжённости поля **E** совпадает с касательной к силовой линии.

Так как электрическое поле существует во всех точках пространства, то через любую точку можно провести силовую линию. А так как напряжённость поля в какой-нибудь точке имеет вполне определённую величину и направление, то, следовательно, через эту точку можно провести только одну силовую линию. Отсюда следует, что *силовые линии нигде не пересекаются*. Они могут только сходиться к заряду или расходиться от него. Силовым линиям приписывают начало у положительных зарядов и конец у отрицательных зарядов или в бесконечности.

На рис. 15 изображены с помощью силовых линий поля точечных зарядов. Силовые линии полей одиночных зарядов представляют собой прямые линии. Силовые линии парных и более сложных систем зарядов – кривые.

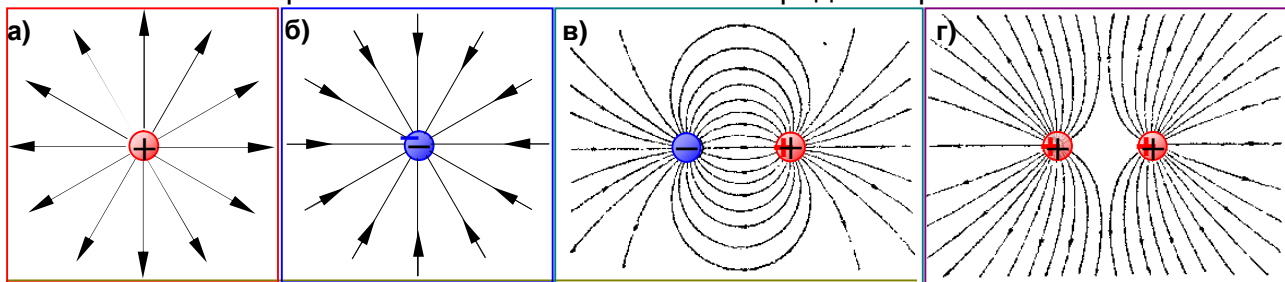


Рис. 15. Силовые линии поля одиночного точечного заряда – прямые. Они «выходят» из положительного (а) и «входят» в отрицательный (б) заряд. Силовые линии поля двух зарядов – кривые. Два разноимённых заряда взаимно притягиваются, образуя диполь (в). Два одноимённых заряда (г) взаимно отталкиваются.

8⁰. По тому, как густо расположены силовые линии, можно судить о величине напряжённости поля.

На рис. 16 изображено поле положительного точечного заряда. Силовые линии этого поля представляют собой радиальные прямые, идущие от заряда. Опишем вокруг такого заряда ряд сферических поверхностей. На рис. 16 показаны сечения **A, B, C, D** этих поверхностей плоскостью листа. Через эти поверхности пройдут все силовые линии, выходящие из заряда. Так как площадь поверхности каждой из сфер увеличивается пропорционально квадрату их радиуса, то число силовых линий, проходящих сквозь 1 см^2 поверхности каждой сферы, уменьшается пропорционально квадрату её радиуса (расстояния от заряда). Так же уменьшается с расстоянием от заряда и напряжённость поля; поэтому о величине напряжённости в разных точках поля можно судить по числу силовых линий, проходящих через 1 см^2 площади, перпендикулярной к силовым линиям, т. е. по густоте силовых линий.

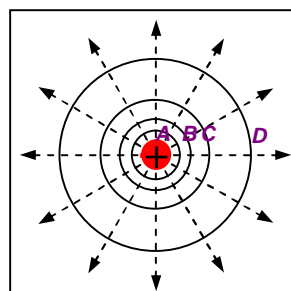


Рис. 16. Напряжённость электрического поля точечного заряда убывает пропорционально квадрату расстояния от него

9⁰. Представление о картине распределения силовых линий электростатического поля можно получить из опыта.

Поместим заряженные тела в какую-нибудь непроводящую жидкость (керосин, касторовое масло, вазелин и т. п.), в которой находятся мелкие игольчатые кристаллики гипса, хинина или асбеста. Тогда под действием электрического поля кристаллики, играющие в данном случае роль пробных тел, располагаются в цепочки. Их форма даёт представление о силовых линиях поля. Зачернённые кружки и полосы представляют собой разноимённо заряженные тела, вокруг которых существует электрическое поле, *рис. 17*.

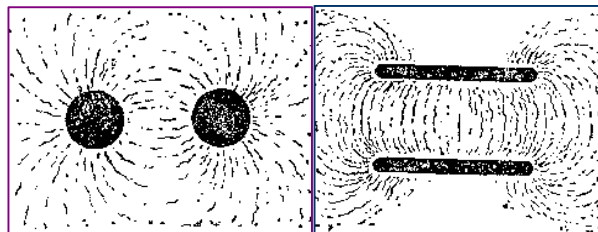


Рис. 17. Картинки электростатических полей разноимённо заряженных тел.

10⁰. **Однородное поле** – это поле между двумя «бесконечными» параллельными пластинами с равными и противоположными по знаку зарядами $+q$; $-q$. Их силовые линии – перпендикулярные заряженным пластинам прямые, густота которых всюду одна и та же, *рис. 18*.

В каждой точке этого поля на заряд действует постоянная сила $F=qE$, подобно тому, как Земля действует с постоянной силой $F=mg$ на камень вблизи её поверхности.

Поле, напряжённость которого во всех точках имеет одну и ту же величину и направление ($E=const$), называется однородным.

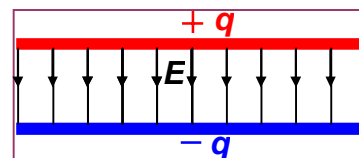


Рис. 18. Однородное электрическое поле

Однако реальные пластины, конечно, всегда имеют конечные размеры. Поэтому кристаллики гипса между реальными заряженными пластинами располагаются вдоль параллельных линий, перпендикулярных плоскостям, но на краях плоскостей эта параллельность заметно нарушается: кристаллики гипса расположены здесь по кривым линиям, *рис. 17, справа*.

На *рис. 19* графически изображены картины двух однородных полей различной напряжённости между разноимённо заряженными близко расположенными пластинками конечных размеров. Эти поля неоднородны лишь на краях пластин. Посмотрев на эти рисунки, по густоте линий легко решить, какое из них имеет большую напряжённость.

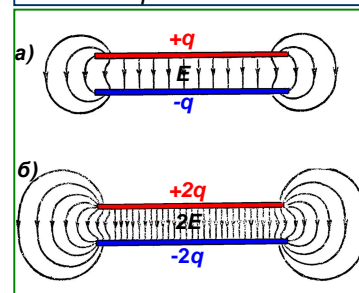


Рис. 19. Изображение полей разной напряжённости.

Однородное поле представляет собой простейший, но очень важный вид электрического поля, часто встречающийся в практике.



Вопросы

1. В чем состоит отличие теории близкодействия от теории действия на расстоянии?
2. Каковы основные свойства электростатического поля – поля, создаваемого неподвижными зарядами?
3. Что называется напряженностью электрического поля?
4. Чему равна напряженность поля точечного заряда Q?
5. Как направлена напряженность поля заряда Q, если $Q>0$? Если $Q<0$?
6. Как формулируется принцип суперпозиции полей?
7. Расскажите о графическом способе изображения электростатических полей. Что такое силовая линия поля? Какие свойства силовых линий вы знаете?
8. Как по графическому изображению силовых линий судить о величине напряжённости поля?
9. Можно ли «увидеть» силовые линии электростатического поля?
10. Что такое однородное поле? Его основные свойства и графические изображения.

§ 28а. РАБОТА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ. ПОТЕНЦИАЛ И РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

1⁰. Работа при перемещении заряда в электростатическом поле. На заряд, находящийся в электрическом поле, действует сила. Поэтому при перемещении заряда в поле совершается работа. Рассчитаем эту работу.

Рассмотрим перемещение заряда в однородном поле $E = \text{const}$, образованном двумя параллельными пластинами A и B , заряженными противоположными зарядами и расположенными на расстоянии d (рис. 20, 1). В таком поле силовые линии перпендикулярны пластинам, и если пластина A заряжена положительно, то напряжённость поля E направлена от A к B . Сила F , действующая на положительный заряд q , в поле равна $F = qE$.

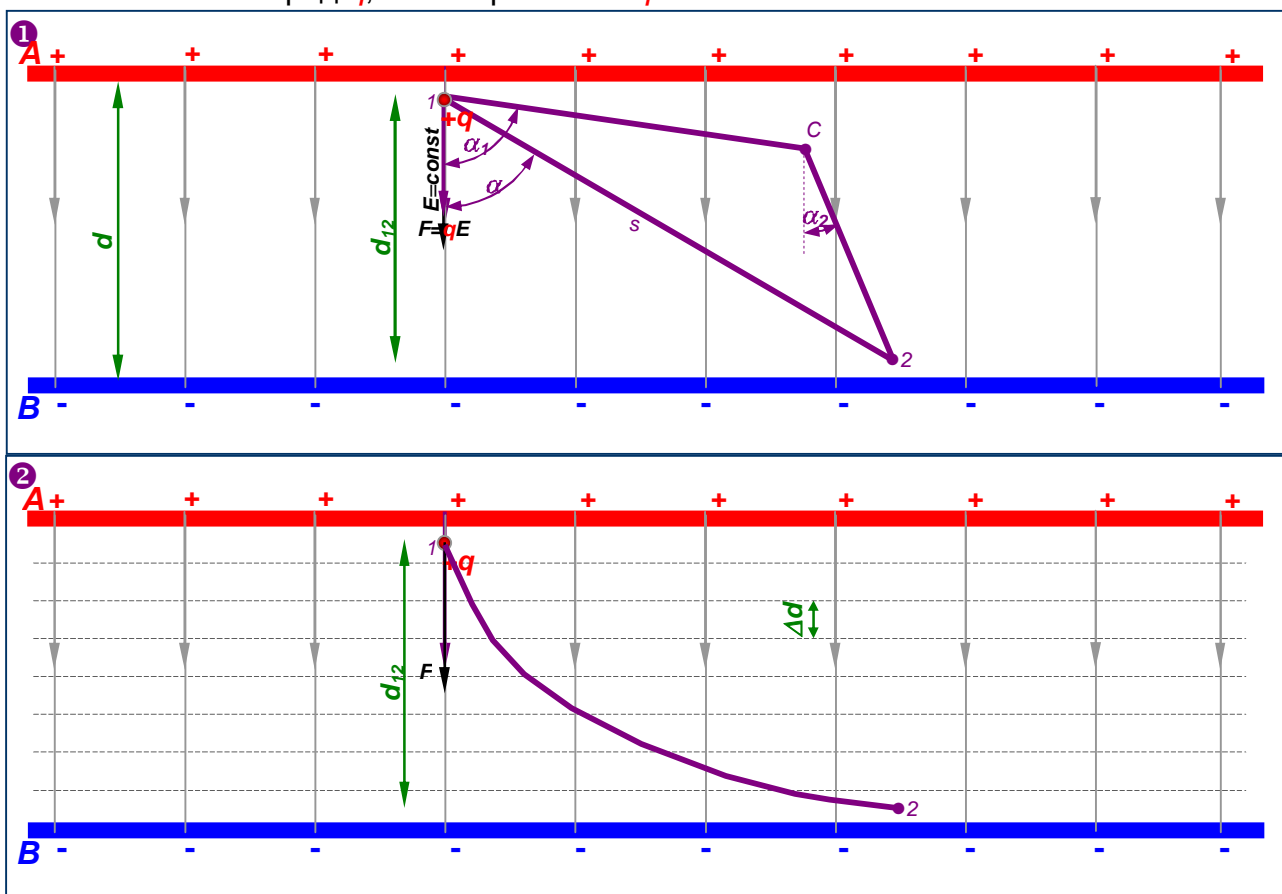


Рис. 20. К расчёту работы сил электрического поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2. Величина работы определяется положением точек 1 и 2, но не зависит от формы пути.

Допустим, что положительный заряд q перемещается из точки 1 в точку 2 по прямолинейному пути s под углом α к силе F , действующей со стороны поля. Работа поля при этом перемещении определится равенством:

$$A_{12} = F s \cos \alpha = q E s \cos \alpha.$$

Замечая, что $s \cdot \cos \alpha = d_{12}$ (здесь d_{12} – расстояние между точками 1 и 2 по направлению поля E), перепишем последнее равенство так:

$$A_{12} = q E d_{12}.$$

Обратите внимание, что при перемещении перпендикулярно силовым линиям $\alpha = 0$ работа не совершается.

