

ных давлении и температуре.) Если заряд q положителен, то для такой электризации от шарика надо отнять $n_e = q/e \approx 2 \cdot 10^{11}$ электронов. Пусть масса шарика $M = 30$ г. Тогда сумма содержащихся в нем протонов и нейтронов будет $N_p + N_n = \frac{M}{m_p} = \frac{30}{1,67 \cdot 10^{-24}} \approx 2 \cdot 10^{25}$. Превышение протонов над электронами ничтожно и составляет всего $n_e/N_p \sim 10^{-14}$ от общего числа протонов. Уменьшение массы шарика из-за электризации составляет $n_e m_e \approx 2 \cdot 10^{-16}$ г, т. е. примерно 10^{-17} массы самого шарика. Такое уменьшение массы не может быть обнаружено даже на самых чувствительных весах. Допустим теперь, что при электризации электроны были удалены от поверхностного слоя шарика. Оценим его толщину δ . Общее число протонов и нейтронов в слое будет $\sim n_e$, а масса слоя $\Delta M \sim n_e m_p \sim 10^{-13}$ г. Так как $\Delta M/M = 3\delta/a$, то получаем $\delta \sim 10^{-15}$ см.

5. При внесении тела в электрическое поле легкие электроны испытывают смещения против поля. Смещения атомных ядер по сравнению с ними пренебрежимо малы. Происходит частичное разделение положительных и отрицательных зарядов. В отдельных местах тела появляются макроскопические заряды различных знаков. Явление называется *электрической индукцией* или *влиянием*, а появившиеся в результате разделения заряды — *индукционными зарядами*. К возникновению индукционных зарядов и сводится влияние вещества на электрическое поле. Индукционные заряды создают дополнительное электрическое поле, накладывающееся на поле первичных зарядов. Если известны все первичные и индукционные заряды, то при вычислении полного электрического поля можно «забыть» о наличии вещества. Полное поле найдется суперпозицией кулоновых полей, возбуждаемых в вакууме всеми первичными и индукционными зарядами.

§ 11. Проводники в электрическом поле

1. Смещения электрических зарядов в металлах и изоляторах носят совершенно различный характер. В металлах имеются *свободные электроны*, которые в пределах тела могут перемещаться на какие угодно расстояния. Поэтому индукционные заряды, возникающие в электрическом поле на противоположных концах тела, могут быть механически отделены друг от друга. Возьмем два металлических цилиндра A и B , установленных на изолирующих подставках и соединенных с электроскопами (рис. 32). Сближим их до соприкосновения. Если поднести заряженный шар C , то стрелки обоих электроскопов отклонятся. При удалении шара C отклонение пропадает. Раздвинем теперь цилиндры A и B в присутствии влияющего тела C , а затем тело C удалим. Электрические заряды на A и B , а также на стержнях и стрелках электроскопов сохранятся. Если шар C был заряжен положительно,

то на A окажется отрицательный, а на B — положительный заряды. В этом можно убедиться, взяв потертую о кожу стеклянную палочку. Если этой палочкой коснуться цилиндра A , то отклонение стрелки электроскопа A уменьшится. Если же коснуться цилиндра B , то стрелка электроскопа B отклонится еще больше.

2. Если бы внутри однородного проводника существовало макроскопическое электрическое поле, то оно привело бы в движение свободные электроны. В проводнике возник бы электрический ток, и равновесие электричества было бы невозможно. Для равновесия необходимо, чтобы макроскопическое поле E обращалось в нуль во всех точках внутри проводника ¹⁾. Будет равна нулю также дивергенция вектора E , а с ней, в силу теоремы Гаусса (10.6), и величина $\bar{\rho}$. Таким образом, при равновесии объемная плотность электричества внутри однородного проводника равна нулю. Электричество может располагаться только на поверхности, а не внутри проводника. Как было выяснено в предыдущем параграфе (пункт 4), толщина поверхностного слоя, в котором нарушается электрическая нейтральность вещества, настолько мала, что в макроскопической электростатике ее можно совсем не принимать во внимание. Можно пользоваться математической идеализацией, в которой электричество ведет себя как сплошная жидкость, располагающаяся на границе проводника как на геометрической поверхности.

