

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

1. Помните, что величина силы тока постоянна при условии, что в данной электрической цепи поддерживается постоянная разность потенциалов.

$$I = \text{const} \Leftarrow U = \text{const} \Leftarrow E = \text{const}$$

2. В задачах на постоянный электрический ток важно помнить, что знание материала, из которого изготовлен проводник, позволяет определить как его электрические, так и механические, и тепловые свойства.

Медный проводник:

Удельное сопротивление

Удельная теплоемкость

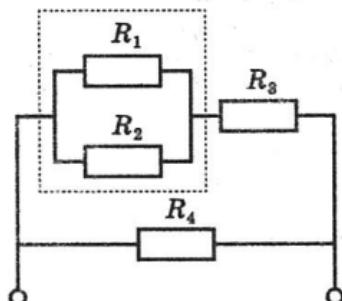
Температура плавления

Удельная теплота плавления

Плотность

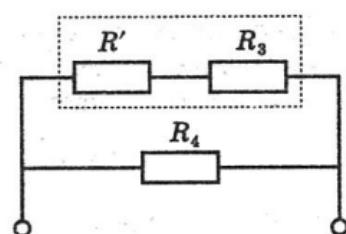
3. При решении задач на расчет сопротивления разветвленной цепи, когда заданы сопротивления всех ее участков, следует использовать свойства параллельного и последовательного соединений проводников. Для этого необходимо разложить сложную цепь на участки последовательного и параллельного соединений. Поочередное применение отражающих эти свойства формул позволит найти сопротивление всей цепи — эквивалентное сопротивление. При этом следует аккуратно обозначать каждый участок и рекомендуется перерисовывать эквивалентную схему на каждом участке.

Исходная схема



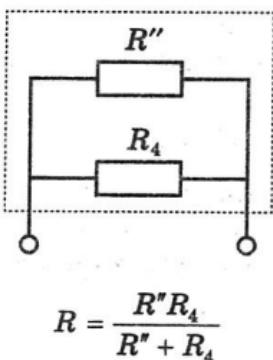
$$R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Эквивалентная схема 1

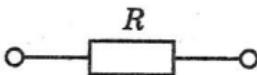


$$R'' = R' + R_3$$

Эквивалентная схема 2

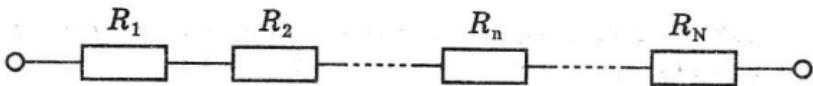


Эквивалентная схема 3



$$R = \frac{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) R_4}{\left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) + R_4}$$

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ



- Сила тока во всех последовательно соединенных участках цепи одинакова:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n = \dots$$

- Напряжение в цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных участков, равно сумме напряжений на каждом участке:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n + \dots$$

- Сопротивление цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных участков, равно сумме сопротивлений каждого участка:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n + \dots$$

Если все сопротивления в цепи одинаковы, то:

$$R = R_1 \cdot N$$

При последовательном соединении общее сопротивление увеличивается (больше большего).

- Работа электрического тока в цепи, состоящей из последовательно соединенных участков, равна сумме работ на отдельных участках:

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_n + \dots$$

т.к.

$$A = I^2 R t = I^2 (R_1 + R_2 + \dots + R_n + \dots) t$$

- Мощность электрического тока в цепи, состоящей из последовательно соединенных участков, равна сумме мощностей на отдельных участках:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n + \dots$$

- Т.к. силы тока во всех участках одинаковы, то:

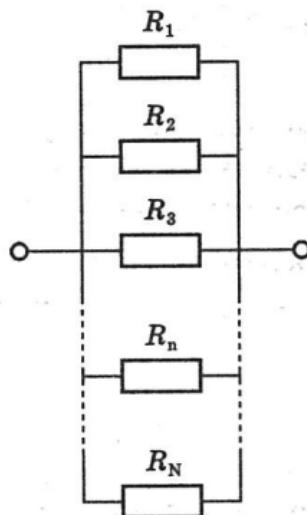
$$U_1 : U_2 : \dots : U_n : \dots = R_1 : R_2 : \dots : R_n : \dots$$

Для двух резисторов:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

т.е. чем больше сопротивление, тем больше напряжение.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ



- Сила тока в неразветвленном участке цепи равна сумме сил токов во всех параллельно соединенных участках.

