

2. Чтобы в воздухе при атмосферном давлении проскочила искра, в нём должно быть электростатическое поле, модуль напряжённости которого не менее  $E = 3,00$ . Определите разность потенциалов между облаком и поверхностью Земли во время грозы, если длина «искры» — молнии —  $d = 480$  м.

3. Напряжение между двумя точками, расположенными на одной линии напряжённости однородного электростатического поля,  $U = 4,8$  кВ. Определите модуль напряжённости поля, если расстояние между точками  $d = 12$  см.

4. Напряжение между двумя точками, находящимися на одной линии напряжённости однородного электростатического поля на расстоянии  $r_1 = 1,5$  см друг от друга,  $U_{12} = 18$  В. Определите напряжение между двумя точками, расположенными на этой же линии напряжённости на расстоянии  $r_2 = 20$  см друг от друга.

5. Пылинка массой  $m = 4,0 \cdot 10^{-9}$  кг находится во взвешенном состоянии между разноимённо заряженными горизонтальными пластинами, напряжение между которыми  $U = 12$  В, а расстояние  $d = 4,0$  см. Определите электрический заряд пылинки.



§ 22-1  
§ 22-2  
§ 22-3

6. Электрон из состояния покоя ускоряется в электростатическом поле, двигаясь из точки 1 в точку 2. Определите напряжение между этими точками, если модуль скорости движения электрона в точке 2 составляет  $v_2 = 2,7 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Масса электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

## § 23. Конденсаторы. Электроёмкость конденсатора. Электроёмкость плоского конденсатора

*Во многих электротехнических и радиотехнических приборах используют устройства, способные при малых размерах накапливать значительные разноимённые электрические заряды и связанную с ними электрическую энергию. Какие это устройства и от чего зависят накопленные ими заряды и запасённая энергия?*

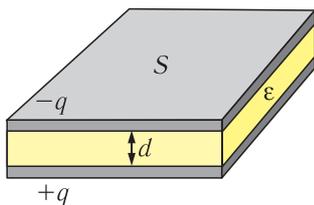


Рис. 119

**Конденсаторы.** Для накопления значительных разноимённых зарядов используют устройство, называемое *конденсатором* (от лат. *condensator*, буквально — тот, кто уплотняет, сгущает). Простейший конденсатор — система, состоящая из двух проводников, разделённых слоем диэлектрика, толщина  $d$  которого мала по сравнению с размерами проводников (рис. 119). Проводники, образующие конденсатор, называют его *обкладками*.

На обкладках конденсатора накапливаются противоположные по знаку электрические заряды, модули которых равны. Процесс накопления зарядов на обкладках называют *зарядкой конденсатора*, а процесс нейтрализации зарядов при соединении обкладок конденсатора проводником — *разрядкой конденсатора*. Модуль заряда, находящегося на одной из обкладок конденсатора, называют *зарядом конденсатора*.



### Из истории физики

В 1745—1746 гг. немецкий физик Эвальд фон Клейст (1700—1748) и нидерландский физик Питер ван Мушенбрук (1692—1761) независимо друг от друга изобрели первый конденсатор — лейденскую банку. Изобретение конденсатора способствовало изучению электрических явлений, так как позволило накапливать большие электрические заряды.

### Интересно знать

Широко распространённый тип конденсаторов представляют собой две ленты металлической фольги, разделённые тонкой парафинированной бумагой, полистиролом, слюдой или другим диэлектриком, которые свёрнуты в тугую рулон и запаяны (рис. 120). Используют и так называемые воздушные конденсаторы, в которых изолирующим слоем, отделяющим проводники, является воздух.

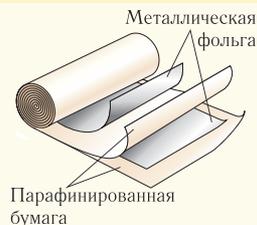


Рис. 120

**Электроёмкость конденсатора.** В процессе зарядки простейшего конденсатора его обкладки приобретают противоположные по знаку заряды  $q$  и  $-q$ , модули которых равны. Эти заряды создают между обкладками электростатическое поле, линии напряжённости которого начинаются на положительно заряженной обкладке и заканчиваются на отрицательно заряженной. Многочисленные эксперименты свидетельствуют, что при неизменных размерах и форме проводников (обкладок конденсатора), а также диэлектрических свойствах среды, в которой они находятся, сохраняется прямая пропорциональная зависимость между зарядом конденсатора и напряжением между его обкладками.

Следовательно, величина, равная отношению  $\frac{q}{U}$  заряда конденсатора к напряжению между его обкладками, является постоянной для данного конденсатора и не зависит ни от заряда, ни от напряжения. Эту величину назвали *электрической ёмкостью*  $C$  (электроёмкостью). Электроёмкость количественно характеризует способность конденсатора накапливать электрические заряды.

