

Рис. 14.32

2. Почему заряженная расческа притягивает электрически нейтральные кусочки бумаги?

3. Электрический заряд $q_1 > 0$ переместили по замкнутому контуру $ABCD$ в поле точечного заряда $q_2 > 0$ (рис. 14.32). На каких участках работа поля по перемещению заряда была положительной? отрицательной? равной нулю? Как изменялась потенциальная энергия системы? Чему равна полная работа поля по перемещению заряда?

4. Двигаясь в электрическом поле, электрон перешел из одной точки в другую, потенциал которой выше на 1 В. Насколько изменилась кинетическая энергия электрона? потенциальная?

5. Точечные заряды $q_1 > 0$ и $q_2 < 0$ расположены в двух вершинах равностороннего треугольника со стороной r . Определите модуль вектора напряженности в третьей вершине.

6. Потенциал электростатического поля возрастает в направлении снизу вверх. Куда направлен вектор напряженности поля?

7. Разность потенциалов между точками, лежащими на одной силовой линии на расстоянии 3 см друг от друга, равна 120 В. Определите напряженность электростатического поля, если известно, что поле однородно.

8. Изобразите эквипотенциальные поверхности бесконечного проводящего и равномерно заряженного цилиндра.

9. У электрона, движущегося в электрическом поле, увеличилась скорость с $v_1 \approx 1 \cdot 10^7$ м/с до $v_2 \approx 3 \cdot 10^7$ м/с. Определите разность потенциалов между начальной и конечной точками перемещения электрона. Отношение заряда электрона к его массе равно: $\frac{|e|}{m} = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

§ 99

ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРОЕМКОСТИ

Выясним важный для практики вопрос: при каком условии можно накопить на проводниках большой электрический заряд?

При любом способе электризации тел — с помощью трения, электростатической машины, гальванического элемента и т. д. — первоначально нейтральные тела заряжаются вследствие того, что некоторая часть заряженных частиц переходит от одного тела к другому. Обычно этими частицами являются электроны.

При электризации двух проводников, например от электростатической машины, один из них приобретает заряд $+q$, а другой $-q$. Между проводниками появляется электрическое поле и возникает разность потенциалов (напряже-

ние). С увеличением заряда проводников электрическое поле между ними усиливается.

В сильном электрическом поле (при большом напряжении и соответственно при большой напряженности) диэлектрик (например, воздух) становится проводящим. Возможен так называемый *пробой* диэлектрика: между проводниками проскакивает искра, и они разряжаются. Чем меньше увеличивается напряжение между проводниками с увеличением их зарядов, тем больший заряд можно на них накопить.

Емкость. Введем физическую величину, характеризующую способность двух проводников накапливать электрический заряд. Эту величину называют **емкостью**.

Напряжение U между двумя проводниками пропорционально электрическим зарядам, которые находятся на проводниках (на одном $+|q|$, а на другом $-|q|$). Действительно, если заряды удвоить, то напряженность электрического поля станет в 2 раза больше, следовательно, в 2 раза увеличится и работа, совершаемая полем при перемещении заряда, т. е. в 2 раза увеличится напряжение. Поэтому отношение заряда q одного из проводников (на другом находится такой же по модулю заряд) к разности потенциалов между этим проводником и соседним не зависит от заряда. Оно определяется геометрическими размерами проводников, их формой и взаимным расположением, а также электрическими свойствами окружающей среды.

Это позволяет ввести понятие емкости двух проводников.

Емкостью двух проводников называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (14.22)$$

Чем меньше напряжение U между проводниками при сообщении им зарядов $+|q|$ и $-|q|$, тем больше емкость проводников. На проводниках можно накопить большие заряды, не вызывая пробоя диэлектрика. Но сама емкость не зависит ни от сообщенных проводникам зарядов, ни от возникающего между ними напряжения.

Единицы емкости. Формула (14.22) позволяет ввести единицу емкости.

Емкость двух проводников численно равна единице, если при сообщении им зарядов $+1$ Кл и -1 Кл между ними возникает разность потенциалов 1 В. Эту единицу называют фарад (Ф); $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$.

Из-за того что заряд в 1 Кл очень велик, емкость 1 Ф оказывается очень большой. Поэтому на практике часто используют доли этой единицы: микрофарад (мкФ) — 10^{-6} Ф и пикофарад (пФ) — 10^{-12} Ф.