Электрические заряды располагаются по поверхности проводника потому, что между ними действуют кулоновские силы притяжения и отталкивания. Допустим, что внутри проводника возникли электрические заряды. Согласно теореме Ирншоу никакая статическая конфигурация их внутри проводника не может быть устойчивой. Притяжение между разноименными зарядами приведет к их сближению и нейтрализации, а отталкивание одноименных зарядов — к тому, что они разойдутся как можно дальше и сосредоточатся на поверхности тела. Приведенное рассуждение показывает также, что поверхностная плотность электричества будет максимальна на наиболее удаленных выступающих частях проводника, обладающих максимальной кривизной, например на остриях. Это видно также из формулы (8.6), согласно которой поле E должно очень резко меняться вблизи острия.

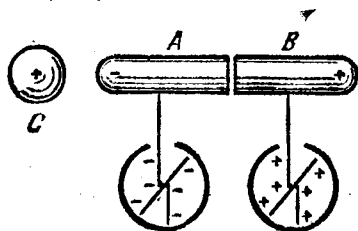


Рис. 32.

¹⁾ В неоднородном проводнике это не обязательно из-за действия сил неэлектростатического происхождения.

3. Распределение электричества по поверхности проводника можно исследовать с помощью *пробного шарика*, т. е. маленького металлического шарика, насаженного на изолирующую ручку. Возьмем металлическое тело, форма которого изображена на рис. 33, установленное на изолирующей подставке. Зарядив его, коснемся пробным шариком острия *A*, а затем поднесем шарик к электроскопу. Стрелка электроскопа отклонится. Если то же самое повторить, касаясь пробным шариком боковой поверхности тела, то отклонение стрелки будет меньше. Если же коснуться впадины *B*, то стрелка совсем не отклонится. Это показывает, что плотность электричества максимальна у *A* и минимальна у *B*.

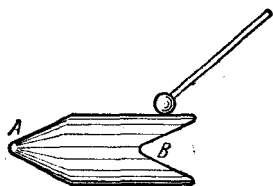


Рис. 33.

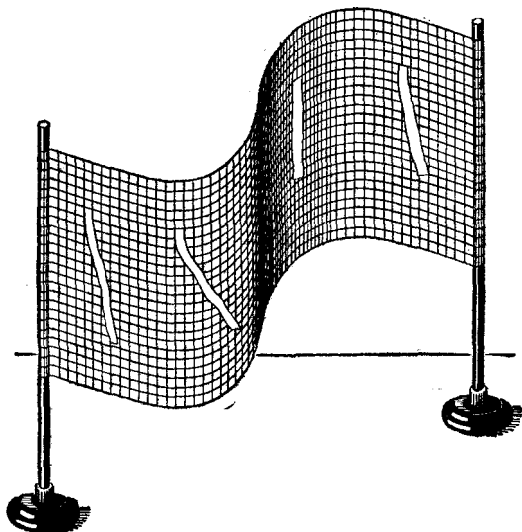


Рис. 34.

Возьмем гибкую металлическую сетку, к которой по обе стороны приклеены легкие бумажные листочки (рис. 34). Установим ее на изолирующих подставках, а затем зарядим электричеством. Если сетка плоская, то листочки расходятся одинаково с обеих сторон. При изгибании сетки листочки с выпуклой стороны расходятся еще больше, а с вогнутой — спадают.

На остриях заряженного проводника поверхностная плотность электричества может быть настолько большой, что электричество начинает с них стекать. В сильном и сильно неоднородном поле вблизи острия молекулы воздуха заряжаются через влияние и притягиваются к нему. Коснувшись острия, молекулы заряжаются одноименно с ним и отталкиваются. Сила отталкивания превосходит ранее действовавшую силу притяжения, так как она действует на заряженные молекулы, а сила притяжения — на нейтральные. По этой причине заряженные молекулы будут удаляться от острия с большими скоростями, чем они приближались к нему. Возникает поток заряженных частиц воздуха, направленный

от острия, называемый *электрическим ветром*. Им можно погасить зажженную свечу.

В демонстрационном приборе — *колесе Франклина* (1706—1790) — электрический ветер, стекающий с острия, приводит во вращение легкий крест из металлических проволок (рис. 35). Прибор действует по тому же принципу, что и Сегнерово колесо. В другом демонстрационном опыте электрический ветер с острия (рис. 36) приводит во вращение легкий цилиндр, насаженный на вертикальную ось (электрический ротор).