**Электрическая ёмкость конденсатора** — физическая скалярная величина, равная отношению заряда конденсатора к напряжению между его обкладками:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (23.1)$$

Проанализировав формулу (23.1), можно сделать вывод: чем меньше напряжение  $U$  на обкладках конденсатора при сообщении им зарядов  $q$  и  $-q$ , тем больше электроёмкость конденсатора.

Единицей электрической ёмкости в СИ является фарад (Ф).

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

1 Ф — очень большая электроёмкость. Электроёмкостью  $C = 1 \text{ Ф}$  обладал бы находящийся в вакууме уединённый шар радиусом  $R = 9 \cdot 10^9 \text{ м}$  (для сравнения: радиус земного шара  $R_3 = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ ). Поэтому на практике применяют дольные единицы: микрофарад ( $1 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ), нанофарад ( $1 \text{ нФ} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ ) и пикофарад ( $1 \text{ пФ} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ ).

Например, электроёмкость такого огромного проводника, как земной шар, равна  $C = 0,71 \text{ мФ}$ , а электроёмкость человеческого тела примерно  $C = 50 \text{ пФ}$ .

### От теории к практике

1. Изменится ли электроёмкость конденсатора, если: а) увеличить напряжение между его обкладками; б) уменьшить заряд конденсатора?
2. Электроёмкость конденсатора  $C = 10 \text{ нФ}$ . Каков заряд конденсатора, если напряжение между его обкладками  $U = 150 \text{ В}$ ?

### Из истории физики

В XVII—XVIII вв. учёные рассматривали электричество как «нематериальную жидкость». Эта «жидкость» могла «вливаться» в проводник и «выливаться» из него. Так появился термин «электрическая ёмкость».

### Интересно знать

На схемах номинальную электроёмкость конденсаторов обычно указывают в микрофарадах и пикофарадах. Однако реальная электроёмкость конденсатора может значительно меняться в зависимости от многих факторов. Другой, не менее важной,

характеристикой конденсаторов является номинальное напряжение — значение напряжения, обозначенное на конденсаторе, при котором его можно использовать в заданных условиях в течение срока службы. Это напряжение может находиться в пределах от нескольких вольт до нескольких сотен киловольт. Номинальное напряжение зависит от конструкции конденсатора и свойств применяемых материалов. Для многих типов конденсаторов с увеличением температуры допустимое напряжение уменьшается.

### Электроёмкость плоского конденсатора.

Если обкладками конденсатора являются две одинаковые параллельные друг другу пластины, то конденсатор называют *плоским*. Электростатическое поле заряженного плоского конденсатора в основном сосредоточено между его обкладками и является практически однородным. Вблизи краёв пластин однородность поля нарушается, однако этим часто пренебрегают, когда расстояние между пластинами значительно меньше их размеров (рис. 121).

Чтобы установить, от чего зависит электроёмкость плоского конденсатора, проведём несколько опытов. В качестве обкладок конденсатора используем две металлические пластины, расположенные в воздухе на некотором расстоянии параллельно друг другу. Соединим стержень электрометра с одной из пластин, а его корпус с другой (рис. 122). Зарядим конденсатор, подключив его к источнику тока на некоторый промежуток времени. Когда между пластинами конденсатора возникнет напряжение (стрелка электрометра отклонится), отключим его от источника тока.

Если перемещать пластины относительно друг друга, уменьшая площадь их взаимного перекрытия при неизменном расстоянии между ними, то показания электрометра при этом увеличиваются, хотя сообщённый пластинам при зарядке конденсатора заряд не изменяется. Так как напряжение между пластинами увеличивается при уменьшении площади перекрытия пластин конденсатора, то его электроёмкость должна уменьшаться ( $S \downarrow \Rightarrow C \downarrow$ ).

Увеличивая расстояние между пластинами конденсатора, не меняя площади их перекрытия, будем наблюдать возрастание показаний электрометра, т. е. увеличение напряжения между пластинами конденсатора, что возможно при уменьшении его электроёмкости. Значит, чем больше расстояние между пластинами конденсатора, тем меньше его электроёмкость ( $d \uparrow \Rightarrow C \downarrow$ ).