Важная характеристика проводников — электроемкость. Электроемкость проводников тем больше, чем меньше разность потенциалов между ними при сообщении им зарядов противоположных знаков.



1. Что называют электроемкостью двух проводников?
2. Почему понятие электроемкости неприменимо к диэлектрикам?
3. В каких единицах выражается электроемкость?

§ 100 КОНДЕНСАТОРЫ¹

Систему проводников очень большой электроемкости вы можете обнаружить в любом радиоприемнике или купить в магазине. Называется она конденсатором. Сейчас вы узнаете, как устроены подобные системы и от чего зависит их электроемкость.

Конденсатор. Большой электроемкостью обладают системы из двух проводников, называемые **конденсаторами**. Конденсатор представляет собой два проводника, разделенные слоем диэлектрика, толщина которого мала по сравнению с размерами проводников. Проводники в этом случае называются **обкладками** конденсатора.

Простейший плоский конденсатор состоит из двух одинаковых параллельных пластин, находящихся на малом расстоянии друг от друга (рис. 14.33). Если заряды пластин одинаковы по модулю и противоположны по знаку, то силовые линии электрического поля начинаются на положительно заряженной обкладке конденсатора и оканчиваются на отрицательно заряженной (см. рис. 14.28). Поэтому почти все электрическое поле *сосредоточено внутри конденсатора и однородно.*

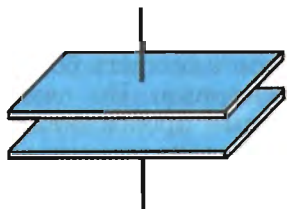


Рис. 14.33

Для зарядки конденсатора нужно присоединить его обкладки к полюсам источника напряжения, например к полюсам батареи аккумуляторов. Можно также первую обкладку соединить с полюсом батареи, у которой другой полюс заземлен, а вторую обкладку конденсатора зазем-

¹ Слово «конденсатор» в переводе на русский язык означает «сгуститель». В данном случае — «сгуститель электрического заряда».

лить¹. Тогда на заземленной обкладке останется заряд, противоположный по знаку и равный по модулю заряду незаземленной обкладки. Такой же по модулю заряд уйдет в землю.

Под *зарядом конденсатора* понимают абсолютное значение заряда одной из обкладок.

Емкость конденсатора определяется формулой (14.22).

Электрические поля окружающих тел почти не проникают внутрь конденсатора и не влияют на разность потенциалов между его обкладками. Поэтому емкость конденсатора практически не зависит от наличия вблизи него каких-либо других тел.

Емкость плоского конденсатора. Геометрия плоского конденсатора полностью определяется площадью S его пластин и расстоянием d между ними. От этих величин и должна зависеть емкость плоского конденсатора.

Чем больше площадь пластин, тем больший заряд можно на них накопить: $q \sim S$. С другой стороны, напряжение между пластинами согласно формуле (14.21) пропорционально расстоянию d между ними. Поэтому емкость

$$C = \frac{q}{U} = \frac{S}{d}. \quad (14.23)$$

Кроме того, емкость конденсатора зависит от свойств диэлектрика между пластинами. Так как диэлектрик ослабляет поле, то емкость при наличии диэлектрика увеличивается.

Проверим на опыте зависимости, полученные нами из рассуждений. Для этого возьмем конденсатор, у которого расстояние между пластинами можно изменять, и электрометр с заземленным корпусом (рис. 14.34). Соединим

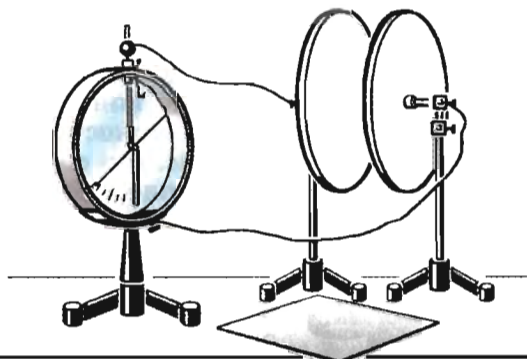


Рис. 14.34

¹ Заземление проводников — это соединение их с землей (очень большим проводником) с помощью металлических листов в земле, водопроводных труб и т. д.

корпус и стержень электрометра с пластинами конденсатора проводниками и зарядим конденсатор. Для этого нужно коснуться наэлектризованной палочкой пластины конденсатора, соединенной со стержнем. Электрометр покажет разность потенциалов между пластинами.