Теперь переместим заряд q из 1 в 2 по пути $1 \rightarrow C \rightarrow 2$. Работа поля, совершённая на этом пути, будет равна сумме работ, совершённых на отдельных прямолинейных участках s_1 и s_2 :

$$A_{12} = q E s_1 \cos \alpha_1 + q E s_2 \cos \alpha_2 = q E (s_1 \cos \alpha_1 + s_2 \cos \alpha_2).$$

Но из *рис. 20, 1* видно, что $(s_1 \cos\alpha_1 + s_2 \cos\alpha_2) = d_{12}$, следовательно, и в этом случае $A_{12} = qEd_{12}$.

Наконец, представим себе, что заряд q перемещается из 1 в 2 по какой-либо кривой линии (*рис. 20, 2*). Чтобы подсчитать работу, совершённую полем E на этом криволинейном пути, расслоим поле между пластинами A и B рядом параллельных плоскостей, настолько близких друг к другу, чтобы отдельные отрезки пути между этими плоскостями можно было считать прямыми.

Тогда работа, произведённая на каждом из этих отрезков пути, будет равна $\Delta A = qE\Delta d$, где Δd – расстояние между двумя соседними плоскостями. Полная же работа на пути $1 \rightarrow 2$ будет равна произведению $qE = F$ на сумму расстояний $\Sigma \Delta d$, равную d_{12} . Следовательно, и в случае криволинейного пути совершённая работа поля будет равна

$$A_{12} = \Sigma \Delta A = qEd_{12}.$$

Итак, работа при перемещении заряда из одной точки электростатического поля в другую не зависит от формы пути, а зависит только от положения этих точек в поле.

Если точки 1 и 2 выбрать на поверхности пластин A и B , расположенных на расстоянии d , то работа перемещения заряда с одной пластины на другую равна:

$$A = qEd \quad [5]$$

Очевидно, чтобы вернуть заряд из точки 2 в точку 1 , необходимо приложить внешнюю силу, направленную противоположно, и совершить такую же работу по величине, но противоположного знака $A^* = -A$ (A^* – работа внешней силы).

В частности, если перемещение происходит по замкнутой траектории, а начальная и конечная точки совпадают (например, $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$), работа будет равна нулю: $A^* + (-A) = 0$.

Можно доказать, что рассмотренным важным свойством обладает не только однородное, но и любое электростатическое поле.

Сила, работа которой не зависит от формы траектории тела, на которое она действует при совершении работы, а зависит только от начального и конечного положения тела, называется консервативной.

Соответствующие силовые поля в физике называются **потенциальными** (или **консервативными**) полями.

К таким силам (полям) относятся электростатические и гравитационные силы (поля). Силы трения не относятся к консервативным силам.

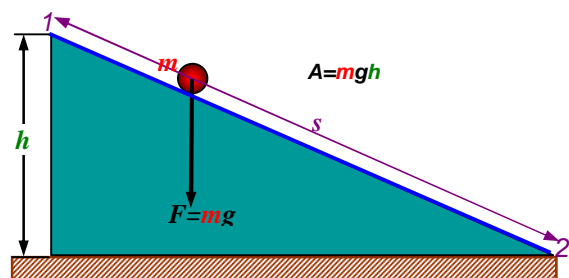
2⁰. Вспомним, что происходило с телом (материальной точкой) при перемещении его в гравитационном поле вблизи поверхности Земли, где оно является однородным: как в этом случае работа связана с изменением потенциальной энергии.

Из курса 7 класса вы знаете, что если потенциальная энергия E_n тела (материальной точкой) массой m в гравитационном поле у поверхности Земли принята равной нулю ($E_{n2} = 0$), то на высоте h она будет равна $E_{n1} = mgh$.

При отсутствии трения работа, совершаемая силой тяжести $F = mg$, перемещающей тело массой m по наклонной плоскости $s = 1 \rightarrow 2$, равна работе, совершаемой при падении этого тела с той же высоты h , *рис. справа*. Она равна убыли потенциальной энергии:

$$A = Fh = mgh = -(E_{n2} - E_{n1}) = -\Delta E_n.$$

Иными словами, работа, совершённая гравитационным полем при перемещении тела массой m с высоты h до поверхности



К вопросу о связи работы A и изменения потенциальной энергии ΔE при перемещении тела в гравитационном поле

Земли, не зависит от формы траектории и равна $A=mgh$. Для возвращения тела с уровня земли на высоту h потребуется затратить точно такую же работу, т. е. совершить работу $A^*=-A$ (A^* – работа внешней силы, направленной против силы тяжести):

$$A^* = -A = -mgh.$$

Таким образом, работа, совершённая силой поля, уменьшает, а работа внешней силой против силы тяжести увеличивает потенциальную энергию тела.

С зарядом в электростатическом поле всё происходит аналогичным образом.

3⁰. **Потенциальная энергия электростатического поля W_n** ³. Работа A электростатической силы поля при перемещении заряда из точки 1 в точку 2, выбранных на поверхностях пластин **A** и **B** равна убыли потенциальной энергии:

$$A = - (W_{n2} - W_{n1}) = -\Delta W_n = qEd$$

Если принять, что на пластине **B** (см. рис. 20) потенциальная энергия равна нулю ($W_{n2}=0$), то для **потенциальной энергии заряда в однородном электростатическом поле** на уровне пластины **A** (на «высоте» d) получим выражение:

$$W_n = qEd, \quad [6]$$

Формула [6] подобна формуле $E_n = mgh$ для потенциальной энергии тела в однородном гравитационном поле на высоте h . Но заряд q , в отличие от массы m , может быть как положительным, так и отрицательным.

Если поле совершает положительную работу, то потенциальная энергия заряженного тела в поле уменьшается: $\Delta W_n < 0$. Это движение подобно движению камня, падающего вниз. И наоборот, если эта работа отрицательна (например, при движении положительно заряженной частицы в направлении, противоположном направлению вектора напряженности поля **E**), то $\Delta W_n > 0$. Это движение подобно движению камня, брошенного вверх.

На *замкнутой* траектории, когда заряд возвращается в начальную точку (например, $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$), изменение потенциальной энергии и работа равны нулю:

$$A_{11} = -\Delta W_n = -(W_{n1} - W_{n1}) = 0.$$

Таким образом, **заряженные частицы в электростатическом поле обладают потенциальной энергией. При перемещении заряда из одной точки поля в другую совершается работа, не зависящая от формы траектории. Эта работа равна изменению потенциальной энергии, взятой со знаком «-». При перемещении заряда по замкнутой траектории и возвращении его в ту же точку, работа и изменение потенциальной энергии равны нулю.**

4⁰. **Потенциал поля φ** . Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле W_n пропорциональна заряду q . Это справедливо как для однородного поля (см. формулу [5]), так и для неоднородного. Следовательно, отношение потенциальной энергии к заряду (W_n / q) не зависит от величины помещенного в поле заряда, что позволяет ввести новую, часто более удобную количественную характеристику поля, не зависящую от заряда, помещенного в поле, - **потенциал**:

$$\varphi = W_n / q \quad [7]$$

Потенциал φ - скаляр, определяет потенциальную энергию заряда q в данной точке поля: $W_n = q\varphi$. Выбор точки отсчёта потенциала (как и потенциальной энергии) диктуется удобством решения каждой конкретной задачи.

В соответствии с [7], **потенциалом точки электростатического поля называется отношение потенциальной энергии заряда, помещенного в данную точку, к этому заряду. Потенциал – скалярная величина. Он является энергетической характеристикой поля.**

³ При рассмотрении электрических явлений для обозначения энергии будет использоваться буква **W**. В частности потенциальная энергия электростатического поля будет обозначаться так: W_n .

Если в рассмотренном примере **однородного** поля, создаваемого двумя заряженными пластинами, в качестве точки с нулевым потенциалом выбрать точку **2** на отрицательно заряженной пластине **B** (см. рис. 20), то согласно формулам [6] и [7] потенциал на положительно заряженной пластине **A** равен:

$$\varphi = W_{\Gamma}/q = Ed. \quad [7]^*$$

Аналогичным образом вводится потенциал гравитационного поля вблизи поверхности Земли

$$\varphi = E_{\Gamma}/m = gh$$

Для одного или системы точечных зарядов за нулевое значение потенциала (и потенциальной энергии) обычно принимается значение этой величины в бесконечно удалённой точке поля (при $r \rightarrow \infty$), *рис. 21*.

5⁰. **Разность потенциалов (напряжение)** $U = (\varphi_1 - \varphi_2)$. Нетрудно понять, что *изменение* потенциала не зависит от выбора нулевого уровня отсчета потенциала, *рис. 21*.

Так как потенциальная энергия $W_{\Gamma} = q\varphi$, то работа сил поля равна:

$$A = -(W_{\Gamma 2} - W_{\Gamma 1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad [8]$$

Здесь

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi \quad [9]$$

представляет собой разность значений потенциала φ в начальной **1** и конечной **2** точке траектории (*убыль потенциала*). Разность потенциалов называют также **напряжением**. Последний термин наиболее часто используется на практике.

Согласно формулам [8] и [9] разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = A/q \quad [9]^*$$

Напряжение между двумя точками поля равно работе поля при перемещении единичного положительного заряда из начальной точки в конечную точку.

Как видно из [9] и *рис. 21*, если за нулевой уровень отсчета потенциала принять потенциал бесконечно удаленной точки поля, то потенциал в данной точке равен работе электростатических сил по перемещению единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

Итак, **потенциал – энергетическая характеристика электростатического поля. Потенциал данной точки поля равен отношению потенциальной энергии заряда, помещенного в эту точку в поле, к заряду. Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками численно равна работе сил поля по перемещению единичного заряда между этими точками.**

6⁰. **Единица разности потенциалов.** Единицу разности потенциалов устанавливают с помощью формулы [9]*. В Международной системе единиц работу выражают в джоулях, а заряд – в кулонах. Поэтому разность потенциалов между двумя точками численно равна единице, если при перемещении заряда в 1 Кл из одной точки в другую электрическое поле совершает работу в 1 Дж. Эту единицу называют **вольт** (В); $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}$.

7⁰. **Связь между напряжённостью электростатического поля и разностью потенциалов.** Каждой точке электрического поля соответствуют определенные значения потенциала φ и напряженности E . Найдем связь между этими величинами.

Пусть заряд q перемещается в направлении вектора напряженности однородного электрического поля E из точки **1** в точку **2**, находящуюся на расстоянии Δd от точки **1**, *рис. 22*. При этом электрическое поле совершает работу:

$$A = qE\Delta d.$$

Эту работу согласно формуле [8]* можно выразить через разность потенциалов в точках **1** и **2**:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad [8]$$

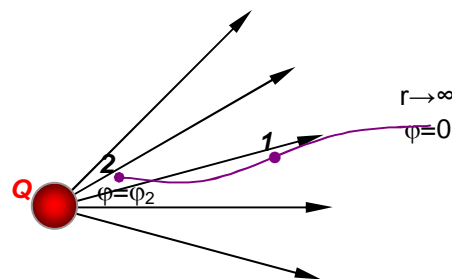


Рис. 21. К понятию разности потенциалов $U = \varphi_1 - \varphi_2$

Приравнивая последние два выражения для работы, найдем модуль вектора напряженности поля:

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta d} = \frac{U}{\Delta d}. \quad [10]$$

В этой формуле $U = (\varphi_1 - \varphi_2) = -\Delta\varphi$ – разность потенциалов (убыль потенциала) между точками 1 и 2, которые связаны вектором перемещения Δd , совпадающим по направлению с вектором напряженности E (см. рис. 22).

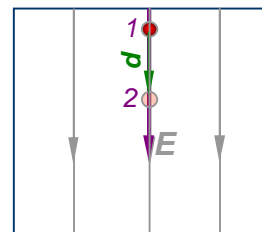


Рис. 22. Направления векторов перемещения Δd и напряжённости E совпадают

Модуль напряженности электростатического поля численно равен разности потенциалов между двумя близкими точками в этом поле, деленной на расстояние между этими точками.

Формула [10] показывает: чем меньше меняется потенциал φ на расстоянии Δd , тем меньше напряженность электростатического поля E . Если потенциал не меняется совсем, то напряженность поля равна нулю.

Так как при перемещении положительного заряда q в направлении вектора напряженности E , поле совершает положительную работу $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$, то потенциал φ_1 больше потенциала φ_2 . Следовательно:

напряженность электростатического поля направлена в сторону убывания потенциала.

Любое электростатическое поле в достаточно малой области пространства можно считать однородным. Поэтому формула [10] справедлива для произвольного электростатического поля, если только расстояние Δd настолько мало, что изменением напряженности поля на этом расстоянии можно пренебречь.