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n + \dots$$

- Напряжение на всех параллельно соединенных участках цепи одинаково:

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n = \dots$$

- При параллельном соединении проводников **проводимости** складываются (складываются величины, обратные сопротивлению):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + \dots$$

Если все сопротивления в цепи одинаковы, то:

$$R = \frac{R_1}{n}$$

При параллельном соединении общее сопротивление уменьшается (меньше меньшего).

- Работа электрического тока в цепи, состоящей из параллельно соединенных участков, равна сумме работ на отдельных участках:

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_n + \dots, \text{ т.к.}$$

$$A = \frac{U^2}{R} t = U^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + \dots \right) t$$

- Мощность электрического тока в цепи, состоящей из параллельно соединенных участков, равна сумме мощностей на отдельных участках: $P = P_1 + P_2 + \dots + P_n + \dots$

- Т.к. напряжения на всех участках одинаковы, то:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = \dots = I_n R_n = \dots$$

Для двух резисторов:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

т. е. чем больше сопротивление, тем меньше сила тока.

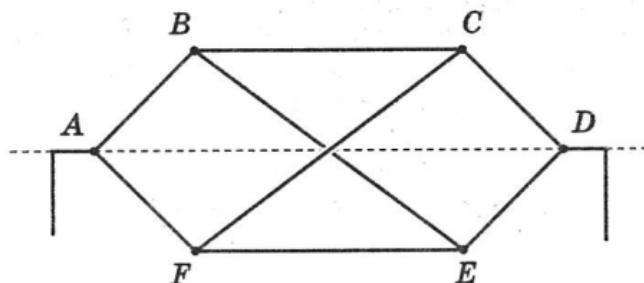
Если в электрической цепи, которую вы рассчитываете в задаче, включены электроизмерительные приборы, важно знать являются ли они идеальными или нет, т.е. надо ли учитывать их сопротивление.

Если в электрической цепи вольтметр включен последовательно с нагрузкой, то он измеряет напряжение на себе самом:

$$U_V = I_V R_V$$

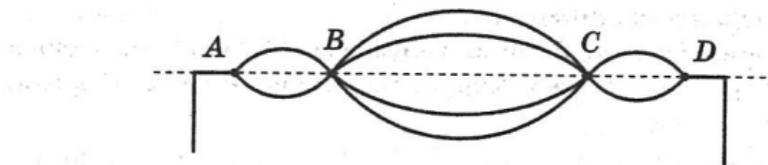
Если заданное сложное соединение проводников нельзя разложить на участки последовательного и параллельного соединений, необходимо заменить его другим соединением, эквивалентным данному в отношении сопротивления так, чтобы это соединение можно было разложить на участки последовательного и параллельного соединений. Такие эквивалентные замены основаны на возможности соединять и разъединять точки цепи, имеющие равные потенциалы, а значит ток на этих участках не течет. Такие точки электрической цепи можно соединять или разъединять без изменения распределения токов, а значит, без изменения сопротивления цепи. Если схема имеет ось симметрии, причем вход и выход (зажимы) схемы лежат на этой оси, то в цепи будет симметричное распределение токов и любые две точки, симметричные относительно этой оси, имеют равные потенциалы. В общем случае, когда нет точек с равным потенциалом, сопротивление любой сколь угодно сложной цепи можно рассчитать, используя правила Кирхгофа.

СОЕДИНЕНИЕ ТОЧЕК С РАВНЫМИ ПОТЕНЦИАЛАМИ



На приведенной схеме все участки между узлами имеют одинаковые сопротивления r . В центре соединения нет. Т.к. точки B и F , а также C и E симметричны относительно оси

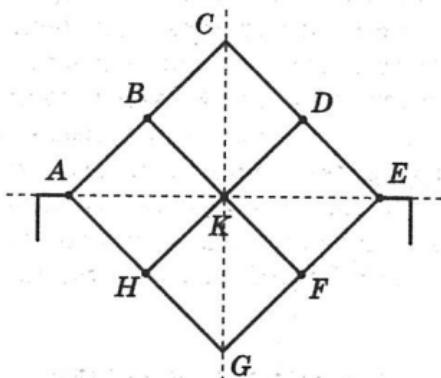
AD , то их можно соединить, получив новую эквивалентную схему с хорошо видными параллельными и последовательными участками:



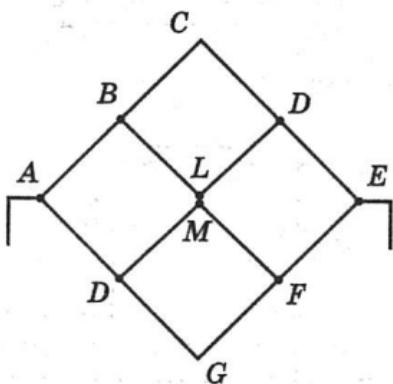
Теперь в соответствии со свойствами параллельного и последовательного соединений:

$$R = \frac{r}{2} + \frac{r}{4} + \frac{r}{2} = 1,25 r$$

РАЗЪЕДИНЕНИЕ ТОЧЕК С РАВНЫМИ ПОТЕНЦИАЛАМИ



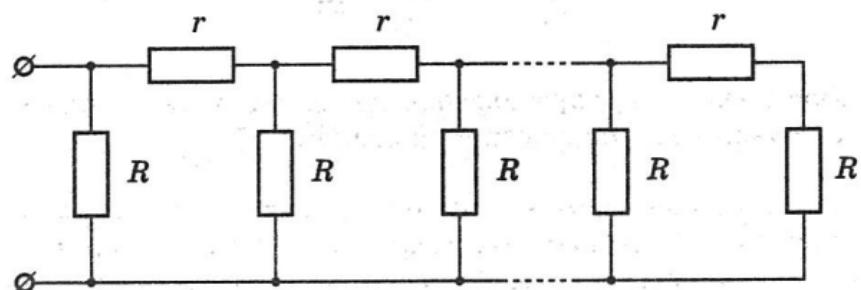
В отличие от предыдущего случая в точке K имеется соединение, которое можно разъединить.



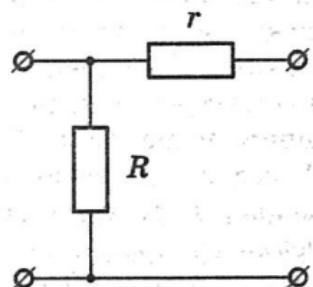
В задачах, где цепи состоят из бесконечного количества ячеек, пользуются свойствами счетных множеств. Для этого в цепи выделяют одинаковые повторяющиеся ячейки и получают эквивалентную схему, сводящуюся к расчету параллельных и последовательных соединений. При бесконечном числе ячеек сопротивление цепи и сопротивление, обозначенное на рис. как R_x , одинаковы.

В данной задаче выделенные ячейки можно менять, но при этом решение не изменится.

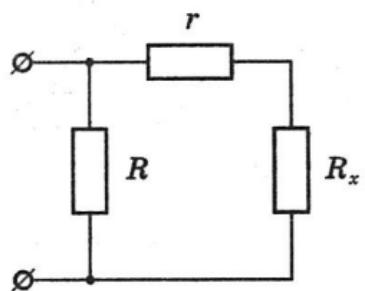
Исходная схема:



Выделенная ячейка:



Эквивалентная схема:



Теперь решение выглядит как

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_x + r}$$

Следовательно:

$$R_x^2 + R_x r - Rr = 0$$

Решая квадратное уравнение получаем:

$$R_x = \frac{-r \pm \sqrt{r^2 + 4Rr}}{2}$$

Учитывая, что сопротивление не может быть отрицательным, оставим только решение со знаком “+”.

При решении задач на закон Ома надо начертить схему и указать на ней все элементы цепи. Если схема дается в готовом виде, то устанавливают, какие элементы цепи включены последовательно, какие — параллельно. Затем следует обозначить токи в каждом участке цепи и записать для каждой точки разветвления (если они есть) уравнения токов и уравнения, связывающие напряжения на участках цепи. Используя закон Ома, устанавливают связь между токами и напряжениями и, решив эти уравнения совместно, находят искомую величину.

