

## 11 класс, Экспресс-подготовка к ЕГЭ по физике

### Теоретический обзор к занятию 6.

#### Тема: постоянный ток.

Теме «ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА» может быть посвящено несколько заданий ЕГЭ-2022. Это почти те же задания, что и для темы «ЭЛЕКТРОСТАТИКА»: № 14, №№ 17-19, № 24, № 26 и № 28. Набор теоретических сведений, необходимых для выполнения этих заданий, достаточно четко ограничен. Перечислим их, начиная с основного понятия – собственно, об электрическом токе.

**Электрический ток** – направленное движение носителей заряда. Отметим, что свободные носители заряды в любом веществе находятся в постоянном тепловом движении. Однако это движение носит хаотический характер, и через любое сечение проводника за большой по сравнению со временем свободного пробега носителей интервал времени в среднем проходит практически нулевой заряд. Поэтому для существования тока всегда необходима «внешняя» причина, создающее «коллективное» движение носителей заряда в одном направлении. Кроме того, поддержание тока в стационарном режиме возможно только в замкнутой электрической цепи – иначе идет накопление зарядов в каком-то элементе цепи.

**Проводники** – вещества, содержащие *свободные* носители заряда (которые могут перемещаться по всему объему тела при приложении электрического поля) в достаточно большом количестве (их концентрация по порядку величины не меньше концентрации атомов). При помещении проводящего тела в электрическое поле свободные носители заряда приходят в движение – возникает электрический ток, который существует до тех пор, пока поле внутри проводника отлично от нуля. В изолированном теле носители заряда спустя некоторое время распределяются так, что создаваемое ими электрическое поле полностью компенсирует внешнее поле внутри проводника – полное поле станет равным нулю.

**Полупроводники** – вещества с низкой концентрацией свободных носителей заряда. По удельному сопротивлению занимают промежуточное место между проводниками и изоляторами. У многих полупроводников концентрация носителей может резко возрастать при различных воздействиях (нагревании, освещении и т.д.)

**Сила тока** – скалярная физическая величина, описывающая скорость изменения заряда, протекающего через сечение проводника:  $I \equiv \frac{dq}{dt}$ . Именно постоянство во времени силы тока означает, что мы имеем дело с постоянным током.

**Источник электродвижущей силы (ЭДС)** – прибор, производящий разделение зарядов за счет работы *сторонних* сил. Характеризуется величиной ЭДС, равной отношению работы сторонних сил по перемещению через источник пробного заряда к величине этого заряда:

$$E \equiv \frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

#### Основные законы и результаты:

**Элементарная теория проводимости:** Если на концах проводника длиной  $l$  создана разность потенциалов  $U$ , то внутри него существует электрическое поле  $E = \frac{U}{l}$ . Значит, носители заряда (например, электроны) начнут двигаться с ускорением:

$$a = \frac{eE}{m} = \frac{e}{m} \cdot \frac{U}{l}.$$

Однако при ненулевой скорости они будут сталкиваться с препятствиями – дефектами атомной решетки металла, и отдавать им часть кинетической энергии – тем чаще, чем выше их скорость. Поэтому влияние решетки на движение электрона проводимости можно учесть, вводя пропорциональную скорости силу сопротивления  $\vec{F}_{\text{сопр}} = -\gamma\vec{v}$ . В этом случае разгон

электронов электрическим полем будет продолжаться до достижения ими «скорости дрейфа»

$$\gamma v = eE \Rightarrow v = \frac{eU}{\gamma l} \equiv \alpha \frac{U}{l} \quad (\text{величина } \alpha \text{ называется } \mathbf{подвижностью} \text{ носителя заряда}).$$

Поэтому установившийся в проводнике сечением  $S$  с плотностью электронов проводимости  $n$  ток равен  $I = envS = e\alpha n \cdot \frac{S}{l} \cdot U \equiv \frac{U}{R}$ . Итак, получился **закон Ома для участка цепи**: напряжение на концах участка равно произведению силы тока на **сопротивление**:

$$U = IR, \quad R = \frac{1}{e\alpha n} \cdot \frac{l}{S} \equiv \rho \cdot \frac{l}{S}$$

(величина  $\rho$  (удельное сопротивление) является характеристикой вещества проводника; как видно из формулы, оно зависит от концентрации и подвижности носителей и величины их заряда).