8°. **Единица напряженности электрического поля.** Единицу напряженности электрического поля устанавливают, используя формулу [10]. Напряженность электрического поля в СИ численно равна единице, если разность потенциалов между двумя точками на расстоянии 1 м в однородном поле равна 1 В. Наименование этой единицы – **вольт на метр** (В/м).

Напряженность можно также выразить в ньютонах на кулон. Действительно, $1 \text{ В/м} = 1 \text{ Дж/Кл} \cdot 1/\text{м} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м/Кл} \cdot 1/\text{м} = 1 \text{ Н/Кл}$.

9°. **Эквипотенциальные поверхности.** При перемещении заряда под углом 90° к силовым линиям электрическое поле не совершает работы, так как сила перпендикулярна перемещению. Значит, если провести поверхность, перпендикулярную в каждой ее точке силовым линиям, то при перемещении заряда вдоль этой поверхности работа не совершается. А это означает, что все точки поверхности, перпендикулярной силовым линиям, имеют один и тот же потенциал.

Поверхности равного потенциала называются эквипотенциальными.

Эквипотенциальные поверхности однородного поля представляют собой плоскости (рис. 23, а), а поля точечного заряда – концентрические сферы (рис. 23, б).

Подобно силовым линиям, эквипотенциальные поверхности качественно характеризуют распределение поля в пространстве. Из рис. 23 видно, что **вектор напряженности E ортогонален эквипотенциальным поверхностям и направлен в сторону уменьшения потенциала φ .**

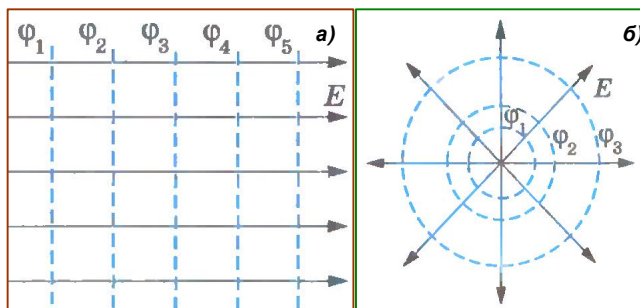


Рис. 23. Сплошные линии изображают силовые линии, а пунктирные – сечения эквипотенциальных поверхностей однородного (1) и центрального (2) электростатических полей. $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3 > \dots$

Эквипотенциальные поверхности строятся обычно так, что разность потенциалов между двумя соседними поверхностями постоянна. Поэтому согласно формуле [10] расстояния между соседними эквипотенциальными поверхностями увеличиваются по мере удаления от точечного заряда, так как напряженность поля уменьшается.

Эквипотенциальные поверхности однородного поля расположены на равных расстояниях друг от друга.



Вопросы

1. От чего зависит работа при перемещении заряда из одной точки электростатического поля в другую?
2. Чему равна работа при перемещении заряда из одной точки однородного электростатического поля в другую?
3. Какие силы и силовые поля называются потенциальными?
4. Чему равна потенциальная энергия заряженной частицы в однородном электрическом поле?
5. Что такое потенциал электростатического поля? Как связан потенциал с потенциальной энергией? Что он характеризует?
6. Что такое напряжение? В каких единицах измеряется напряжение?
7. Какова связь между напряжённостью электростатического поля и разностью потенциалов?
8. Что такое эквипотенциальные поверхности? Что они характеризуют? Как они выглядят в случаях однородного и центрального электростатического полей?

§ 29. ДЕЛИМОСТЬ И МИНИМАЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

1⁰. Для объяснения тепловых явлений мы успешно пользовались молекулярно-кинетической теорией (МКТ) строения вещества, в основе которой лежит идея *атомизма* – существования минимальных частиц вещества (см. §8 Пособия 7 кл.). А может быть подобная идея полезна и при изучении электрических явлений? Как объяснить явление электризации? Почему на двух соприкасающихся телах возникают заряды обязательно противоположного знака? Может быть, в природе есть частицы, имеющие *элементарный* электрический заряд – «*атом*» *электричества*, который уже невозможно разделить? Если это так, то заряд тела можно делить на части, пока не будет обнаружен предел деления – *элементарная* заряженная частица.

2⁰. Физики неоднократно пытались проверить это опытным путём, подобно тому, как это делал Кулон (см. § 27а). Попробуем и мы сделать такой опыт.

Зарядим металлический шар, прикрепленный к стержню электроскопа, сообщив ему заряд q (рис. 24,а). Соединим этот шар металлическим проводником А, держа его за ручку В, сделанную из диэлектрика, с другим точно таким же, но незаряженным электроскопом. Половина заряда $q/2$ перейдет с первого



Рис. 24. К вопросу о делении заряда q . Соединяя два одинаковых электроскопа, один из которых имеет заряд q , разделим его пополам $q/2 + q/2$. Разрядив второй электроскоп и повторяя подобное деление заряда $q/2$, оставшегося на первом, получим $q/4 + q/4$ на каждом из электроскопов. Продолжая, будем получать: $q/8 + q/8$; $q/16 + q/16$, и т. д.

электроскопа на второй (рис. 24, б). Таким образом, первоначальный заряд q разделится на две равные части $q/2+q/2$.

Теперь разъединим шары и коснемся второго шара рукой. От этого электроскоп потеряет заряд - разрядится. Присоединим его снова к первому электроскопу, на котором осталась половина первоначального заряда $q/2$. Оставшийся заряд снова разделится на две равные части, и на первом электроскопе останется четвертая часть первоначального заряда.

Таким же образом можно получить одну восьмую, одну шестнадцатую часть первоначального заряда и т. д. Но скоро мы убедимся, что оставшийся на шаре заряд станет таким малым, что обнаружить его обычным электроскопом не удастся.

Вывод: если существует «атом» электричества, он является очень малой величиной и для его обнаружения необходимы более сложные и точные опыты.

3⁰. Эксперименты, доказывающие существование «атома» электрического заряда были выполнены почти одновременно и независимо друг от друга американским и советским физиками – Милликеном и Иоффе.

Они понимали, что необходимо исследовать заряды, в миллиарды раз меньшие тех, которые получались в описанном опыте. Схемы их опытов представлены на



А. Ф. Иоффе
(1880-1960)



Р. Э. Милликен
(1868-1953)

рис. 25. Идея состояла в том, чтобы уравновесить вес $F_T=mg$ заряженной частицы (масляной капли, цинковой пылинки) электрическим полем E , действующим на исследуемую заряженную частицу с электрической силой $F_{эл}=qE$. Равновесие достигалось изменением заряда частицы с помощью излучения (ультрафиолетового или рентгеновского). Заряд частицы меняли и вычисляли его. Так поступали много раз. При этом заряд оказывался каждый раз другим. Но все его изменения были **в целое число раз** (т. е. в 2, 3, 4 и т. д.) больше некоторого определенного наименьшего заряда. Этот результат можно объяснить только так, что к частице присоединяется или от нее отделяется только наименьший заряд (или целое число таких зарядов). Этот заряд дальше уже не делится. Частицу, имеющую самый маленький заряд, называли **электроном**.

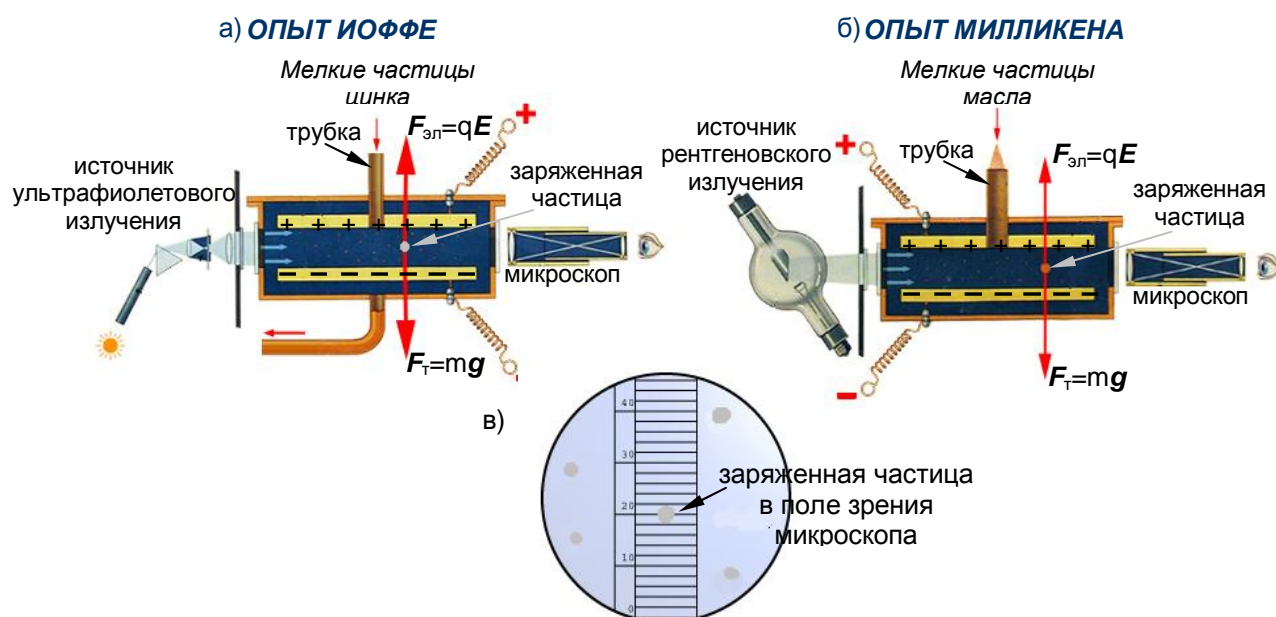


Рис. 25. Определение заряда электрона Иоффе и Милликеном. Исследуемая заряженная частица (цинковая пылинка или капля масла) помещалась в камеру, где можно было создавать электрическое поле между двумя плоскими пластинами. Изменяя его, уравнивали вес частицы и действующую электрическую силу.

4⁰. Масса электрона равна $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Эта масса примерно в 1840 раз меньше массы молекулы водорода, которая является наименьшей из всех молекул.

Электрический заряд электрона – отрицательный. Он является неотъемлемым свойством электрона. Он не делим и равен $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Электрон был открыт английским учёным Джозефом Джоном Томсоном в 1897г.

Такой же, но положительный заряд, как вам известно, имеет протон. Электрон и протон – это не просто элементарные частицы; это «атомы» электричества.



Вопросы

1. Как на опыте показать, что электрический заряд делится на части?
2. Можно ли электрический заряд делить бесконечно? Имеет ли электрический заряд предел делимости?
3. Расскажите об экспериментах Иоффе и Милликена. Почему они исследовали электрические заряды очень малой величины? Как они это делали?
4. Как назвали частицу с самым малым зарядом? Что вы знаете о заряде и массе электрона?
5. Кем и когда был открыт электрон?

§ 30. ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА И СТРОЕНИЕ АТОМА

1⁰. Опыты Иоффе и Милликена и ряд других опытов доказали существование электрона - частицы, имеющей наименьший электрический заряд. Откуда берутся электроны?

Можно предположить, что электроны есть во всех телах, так как все тела можно наэлектризовать. Мы знаем, что все тела состоят из молекул, а молекулы – из атомов. Значит, решили физики, – электроны следует «искать» в атомах.

В начале нашего столетия опыт по исследованию состава и строения атома был поставлен английским физиком Резерфордом. Идея опыта состояла в следующем. Через тонкую пластину металла пропускались очень маленькие, сравнимые по размерам с атомом частицы, обладающие электрическим зарядом и летящие с большой скоростью. По тому, как пролетают эти частицы-«снаряды» через атомы металла, можно узнать, есть ли в атоме другие заряженные частицы или нет.

К тому времени, когда были поставлены эти опыты, нужные «снаряды» уже имелись в распоряжении ученых. Оказалось, что в природе есть такие вещества (уран, радий и др.), из атомов которых непрерывно вылетают маленькие, имеющие положительный заряд, частицы. Называют их альфа-частицами и обозначают буквой α (α - первая буква греческого алфавита, читается она так: «альфа»). Они имеют громадную скорость – около 15000 км/с. Эти маленькие снаряды, предоставленные самой природой, и были использованы Резерфордом для опыта.