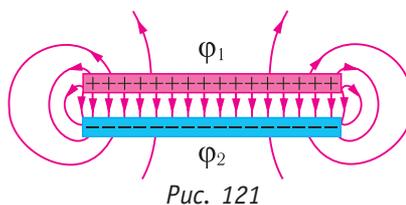


Рис. 121

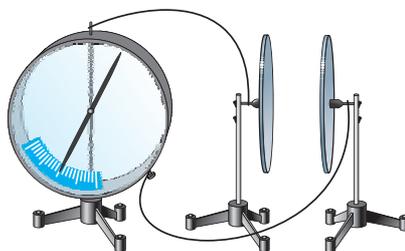


Рис. 122

Если между обкладками конденсатора поместить пластину из диэлектрика, например из стекла, то показания электромметра уменьшатся. Напряжение между обкладками в этом случае уменьшается, следовательно, электроёмкость конденсатора увеличивается ( $\epsilon \uparrow \Rightarrow C \uparrow$ ).

В СИ коэффициентом пропорциональности между электроёмкостью конденсатора и определяющими её величинами ( $S$ ,  $d$ ,  $\epsilon$ ) является электрическая постоянная  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ .

Результаты экспериментов позволяют записать формулу для определения электроёмкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

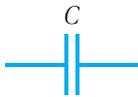


Рис. 123

где  $S$  — площадь одной из обкладок конденсатора (площадь взаимного перекрытия обкладок конденсатора);  $d$  — расстояние между обкладками;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды, находящейся между его обкладками.

Условное изображение конденсатора постоянной электроёмкости на электрических схемах представлено на рисунке 123.

### От теории к практике

1. Один из двух уединённых проводящих шаров сплошной, а второй — имеет внутри полость. Если диаметры шаров одинаковые, то какой из них имеет большую электроёмкость?
2. Расстояние между обкладками плоского воздушного конденсатора уменьшили в два раза. Если при этом заряд конденсатора остался прежним, то изменились ли напряжение между его обкладками и напряжённость поля? Если изменились, то как?

### Интересно знать

Зависимость электроёмкости конденсатора от расстояния между его обкладками используют в схемах кодирования клавиатуры персонального компьютера. Под каждой клавишей находится конденсатор, электроёмкость которого изменяется при нажатии на клавишу. Микросхема, подключённая к каждой клавише, при изменении электроёмкости выдаёт кодированный сигнал, соответствующий данной букве (рис. 124).

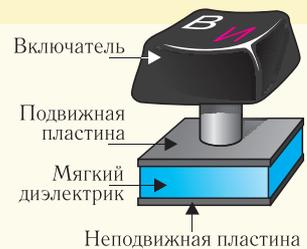


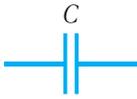
Рис. 124



Электрическая ёмкость конденсатора — физическая скалярная величина, равная отношению заряда конденсатора к напряжению между его обкладками:

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

Условное обозначение:



Электроёмкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

Зависит от площади взаимного перекрытия обкладок, расстояния между ними и диэлектрической проницаемости среды, находящейся между обкладками.



1. Что представляет собой конденсатор? Каково его назначение?
2. Какой процесс называют зарядкой конденсатора? разрядкой конденсатора?
3. Что понимают под зарядом конденсатора?
4. Какую физическую величину называют электроёмкостью конденсатора? В каких единицах её измеряют?
5. От чего зависит электроёмкость плоского конденсатора?
6. Плоский воздушный конденсатор присоединён к источнику постоянного тока. Изменятся ли заряд конденсатора и напряжение на нём, если пространство между обкладками конденсатора заполнить диэлектриком?

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Плоскому конденсатору электроёмкостью  $C = 0,4$  мкФ сообщён электрический заряд  $q = 2$  нКл. Определите модуль напряжённости электростатического поля между обкладками конденсатора, если расстояние между ними  $d = 5$  мм.

Дано:

$$C = 0,4 \text{ мкФ} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

$$q = 2 \text{ нКл} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$d = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$E$  — ?

Решение. Модуль напряжённости однородного электростатического поля определим по формуле  $E = \frac{U}{d}$ . Так как напряжение между обкладками конденсатора:  $U = \frac{q}{C}$ , то  $E = \frac{q}{Cd}$ .

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Ответ:  $E = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$

**Пример 2.** Пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено диэлектриком. Конденсатор зарядили до напряжения  $U_1 = 1$  кВ и отключили от источника тока. Определите диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если после его удаления из конденсатора напряжение увеличилось до  $U_2 = 3$  кВ.