В сильных электрических полях механизм утечки зарядов с острия становится более сложным. Вблизи острия молекулы

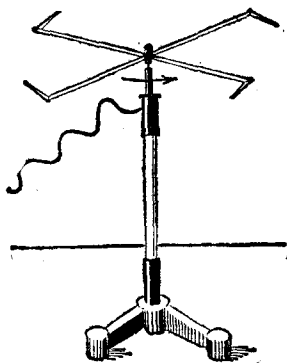


Рис. 35.

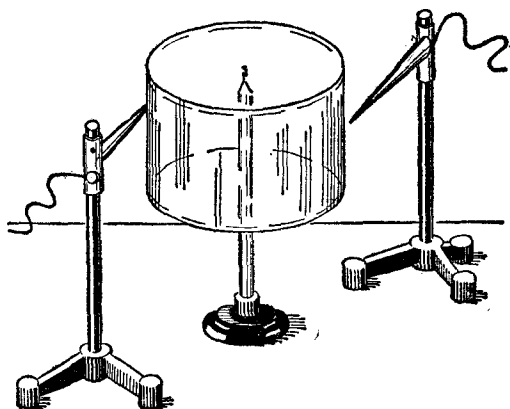


Рис. 36.

воздуха ионизируются сильным электрическим полем. Воздух становится проводником электричества. Возникает сильный электрический ток, направленный к острию или от него (*электрический пробой*). Этот ток снимает электрические заряды с острия. На этом основано действие громоотвода.

4. При переходе через любую границу раздела сред тангенциальная составляющая электрического поля меняется непрерывно (см. § 6, пункт 6). В электростатике электрическое поле внутри проводника обращается в нуль. Отсюда следует, что во внешнем пространстве поле E должно быть перпендикулярно к поверхности проводника. Если бы это было не так, то под действием касательной составляющей поля E заряды пришли бы в движение по поверхности проводника, т. е. равновесие их было бы невозможно. Силовые линии, таким образом, нормальны к поверхности проводника и оканчиваются на ней, не проникая внутрь проводника (рис. 37).

Напряженность электрического поля вблизи поверхности проводника легко найти по формуле (6.9). Полагая в ней $E_{1n} = 0$

(внутри проводника), $E_{2n} = E$ (вне проводника), получим $E = 4\pi\sigma$, или в векторной форме

$$E = 4\pi\sigma n \quad (11.1)$$

(нормаль n проведена наружу от поверхности проводника).

Электрическая сила f , действующая на единицу площади заряженной поверхности проводника, согласно общим формулам (6.13) и (6.15), будет

$$f = \frac{\sigma}{2} E = 2\pi\sigma^2 n = \frac{E^2}{8\pi} n. \quad (11.2)$$

Она всегда направлена наружу, т. е. стремится удалить электричество с поверхности проводника.

5. Докажем теперь несколько положений, совокупность которых называется *теоремой Фарадея*. Пусть в однородном проводнике имеется полость, внутрь которой внесены электрические

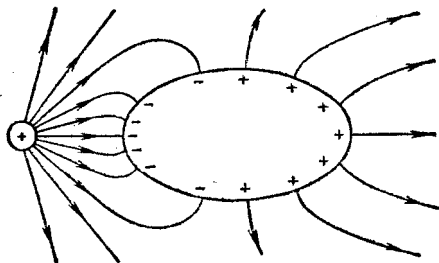


Рис. 37.

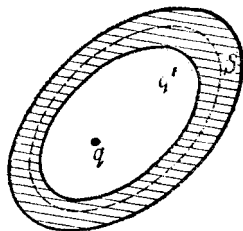


Рис. 38.

заряды (рис. 38). Проведем замкнутую поверхность S , окружающую полость и целиком проходящую в проводнике. Так как напряженность электрического поля на поверхности S равна нулю, то будет равен нулю и полный заряд, окруженный этой поверхностью. Таким образом, *сумма индуцированных зарядов на внутренней поверхности проводящей оболочки равна и противоположна по знаку сумме зарядов, окруженных этой оболочкой*.