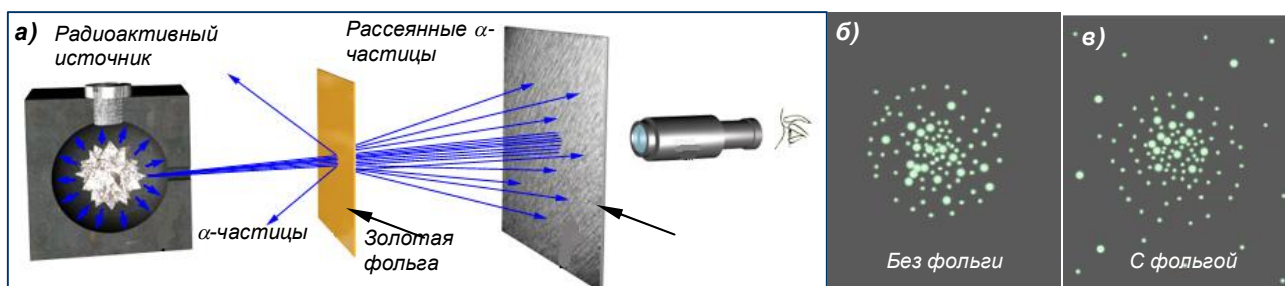


Рис. 26. Схема опыта Резерфорда. а) Схема установки. Фотографии люминесцирующего экрана в потоке α -частиц при отсутствии золотой фольги б) и при её внесении в поток в). Каждая вспышка вызывается ударом α -частицы об экран.

2⁰. Рассмотрим этот опыт (рис. 26).

В свинцовую коробочку помещали вещество, испускающее α -частицы, которые через маленькое отверстие вылетали из неё тонким пучком. На их пути ставили тончайшую золотую пластинку (фольгу). Хотя эта пластинка была очень тонка (толщина ее 0,001 мм), но в ней по толщине укладывалось около 3300 слоев атомов золота.

Для обнаружения α -частиц, прошедших сквозь золотую пластину, пользовались люминесцентным экраном, на котором при ударе каждой α -частицы возникала вспышка. Иначе α -частицу трудно обнаружить, ведь ее нельзя увидеть даже в микроскоп.

Как же пролетали сквозь золотую фольгу α -частицы?

Результаты опыта показали, что большинство α -частиц пролетали сквозь золотую фольгу так, как будто на их пути *ничего не было*. Часть α -частиц немного отклонялась от первоначального направления при прохождении сквозь пластинку. Совсем незначительная часть α -частиц отклонялась на большой угол, а некоторые частицы были даже отброшены почти назад, *рис. 27*.

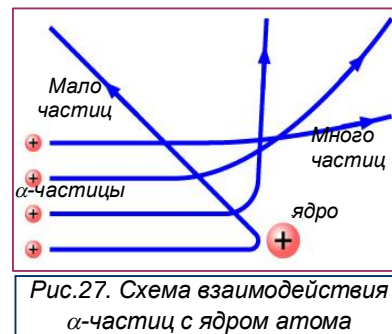


Рис.27. Схема взаимодействия α -частиц с ядром атома

3⁰. Результаты опыта были объяснены Резерфордом. Он предположил, что **в атоме есть пустоты, не заполненные частицами вещества (1)**, иначе большинство α -частиц не пролетело бы прямо сквозь пластинку.

Небольшое отклонение α -частиц было объяснено так: α -частицы прошли, очевидно, около каких-то **заряженных частиц (2)**, причем сравнительно далеко от них, так как притяжение или отталкивание было не очень сильным.

Другой, очень важный вывод был сделан на основании того, что некоторые α -частицы отбрасывались атомами золота назад. Причиной этого могло быть прямое взаимодействие α -частицы с другой частицей, имеющей тоже положительный заряд, но большую массу. Отсюда следовало, что **внутри атома есть частицы с положительным электрическим зарядом, масса которых больше массы α -частицы (3)**.

4⁰. А где же находятся электроны?

Резерфорд пришёл к выводу, что атом имеет сложное строение.

В центре атома находится заряженная положительным зарядом частица – ядро атома. Именно от ядра и отталкивались те немногие α -частицы, которые оказывались близко от него.

На большом расстоянии от ядра (по сравнению с его размерами) в атоме **находятся электроны**. Они притягиваются, но не приближаются вплотную к ядру, потому что **быстро движутся вокруг него**. Масса всех электронов составляет незначительную часть массы атома – сотые доли процента.

5⁰. Итак, по своему строению атом напоминает нашу Солнечную систему. Подобно тому, как планеты, притягиваясь к Солнцу, движутся вокруг него, так и электроны в атоме движутся вокруг ядра, удерживаемые силами притяжения к нему.

Расстояния между ядром и электронами очень велики по сравнению с размерами этих частиц. Если бы весь атом увеличился так, что ядро приняло размеры 1 см, то расстояние между ядром и электронами стало бы равно целому километру! Подсчитали, что если бы все электроны примкнули вплотную к ядрам, т. е. не было бы внутриатомных промежутков, то объем тела взрослого человека стал бы равным одной миллионной доле кубического миллиметра!

6⁰. **Ядро**, как уже было сказано, **имеет положительный заряд**. Этот заряд равен абсолютному значению заряда всех электронов, имеющих в атоме. Но заряд электронов отрицателен, поэтому весь атом в целом не имеет заряда, т. е.

нейтрален. Такое представление о строении атома, предложенное Резерфордом, назвали *ядерной моделью атома*. Позднее ей стали называть *планетарной моделью атома* за сходство с Солнечной системой.

Итак, **атом в основном состоит «из пустоты»: размер самого атома приблизительно в 100 000 раз больше размеров ядра, рис. 28!**

10⁰. Продолжая исследования атома, в 1913 г. Э. Резерфорд выдвинул гипотезу, что одной из частиц, входящих в ядро атома любого химического элемента должно быть **ядро атома водорода**, т.к. было известно, что массы атомов химических элементов превышают массу атома водорода в целое число раз.

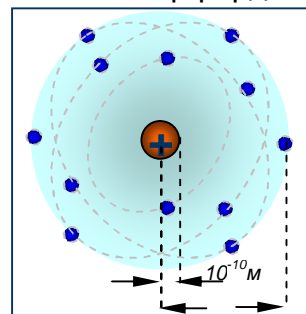


Рис. 28. Числа (но не схема!) показывают соотношение размеров ядра и электронного облака модели атома Резерфорда

Резерфорд поставил опыт по исследованию взаимодействия альфа-частиц с ядрами атома азота. В результате взаимодействия из ядра атома азота вылетела частица, которую Резерфорд назвал **протоном** и предположил, что это ядро атома водорода.

Позднее (с помощью камеры Вильсона) было доказано, что протон действительно является ядром атома водорода.

11⁰. В 1920 г. Резерфорд высказал предположение, что должна существовать частица массой, равной массе протона, но не имеющая электрического заряда. Однако, обнаружить такую частицу Резерфорду не удалось. Это удалось сделать его ученику – английскому ученому **Дж. Чедвику** в 1932 году. Такие частицы были названы **нейтронами**. При прохождении через вещество нейтроны не теряют энергию на ионизацию атомов вещества, поэтому имеют огромную проникающую способность. Масса нейтрона чуть больше массы протона (примерно на 2,5 массы электрона).

12⁰. В результате опытов Резерфорда и других учёных появилась так называемая **планетарная модель атома**, с которой вы познакомились ещё в Приложении к главе 1 Пособия 7 класса. Для дальнейшей работы нам необходимо вспомнить основные сведения о строении атома. Они сводятся к следующему.

1. Атомы разных элементов в обычном состоянии отличаются друг от друга числом электронов, движущихся вокруг ядра. Каждый атом состоит из ядра (1) и движущихся вокруг него электронов (2); ядро атома состоит из **протонов** (3) и **нейтронов** (4), рис. 29 (в качестве примера на этом рисунке изображена схема атома бериллия).

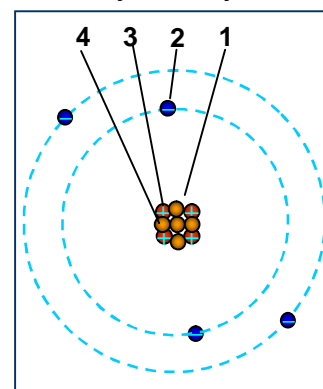


Рис. 29. Схема атома бериллия Be

В атоме водорода вокруг ядра движется один электрон, в атоме гелия – два электрона. Вокруг ядра атома кислорода движется 8 электронов, железа – 26, урана – 92 электрона.

2. **Протоны** и **электроны** взаимодействуют друг с другом. Протоны отталкиваются, и электроны тоже отталкиваются. Протоны же и электроны притягиваются друг к другу (рис. 30).

Взаимодействие между протонами и электронами называется **электрическим**, так как они имеют **электрические заряды**: **протоны - положительный**, а **электроны - отрицательный**.

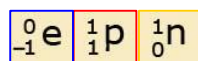
Заряд протона: $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряд электрона: $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.



Рис. 30. Элементарные заряженные частицы атомов

Нейтроны не имеют заряда: они электрически нейтральны. **Протоны** и **нейтроны** находятся в ядрах атома. Они называются **нуклонами**. Нуклоны сжаты в ядрах атомов огромными ядерными силами, действующими на очень малых расстояниях. Ядерные силы представляют собой сильное фундаментальное взаимодействие.

Используются специальные обозначения этих элементарных частиц. В обозначениях **электрона**, **протона** и **нейтрона** верхнее число означает атомную массу частицы, нижнее – её элементарный заряд:



3. В обычном состоянии атом в целом не имеет заряда, он нейтрален, потому что положительный заряд его ядра равен отрицательному заряду всех его электронов. Однако электроны могут иногда отрываться от атома или присоединяется к нейтральному атому. Тогда общий заряд электронов в атоме изменится.

Атом, потерявший один или несколько электронов, уже не является нейтральным, а будет иметь положительный заряд. Его называют тогда **положительным ионом**. Заряд этого иона будет тем больше, чем больше в атоме недостает электронов.

Атом, присоединивший дополнительный электрон (электроны), приобретает отрицательный заряд, становится **отрицательным ионом**.

Заряд же ядра изменить очень трудно. А если он изменится, то получится уже другой химический элемент.

Главной характеристикой каждого данного химического элемента является не число электронов, а заряд ядра.

4. Поскольку все вещества состоят из атомов, из сказанного следует, что если число протонов и электронов в частице вещества или в теле одинаковое, то частица или тело **электронейтральны**, т. е. не имеют электрического заряда.

Если в частице или теле число электронов больше, чем число протонов, то частица или тело обладает отрицательным электрическим зарядом.

Если же в частице или теле число электронов меньше числа протонов, то частица или тело имеет положительный заряд.

Этот вывод составляет основу **электронной теории**, которая позволяет объяснить многие электрические свойства тел.



Вопросы

1. С какой целью был поставлен опыт Резерфорда?
2. Откуда берутся α -частицы? Что вы о них знаете?
3. Опишите опыт Резерфорда. Каковы результаты опыта?
4. Как были открыты протон и нейтрон?
5. Чем отличаются друг от друга атомы различных химических элементов?
6. Какие элементарные частицы входят в состав атома? Как они взаимодействуют? Какие частицы входят в состав ядра? Как они называются? Как обозначаются электрон, протон, нейтрон?
7. Что является главной характеристикой данного химического элемента?
8. Как образуются положительные и отрицательные ионы?
9. В каких случаях частица или тело имеет отрицательный заряд, а в каких – отрицательный?



Упражнение

1. Альфа-частицы пролетают через пластинку из лития. Как объяснить, что часть альфа-частиц проходит почти не отклонившись; часть отклоняется немного, а некоторые отбрасываются назад?
2. В ядре атома углерода содержится 12 частиц. Вокруг ядра движутся 6 электронов. Сколько в ядре этого атома протонов и сколько нейтронов?
3. От атома гелия отделился один электрон. Как называется оставшаяся частица? Каков ее заряд?

§ 31. ОБЪЯСНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ТЕЛ

1⁰. Из ранее изложенного следует, что заряжая какое-либо тело, мы создаем на нем либо недостаток, либо избыток электронов по сравнению с их нормальным числом, при котором тело не заряжено. При этом электроны заимствуются у другого тела или удаляются из тела, но отнюдь не уничтожаются и не создаются вновь. Таким образом, **явление зарядки и разрядки тел сводится к перераспределению электронов без изменения общего числа их.**

2⁰. **Электризация трением.** Основной причиной явления, которое мы называем «электризация трением», является то, что при тесном соприкосновении двух *различных* тел часть электронов переходит с одного тела на другое, *рис. 31, а*. В результате на поверхности первого тела оказывается положительный заряд (недостаток электронов), а на поверхности второго тела — отрицательный заряд (избыток электронов). Происходит это потому, что второе тело способно их «крепче удерживать». Смещение электронов при этом очень мало — порядка межатомных расстояний ($\sim 10^{-10}$ м). Поэтому возникший на границе двух тел так называемый двойной электрический слой ничем не проявляет себя во внешнем пространстве. Но если тела раздвинуть, то на каждом из них окажутся заряды противоположных знаков, *рис. 31, б*.