Если в задачах на применение закона Ома для участка цепи, не содержащего ЭДС, заданы сопротивления всех элементов цепи и общее напряжение, и требуется определить токи и напряжения на этих элементах, в расчетах сначала определяют общее сопротивление участка цепи. Токи и напряжения на отдельных элементах цепи вычисляют по закону Ома.

$$U = 12 \text{ В}$$

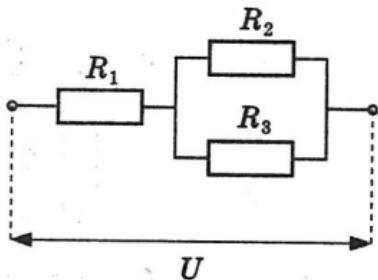
$$R_1 = 1,8 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 2 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 3 \text{ Ом}$$

$$U_{1,2,3} = ?$$

$$I_{1,2,3} = ?$$



Решение:

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R = 3 \text{ Ом}$$

$$I = I_1 = \frac{U}{R} = 4 \text{ А}$$

$$U_1 = I_1 R_1 = 7,2 \text{ В}$$

$$U_2 = U_3 = U - U_1 = 4,8 \text{ В}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = 2,4 \text{ А}$$

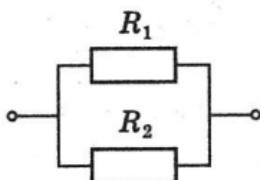
$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = 1,6 \text{ А}$$

$$\text{Проверка: } I_1 + I_2 = 4 \text{ А} = I.$$

Если в задачах заданы все сопротивления и ток (или напряжение) в одной ветви, то токи и напряжения на остальных участках цепи определяют, пользуясь законом Ома и первым правилом Кирхгофа (сумма всех втекающих в узел токов равна сумме всех вытекающих из этого узла токов, или алгебраическая сумма токов в каждом узле равна нулю).

Если в схеме делаются какие-либо переключения сопротивлений или источников, уравнения составляют для каждого случая в отдельности.

Например, при последовательном соединении резисторов, сопротивление которых 1 и 2 Ом соответственно, сила тока в электрической цепи 1 А. Какой будет сила тока, если резисторы соединить параллельно и подать на них такое же напряжение?



$$U_1 = I_1(R_1 + R_2)$$

$$U_2 = I_2 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_1 = U_2$$

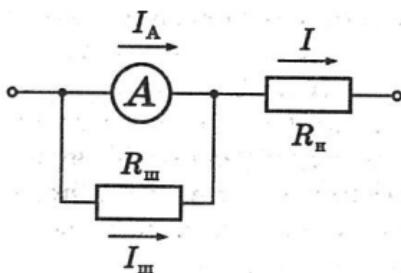
$$I_1(R_1 + R_2) = I_2 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = I_1 \frac{(R_1 + R_2)^2}{R_1 R_2}$$

$$I_2 = 4,5 \text{ A}$$

Основная цель решения задач на расчет шунтов и добавочных сопротивлений состоит в выяснении, как и при каких условиях можно использовать один и тот же измерительный прибор для разных целей, какие ошибки могут возникать во время измерений при различных условиях.

АМПЕРМЕТР



Из свойств последовательного соединения:

- Подсоединяется последовательно к измеряемому участку.
- Чем меньше собственное сопротивление амперметра, тем меньшую погрешность он вносит.

Из свойств параллельного соединения:

- Для изменения пределов измерения в n раз параллельно подсоединяют резистор (шунт).

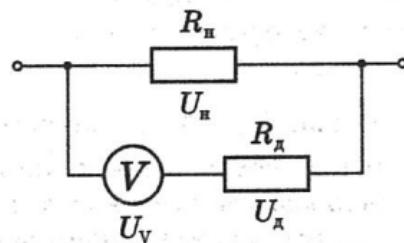
$$I = I_a + I_m; U_a = U_m; I = nI_a$$

Тогда: $I_a R_a = (I - I_a) R_m$

Следовательно:

$$R_m = \frac{R_a}{n-1}$$

ВОЛЬТМЕТР



Из свойств параллельного соединения:

- Подсоединяется параллельно к измеряемому участку
- Чем больше собственное сопротивление вольтметра, тем меньшую погрешность он вносит.