Дано:

$$U_1 = 1 \text{ кВ} = 1 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$U_2 = 3 \text{ кВ} = 3 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$\varepsilon_2 = 1$$

$$\varepsilon_1 = ?$$

Решение. В обоих случаях заряд конденсатора будет одинаковым  $q_1 = q_2$ , так как он отключён от источника тока. Поскольку  $q_1 = C_1 U_1$ ,  $q_2 = C_2 U_2$ , то

$$C_1 U_1 = C_2 U_2. \quad (1)$$

Ёмкость плоского конденсатора определяют по формуле

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}.$$

Для рассматриваемых случаев ёмкости соответственно равны:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{d}, \quad C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S}{d}. \quad (2)$$

Подставив формулы (2) в равенство (1), получим:  $\varepsilon_1 U_1 = \varepsilon_2 U_2$ ,  $\varepsilon_1 = \frac{U_2}{U_1} \varepsilon_2$ .

$$\varepsilon_1 = \frac{3 \cdot 10^3 \text{ В}}{1 \cdot 10^3 \text{ В}} \cdot 1 = 3.$$

Ответ:  $\varepsilon_1 = 3.$

### Упражнение 17

1. Определите ёмкость конденсатора, если напряжение между его обкладками  $U = 20$  В, а заряд  $q = 5,0 \cdot 10^{-4}$  Кл.

2. Ёмкость плоского воздушного конденсатора  $C = 54$  пФ. Определите расстояние между его обкладками, если площадь их перекрытия  $S = 300 \text{ см}^2$ .

3. Определите, как изменится ёмкость плоского конденсатора, если площадь перекрытия его обкладок увеличить в  $\alpha = 2$  раза, а расстояние между ними уменьшить в  $\beta = 3$  раза.

4. Обкладки плоского конденсатора площадью  $S = 100 \text{ см}^2$  каждая расположены на расстоянии  $d = 2,0 \text{ мм}$ . Пространство между ними заполнено слюдой, диэлектрическая проницаемость которой  $\epsilon = 6,0$ . Определите заряд конденсатора, если напряжение между его обкладками  $U = 3,0 \text{ кВ}$ .

5. Определите модуль напряжённости электростатического поля между обкладками плоского воздушного конденсатора, заряд которого  $q = 20 \text{ нКл}$ , а площадь перекрытия обкладок  $S = 50 \text{ см}^2$ .

6. Модуль напряжённости электростатического поля в пространстве между обкладками плоского воздушного конденсатора  $E_1 = 2,1 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ . Не отключая конденсатор от источника тока, расстояние между его обкладками уменьшили в  $\alpha = 4,0$  раза. Определите модуль напряжённости поля после сближения обкладок.

7. Капля, масса которой  $m = 1,5 \text{ г}$ , находится в равновесии между горизонтально расположенными обкладками плоского воздушного конденсатора, заряженного до напряжения  $U = 500 \text{ В}$ . Определите расстояние между обкладками, если заряд капли  $q = 0,15 \text{ мкКл}$ .



§ 23-1

## § 24. Энергия электростатического поля конденсатора

*Процесс зарядки конденсатора можно представить как перенос заряда  $q$  с одной обкладки на другую, в результате чего одна из них приобретает заряд  $-q$ , а другая —  $+q$ . Работа, совершённая при этом внешней силой, равна энергии электростатического поля заряженного конденсатора.*

Убедиться в том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно на опыте. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, конденсатора и электрической лампы. Схема цепи представлена на рисунке 125. Зарядим конденсатор, подсоединив его к источнику тока. Затем, отключив конденсатор от источника тока, подсоединим его к лампе. При этом наблюдаем кратковременную вспышку света. В данном случае во время разрядки конденсатора энергия, запасённая им при зарядке, превращается во внутреннюю энергию спирали лампы, часть этой энергии расходуется на излучение света. При прохождении электрического тока по цепи с источником тока конденсатор заряжался, т. е. на его обкладках накапливались электрические заряды. При этом в окружающем конденсатор пространстве возникло электростатическое поле. Суммарный электрический заряд обеих обкладок

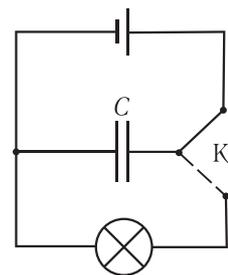


Рис. 125



конденсатора до его зарядки, во время зарядки и после разрядки конденсатора равен нулю. Единственное изменение, которое произошло при разрядке конденсатора, заключается в том, что исчезло электростатическое поле, которое создавалось зарядами обеих обкладок конденсатора. Следовательно, энергией обладало электростатическое поле, образованное зарядами обкладок заряженного конденсатора.

Расчёты подтверждают, что формулу для определения энергии электростатического поля заряженного конденсатора можно записать в виде:

$$W = \frac{qU}{2}, \text{ или } W = \frac{CU^2}{2}, \text{ или } W = \frac{q^2}{2C}.$$

### От теории к практике

Как изменится энергия электростатического поля заряженного конденсатора при увеличении расстояния между его обкладками, если: а) конденсатор отключён от источника тока; б) конденсатор подключён к источнику тока?