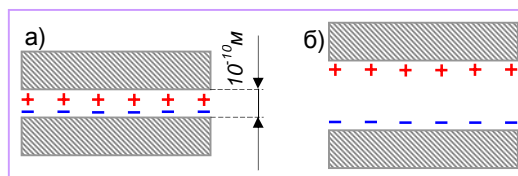
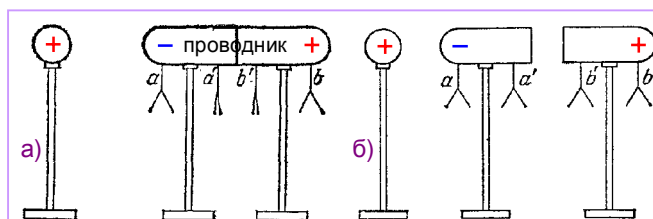


Рис. 31. а). Возникновение двойного электрического слоя при тесном соприкосновении двух различных тел. б). После раздвижения тел каждое из них оказывается заряженным.

«Тесное соприкосновение» двух тел предполагает такое сближение их, при котором расстояние между частицами их становится примерно таким же, как расстояние между атомами или молекулами одного и того же тела. Только при этом возможен «захват» одним телом электронов другого тела и возникновение двойного электрического слоя. Но тела не бывают идеально гладкими. Поэтому, даже когда два тела прижимают друг к другу, тесное соприкосновение их в указанном смысле имеет место только в отдельных небольших участках. Когда мы трем тела друг о друга, число таких участков увеличивается; увеличивается и общий заряд на каждом из тел, когда мы их раздвинем. Только в этом и заключается роль трения. «Электризация трением» — название, имеющее лишь историческое происхождение.

3⁰. **Электризация через влияние.** Подвесим на изолированном проводнике легкие листки бумаги. Если проводник не заряжен, листки не отклоняются. Приближая к проводнику изолированный металлический шар, заряженный, например, при помощи стеклянной палочки, увидим, что листки, подвешенные у концов тела, в точках *a* и *b*, разойдутся, хотя заряженный шар и не касается проводника, *рис. 32, а*.

Проводник зарядился через влияние, отчего и само явление получило название «электризация через влияние» или «электрическая индукция». Заряды, полученные посредством электрической индукции, называют **наведенными** или **индуцированными**. Листки в точках *a'* и *b'* у середины тела, не расходятся. Значит, индуцированные заряды возникают только на концах тела, а середина остается нейтральной, незаряженной.



*Рис. 32. а). С приближением заряженного шара листки *a* и *b* расходятся, указывая на появление зарядов в этих точках проводника. Листки *a'* и *b'* не расходятся, следовательно, заряда в этих точках нет. б). Листки в точках *a*, *a'*, *b*, *b'* остаются отклоненными и после удаления заряженного шара, указывая наличие зарядов на обоих телах.*

Поднося к листкам, подвешенным в точках *a* и *b*, наэлектризованную стеклянную палочку, легко убедиться, что листки в точке *b* от нее отталкиваются, а листки в точке *a* — притягиваются. Это значит, что на удаленном конце проводника возникает заряд того же знака, что и на шаре, а на

близлежащих частях возникают заряды другого знака. Удалив заряженный шар, мы увидим, что листки опустятся.

Явление протекает совершенно аналогичным образом, если повторить опыт, зарядив шар отрицательно (например, при помощи сургуча).

С точки зрения электронной теории эти явления легко объясняются существованием в проводнике электронного газа, *рис. 33*.

При поднесении к проводнику положительного заряда электроны к нему притягиваются и скапливаются на ближайшем конце проводника. Эта часть проводника заряжается отрицательно. На удаленном конце образуется недостаток электронов – избыток положительных ионов: здесь появляется положительный заряд, *рис. 32*.

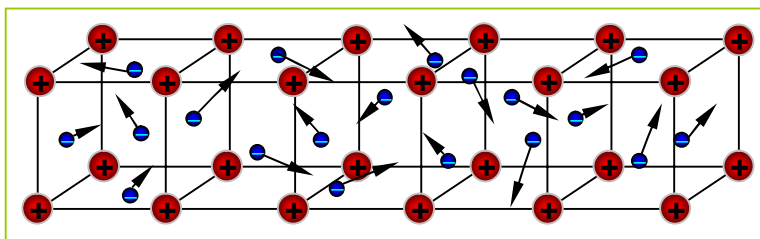


Рис. 33. Основу металлов составляют положительные ионы, расположенные в узлах кристаллической решётки. Их «оторванные» электроны свободны и образуют **электронный газ**.

При поднесении к проводнику отрицательно заряженного тела электроны накапливаются на удаленном конце, а на ближнем конце получается избыток положительных ионов. После удаления заряда, вызывающего перемещение электронов, они вновь распределяются по проводнику, так что все участки его оказываются по-прежнему незаряженными. Перемещение зарядов по проводнику и их накопление на концах его будут продолжаться до тех пор, пока воздействие избыточных зарядов, образовавшихся на концах проводника, не уравновесит те исходящие из шара электрические силы, под влиянием которых происходит перераспределение электронов. Отсутствие заряда у середины тела показывает, что здесь уравновешены силы, исходящие из шара, и силы, с которыми действуют на свободные электроны избыточные заряды, накопившиеся у концов проводника.

4⁰. Индуцированные заряды можно обособить на соответствующих частях проводника, если в присутствии заряженного тела разделить проводник на части, *рис. 32, б*. В этом случае сместившиеся электроны уже не могут вернуться обратно после удаления заряженного шара, так как между обеими частями проводника находится диэлектрик (воздух). Избыточные электроны распределяются по всей левой части; недостаток электронов в точке *b* частично пополняется из области точки *b'*, так что каждая часть проводника оказывается заряженной: левая — зарядом, по знаку противоположным заряду шара, правая — зарядом, одноименным с зарядом шара. Поэтому расходятся не только листки в точках *a* и *b*, но и оставшиеся прежде неподвижными листки в точках *a'* и *b'*, *рис. 32, б*.

Этим обстоятельством пользуются на практике для зарядки проводников. Чтобы зарядить электроскоп, можно приблизить к нему заряженную палочку сургуча (несущую отрицательный заряд) и коснуться стержня электроскопа пальцем. При этом некоторое число электронов под влиянием отталкивания от сургуча уйдет через наше тело в землю, а на стержне и на листках электроскопа образуется некоторый недостаток электронов. Если теперь, предварительно отняв палец, убрать сургучную палочку, электроскоп окажется заряженным и притом положительным зарядом, *рис. 34*.

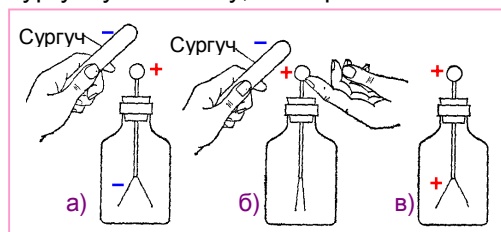


Рис. 34 Стадии зарядки через влияние: а) приближая к электроскопу отрицательно заряженный сургуч, мы вызываем на его электроскопа положительный, а на его листках — отрицательный заряд; б) не убирая сургуч с отрицательным зарядом, прикасаемся рукой к шару электроскопа и отводим часть отрицательного заряда электроскопа через свое тело в землю; листки электроскопа спадают; в) убрав палец, а затем и сургуч, мы оставляем лишь положительный заряд на шарике и листках электроскопа.

В этом опыте роль второй части проводника играет наше тело, соединенное с землей.

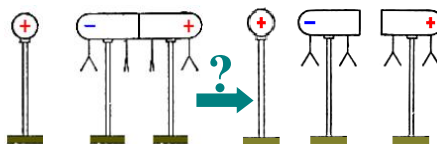
Пользуясь явлением индукции, можно определить знак заряда электроскопа. Приблизим к электроскопу тело с зарядом известного знака, например стеклянную палочку. Нетрудно сообразить, каков знак заряда электроскопа, наблюдая, увеличивается или уменьшается при этом отклонение листков.

5⁰. Если заряд *передают* от заряженного шара к незаряженному и размеры шаров одинаковы, то заряд разделится пополам (см. *рис. 24*). Но если второй, незаряженный шар больше, чем первый, то на него перейдет больше половины заряда. Чем больше тело, которому передают заряд, тем большая часть заряда на него перейдет. На этом основано так называемое *заземление* - передача заряда Земле. Земной шар очень велик по сравнению с телами, находящимися на нем. Поэтому при

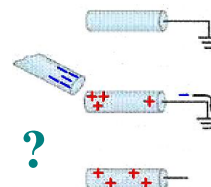
соприкосновении с землей заряженное тело отдает практически весь свой заряд и становится электрически нейтральным.



Вопросы



1. Объясните электризацию тел при соприкосновении.
2. Почему при электризации трением на телах появляются равные по абсолютному значению, но противоположные по знаку заряды?
3. Как передается нейтральному телу заряд с тела, наэлектризованного отрицательно? положительно?
4. От чего зависит заряд, переходящий на нейтральное тело при соприкосновении его с наэлектризованным телом?
5. Почему притягивается к заряженной палочке незаряженный шарик?
6. Почему при заземлении в Землю уходит с тела почти весь заряд?



Упражнение

1. Почему можно, держа в руке, наэлектризовать трением эбонитовую палочку и нельзя металлический стержень?
2. При наливании бензина корпус бензовоза обязательно соединяют с землей при помощи металлического проводника. Зачем это делают?
3. При соединении поврежденных проводов мастер надевает резиновые перчатки. Зачем он это делает?



§ 31, а. КОНДЕНСАТОРЫ – НАКАПИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1⁰. Вы знаете, что электрическое поле обладает энергией. Чтобы использовать энергию, нужно научиться накапливать ее. Это можно делать различными способами. Одно из устройств, предназначенных для этого, называется **конденсатором**⁴.

Вы могли видеть одно такое устройство в электрофорной машине, которая наверняка имеется в школьном кабинете физики. Там два конденсатора в виде круглых цилиндров. Их называют **лейденскими банками**, (рис.34, а, б). Это самые «древние» конденсаторы.

Свое название эти конденсаторы получили от голландского города Лейден, где они впервые были продемонстрированы в 1746 году. Вместе с такими устройствами, как маятниковые часы, барометр, термометр, лейденская банка долгое время являлась частью научной коллекции многих лабораторий и музеев.

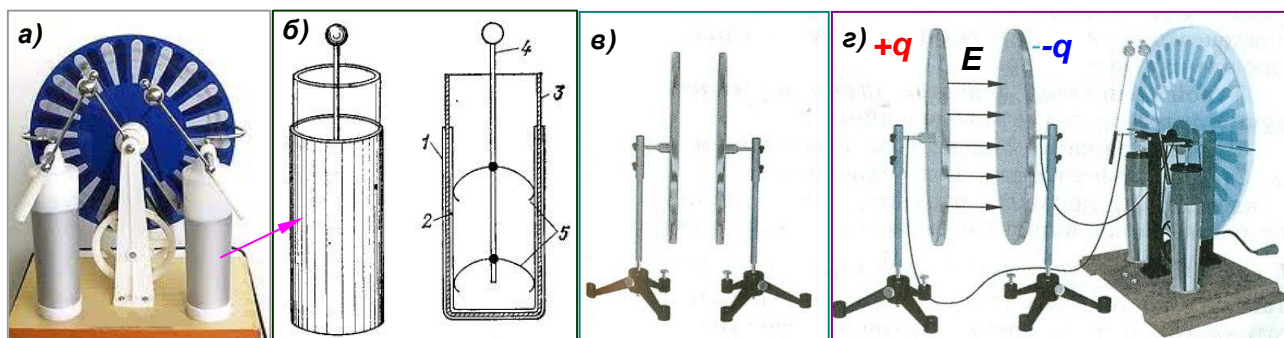


Рис. 34. Простейшие конденсаторы. а) общий вид электрофорной машины. б) Лейденская банка (конденсатор) и её устройство (справа): 1 и 2 — станиоловые обкладки, 3 — стеклянный стакан, 4 — металлический стержень, 5 — упругие металлические полоски для контакта. в) Простейший конденсатор — пластины, разделённые диэлектриком, (например, воздухом). з) После подключения его к электрофорной машине, между пластинами возникает электрическое поле E .

2°. На *рис. 34*, в изображен простейший конденсатор, представляющий собой систему двух пластин, разделенных диэлектриком (в данном случае – воздухом).