Раздвигая пластины, мы обнаружим *увеличение разности потенциалов*. Согласно определению электроемкости (см. формулу (14.22)) это указывает на ее уменьшение. В соответствии с зависимостью (14.23) электроемкость действительно должна уменьшаться с увеличением расстояния между пластинами.

Вставив между обкладками конденсатора пластину из диэлектрика, например из органического стекла, мы обнаружим *уменьшение разности потенциалов*. Следовательно, *электроемкость плоского конденсатора в этом случае увеличивается*. Расстояние между пластинами d может быть очень малым, а площадь S — большой. Поэтому при небольших размерах конденсатор может иметь большую электроемкость.

Для сравнения: в отсутствие диэлектрика между обкладками плоского конденсатора при электроемкости в 1 Ф и расстоянии между пластинами $d = 1$ мм он должен был бы иметь площадь пластин $S = 100 \text{ км}^2$.

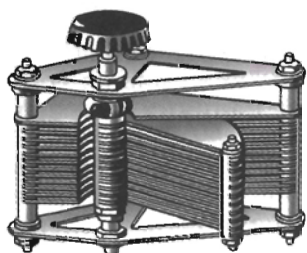


Рис. 14.35

Различные типы конденсаторов.

В зависимости от назначения конденсаторы имеют различное устройство. Обычный технический бумажный конденсатор состоит из двух полосок алюминиевой фольги, изолированных друг от друга и от металлического корпуса бумажными лентами, пропитанными парафином. Полоски и ленты туго свернуты в пакет небольшого размера.

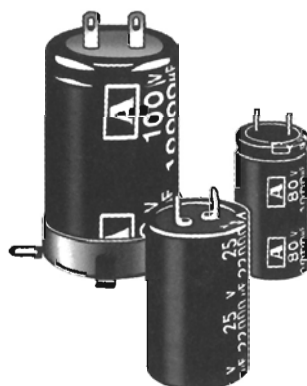


Рис. 14.36

В радиотехнике широко применяют конденсаторы переменной электроемкости (рис. 14.35). Такой конденсатор состоит из двух систем металлических пластин, которые при вращении рукоятки могут войти одна в другую. При этом меняются площади перекрывающихся частей пластин и, следовательно, их электроемкость. Диэлектриком в таких конденсаторах служит воздух.

Значительного увеличения электроемкости за счет уменьшения расстояния между обкладками дости-

гают в так называемых электролитических конденсаторах (рис. 14.36). Диэлектриком в них служит очень тонкая пленка оксидов, покрывающих одну из обкладок (полосу фольги). Другой обкладкой служит бумага, пропитанная раствором специального вещества (электролита).

Конденсаторы позволяют накапливать электрический заряд. Электроемкость плоского конденсатора пропорциональна площади пластин и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами. Кроме того, она зависит от свойств диэлектрика между обкладками.



1. От чего зависит электроемкость?
2. Как изменяется емкость конденсатора при наличии диэлектрика между его обкладками?
3. Какие существуют типы конденсаторов?
4. Какую роль выполняют конденсаторы в технике?

§ 101

ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА. ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Как и любая система заряженных тел, конденсатор обладает энергией. Вычислить энергию заряженного плоского конденсатора с однородным полем внутри него несложно.

Энергия заряженного конденсатора. Для того чтобы зарядить конденсатор, нужно совершить работу по разделению положительных и отрицательных зарядов. Согласно закону сохранения энергии эта работа равна энергии конденсатора. В том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно убедиться, если разрядить его через цепь, содержащую лампу накаливания, рассчитанную на напряжение в несколько вольт (рис. 14.37). При разрядке конденсатора лампа вспыхивает. Энергия конденсатора превращается в тепло и энергию света.

Выведем формулу для энергии плоского конденсатора.

Напряженность поля, созданного зарядом одной из пластин, равна $E/2$, где E — напряженность поля в конденсаторе. В однородном поле

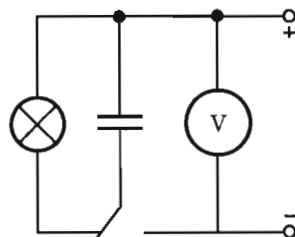


Рис. 14.37

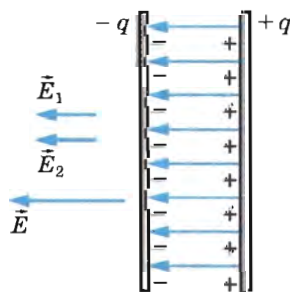


Рис. 14.38

одной пластины находится заряд q , распределенный по поверхности другой пластины (рис. 14.38). Согласно формуле (14.14) для потенциальной энергии заряда в однородном поле энергия конденсатора равна:

$$W_{\pi} = q \frac{E}{2} d, \quad (14.24)$$

где q — заряд конденсатора, а d — расстояние между пластинами.