**Применение конденсаторов.** Конденсаторы находят широкое применение в электротехнике, радиотехнической и телевизионной аппаратуре, радиолокационной технике, телефонии, технике счётно-решающих устройств, лазерной технике, электроэнергетике (например, для улучшения коэффициента мощности промышленных установок, регулирования напряжения в распределительных сетях, в устройствах освещения люминесцентными лампами), металлопромышленности (например, для плавки и термической обработки металлов), добывающей промышленности (например, в электровзрывных устройствах), медицинской технике (например, в рентгеновской аппаратуре, приборах электротерапии), фототехнике (для получения вспышки света при фотографировании).

В связи с этим наряду с миниатюрными конденсаторами (рис. 126, а), имеющими массу менее грамма и размеры порядка нескольких миллиметров, существуют конденсаторы с массой в несколько тонн (рис. 126, б).



б

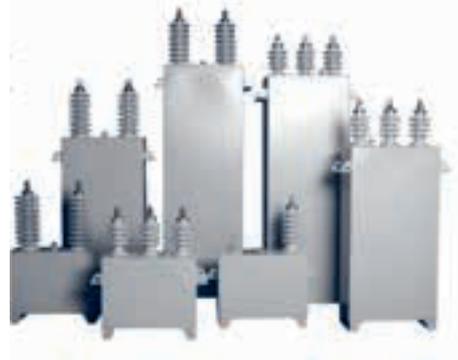


Рис. 126



### Энергия электростатического поля конденсатора

$$W = \frac{qU}{2}$$

$$q = CU$$

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

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

$$W = \frac{q^2}{2C}$$



1. Какие факты позволяют сделать вывод, что электростатическое поле обладает энергией?
2. Как можно убедиться в том, что заряженный конденсатор обладает энергией?
3. Как можно рассчитать энергию электростатического поля заряженного конденсатора?



### Примеры решения задач

**Пример 1.** Определите, как и во сколько раз изменится энергия электростатического поля заряженного плоского воздушного конденсатора, если пространство между его обкладками заполнить керосином, диэлектрическая проницаемость которого  $\epsilon_2 = 2$ . Рассмотрите случаи: а) конденсатор отключён от источника тока; б) конденсатор подключён к источнику тока.

Дано:  
 $\epsilon_1 = 1$   
 $\epsilon_2 = 2$

$\frac{W_2}{W_1} = ?$

Решение. Электроёмкость воздушного конденсатора

$C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ . Электроёмкость этого конденсатора после заполнения пространства между обкладками керосином

$C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S}{d}$ . Следовательно,  $C_2 = \epsilon_2 C_1$ .

В случае а) конденсатор отключён от источника тока, поэтому  $q_2 = q_1$ . Тогда, если энергия электростатического поля воздушного конденсатора  $W_1 = \frac{q^2}{2C_1}$ , то энергия электростатического поля этого конденсатора, заполненного керосином:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{q^2}{2\epsilon_2 C_1} = \frac{W_1}{\epsilon_2}.$$

Таким образом, энергия электростатического поля уменьшилась в 2 раза.

В случае б) конденсатор не отключён от источника тока, поэтому напряжение между его обкладками равно напряжению между полюсами источника тока  $U_2 = U_1 = U$ . Тогда, если энергия электростатического поля воздушного конденсатора  $W_1 = \frac{C_1 U^2}{2}$ , то энергия электростатического поля этого конденсатора, заполненного керосином:

$$W_2 = \frac{C_2 U^2}{2} = \frac{\epsilon_2 C_1 U^2}{2} = \epsilon_2 W_1.$$

Таким образом, энергия электростатического поля увеличилась в 2 раза.

*Ответ:* а) энергия электростатического поля уменьшилась в 2 раза; б) энергия электростатического поля увеличилась в 2 раза.

**Пример 2.** Плоский воздушный конденсатор, площадь перекрытия обкладок которого  $S = 100 \text{ см}^2$ , поместили в керосин с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,0$  и подключили к источнику тока с напряжением на полюсах  $U = 120 \text{ В}$ . Определите минимальную работу, которую необходимо совершить внешней силе, чтобы после отключения конденсатора от источника тока медленно увеличить расстояние между его обкладками от  $d_1 = 1,0 \text{ см}$  до  $d_2 = 2,0 \text{ см}$ .

Дано:

$$S = 100 \text{ см}^2 = 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\epsilon = 2,0$$

$$U = 120 \text{ В}$$

$$d_1 = 1,0 \text{ см} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d_2 = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$A_{\text{внеш}}^{\text{min}} \text{ — ?}$$

Решение. Модуль заряда каждой из обкладок конденсатора

$$q = C_1 U = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U}{d_1}.$$

Энергия электростатического поля конденсатора до изменения расстояния между его обкладками

$$W_1 = \frac{qU}{2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d_1}.$$

После отключения конденсатора от источника тока заряды на его обкладках не изменяются.