Конденсатор *заряжают*, сообщая его пластинам заряды, равные по величине, но противоположные по знаку. Зарядить конденсатор можно, присоединив его пластины к разноименным полюсам электрофорной машины (при вращении эта машина способна разделять положительные и отрицательные заряды), *рис. 34, а*.

Можно зарядить конденсатор и по-другому. Одну из пластин конденсатора следует подключить к полюсу машины, а вторую заземлить, т. е. соединить проводом с Землей.

Но самый простой способ – коснуться заряженным телом одной из пластин, а другую заземлить. При этом поле положительно заряженной пластины перераспределяет заряды во второй пластине. С Земли приходят свободные электроны и нейтрализуют положительный заряд.

3°. Ёмкость конденсатора.

Физическая величина, характеризующая способность конденсатора накапливать электрический заряд и энергию электрического поля называется *электроемкостью* (ёмкостью).

Получим формулу для ее определения, проделав опыт по *рис.35*.

С помощью шарика на изолирующей ручке будем передавать заряд пластинам конденсатора от электрофорной машины. Для измерения напряжения между пластинами конденсатора используем *электрометр* – прибор, состоящий из металлического корпуса, стержня с шаром и стрелкой (разновидность электроскопа; подробнее – см. Приложение 3 к этой главе). Стержень изолирован от корпуса специальной прокладкой. Одну пластину конденсатора соединим с корпусом, другую – со стержнем. При зарядке конденсатора между стержнем и корпусом электрометра возникает такое же напряжение (обозначим его буквой U), что и между его пластинами. О его величине можно судить по углу отклонения стрелки.



Рис. 35. Будем передавать заряд пластинам конденсатора от электрофорной машины, измеряя его величину

Будем заряжать конденсатор, передавая ему заряды q , $2q$, $3q$. Электрометр, подключённый к пластинам конденсатора, покажет, что напряжение между ними возрастает пропорционально заряду и имеет значения: U , $2U$, $3U$. Значит, отношение q/U будет в этих опытах оставаться **постоянным** (числитель и знаменатель изменяются в одно и то же число раз). Оно не зависит ни от заряда, ни от напряжения, а определяется свойствами самого конденсатора – геометрическими размерами пластин, их формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды.

Это отношение называется **электроемкостью** (или просто **ёмкостью**) конденсатора. Она обозначается буквой C :

$$C = q/U \quad [11],$$

где q – заряд конденсатора (одной из его пластин); и U – напряжение между пластинами.

Электроемкостью двух проводников называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними.

4°. Формула [11] позволяет ввести единицу электроемкости. Единица электроемкости (в честь великого физика М. Фарадея) - **фарад** (1 Ф):

$$[C] = 1 \text{ Кл} / 1\text{В} = 1 \text{ Ф}$$

Фарад – очень большая величина. Чаще используют более мелкие единицы:

$$1\text{мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}, \quad 1\text{нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}, \quad 1\text{пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}.$$

⁴ Название «конденсатор» происходит от латинского слова *condensare* — сгущать.

5⁰. Из формулы [11] можно сделать следующие выводы.

Во-первых, ёмкость конденсатора определяет зависимость между зарядом, сообщенным конденсатору, и напряжением, возникающим между его пластинами:

$$C = q/U \quad [11]$$

Во-вторых, если двум разным конденсаторам сообщить одинаковый заряд, то в зависимости от электроёмкости конденсаторов между их пластинами возникает разное напряжение:

$$U = q/C, \quad [11^*]$$

В-третьих, при одинаковом напряжении между пластинами заряд будет больше на пластинах того конденсатора, у которого ёмкость больше:

$$q = CU. \quad [11^{**}]$$

6⁰. Теперь выясним, *от чего зависит ёмкость конденсатора C*, проделав опыты по рис. 36.

1. Соединим одну пластину конденсатора с корпусом электрометра, а другую - с его стержнем и зарядим их (рис. 36, а).

Затем, не меняя заряда пластин, увеличим расстояние d между ними (рис. 36, б). Мы увидим, что напряжение U при этом увеличится.

Расстояние d между пластинами увеличилось. Напряжение U увеличилось. Заряд q не менялся. Значит, согласно формуле $C = q/U$, ёмкость C уменьшилась. Следовательно,

чем больше расстояние d между пластинами, тем меньше ёмкость C конденсатора.

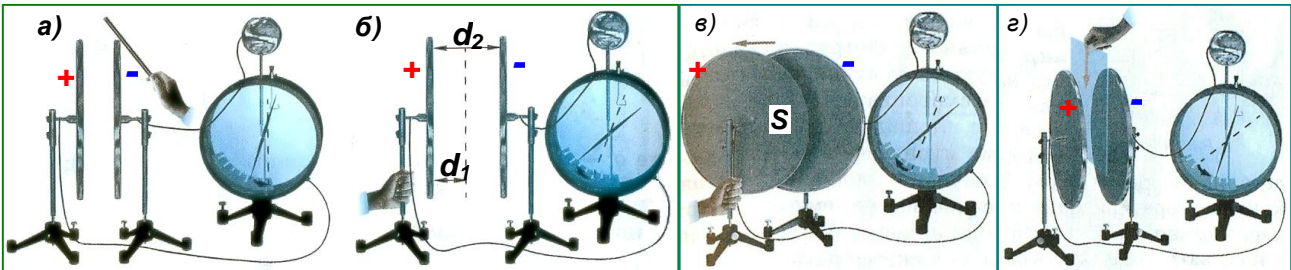


Рис.36. Исследование влияния расстояния d между пластинами конденсатора на его ёмкость с помощью электрометра: а) зарядка конденсатора; б) изменение расстояния между пластинами. в) Исследование влияния рабочей площади S пластин конденсатора на его ёмкость. г) Исследование влияния свойств диэлектрика ε на ёмкость конденсатора

2. Теперь сдвинем одну пластину относительно другой, оставляя заряд и расстояние между пластинами неизменными (рис. 36, в). При этом уменьшится площадь перекрытия пластин S . Одновременно мы заметим, что напряжение между пластинами увеличилось.

Площадь S уменьшилась. Напряжение U увеличилось. Согласно формуле $C = q/U$, ёмкость C уменьшилась. Следовательно:

чем меньше площадь пластин, тем меньше ёмкость конденсатора.

3. Снова поставим пластины друг против друга, расположив их на близком расстоянии.

Зарядим конденсатор и поместим в пространство между пластинами лист оргстекла (рис. 36, г). При этом электрометр регистрирует уменьшение напряжения. Дело в том, что оргстекло – диэлектрик, но свойства его отличаются от диэлектрических свойств воздуха. Эти свойства характеризуются специальным коэффициентом ε – *диэлектрической проницаемостью*, которая у оргстекла больше, чем у воздуха⁵.

Итак, диэлектрическая проницаемость ε увеличилась, а напряжение U уменьшилось. Заряд q конденсатора остался прежним. Поэтому можно утверждать, что ёмкость конденсатора $C = q/U$ увеличилась. Отсюда следует, что

с увеличением диэлектрической проницаемости среды ёмкость конденсатора увеличивается.

4. Из всех трех опытов следует общий вывод:

⁵ Более подробно о диэлектрической проницаемости см. Приложение 3 к этой главе.

ёмкость конденсатора C зависит от расстояния между пластинами d (толщины диэлектрика), площади пластин S и диэлектрической проницаемости среды ϵ между пластинами.

Расчёты, которые выходят за пределы нашего курса, показывают, что ёмкость плоского конденсатора выражается следующей формулой:

$$C = \epsilon S / 4\pi d \quad [12]$$

Здесь $\pi = 3,14$.

Обратите внимание на то, что в формулу входят величины, характеризующие **устройство конденсатора**: диэлектрическая проницаемость диэлектрика между пластинами ϵ , площадь пластин S , расстояние между ними d , и не входят заряд q и напряжение U .

7⁰. **Энергия конденсатора $W_{кон}$.** При зарядке конденсатор накапливает электрическую энергию $W_{кон}$. При его разрядке электрическое поле совершает работу, перемещая заряды по цепи.

Выясним, от каких физических величин зависит энергия конденсатора. Для этого подсчитаем работу, которую совершит поле конденсатора при его разрядке. При разрядке заряд q будет переходить с одной пластины на другую (рис.37). Работа же, совершаемая полем, может быть вычислена так:

$$A = qU_{ср},$$

где $U_{ср}$ - среднее значение напряжения.

Эта формула несколько отличается от формулы [8] для работы поля при перемещении заряда. Дело в том, что по мере разрядки конденсатора начальное напряжение U не остается постоянным. Оно непрерывно уменьшается до нуля. Поэтому для расчета необходимо воспользоваться средним значением напряжения, которое в данном случае оказывается равным $U_{ср} = U/2$. Тогда получим выражение для работы:

$$A = qU/2.$$

Но она (по закону сохранения энергии) должна быть равна (потенциальной) энергии, которой располагал конденсатор до его разрядки:

$$W_{кон} = A = qU/2 = CU^2/2. \quad [13]$$

Здесь учтено, что $q = CU$.

Анализируя формулу [13], можно прийти к выводу, что **энергия, запасенная в конденсаторе, тем больше, чем больше его ёмкость и, особенно, напряжение между пластинами.**

8⁰. По своей **конструкции** конденсаторы бывают разных типов (см. рис.38):

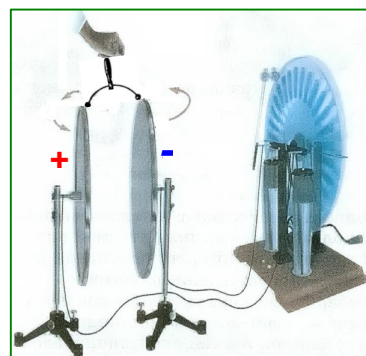


Рис.37. Разрядка конденсатора: электроны переходят на левую пластину



Рис. 38. Конденсаторы обычно различают по типу применяемого в них диэлектрика: бумажные (а, б), слюдяные (в), электролитические (г), керамические (д). Это конденсаторы постоянной (неизменной) ёмкости.

бумажные, слюдяные, электролитические, керамические и др. Как видно из названия конденсаторов, их тип определяется диэлектриком, расположенным между пластинами.

Устройство бумажного конденсатора показано на рис. 39,а. Внутри металлического корпуса находится рулон, состоящий из двух полос металлической

фольги, разделенных полосой бумаги, пропитанной парафином. Если такой рулон развернуть, то получится плоский конденсатор с большой площадью пластин.

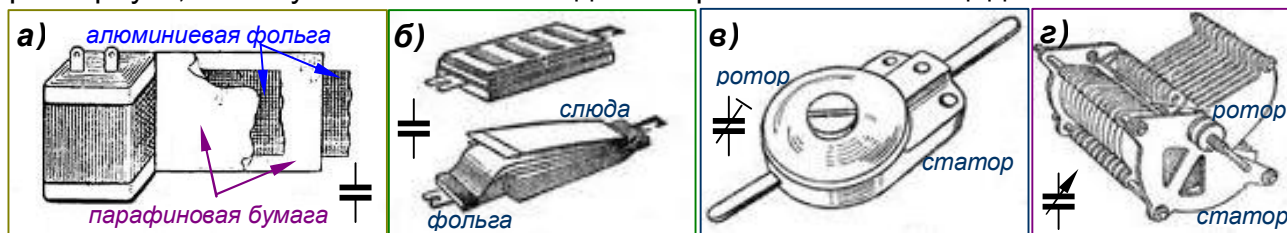


Рис. 39. Устройство некоторых конденсаторов и их обозначения на схемах. Внутри металлического корпуса в бумажном конденсаторе находится рулон из полос фольги и бумаги (а). Слюдяной конденсатор представляет собой «стопку» из листочков фольги и слюды (б). Полупеременный керамический конденсатор (статор и ротор – неподвижная и подвижная части конструкции) (в). Переменный конденсатор с воздушным диэлектриком – два блока алюминиевых пластин (г).

На том же рис. 39, б показано устройство слюдяного конденсатора.

Электролитические конденсаторы в качестве диэлектрика имеют очень тонкую оксидную плёнку. Они могут иметь очень большую ёмкость при малых размерах. Их недостатком является необходимость соблюдения полярности: если перепутать «+» и «-» при подключении, они выходят из строя. Поэтому на схемах они обозначаются с указанием полярности, рис. 38, г.

На корпусе конденсаторов указывают их ёмкость и предельное напряжение, на которое рассчитана их изоляция.

9⁰. Кроме конденсаторов постоянной ёмкости, используются конденсаторы, ёмкость которых можно изменять.

