

## Примеры решения задач по теме

### «Электроёмкость. Энергия заряженного конденсатора»

«Электроёмкость» — последняя тема раздела «Электростатика». При решении задач на эту тему могут потребоваться все сведения, полученные при изучении электростатики: закон сохранения электрического заряда, понятия напряжённости поля и потенциала, сведения о поведении проводников в электростатическом поле, о напряжённости поля в диэлектриках, о законе сохранения энергии применительно к электростатическим явлениям. Основной формулой при решении задач на электроёмкость является формула (14.22).

*Задача 1.* Электроёмкость конденсатора, подключённого к источнику постоянного напряжения  $U = 1000$  В, равна  $C_1 = 5$  пФ. Расстояние между его обкладками уменьшили в  $n = 3$  раза. Определите изменение заряда на обкладках конденсатора и энергии электрического поля.

**Решение.** Согласно формуле (14.22) заряд конденсатора  $q = CU$ . Отсюда изменение заряда  $\Delta q = (C_2 - C)U = (nC_1 - C_1)U = (n - 1)C_1U = 10^{-8}$  Кл.

Изменение энергии электрического поля

$$\Delta W_{\text{п}} = W_{\text{п}2} - W_{\text{п}1} = \frac{q_2 U}{2} - \frac{q_1 U}{2} = \frac{(q_2 - q_1)U}{2} = \frac{(n - 1)C_1 U^2}{2} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

*Задача 2.* Заряд конденсатора  $q = 3 \cdot 10^{-8}$  Кл. Ёмкость 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  $W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$ . Применим закон сохранения

энергии  $\frac{mv^2}{2} - 0 = A$ , где  $A$  — работа электрического поля

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

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

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

*Задача 3.* Четыре конденсатора ёмкостями  $C_1 = C_2 = 1 \text{ мкФ}$ ,  $C_3 = 3 \text{ мкФ}$ ,  $C_4 = 2 \text{ мкФ}$  соединены, как показано на рисунке 14.46. К точкам А и В подводится напряжение  $U = 140 \text{ В}$ . Определите заряд  $q_1$  и напряжение  $U_1$ , на каждом из конденсаторов.

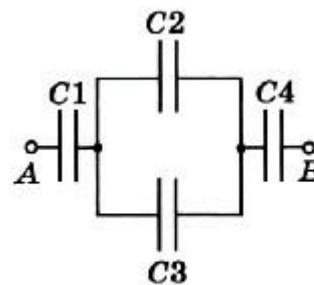


Рис. 14.46

**Решение.** Для определения заряда и напряжения прежде всего найдём ёмкость батареи конденсаторов. Эквивалентная ёмкость второго и третьего конденсаторов  $C_{2,3} = C_2 + C_3$ , а эквивалентную ёмкость всей батареи конденсаторов, представляющей собой три последовательно соединённых конденсатора ёмкостями  $C_1$ ,  $C_{2,3}$ ,  $C_4$ , найдём из соотношения

$$1/C_{\text{экв}} = 1/C_1 + 1/C_{2,3} + 1/C_4, C_{\text{экв}} = (4/7) \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Заряды на этих конденсаторах одинаковы:

$$q_1 = q_{2,3} = q_4 = C_{\text{экв}} U = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Кл.}$$

Следовательно, заряд первого конденсатора  $q_1 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$ , а разность потенциалов между его обкладками, или напряжение,  $U_1 = q_1/C_1 = 80 \text{ В}$ .

Для четвёртого конденсатора аналогично имеем  $q_4 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$ ,  $U_4 = q_4/C_4 = 40 \text{ В}$ .

Найдём напряжение на втором и третьем конденсаторах:  $U_2 = U_3 = q_{2,3}/C_{2,3} = 20 \text{ В}$ .

Таким образом, на втором конденсаторе заряд  $q_2 = C_2 U_2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$ , а на третьем конденсаторе  $q_3 = C_3 U_3 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$ . Отметим, что  $q_{2,3} = q_2 + q_3$ .