Энергию электростатического поля конденсатора после увеличения расстояния между его пластинами определим следующим образом:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{(\epsilon \epsilon_0 S U)^2 d_2}{2d_1^2 \epsilon \epsilon_0 S} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2 d_2}{2d_1^2}.$$

Минимальная работа, которую необходимо совершить внешней силе, чтобы увеличить расстояние между обкладками конденсатора, равна приращению энергии электростатического поля конденсатора, так как при медленном увеличении расстояния между обкладками конденсатора их кинетическая энергия остаётся близкой к нулю.

$$A_{\text{внеш}}^{\min} = W_2 - W_1 = \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2 d_2}{2d_1^2} - \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2}{2d_1} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2}{2d_1} \left( \frac{d_2}{d_1} - 1 \right).$$

$$A_{\text{внеш}}^{\min} = \frac{2,0 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 120^2 \text{ В}^2}{2 \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \cdot \left( \frac{2,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}}{\text{м}}}{1,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}}{\text{м}}} - 1 \right) =$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 0,13 \text{ мкДж}.$$

Ответ:  $A_{\text{внеш}}^{\min} = 0,13 \text{ мкДж}$ .

### Упражнение 18

1. Определите энергию электростатического поля конденсатора ёмкостью  $C = 0,20 \text{ мкФ}$ , если напряжение на нём  $U = 200 \text{ В}$ .

2. Модуль напряжённости однородного электростатического поля между обкладками плоского воздушного конденсатора  $E = 200 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ . Определите расстояние между обкладками, если площадь их перекрытия  $S = 100 \text{ см}^2$ , а энергия электростатического поля конденсатора  $W = 35,4 \text{ мкДж}$ .

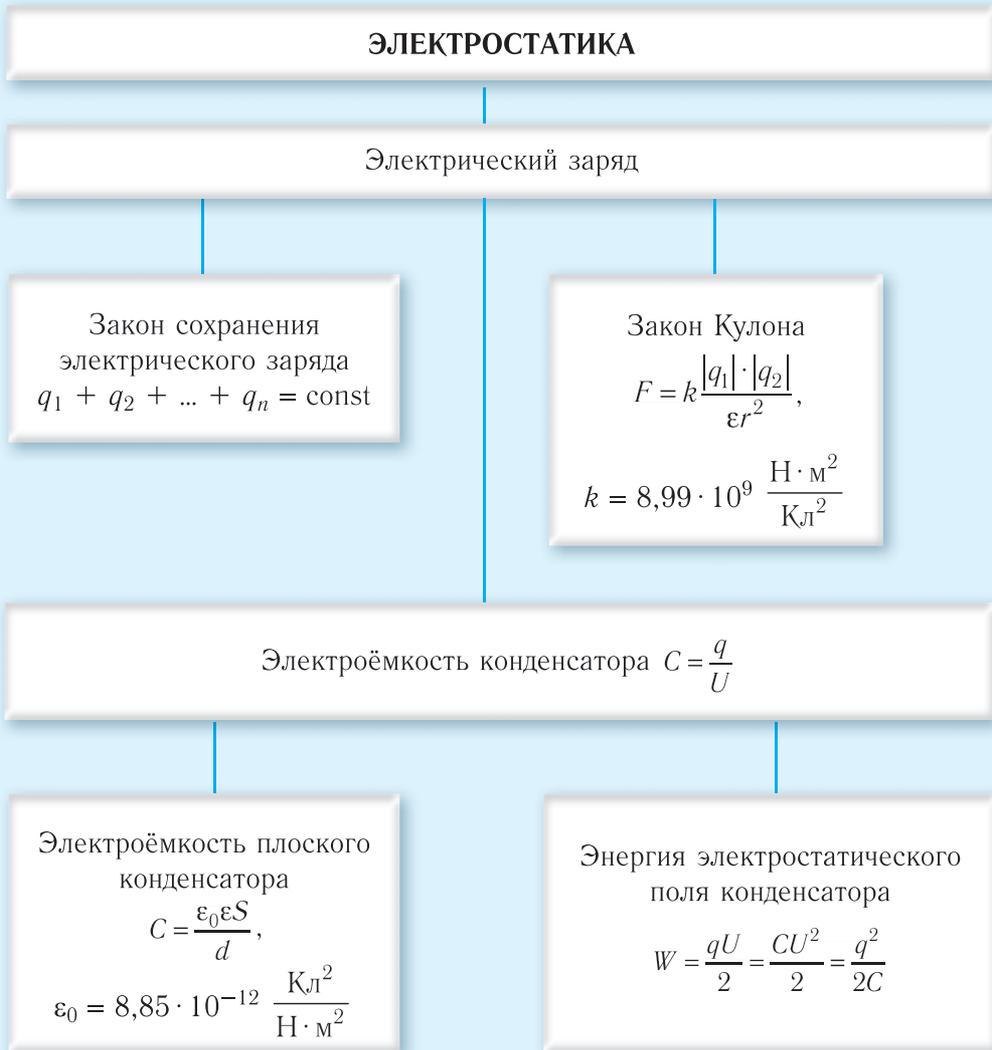
3. Энергия электростатического поля заряженного плоского конденсатора  $W_1 = 5 \text{ мкДж}$ , если между его обкладками находится керосин, диэлектрическая проницаемость которого  $\epsilon_1 = 2$ . Определите энергию поля этого конденсатора, если пространство между его обкладками будет заполнено маслом, диэлектрическая проницаемость которого  $\epsilon_2 = 2,5$ .