Для настройки аппаратуры используют конденсаторы, ёмкость которых регулируется с помощью отвёртки (рис. 39, в). Малогабаритные керамические конденсаторы представляют собой пластинку или цилиндр, на обе стороны которых нанесен тонкий проводящий слой.

Есть конденсаторы с переменной ёмкостью. У них ёмкость изменяется за счет изменения площади перекрытия пластин (рис. 39, г). Они применяются в радиоприёмной аппаратуре для настройки приёма различных передающих станций.

10⁰. Соединение конденсаторов.

Для получения больших ёмкостей конденсаторы соединяют **параллельно**, рис. 40, а. При этом конденсаторы соединяются одноименно заряженными обкладками, так что напряжение между обкладками всех конденсаторов одинаково. Общая ёмкость батареи параллельно соединённых конденсаторов равна сумме ёмкостей всех конденсаторов, входящих в батарею:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n; \text{ или } C = \sum_{i=1}^n C_i. \quad [14]$$

Если у всех параллельно соединённых конденсаторов расстояние между обкладками и свойства диэлектрика одинаковы, то эти конденсаторы можно представить как один большой конденсатор, разделённый на фрагменты меньшей площади.

При **последовательном** соединении конденсаторов, рис. 40, б, заряды всех конденсаторов одинаковы, так как от источника питания они поступают только на внешние электроды, а на внутренних электродах они получают только за счёт разделения зарядов, ранее нейтрализовавших друг друга. Общая ёмкость батареи последовательно соединённых конденсаторов равна

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}}; \text{ или } C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}} \quad [15]$$

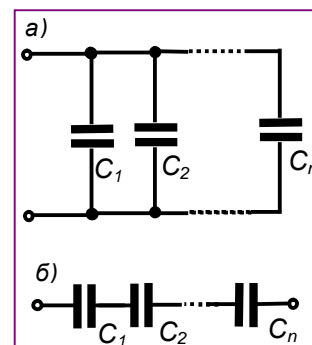


Рис. 40. Соединение конденсаторов:
а) параллельное;
б) последовательное

Эта ёмкость всегда меньше минимальной ёмкости конденсатора, входящего в батарею. Однако при последовательном соединении уменьшается возможность пробоя конденсаторов, так как на каждый конденсатор приходится лишь часть разницы потенциалов источника напряжения.

Если площадь обкладок всех конденсаторов, соединённых последовательно, одинакова, то эти конденсаторы можно представить в виде одного большого конденсатора, между обкладками которого находится стопка из пластин диэлектрика всех составляющих его конденсаторов.

11⁰. Конденсаторы используются во многих радиоэлектронных и электротехнических устройствах.

Рассмотрим принцип действия стробоскопа и лампы-вспышки (рис. 40, а, б), главной частью которых является конденсатор.

Фотограф от сети через выпрямитель заряжает батарею конденсаторов большой емкости, а затем в момент фотографирования разряжает эту батарею на мощную газоразрядную лампу (рис. 40, а).

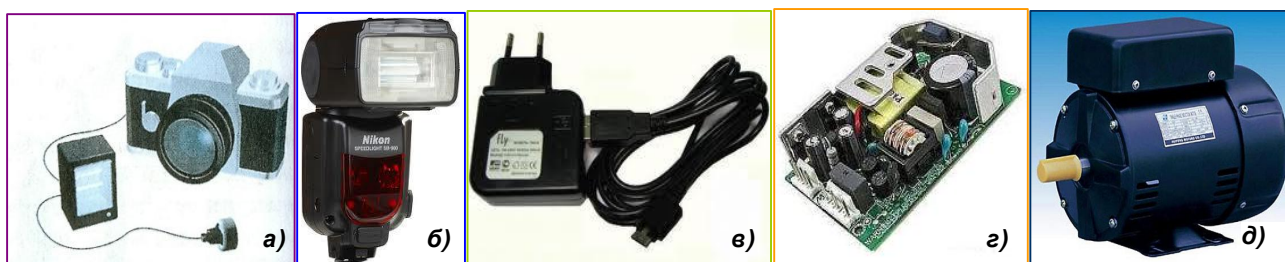


Рис. 40. Конденсаторы применяются очень широко: в фотовспышке (а, б), в любом зарядном устройстве (в), во всех электронных устройствах (г), в электродвигателях (д) и в огромном количестве других устройств

Стробоскоп (рис. 40, б) работает так же, как и лампа-вспышка. Только электронная схема после каждой разрядки подключает конденсатор на подзарядку. В результате вспышки света следуют непрерывно друг за другом через равные промежутки времени. Этот промежуток времени можно регулировать. Такой стробоскоп используют в научных лабораториях для исследования движений или во время проведения некоторых демонстраций.

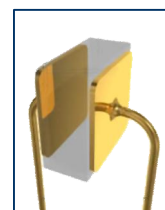
Установленные в электродвигателях, конденсаторы помогают устранить помехи при их работе на работу теле- и радиоприёмной аппаратуры.

При изучении дальнейшего курса физики вы неоднократно будете встречаться со схемами установок, в которых применяются конденсаторы.



Вопросы

1. Что представляет собой конденсатор?
2. Что называют электроёмкостью конденсатора? В каких единицах она измеряется?
3. От каких величин зависит электроёмкость конденсатора? Как это можно установить опытным путём? Напишите соответствующие формулы.
4. От чего зависит энергия конденсатора? Напишите формулу. Как происходит накопление энергии в конденсаторе?
5. Какие бывают конденсаторы?
6. Как устроены конденсаторы? Что общего в их устройстве?
7. Что такое конденсаторы переменной и полупеременной ёмкости?
8. Какие соединения конденсаторов вы знаете? Чему равна ёмкость батарей конденсаторов при их параллельном и последовательном соединении?
9. Где применяются конденсаторы? Приведите примеры.



Основа конструкции **любого** конденсатора - две токопроводящие обкладки, между которыми находится диэлектрик.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА В ПРОВОДНИКЕ

1⁰. В заряженном проводнике избыточные заряды располагаются на его **наружной поверхности** вследствие кулоновского отталкивания: одноименные заряды отталкиваются и стремятся расположиться как можно дальше друг от друга. **Внутри проводника зарядов нет.**

В этом можно убедиться и экспериментально. Установим большой металлический полый шар с отверстием в верхней части на изоляторе и зарядим его. Прикасаясь к различным частям поверхности шара маленьким металлическим шариком и передавая заряд шарика электроскопу, мы сможем судить о распределении заряда по поверхности большого шара.

Мы заметим, что при прикосновении шарика к наружной поверхности заряженного шара часть заряда шара переходит на шарик (рис. 41, а). При прикосновении же к внутренней поверхности шара шарик совсем не получает заряда (рис. 41, б).

Проделав аналогичные опыты с проводниками различной формы, мы получим тот же результат.

2⁰. В зависимости от формы проводника распределение зарядов по его поверхности может быть весьма разнообразным.

Для характеристики распределения зарядов на поверхности проводника вводится величина, называемая **поверхностной плотностью электрических зарядов**. Она равна отношению величины заряда Δq , находящегося на участке поверхности проводника ΔS , к площади этой поверхности. Обозначая поверхностную плотность зарядов греческой буквой σ (сигма). Можно написать:

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S} \quad [16]$$

3⁰. **Плотность зарядов σ зависит от формы проводника, от кривизны его поверхности.**

У шара, кривизна поверхности которого во всех точках поверхности одинакова, электрические заряды распределены равномерно ($\sigma = \text{const}$).

Такое же равномерное распределение зарядов наблюдается и при электризации проводящей плоскости, в чём легко убедиться, например, на следующем опыте. Прикрепим к поверхности плоской металлической сетки ряд бумажных листочков (рис. 42) и сильно наэлектризуем сетку. Мы обнаружим, что все листочки отклоняются на один и тот же угол. Значит, электрические заряды по плоской поверхности распределяются с одинаковой плотностью.

Если же кривизна поверхности заряженного проводника неодинакова, то заряды будут распределены неравномерно: **поверхностная плотность зарядов будет больше там, где больше кривизна поверхности (рис. 43).**

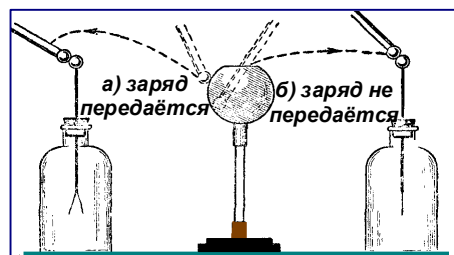


Рис. 41. Опыт, показывающий, что электрический заряд располагается на поверхности проводника

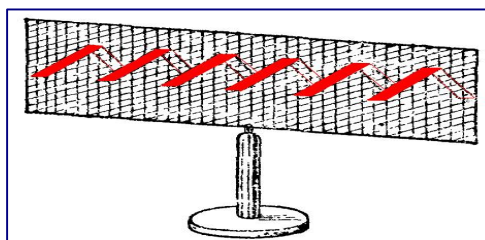


Рис. 42. Опыт, показывающий, что на плоской поверхности заряд располагается равномерно

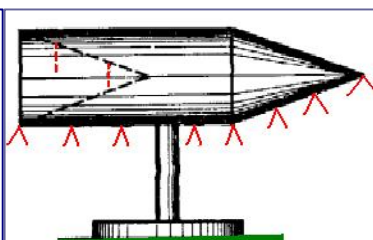


Рис. 43. Наибольшая плотность заряда на острие проводника

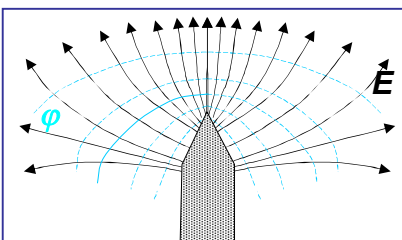
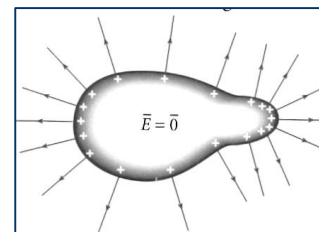


Рис. 43, а. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности у острия заряженного проводника

Особенно велика напряжённость поля вблизи очень острых выступов. С этим обстоятельством приходится считаться. При зарядении проводников до высоких потенциалов: при наличии острых углов или выступов около них может произойти пробой окружающего диэлектрика (в частном случае воздуха) и начаться так называемый **коронный разряд** (о пробое диэлектрика подробнее будет сказано в следующей главе). Поэтому всем металлическим частям приборов, заряжаемых до высоких потенциалов, придают закругленные формы и делают их поверхности гладкими.

4⁰. Исследования показывают, что **во всех точках поверхности заряженного проводника напряжённость электростатического поля E перпендикулярна к поверхности, рис. справа.**

Если бы этого не было, то касательная составляющая напряжённости вызвала бы перемещение электрических зарядов вдоль поверхности.



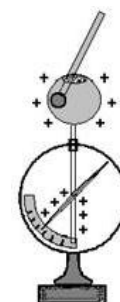
5⁰. **Внутри заряженного проводника напряжённость поля $E=0$; потенциал $\varphi=const$, и его поверхность является эквипотенциальной поверхностью.**

Если бы это было не так, то разность потенциалов должна была бы отличаться от нуля. Но это означало бы существование напряжённости электрического поля внутри проводника, что вызвало бы перемещение зарядов до исчезновения электрического поля во всех точках проводника.



Упражнение

Чтобы полностью передать электрический заряд с пробного шарика электроскопу, на стержень электроскопа надевают полый шар с отверстием. Затем заряженный пробный шарик вводят внутрь шара, касаясь его внутренней поверхности. Шарик при этом полностью разряжается. Прodelайте такой опыт и объясните его.



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

1⁰. Различные тела, как известно, по своим электрическим свойствам делятся на проводники и непроводники (диэлектрики). Одна из особенностей проводников состоит в том, что при равновесии зарядов на поверхности проводников электрическое поле внутри них отсутствует. Чем это объясняется?

Дело в том, что в проводниках имеются свободные электрические заряды. В металлах, например, носителями таких зарядов являются электроны, потерявшие связь со своими атомами. Их принято называть **свободными электронами**, рис. 44,а.