**Задача 4.** Определите эквивалентную электрическую ёмкость в цепи, изображённой на рисунке (14.47 а), если ёмкости конденсаторов известны.

**Решение.** Часто при решении задач, в которых требуется определить эквивалентную электрическую ёмкость, соединение конденсаторов не очевидно. В этом случае если удаётся определить точки цепи, в которых потенциалы равны, то можно соединить эти точки или исключить конденсаторы, присоединённые к этим точкам, так как они не могут накапливать заряд ( $\Delta\phi = 0$ ) и, следовательно, не играют роли при распределении зарядов.

В приведённой на рисунке (14.47, а) схеме нет очевидного параллельного или последовательного соединения конденсаторов, так как в общем случае  $\phi_A \neq \phi_B$  и к конденсаторам  $C_1$  и  $C_2$  приложены разные напряжения. Однако заметим, что в силу симметрии и равенства ёмкостей соответствующих конденсаторов потенциалы точек А и В равны. Следовательно, можно, например, соединить точки А и В. Схема преобразуется к виду, изображённому на рисунке (14.47, б). Тогда конденсаторы  $C_1$ , так же как и конденсаторы  $C_2$ , будут соединены параллельно и  $C_{\text{экв}}$  определим по формуле  $1/C_{\text{экв}} = 1/2C_1 + 1/2C_2$ , откуда

$$C_{\text{экв}} = \frac{2C_1C_2}{C_1 + C_2}.$$

Можно также просто не учитывать присутствие в схеме конденсатора  $C_3$ , так как заряд на нём равен нулю. Тогда схема преобразуется к виду, изображённому на рисунке (14.47, в). Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  соединены последовательно, следовательно,

$$C'_{\text{экв}} = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}.$$

Эквивалентные конденсаторы с  $C'_{\text{экв}}$  соединены параллельно, так что окончательно получим такое же выражение для эквивалентной ёмкости:

$$C_{\text{экв}} = 2C'_{\text{экв}} = \frac{2C_1C_2}{C_1 + C_2}.$$

**Задача 5.** Энергия плоского воздушного конденсатора  $W_1 = 2 \cdot 10^{-7}$  Дж. Определите энергию конденсатора после заполнения его диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2$ , если:

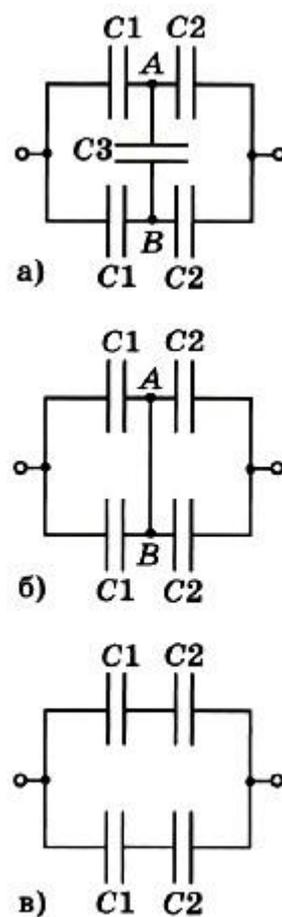


Рис. 14.47

- 1) конденсатор отключён от источника питания;
- 2) конденсатор подключён к источнику питания.

Р е ш е н и е. 1) Так как конденсатор отключён от источника питания, то его заряд  $q_0$  остаётся постоянным. Энергия конденсатора до заполнения его

диэлектриком  $W_1 = \frac{q_0^2}{2C_1}$ ; после заполнения  $W_2 = \frac{C_2 U_0^2}{2}$ , где  $C_2 = \epsilon C_1$ .

Тогда  $W_2 = \frac{\epsilon C_1 U_0^2}{2} = \epsilon W_1 = 4 \cdot 10^{-7}$  Дж.