Так как $Ed = U$, где U — разность потенциалов между обкладками конденсатора, то его энергия равна:

$$W_{\pi} = \frac{qU}{2}. \quad (14.25)$$

Эта энергия равна работе, которую совершит электрическое поле при сближении пластин вплотную.

Заменив в формуле (14.25) разность потенциалов или заряд с помощью выражения (14.22) для электроемкости конденсатора, получим:

$$W_{\pi} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \quad (14.26)$$

Можно доказать, что эти формулы справедливы для любого конденсатора, а не только для плоского.

Энергия электрического поля. Согласно теории близкодействия вся энергия взаимодействия заряженных тел сконцентрирована в электрическом поле этих тел. Значит, энергия может быть выражена через основную характеристику поля — напряженность.

Так как напряженность электрического поля прямо пропорциональна разности потенциалов ($U = Ed$), то согласно формуле $W_{\pi} = \frac{CU^2}{2}$ энергия конденсатора прямо пропорциональна квадрату напряженности электрического поля внутри него: $W_{\pi} \sim E^2$.

Применение конденсаторов. Зависимость электроемкости конденсатора от расстояния между его пластинами используется при создании одного из типов клавиатур компьютера. На тыльной стороне каждой клавиши располагается одна пластина конденсатора, а на плате, расположенной под клавишами, — другая. Нажатие клавиши изменяет емкость конденсатора. Электронная схема, подключенная к этому конденсатору, преобразует сигнал в соответствующий код, передаваемый в компьютер.

Энергия конденсатора обычно не очень велика — не более сотен джоулей. К тому же она не сохраняется долго из-за неизбежной утечки заряда. Поэтому заряженные конденсаторы не могут заменить, например, аккумуляторы в качестве источников электрической энергии.

Но это совсем не означает, что конденсаторы как накопители энергии не получили практического применения. Они имеют одно важное свойство: конденсаторы могут накапливать энергию более или менее длительное время, а при разрядке через цепь с малым сопротивлением они отдают энергию почти мгновенно. Именно это свойство широко используют на практике.

Лампа-вспышка, применяемая в фотографии, питается электрическим током разряда конденсатора, заряжаемого предварительно специальной батареей. Возбуждение квантовых источников света — лазеров осуществляется с помощью газоразрядной трубки, вспышка которой происходит при разрядке батареи конденсаторов большой емкости.

Однако основное применение конденсаторы находят в радиотехнике.

Энергия конденсатора пропорциональна его емкости и квадрату напряжения между пластинами. Вся эта энергия сосредоточена в электрическом поле. Энергия поля пропорциональна квадрату напряженности поля.



1. Чему равна энергия заряженного конденсатора?
2. Перечислите основные применения конденсаторов.



ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Емкость — последняя тема раздела «Электростатика». При решении задач на эту тему могут потребоваться все сведения, полученные при изучении электростатики: закон сохранения электрического заряда, понятия напряженности поля и потенциала, сведения о поведении проводников в электростатическом поле, о напряженности поля в диэлектриках, о законе сохранения энергии применительно к электростатическим явлениям.

Основной формулой при решении задач на емкость является формула (14.22).

1. Конденсатор имеет емкость $C = 5$ пФ. Какой заряд находится на каждой из его обкладок, если разность потенциалов между ними $U = 1000$ В?

Решение. Согласно формуле (14.22) емкость конденсатора $C = \frac{q}{U}$. Отсюда заряд обкладки равен $q = CU$; $q = 5 \cdot 10^{-12} \cdot 1000$ Кл = $5 \cdot 10^{-9}$ Кл.