2⁰. Свободные электроны в

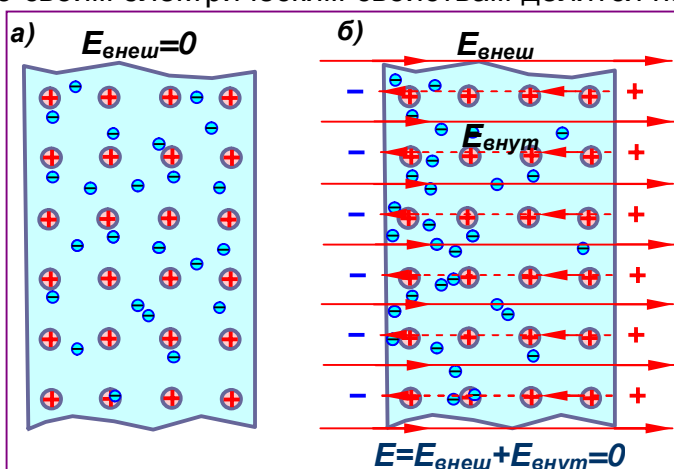


Рис. 44. Металлическая пластина при отсутствии (а) и при наличии (б) внешнего поля $E_{внеш}$. Внутреннее, индуцированное $E_{внут}$ поле полностью компенсирует $E_{внеш}$. Поэтому внутреннее поле $E=0$.

металлическом проводнике, помещённом в электрическое поле, под действием сил поля будут перемещаться в направлении, противоположном напряжённости поля.

Так, на *рис. 44,б* изображён проводник, помещённый в однородное внешнее поле $E_{внеш}$, напряжённость которого направлена слева направо. В результате на **левой** поверхности проводника появляется избыточный **отрицательный заряд**, а на **правой** избыточный **положительный заряд**.

Таким образом, **проводник, помещённый в электрическое поле, электризуется**. Заряды, появляющиеся на поверхности проводника, создадут внутри него добавочное электрическое поле $E_{внут}$. Силовые линии этого поля на *рис. 44,б* изображены пунктиром, они направлены противоположно силовым линиям основного (внешнего) поля $E_{внеш}$. Напряжённость результирующего поля в проводнике ослабится, т. е. уменьшится сила, действующая на свободные электроны и вызывающая их движение. Движение зарядов в проводнике прекратится, когда напряжённость результирующего поля внутри проводника окажется равной нулю $E=0$.

Итак, при равновесии зарядов на проводнике поле внутри проводника отсутствует.

3⁰. То обстоятельство, что электрическое поле внутри проводника отсутствует, может быть использовано для защиты тел от воздействия внешнего электрического поля. Для этого достаточно окружить данное тело хотя бы тонким проводящим слоем, например, поместить его в металлический ящик. Внутри такого ящика поля не будет.

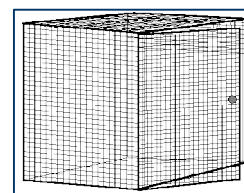


Рис. 45. Клетка Фарадея

Для доказательства того факта, что внутри заряженного проводника электрическое поле отсутствует, Фарадей построил большую проволочную клетку, установил её на изоляторы и заряжал, *рис. 45*. Помещаясь внутрь этой клетки с очень чувствительным электроскопом в руках, Фарадей убедился в том, что внутри клетки не действуют никакие электрические силы, хотя на наружной поверхности сосредоточивался значительный заряд.

4⁰. **Измерение разности потенциалов электрометром.** Электрометр это обычный электроскоп с листками, который, имеет металлический корпус (с клеммой) и измерительную шкалу (проградуированную в вольтах), *рис. 46, а*.

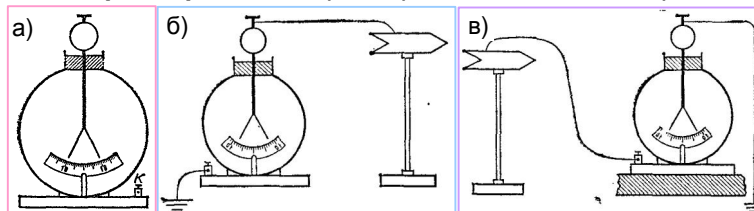


Рис. 46. Электрометр и измерение разности потенциалов

Отклонение листков электрометра зависит от действующей на них силы, т. е. от напряжённости электрического поля возле них. Создавая одну и ту же

разность потенциалов между листками и корпусом, мы будем наблюдать и одинаковые отклонения листков. Итак, отклонение листков в данном приборе зависит от разности потенциалов между ними и корпусом прибора. Чтобы измерить разность потенциалов между проводником и Землей (*рис. 46, б*), нужно стержень (листки) электрометра соединить с этим проводником, а его корпус — с Землей. Через очень короткое время стержень электрометра окажется при том же потенциале, что и соединённый с ним проводник, а потенциал корпуса электрометра сравняется с потенциалом Земли. Показания электрометра дадут разность потенциалов между проводником и Землей. Перемещая конец проволоки, ведущей к электрометру, по поверхности проводника, можно убедиться, что отклонение листков совершенно не меняется, т. е. поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью, какую бы сложную форму она ни имела.

Можно, конечно, поступать наоборот: соединить с Землей стержень электрометра, а корпус его, тщательно изолировав (например, поставив на кусок парафина), соединить с изучаемым проводником (*рис. 46, в*). Показания электрометра и в этом случае дают разность потенциалов между его стержнем и корпусом, а следовательно, разность потенциалов между проводником и Землей.

Заземленный металлический корпус электрометра предотвращает влияние внешних электрических полей на показания прибора.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

1⁰. В **диэлектриках** (к ним относятся стекло, фарфор химически чистая вода, газы.) почти отсутствуют свободные заряды и их упорядоченное движение в обычных условиях невозможно: во внешнем электрическом поле происходит **поляризация диэлектрика**.

2⁰. Существуют два вида диэлектриков, различающихся строением молекул.

Полярные диэлектрики, у которых центры положительного и отрицательного зарядов не совпадают (спирты, вода и др.), представляя собой **диполи**, рис. 47.

Неполярные диэлектрики, у которых центры положительного и отрицательного зарядов совпадают (газы – кислород, водород, полиэтилен и др.), рис. 48.

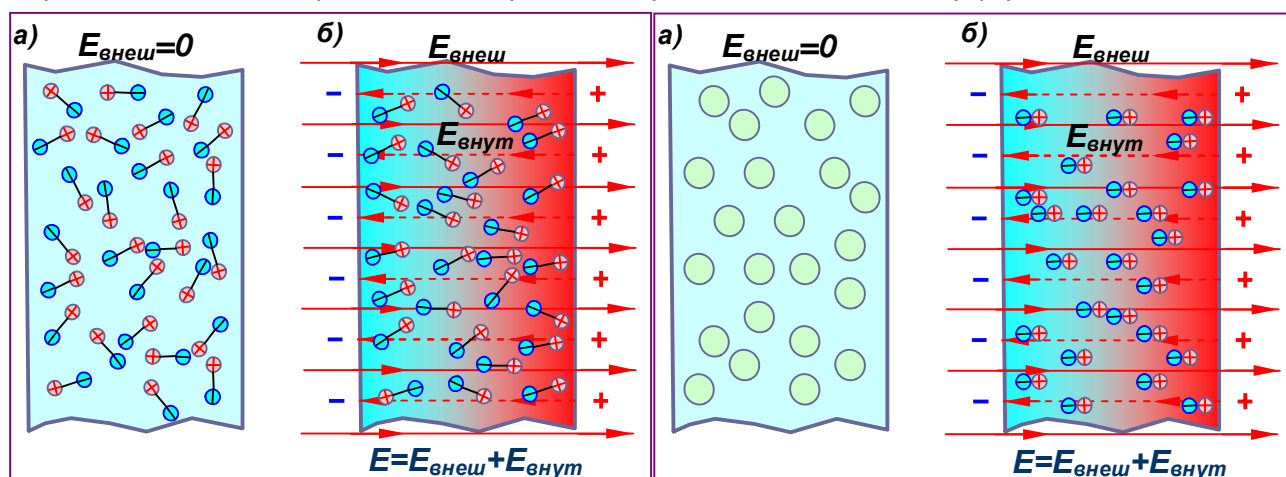


Рис. 47. **Полярный** диэлектрик при отсутствии (а) и при наличии (б) $E_{внеш}$. Под действием поля его молекулярные диполи частично ориентируются, создавая встречное поле $E_{внут}$, ослабляющее $E_{внеш}$. $E = E_{внеш} + E_{внут}$

Рис. 48. **Неполярный** диэлектрик при отсутствии (а) и при наличии (б) $E_{внеш}$. Под действием поля его молекулярные заряды смещаются, создавая встречное поле $E_{внут}$, ослабляющее $E_{внеш}$. $E = E_{внеш} + E_{внут}$.

3⁰. Поляризация **полярных** диэлектриков во внешнем поле обусловлена поворотом их молекулярных диполей, рис.47,б.

Поляризация **неполярных** диэлектриков во внешнем поле обусловлена «расщеплением» их неполярных молекул, рис.48,б.

При электризации диэлектриков на поверхности диэлектрика возникает связанный заряд, а внутри электростатическое поле лишь ослабляется. Ослабление поля зависит от свойств диэлектрика.

8⁰. **Число, показывающее, во сколько раз ослабляется поле внутри диэлектрика, называется относительной диэлектрической постоянной среды** и обозначается буквой ϵ .

$$\epsilon = E_{внеш} / E = E_{внеш} / (E_{внеш} - E_{внут}), \quad [17]$$

где $E_{внеш}$; $E_{внут}$ – напряженность внешнего и внутреннего поля соответственно; E – напряженность результирующего поля.

9⁰. После сказанного выше необходимо ввести одно уточнение в формулу закона Кулона. Если заряды взаимодействуют не в пустоте, а в какой-либо среде, то сила их взаимодействия ослабнет в ϵ раз. Поэтому формула закона Кулона приобретает вид

$$F = kq_1 \cdot q_2 / \epsilon r^2. \quad [2^*]$$

Диэлектрическая проницаемость зависит от рода вещества. Например, у воды $\epsilon = 81$. Это означает, что вода уменьшает напряженность электрического поля в 81 раз.

У газов она чуть больше 1. Существуют же и такие диэлектрики, у которых значение ε выражается десятками и сотнями тысяч. Например, у сегнетовой соли $\varepsilon = 9000$.

Диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора определяет его ёмкость (см. формулу [12]).

10⁰. Благодаря своим свойствам диэлектрики имеют широкое применение как изолирующая часть многих электрических устройств. Вспомните гирлянды изоляторов, с помощью которых высоковольтные провода линий электропередачи крепятся к мачтам, оплетку электрических проводов и т. д.

Однако при повышении напряженности электрического поля E в каком-либо месте выше некоторой величины $E_{пр}$, называемой *электрической прочностью*, в этом месте возникает ионизация (процесс перехода нейтральных атомов и молекул в ионы, несущие положительные или отрицательные электрические заряды). Диэлектрик, до этого являющийся изолятором, превращается в проводник, что приведет к **пробою** изоляции.

В природе с явлением пробоя атмосферного воздуха мы встречаемся во время грозы. Между положительно и отрицательно заряженными зонами грозового облака или между облаком и землёй «проскакивает искра» – **молния**, раскаляющая воздух, *рис. 49*. Он резко расширяется, что порождает сильную звуковую волну – **гром**.



Рис. 49. Явление пробоя диэлектрика (воздуха): а) пробой при испытании высоковольтного изолятора; б) молния – пробой атмосферного воздуха.

11⁰. Существует особый класс диэлектриков – *пьезодиэлектрики*. Таковы, например, кристаллы кварца. Если пластинку, определенным образом вырезанную из монокристалла кварца, деформировать, сжимая и растягивая, между ее противоположными гранями возникнет напряжение. Такой монокристалл позволяет улавливать ультразвук, в то время как ухо человека этого сделать не может. Если же, наоборот, между противоположными гранями пьезокристалла приложить переменное напряжение, полярность которого будет непрерывно изменяться, то кристалл начнет деформироваться и излучать звук или ультразвук.

12⁰. Сравнительно недавно были открыты **электреты**.

Если обычную стеклянную или эбонитовую палочку наэлектризовать, то она быстро теряет свои свойства, поле ее ослабевает. Для проведения опытов ее приходится электризовать заново. Электреты же, подобно магнитам, будучи наэлектризованы, очень долго сохраняют свои свойства.

Электреты применяются в миниатюрных устройствах, *рис. 50*.



Рис. 50. Электретный микрофон



Вопросы

1. Что такое диэлектрик? Какие бывают диэлектрики? В чём их отличия?
2. Что такое пробой изолятора?
3. В электрическое поле вносят диэлектрик. Чем отличается поле внутри диэлектрика от поля вне диэлектрика?
4. По какой причине напряженность поля в диэлектриках не ослабевает до нуля, как это происходит в проводниках?
5. Что называется диэлектрической проницаемостью вещества?
6. Как и почему следует уточнить закон Кулона?
7. Что такое пьезодиэлектрики? Что такое электреты?