## ЗАДАНИЕ

### 1. Разобрать примеры решения задач

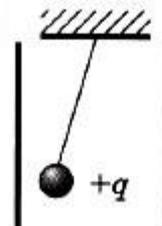
### 2. Задачи для самостоятельного решения (решить не менее двух задач)

1. Разность потенциалов между обкладками конденсатора ёмкостью 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 модуля 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 отключён 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?
4. Определите ёмкость воздушного сферического конденсатора. Радиусы сфер  $R_1$  и  $R_2$ .
5. В плоский воздушный конденсатор вставляется металлическая пластина толщиной  $d_0$ . Заряд на обкладках конденсатора  $q$ . Конденсатор отключён от источника. Расстояние между пластинами  $d$ , площадь пластин  $S$ . Определите изменение ёмкости конденсатора и энергии его электрического поля.

### 3. Дополнительное задание (для желающих)

## Образцы заданий ЕГЭ

C1. Маленький шарик с зарядом  $q = 4 \cdot 10^{-7}$  Кл и массой 3 г, подвешенный на невесомой нити с коэффициентом упругости 100 Н/м, находится между вертикальными пластинами воздушного конденсатора (см. рис.). Расстояние между обкладками конденсатора 5 см. Чему равна разность потенциалов между обкладками конденсатора, если удлинение нити 0,5 мм?



C2. В плоский конденсатор длиной  $L = 5$  см влетает электрон под углом  $\alpha = 15^\circ$  к пластинам. Энергия электрона  $W = 2,4 \cdot 10^{-16}$  Дж. Расстояние между пластинами  $d = 1$  см. Определите разность потенциалов между пластинами конденсатора  $U$ , при которой электрон на выходе из конденсатора будет двигаться параллельно пластинам. Заряд электрона  $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

C3. Конденсаторы, электрическая ёмкость которых 2 мкФ и 10 мкФ, заряжают до напряжения 5 В каждый, а затем «плюс» одного из них подключают к «минусу» другого и соединяют свободные выводы резистором 1000 Ом. Определите количество теплоты, которая выделится в резисторе.

## Электрический ток. Сила тока

Электрический ток — направленное движение заряженных частиц. Благодаря электрическому току освещаются квартиры, приводятся в движение станки, нагреваются конфорки на электроплитах, работает радиоприемник и т. д.

Рассмотрим наиболее простой случай направленного движения заряженных частиц — постоянный ток.

*Какой электрический заряд называется элементарным?*

*Чему равен элементарный электрический заряд?*

*Чем различаются заряды в проводнике и диэлектрике?*

При движении заряженных частиц в проводнике происходит перенос электрического заряда из одной точки в другую. Однако если заряженные частицы совершают беспорядочное тепловое движение, как, например, свободные электроны в металле, то переноса заряда не происходит (рис. 15.1, а).

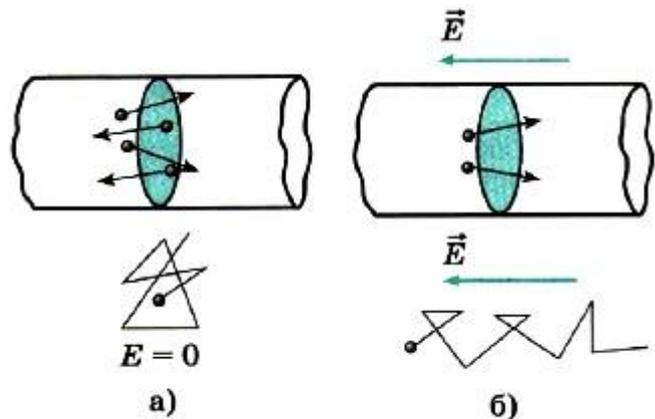


Рис. 15.1

Поперечное сечение проводника

в среднем пересекает одинаковое число электронов в двух противоположных направлениях. Электрический заряд переносится через поперечное сечение проводника лишь в том случае, если наряду с беспорядочным движением электроны участвуют в направленном движении (рис. 15.1, б). В этом случае говорят, что по проводнику идёт *электрический ток*.

### Запомни

**Электрическим током** называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Электрический ток имеет определённое направление.

### Важно

За направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц.