При равновесии индуцированные заряды q' располагаются по внутренней поверхности проводящей оболочки таким образом, чтобы полностью скомпенсировать внутри этой оболочки кулоновское поле зарядов q , окружаемых ею. Такая компенсация должна иметь место не только в стенках проводящей оболочки, но и во всем внешнем пространстве. Чтобы убедиться в этом, достаточно представить, что все внешнее пространство заполнено электрически нейтральной проводящей средой. Поле в ней при равновесии равно нулю. Но такая среда не будет оказывать никакого влияния на электрическое поле, поскольку положительные и отри-

цательные заряды в ней скомпенсированы в каждой точке пространства. Поэтому, если среду удалить, оставив только проводящую оболочку, то от этого поле нигде не изменится. В частности, оно останется равным нулю во всем пространстве, из которого была удалена среда. Значит, *кулоновское поле зарядов, окруженных проводящей оболочкой, и зарядов, индуцированных на ее внутренней поверхности, равно нулю во всем внешнем пространстве.*

Допустим теперь, что все заряды находятся во внешнем пространстве. Если проводящее тело сплошное, то в нем электрического поля нет. Удалим из тела часть (электрически нейтрального) вещества. От этого, как выяснено выше, поле нигде не изменится, а равновесие электричества не нарушится. Зато в теле образуется полость. Таким образом, *если в полости нет электрических зарядов, то электрическое поле в ней равно нулю. Внешние заряды не создают в полости никакого электрического поля.* Чтобы предохранить какие-либо тела, например измерительные приборы, от влияния внешних электрических полей, их окружают проводящей оболочкой (*электростатическая защита*).

Мы видим, что замкнутая проводящая оболочка разделяет все пространство на внутреннюю и внешнюю части, в электрическом отношении совершенно не зависящие друг от друга. Например, при любом перемещении зарядов внутри (вне) оболочки во внешнем (внутреннем) пространстве не будет происходить никаких изменений. В частности, если все внутренние заряды привести в контакт со стенками оболочки, то произойдет их нейтрализация индуцированными зарядами. При этом внутреннее поле исчезнет, но наружное поле и распределение электричества на наружной поверхности тела останутся неизменными.

6. Все эти результаты были получены Фарадеем экспериментально. Опишем некоторые демонстрационные опыты, иллюстрирующие их. Возьмем *«цилиндр Фарадея»*, т. е. длинный металлический сосуд цилиндрической формы, открытый сверху. Насадим его на стержень электроскопа (рис. 39). Затем внесем в цилиндр заряженный шарик на изолирующей ручке. Стрелка электроскопа отклонится. Если шарик погружен достаточно глубоко, то при любых перемещениях его в цилиндре угол отклонения стрелки электроскопа не изменится. Он не изменяется и тогда, когда заряженным шариком касаются внутренней поверхности стенки цилиндра. При этом шарик оказывается незаряженным. В этом легко убедиться, извлекая шарик из цилиндра и касаясь им другого незаряженного электроскопа. Весь заряд с шарика переходит к цилиндру и располагается на его наружной поверхности. В идеальном поставленном опыте отверстие цилиндра Фарадея после внесения в него шарика должно закрываться металлической крышкой. Но если цилиндр длинный, то опыт хорошо удается и без крышки.

Основываясь на опытах такого типа, Фарадей указал способ, с помощью которого заряд проводящего тела можно полностью передать другому проводящему телу. Для этого во втором теле надо сделать полость и внести в нее первое (заряженное) тело. При соприкосновении вносимого тела с внутренней поверхностью полости заряд от него полностью переходит ко второму телу. Внешнее тело можно извлечь из полости и зарядить снова. Внося его в полость второй раз, можно опять передать заряд второму телу. Такую операцию мож-

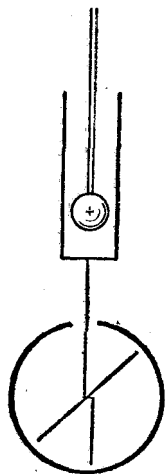


Рис. 39.

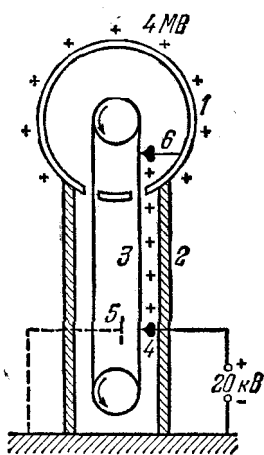


Рис. 40.