4. Плоский конденсатор, площадь перекрытия обкладок которого  $S = 40 \text{ см}^2$ , а расстояние между ними  $d = 8,0 \text{ мм}$ , заполнен трансформаторным маслом с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,5$ . Определите энергию и модуль напряжённости электростатического поля конденсатора, если напряжение на нём  $U = 200 \text{ В}$ .

5. Плоский конденсатор подключили к источнику тока и зарядили до напряжения  $U_1 = 220 \text{ В}$ . Отключив конденсатор от источника тока, увеличили расстояние между его обкладками от  $d_1 = 1,0 \text{ см}$  до  $d_2 = 3,0 \text{ см}$ . Определите модуль напряжённости электростатического поля и напряжение между обкладками конденсатора после того, как их раздвинули.



## Обобщение и систематизация знаний





### Задания для самоконтроля

1. Эбонитовая палочка, потёртая о шерсть, получила электрический заряд  $q = -8 \cdot 10^{-14}$  Кл. Выберите верное утверждение.

- 1) На шерсть с эбонитовой палочки перешло  $8 \cdot 10^{14}$  электронов.
- 2) На эбонитовую палочку с шерсти перешло  $8 \cdot 10^{14}$  электронов.
- 3) На шерсть с эбонитовой палочки перешло  $5 \cdot 10^5$  электронов.
- 4) На эбонитовую палочку с шерсти перешло  $5 \cdot 10^5$  электронов.
- 5) На шерсть с эбонитовой палочки перешло  $8 \cdot 10^5$  электронов.
- 6) На эбонитовую палочку с шерсти перешло  $8 \cdot 10^5$  электронов.

2. Металлический шар, заряд которого  $q = -4,8 \cdot 10^{-11}$  Кл, привели в соприкосновение с таким же незаряженным шаром. Определите число избыточных электронов, оставшихся на первом шаре.

3. Определите, как и во сколько раз изменится модуль сил электростатического взаимодействия шариков, если заряд одного из них увеличить в  $\alpha = 5,0$  раза, а расстояние между ними уменьшить в  $\beta = 2,0$  раза.

4. Точечные заряды  $Q_1 = 50$  нКл и  $Q_2 = 80$  нКл закреплены на расстоянии  $r = 2,0$  м друг от друга в вакууме. В точке пространства, находящейся на середине отрезка прямой, соединяющей заряды, расположен третий точечный заряд  $Q_3 = 1,0$  нКл. Определите результирующую электростатическую силу, действующую на третий заряд.

5. Два маленьких шарика массой  $m = 0,04$  кг каждый подвешены в одной точке на нитях длиной  $l = 0,2$  м. При сообщении шарикам одинаковых зарядов нити разошлись на угол  $\alpha = 60^\circ$ . Определите модуль зарядов шариков.

6. Точечные заряды закреплены в пространстве относительно оси  $Ox$  (рис. 127). Определите координату точки, в которой напряжённость результирующего электростатического поля, создаваемого этими зарядами, принимает нулевое значение.

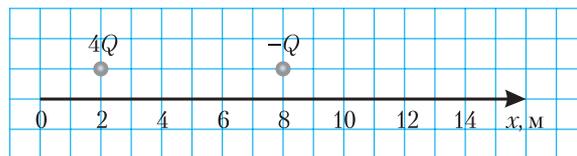


Рис. 127

7. Шарик, масса и заряд которого  $m = 0,040$  г и  $q = 34$  пКл соответственно, подвешен на шёлковой нити. Шарик помещают в электростатическое поле, напряжённость которого одинакова во всех точках поля и направлена горизонтально. Определите угол  $\alpha$  отклонения нити с шариком от вертикали, если модуль напряжённости поля  $E = 1,01 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ .

8. Расстояние между точечными зарядами  $Q_1 = 3,2 \cdot 10^{-9}$  Кл и  $Q_2 = -3,2 \cdot 10^{-9}$  Кл составляет  $r_0 = 12$  см. Определите модуль напряжённости электростатического поля в точках, удалённых от обоих зарядов на расстояние  $r = 8,0$  см.