### ИНТЕРЕСНО

Если перемещать нейтральное в целом тело, то, несмотря на упорядоченное движение огромного числа электронов и атомных ядер, электрический ток не возникнет. Полный заряд,

переносимый через любое сечение, будет при этом равным нулю, так как заряды разных знаков перемещаются с одинаковой средней скоростью.

Направление тока совпадает с направлением вектора напряжённости электрического поля. Если ток образован движением отрицательно заряженных частиц, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц.

#### ИНТЕРЕСНО

Выбор направления тока не очень удачен, так как в большинстве случаев ток представляет собой упорядоченное движение электронов — отрицательно заряженных частиц. Выбор направления тока был сделан в то время, когда о свободных электронах в металлах ещё ничего не знали.

**Действие тока.** Движение частиц в проводнике мы непосредственно не видим. О наличии электрического тока приходится судить по тем действиям или явлениям, которые его сопровождают.

Во-первых, проводник, по которому идёт ток, нагревается.

Во-вторых, электрический ток может изменять химический состав проводника: например, выделять его химические составные части (медь из раствора медного купороса и т. д.).

В-третьих, ток оказывает силовое воздействие на соседние токи и намагнитенные тела. Это действие тока называется *магнитным*.

Так, магнитная стрелка вблизи проводника с током поворачивается. Магнитное действие тока в отличие от химического и теплового является основным, так как проявляется у всех без исключения проводников. Химическое действие тока наблюдается лишь у растворов и расплавов электролитов, а нагревание отсутствует у сверхпроводников.

В лампочке накаливания вследствие прохождения электрического тока излучается видимый свет, а электродвигатель совершает механическую работу.

**Сила тока.** Если в цепи идёт электрический ток, то это означает, что через поперечное сечение проводника всё время переносится электрический заряд.

#### Запомни

Заряд, перенесённый в единицу времени, служит основной количественной характеристикой тока, называемой **силой тока**.

Если через поперечное сечение проводника за время  $\Delta t$  переносится заряд  $\Delta q$ , то среднее значение силы тока равно:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (15.1)$$

**Важно**

Средняя сила тока равна отношению заряда  $\Delta q$ , прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$ , к этому промежутку времени.

**Запомни**

Если сила тока со временем не меняется, то ток называют **постоянным**.

Сила переменного тока в данный момент времени определяется также по формуле (15.1), но промежуток времени  $\Delta t$  в таком случае должен быть очень мал.

Сила тока, подобно заряду, — величина скалярная. Она может быть как *положительной*, так и *отрицательной*. Знак силы тока зависит от того, какое из направлений обхода контура принять за положительное. Сила тока  $I > 0$ , если направление тока совпадает с условно выбранным положительным направлением вдоль проводника. В противном случае  $I < 0$ .

**Связь силы тока со скоростью направленного движения частиц.** Пусть цилиндрический проводник (рис. 15.2) имеет поперечное сечение площадью  $S$ . За положительное направление тока в проводнике примем направление слева направо. Заряд каждой частицы будем считать равным  $q_0$ . В объеме проводника, ограниченном поперечными сечениями 1 и 2 с расстоянием  $\Delta l$  между ними, содержится  $nS\Delta l$  частиц, где  $n$  — концентрация частиц (носителей тока). Их общий заряд в выбранном объеме  $q = q_0 n S \Delta l$ . Если частицы движутся слева направо со средней скоростью  $v$ , то за время  $\Delta t = \frac{\Delta l}{v}$  все частицы, заключенные в рассматриваемом объеме, пройдут через поперечное сечение 2. Поэтому сила тока равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{q_0 n S \Delta l v}{\Delta l} = q_0 n v S. \quad (15.2)$$

**Важно**

В СИ единицей силы тока является ампер (А).

Эта единица установлена на основе магнитного взаимодействия токов.

Измеряют силу тока *амперметрами*. Принцип устройства этих приборов основан на магнитном действии тока.

**Скорость упорядоченного движения электронов в проводнике.** Найдём скорость упорядоченного перемещения электронов в металлическом проводнике. Согласно формуле (15.2)  $v = \frac{I}{enS}$ , где  $e$  — модуль заряда электрона.