Из свойств последовательного соединения:

- Для изменения пределов измерения в n раз последовательно подсоединяют резистор (дополнительное сопротивление).

$$U = U_v + U_d$$

$$I_v = I_d$$

$$U = nU_v$$

Тогда:

$$\frac{U}{I_v} = \frac{U_v + U_d}{I_v} = \frac{nU_v}{I_v}$$

Следовательно:

$$R_d = R_v(n - 1)$$

В задачах на закон Ома для полной цепи следует использовать выражение для этого закона столько раз, сколько цепей рассматривается в задаче, а затем решить полученную систему уравнений. В случае, когда необходимо вычислить параметры отдельных участков, следует для каждого участка воспользоваться законом Ома для участка цепи.

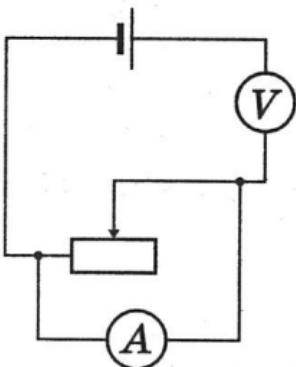
Важно помнить, что из закона Ома для полной цепи следует:

1. Если $R \gg r$, то $\mathcal{E} = U$, т. е. ЭДС можно измерить, подсоединив к зажимам источника вольтметр с большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением источника.
2. Если $R \ll r$, то ток $I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ — максимальный ток для данной цепи (ток короткого замыкания). При этом режиме значительно увеличивается выделяемое количество теплоты, т. к. оно пропорционально квадрату силы тока: $Q = I^2 R t$.

Сумма падений напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи равна ЭДС источника тока: $\mathcal{E} = U_{\text{внеш}} + U_{\text{внутр.}}$

При рассмотрении изменений в полной электрической цепи (например, изменениях нагрузки) важно понимать, что между изменениями силы тока во всей цепи и изменением напряжения на отдельном участке цепи нет прямой пропорциональной зависимости.

Если R растет, то I уменьшается. $U = \mathcal{E} - Ir$ — при уменьшении силы тока в цепи напряжение на внешнем участке увеличивается!



Например: как изменятся показания амперметра и вольтметра при перемещении ползунка реостата вправо?

Т.к. длина активной части реостата при этом увеличится, а сопротивление пропорционально длине проводника ($R = \frac{\rho\ell}{S}$), то внешнее сопротивление увеличится. Согласно з-ну Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Следовательно сила тока и показания амперметра уменьшатся. Вольтметр измеряет напряжение на внешнем участке:

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

Т.к. сила тока уменьшилась, то разность между ЭДС и падением напряжения на источнике (Ir) увеличится, т.е. увеличится и показание вольтметра.

При решении задач на расчет работы и мощности электрического тока следует помнить, что если на участке имеется источник эдс, то при расчете работы или мощности необходимо учитывать работу сторонних сил.

Если необходимо сравнить мощности (работы), выделяемые на различных проводниках, то необходимо сравнить при каких условиях эти проводники включаются в электрическую цепь.

1. На проводники R_1 и R_2 подано одинаковое напряжение:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Чем больше сопротивление проводника, тем меньше выделяемая мощность (количество теплоты).

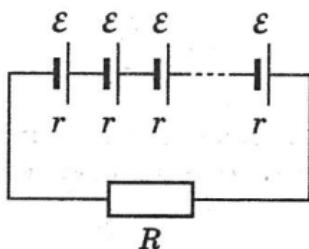
2. Через проводники R_1 и R_2 течет одинаковый ток:

$$P = I^2 R$$

Чем больше сопротивление проводника, тем большее выделяемая мощность (количество теплоты).

СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

1. Последовательное соединение источников: полная ЭДС цепи равна алгебраической сумме ЭДС отдельных источников, полное внутреннее сопротивление равно сумме внутренних сопротивлений всех источников тока.

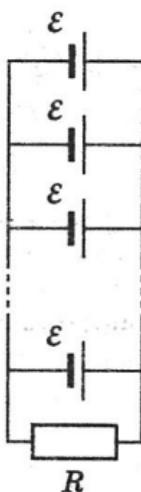


Если все источники одинаковы и включены в одном направлении, то $E_0 = E_n$, а $r_0 = rn$.

Тогда закон Ома запишется в виде:

$$I = \frac{E_n}{R + rn}$$

2. Параллельное соединение источников: один из источников (с наибольшей ЭДС) работает как источник, остальные — как потребители (на этом принципе основана зарядка аккумулятора). Расчет по правилам Кирхгофа.