2. Заряд конденсатора $q = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл. Емкость конденсатора $C = 10$ пФ. Определите скорость, которую приобретает электрон, пролетая в конденсаторе путь от одной пластины к другой. Начальная скорость электрона равна нулю. Удельный заряд электрона $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Решение. Начальная кинетическая энергия электрона равна нулю, а конечная равна $W_{\kappa} = \frac{mv^2}{2}$. Применим закон сохранения энергии

$$\frac{mv^2}{2} - 0 = A,$$

где A — работа поля конденсатора:

$$A = |e| U, \quad U = \frac{q}{C}.$$

Следовательно,

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{|e|q}{C}.$$

Окончательно

$$v = \sqrt{\frac{2|e|q}{mC}} \approx 10^7 \text{ м/с.}$$



УПРАЖНЕНИЕ 18

1. Разность потенциалов между обкладками конденсатора емкостью $0,1$ мкФ изменилась на 175 В. Определите изменение заряда конденсатора.

2. В пространство между пластинами плоского конденсатора влетает электрон со скоростью $2 \cdot 10^7$ м/с, направленной параллельно пластинам конденсатора. На какое расстояние по направлению к положительно заряженной пластине сместится электрон за время движения внутри конденсатора, если длина конденсатора равна $0,05$ м и разность потенциалов между пластинами 200 В? Расстояние между пластинами конденсатора равно $0,02$ м. Отношение заряда электрона к его массе равно $1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

3. Плоский конденсатор зарядили при помощи источника тока напряжением $U = 200$ В. Затем конденсатор был отключен от этого источника тока. Каким станет напряжение U_1 между пластинами, если расстояние между ними увеличить от первоначального $d = 0,2$ мм до $d_1 = 0,7$ мм?

Глава 14. КРАТКИЕ ИТОГИ

В природе существуют только два вида электрических зарядов. Если два заряженных тела отталкиваются друг от друга, но одно из них притягивается к третьему телу, это означает, что третье тело несет заряд противоположного знака. Мы можем абсолютно точно утверждать, что и второе тело, из первых двух, будет притягиваться к третьему телу.

Неподвижные точечные электрические заряды q_1 и q_2 взаимодействуют в вакууме согласно закону Кулона с силой

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

где коэффициент $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$. Заряд выражается в кулонах.

В изолированной системе заряженных тел заряд сохраняется.

Взаимодействие зарядов осуществляется посредством электрического поля. Напряженность поля \vec{E} определяет силу, действующую на заряд: $\vec{F} = q\vec{E}$. Напряженности полей, созданных отдельными зарядами, складываются геометрически (принцип суперпозиции).

Напряженность электрического поля точечного заряда в вакууме равна:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}.$$

В проводниках имеются свободные электрические заряды. Напряженность поля и электрический заряд внутри проводника равны нулю (в электростатике).

В диэлектриках все заряды связаны внутри отдельных атомов или молекул. Диэлектрик ослабляет электрическое поле.

Электростатическое поле потенциально, его работа не зависит от формы траектории заряда и равна изменению его потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком: $A = -\Delta W_n$.

Потенциальная энергия заряда q в однородном поле: $W_n = qEd$, где d — расстояние от плоскости, на которой потенциальная энергия принимается равной нулю.

Потенциалом электрического поля называют отношение потенциальной энергии заряда в поле к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_n}{q}.$$

Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками равна отношению работы поля при перемещении заряда из начальной точки в конечную к этому заряду: $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$. Разность потенциалов выражается в вольтах, $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}$.

Напряженность поля связана с разностью потенциалов формулой

$$E = \frac{U}{\Delta d},$$

где U — разность потенциалов между двумя точками на одной силовой линии, находящимися на малом расстоянии Δd друг от друга.

Способность проводников накапливать электрический заряд характеризуют электроемкостью. Электроемкость двух проводников равна:

$$C = \frac{q}{U},$$

где q — заряд одного из проводников (на другом проводнике такой же заряд противоположного знака), а U — разность потенциалов между проводниками.

Электроемкость выражается в фарадах, $1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$.

Наибольший заряд накапливается в конденсаторах — системах двух проводников, размеры которых много больше расстояния между ними.

Энергия заряженного конденсатора

$$W_{\text{н}} = \frac{qU}{2}.$$

* * *

Мы потратили довольно много времени на изучение электричества, а рассмотрели лишь простейший частный случай неподвижных заряженных тел — электростатику.

Может быть, не стоило уделять электростатике такое большое внимание? Нет, стоило! Мы ведь ввели важнейшие понятия, используемые во всей электродинамике: электрический заряд, электрическое поле, потенциал и разность потенциалов, электроемкость, энергия электрического поля.

На простом частном случае выяснить суть этих фундаментальных понятий не так трудно, как в общем случае движущихся зарядов.

Теперь перейдем к изучению электромагнитных процессов, наблюдаемых при движении заряженных частиц.