9. В двух вершинах равностороннего треугольника со стороной длиной  $a = 25$  см находятся заряды, модули которых  $|Q_1| = |Q_2| = 5,0$  нКл. Определите потенциал поля в третьей вершине треугольника, если: а) оба заряда положительные; б) оба заряда отрицательные; в) заряды противоположных знаков.

10. Электрон, двигаясь в однородном поле, модуль напряжённости которого  $E = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ , переместился на расстояние  $d = 25$  см. Определите изменение потенциальной и кинетической энергий электрона, если направление движения электрона: а) совпадает с направлением линий напряжённости поля; б) противоположно направлению линий напряжённости поля; в) перпендикулярно направлению линий напряжённости поля.

11. Электрон и протон из состояния покоя ускоряются в одном и том же однородном электростатическом поле до скоростей, модули которых значительно меньше скорости света. Определите отношение модуля скорости электрона к модулю скорости протона после прохождения ими одинаковых расстояний. Масса электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, а масса протона  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг.

12. Два противоположных по знаку точечных заряда, модули которых равны, находятся в воздухе. В точке пространства, находящейся на продолжении прямой, соединяющей заряды, и расположенной на расстояниях  $r_1 = 10$  мм и  $r_2 = 30$  мм от зарядов, потенциал электростатического поля  $\varphi = 75$  мВ. Определите модуль напряжённости результирующего поля в этой точке.

13. Расстояние между точками  $A$  и  $B$  однородного электростатического поля (рис. 128), модуль напряжённости которого  $E = 40 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ , составляет  $r = 4,0$  см. Определите напряжение между этими точками.

14. Два маленьких шарика, электрические заряды которых  $q_1 = 3,20$  нКл и  $q_2 = 7,20$  нКл, находятся на расстоянии  $r_1 = 40,0$  см друг от друга. Определите минимальное значение работы, которую надо совершить, чтобы сблизить шарики до расстояния  $r_2 = 25,0$  см.

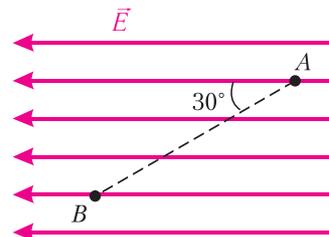


Рис. 128

15. Модули сил электростатического взаимодействия точечных зарядов, находящихся на расстоянии  $r_1 = 20,0$  см в воздухе,  $F_1 = F_2 = F = 90,0$  мкН, а модули сил электростатического взаимодействия этих же зарядов в некоторой среде на расстоянии  $r_2 = 40,0$  см составляют  $F'_1 = F'_2 = F' = 10,0$  мкН. Определите диэлектрическую проницаемость среды.

16. В однородном электростатическом поле, напряжённость которого направлена вертикально вверх, а её модуль  $E = 8,0 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ , на лёгкой непроводящей нити подвешен незаряженный шарик. Определите, во сколько раз изменится модуль силы упругости нити после сообщения шарикау заряда  $q = -1,8 \cdot 10^{-10}$  Кл, если его масса  $m = 1,2$  мг.

17. Модуль напряжённости однородного электростатического поля  $E = 120 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ . Определите, за какой промежуток времени электрон, начиная двигаться из состояния покоя, совершит в этом поле перемещение, модуль которого  $\Delta r = 30$  мм. Излучением электромагнитной энергии пренебечь.

18. На рисунке 129 представлен график зависимости напряжения между обкладками конденсатора от модуля заряда на них. Определите электроёмкость конденсатора.

19. Плоский воздушный конденсатор заменили другим конденсатором такой же электрической ёмкости. У второго конденсатора площадь обкладок в  $\alpha = 4$  раза меньше площади обкладок первого. Определите диэлектрическую проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между обкладками второго конденсатора, если расстояния между обкладками у конденсаторов одинаковые.

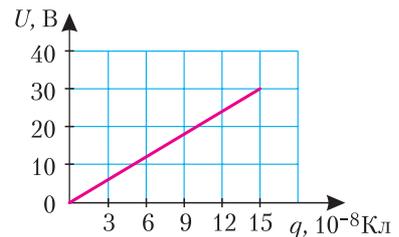


Рис. 129

20. Между обкладками плоского конденсатора находится диэлектрик, диэлектрическая проницаемость которого  $\epsilon = 2,0$ . Конденсатор зарядили до напряжения  $U_1 = 1,4$  кВ, после чего отключили от источника тока. Механическая работа, которую необходимо совершить против электрических сил, чтобы извлечь диэлектрик из конденсатора,  $A_{\text{внеш}} = 10$  Дж. Определите электроёмкость конденсатора в отсутствие диэлектрика.