Если все источники одинаковы, то закон Ома запишется в виде:

$$I = \frac{E}{R + r/n}$$

Полезная мощность источника тока будет максимальна при $r = R$ и равна $P_{\text{полез max}} = \mathcal{E}^2/4r$ при силе тока $I = \mathcal{E}/2r$.

а) Полная:

$$P = I\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r}$$

б) Полезная:

$$P_{\text{п}} = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}$$

в) Теряемая:

$$P_{\text{тер}} = I^2 r = \frac{\mathcal{E}^2 r}{(R+r)^2}$$

г) КПД:

$$\eta = \frac{P_{\text{п}}}{P} = \frac{I^2 R}{I\mathcal{E}} = \frac{R}{R+r}$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗНЫХ СРЕДАХ

Закон Ома для участка цепи справедлив для металлов и для электролитов, т.е. в этих средах существует прямая пропорциональность между силой тока и напряжением (при условии неизменной величины сопротивления).

Вычислить значение силы тока по известным значениям напряжения и сопротивления можно для любых сред (кроме вакуума), но это не означает пропорционального изменения этих величин.

При решении задач, связанных с электропроводностью металлов чаще всего используется связь между силой тока и скоростью упорядоченного движения электронов проводимости, их концентрацией и площадью поперечного сечения проводника. Эта формула, в частности, позволяет качественно объяснить различие в нагревании элементов цепи, соединенных последовательно.

$$I = q_0 n v S$$

а) Т.к. в разных металлах концентрации свободных зарядов примерно одинаковы, то в случае последовательного соединения:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

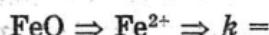
Т.к. чем больше скорость частиц, тем выше температура, то проводник с меньшей площадью сечения будет нагреваться больше;

б) Если имеется контакт проводника и полупроводника ($n_{\text{пров}} \gg n_{\text{пп}}$), то при одинаковых сечениях больше нагреваться будет полупроводник.

Часто в задачах, связанных с электропроводностью металлов необходимо использовать знания из молекулярной физики и термодинамики (расчет плотности, количества теплоты, концентрации и т.д.), а также закон Джоуля-Ленца и формулу расчета сопротивления проводника в зависимости от его материала и размеров.

ВНИМАНИЕ! Помните, что обычно **плотность вещества** и **удельное сопротивление** обозначаются одной и той же буквой ρ . Поэтому в задачах данного типа надо принять такие обозначения, которые позволят избежать ошибки в решении. Например, плотность можно обозначить ρ , а удельное сопротивление ρ^* .

В основе решения задач на электролиз лежат законы электролиза Фарадея. Если в описанном в задаче процессе используются два и более веществ, то уравнение составляется для каждого из них. Помните, что электрохимический эквивалент вещества зависит от его валентности, поэтому, определяя его значение по таблице, обращайте внимание на то, какова валентность данного элемента в веществе, участвующем в процессе электролиза.



Чаще всего в таблице значение электрохимического эквивалента дается в мг/Кл. Необходимо не забыть перевести эти единицы.

$$1 \frac{\text{мг}}{\text{Кл}} = 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$$

Если в задаче в результате процесса электролиза образуется газ (газы), то для определения их параметров (например, масс) необходимо воспользоваться уравнением состояния (уравнением Менделеева-Клапейрона). Ряд задач превращается в практических устные, если понимать, что физический смысл числа Фарадея ($F = eN_A \approx 96500$ Кл/моль) в том, что оно равно заряду, который надо пропустить в процессе электролиза, чтобы на электродах выделился 1 моль данного вещества.

Например: Какой силы ток необходим пропустить через подкисленную воду, чтобы в течение времени t получить объем V гремучего газа. Давление газа и его температура известны. Для каждого газа (греческий газ — смесь водорода и кислорода) записывается уравнение состояния, а для смеси газов — закон Дальтона. Массы вычисляются исходя из закона Фарадея.