Пусть, например, сила тока  $I = 1$  А, а площадь поперечного сечения проводника  $S = 10^{-6}$  м<sup>2</sup>. Модуль заряда электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Число электронов в 1 м<sup>3</sup> меди равно числу атомов в этом объёме, так как один из валентных электронов каждого атома меди является свободным. Это число есть  $n \approx 8,5 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup>. Следовательно,

$$v = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} \text{ (м/с)} \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ м/с.}$$

Как видите, скорость упорядоченного перемещения электронов очень мала. Она во много раз меньше скорости теплового движения электронов в металле.

### Условия, необходимые для существования электрического тока.

#### Важно

Для возникновения и существования постоянного электрического тока в веществе необходимо наличие **свободных** заряженных частиц.

Однако этого ещё недостаточно для возникновения тока.

#### Важно

Для создания и поддержания упорядоченного движения заряженных частиц необходима сила, действующая на них в определённом направлении.

Если эта сила перестанет действовать, то упорядоченное движение заряженных частиц прекратится из-за столкновений с ионами кристаллической решётки металлов или нейтральными молекулами электролитов и электроны будут двигаться беспорядочно.

На заряженные частицы, как мы знаем, действует электрическое поле с силой

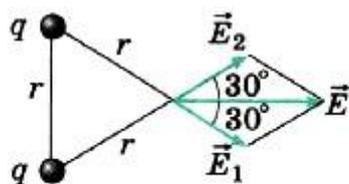


Рис. 14.17

$$= q \vec{E}.$$

#### Важно

Обычно именно электрическое поле внутри проводника служит причиной, вызывающей и поддерживающей упорядоченное движение заряженных частиц.

Только в статическом случае, когда заряды покоятся, электрическое поле внутри проводника равно нулю.

Если внутри проводника имеется электрическое поле, то между концами проводника в соответствии с формулой (14.21) существует разность потенциалов. Как показал эксперимент, когда разность потенциалов не меняется во времени, в проводнике устанавливается *постоянный электрический ток*. Вдоль проводника потенциал уменьшается от максимального значения на одном конце проводника до минимального на другом, так как положительный заряд под действием сил поля перемещается в сторону убывания потенциала.

## ЗАДАНИЕ

**1. Изучить тему и кратко записать в тетрадь**

**2. Вопросы (уметь устно отвечать)**

1. Что определяет среднюю скорость дрейфа свободных электронов?
2. Почему единицу тока определяют по магнитному взаимодействию?

**3. Дополнительное задание (для желающих)**

Образцы заданий ЕГЭ

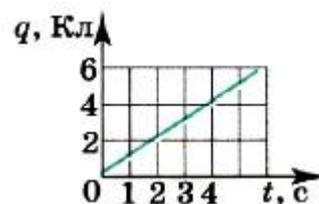
A1. Время рабочего импульса ускорителя электронов равно 1 мкс. Средняя сила тока, создаваемого этим ускорителем, 32 кА. Определите число электронов, ускоряемых за один пуск ускорителя. Заряд электрона  $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

- 1)  $4 \cdot 10^{16}$     2)  $8 \cdot 10^{17}$     3)  $10^{17}$     4)  $2 \cdot 10^{17}$

A2. На электроды вакуумного диода подаётся переменное напряжение, в результате чего сила тока, проходящего через этот диод, равномерно увеличивается за 2 мкс от 0 до 12 А. Определите заряд, который прошёл через диод за это время.

- 1) 36 мкКл    2) 12 мкКл    3) 36 мКл    4)  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

A3. По проводнику идёт постоянный электрический ток. Значение заряда, прошедшего через проводник, возрастает с течением времени согласно графику, представленному на рисунке. Сила тока в проводнике равна



- 1)        36        А  
2) 16 А        4) 1 А

- 3)        6        А

**4. Адрес моей электронной почты: [elenakutuzova8@yandex.ru](mailto:elenakutuzova8@yandex.ru)**