но повторить многократно и сообщить полому телу теоретически сколь угодно большой заряд. Практически величина заряда лимитируется утечкой электричества из-за ионизации окружающего воздуха. По этому принципу работает электростатический генератор Ван-де-Граафа.

Генератор Ван-де-Граафа состоит из полого металлического шара 1 диаметром в несколько метров, укрепленного на изолирующей колонне 2 (рис. 40). Движущаяся бесконечная лента 3 из резиновой ткани заряжается

от источника напряжения с помощью системы острий 4. С обратной стороны ленты против острий помещена заземленная пластина 5, усиливающая стекание зарядов с острий 4 на ленту 3. Другая система острий 6 снимает заряды с ленты и передает их полому шару. Генератор позволяет получать напряжения до 3—5 миллионов вольт. Он применяется для ускорения электронов и ионов.

7. Опишем теперь демонстрационный опыт с «клеткой Фарадея». Она представляет собой цилиндр, дно и крышка которого сделаны из листового металла, а боковые стенки — из металлической сетки, чтобы сквозь них было видно, что делается внутри цилиндра (рис. 41). К боковой поверхности цилиндра снаружи приклеены бумажные полоски. Вдоль оси клетки может перемещаться металлический стержень, все время находящийся в электрическом контакте с крышкой. Стержень оканчивается легкими бумажными листочками, играющими роль электроскопа. Они могут выдвигаться наружу через отверстие в дне клетки. Клетка устанавливается на изолирующих подставках. Если клетку зарядить электричеством, то наружные листочки расходятся, а листочки внутри остаются неподвижными. Если их выдвинуть наружу, то

они также расходятся. Фарадей произвел аналогичный опыт (1836 г.) в большом масштабе, поместившись сам с электроскопом внутри металлической клетки, подвешенной к потолку на шелковых веревках. К клетке подносились металлические тела, заряженные от электростатической машины. Между ними и клеткой проскакивали сильные электрические искры, сообщавшие клетке большой электрический заряд. Никаких отклонений листочков электроскопа внутри клетки не наблюдалось, и никаких особых ощущений Фарадей не испытывал. Физики, работающие на высоковольтных ускорителях Ван-де-Граафа, автоматически повторяют опыт Фарадея. Они располагаются с измерительными приборами внутри шара работающего ускорителя на миллионы вольт и уверены, что находятся под надежной защитой теоремы Фарадея.

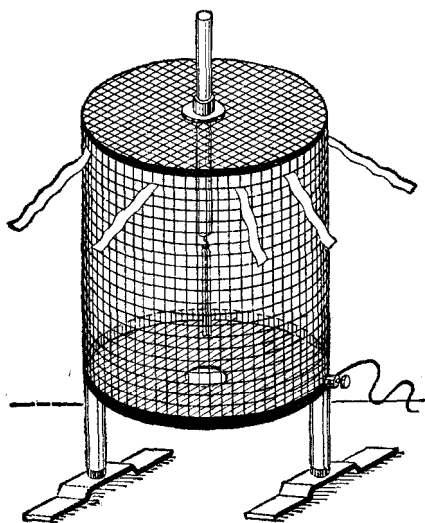


Рис. 41.

§ 12. Поляризация диэлектриков

1. Диэлектрики являются непроводниками электричества. Как и в металлах, в них также могут возбуждаться индукционные заряды. Поднесем, например, к шарiku заряженного электроскопа C электрически нейтральное тело из диэлектрика AB (рис. 42). Угол отклонения стрелки электроскопа уменьшается. Дело в том, что заряд шарика C возбуждает на конце диэлектрика B индукционные заряды того же, а на конце A противоположного знака. Эти заряды оттягивают часть зарядов со стрелки и стержня электроскопа на шарик, с чем и связано уменьшение угла отклонения стрелки.

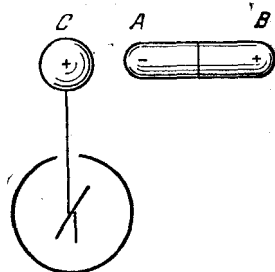


Рис. 42.

Попытаемся разделить индукционные заряды, возникшие на диэлектрике. Для этого воспользуемся тем же приемом, который применялся в случае металлов (см. рис. 32). Пусть диэлектрик