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 V = \frac{m_1}{M_1} RT \\ p_2 V = \frac{m_2}{M_2} RT \\ p = p_1 + p_2 \\ m_1 = \frac{M_1}{n_1} \cdot \frac{1}{F} \cdot I \cdot t \\ m_2 = \frac{M_2}{n_2} \cdot \frac{1}{F} \cdot I \cdot t \end{array} \right.$$

Решение полученной системы даст окончательный ответ:

$$I = \frac{pVF}{RTt \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}$$

При решении задач по теме «Электрический ток в газах» важно понимать, что для того, чтобы ионизировать атом (молекулу), необходимо совершить работу. Сделать это можно либо механическим путем (столкновение частиц, удар), либо при освещении (облучении), либо за счет сил электрического поля, либо путем нагревания. Минимальную энергию, которую надо сообщить атому (молекуле) для ионизации называют энергией ионизации ($W_{\text{ион}}$).

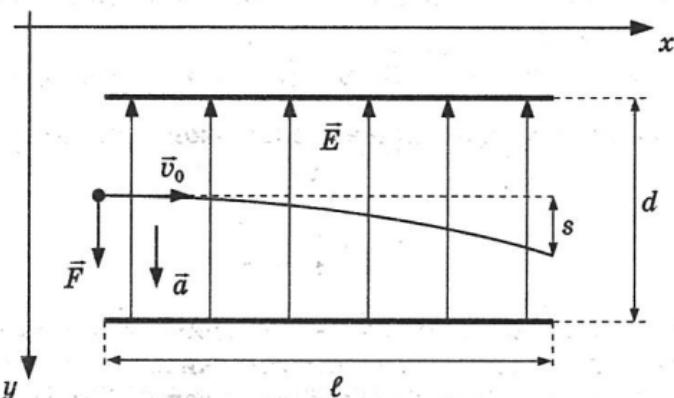
В случае электронного удара ионизация произойдет при условии:

$$\frac{mv^2}{2} = eE\lambda \geq W_{\text{нек}}$$

где E — напряженность электрического поля, в котором разгонялся электрон, λ — расстояние, на котором электрон приобретает данную кинетическую энергию.

При решении задач по теме «Электрический ток в вакууме» чаще всего решаются задачи на движение заряженных частиц в электрическом поле. Обычно эти задачи решаются при изучении электростатики. В этих задачах пренебрегают силами тяготения, действующими на электрон по сравнению с электрическими силами. Поэтому обычно решение такой задачи сводится к описанию движения электрона на плоскости: вдоль оси, перпендикулярной силовым линиям поля, электрон движется с постоянной скоростью; вдоль оси, совпадающей с силовыми линиями поля, электрон движется с ускорением.

Например: Электрон влетает в пространство между двумя управляющими пластинами электронно-лучевой трубки со скоростью v_0 . Расстояние между пластинами d , длина пластин ℓ . Напряжение на пластинах U . На сколько сместится электрон от горизонтали?



Вдоль оси x :

$$\ell = v_0 t \Rightarrow t = \frac{\ell}{v_0}$$

Вдоль оси y :

$$s = \frac{at^2}{2}$$

Исходя из динамических и электростатических закономерностей получаем:

$$s = \frac{F}{m} \cdot \frac{t^2}{2} = \frac{eE}{m} \cdot \frac{t^2}{2} = \frac{eU}{md} \cdot \frac{t^2}{2}$$

Окончательно:

$$s = \frac{eU}{md} \cdot \frac{l^2}{2v_0^2}$$

В задачах другого типа по этой теме рассматриваются изменения энергии электрона или другой заряженной частицы в электрическом поле. Здесь важно помнить и правильно записывать закон сохранения энергии. Не забывайте, что электрон (и другие отрицательно заряженные тела) в электрическом поле будут увеличивать скорость при движении против силовых линий, т. е. от точки с меньшим потенциалом к точке с большим потенциалом.

Обратите внимание на знаки зарядов частиц. Обратите внимание на величины скоростей электронов.

Например: Какую скорость приобретет электрон, пройдя от точки с $\phi_1 = 600$ В до точки с $\phi_2 = 900$ В, если его начальная скорость 10^6 м/с?

$$A = -\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2} = q(\phi_1 - \phi_2) = -e(\phi_1 - \phi_2)$$

$$A = \Delta W_k = W_{k2} - W_{k1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$$

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = -e(\phi_1 - \phi_2)$$

$$\frac{mv_2^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} - e(\phi_1 - \phi_2)$$

Т. к. масса электрона и значение элементарного заряда — табличные величины, получим:

$$v_2 = \sqrt{\frac{mv_1^2 - 2e(\phi_1 - \phi_2)}{m}}$$