Следует отметить, что сопротивление участка цепи является величиной постоянной (и в этом случае ток всегда прямо пропорционален напряжению), если подвижность и концентрация носителей заряда не изменяются. На самом деле есть материалы, у которых эти величины могут сильно изменяться (например, упомянутые выше полупроводники), и такие элементы являются **нелинейными**: ток через них является нелинейной функцией напряжения. Для таких элементов нельзя использовать закон Ома: вместо него необходимо использовать заданную функцию, выражающую зависимость  $I = f(U)$ .

**Зависимость удельного сопротивления от температуры**: при изменении температуры решетки из-за более быстрого теплового движения ионов эффективность их взаимодействия с электронами проводимости возрастает, и подвижность электронов в решетке уменьшается. При не слишком больших изменениях температур (малых по сравнению с температурой плавления металла) этот эффект можно описать линейным выражением:  $\rho(t) = \rho_0(1 + \alpha t)$ . Здесь  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $t = 0^\circ\text{C}$ , а величина  $\alpha$  называется температурным коэффициентом сопротивления. Значит, если в элементе цепи существенно изменяется температура проводника (как у нити лампы накаливания), то такой элемент тоже будет **нелинейным**.

**Правила расчета сопротивления при параллельном и последовательном соединении проводников**: при параллельном соединении проводников с сопротивлениями  $R_1, R_2, \dots, R_N$  (то есть при подключении их всех к одной и той же паре контактов) напряжение на каждом из проводников одинаково  $U_1 = U_2 = \dots = U_N$  (это разность потенциалов между этими контактами), общая сила тока равна сумме токов, протекающих через проводники  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_N$ , а общее сопротивление удовлетворяет соотношению  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$ ; при последовательном соединении проводников с сопротивлениями  $R_1, R_2, \dots, R_N$  (при их подключении «друг за другом» между двумя контактами) сила тока во всех проводниках одинакова  $I_1 = I_2 = \dots = I_N$ , общее напряжение равно сумме напряжений на всех проводниках  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_N$ , и общее сопротивление равно сумме сопротивлений  $R = R_1 + R_2 + \dots + R_N$ .

**Непрерывность тока**: сумма сил токов, подтекающих к любой точке схемы постоянного тока, равна сумме сил токов, утекающих от нее:  $\sum I_{in} = \sum I_{out}$  (эквивалентная формулировка: алгебраическая сумма токов, сходящихся в любой точке схемы, равна нулю).

**Закон Ома для участка цепи с ЭДС**: при наличии источника ЭДС он, разделяя заряды, создает дополнительную разность потенциалов. Ток, вызываемый созданной им разностью потенциалов, будет стремиться уменьшить ее, поэтому напряжение на концах участка с ЭДС  $U = \mathcal{E} - I \cdot R$ .

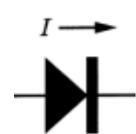
С этим законом связано **правило Кирхгофа** для контура, выделенного из цепи: сумма падений напряжения на любом замкнутом контуре в схеме равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре:  $\sum I \cdot R = \sum \mathcal{E}$ . Отметим, что выбор знака величины в каждом случае связан с выбранным направлением тока в каждом звене контура: ток в этих соотношениях считается со знаком «+», если он течет по направлению обхода, и со знаком «-», если против. ЭДС также рассматривается как алгебраическая величина, то есть входит в соотношения со знаком «+», если полярность включения такова, что стекающий с положительного полюса ток идет по направлению обхода. Но при этом нет необходимости «угадывать» истинное направление тока в звене: достаточно записать уравнения для выбранных направлений, и найти из них токи как алгебраические величины. Отрицательность найденного значения будет означать, что реальный ток течет против выбранного направления.

**Электролиз:** существует особый класс проводников – **электролиты** (растворы или расплавы). В этих веществах за счет механизма электролитической диссоциации нейтральные молекулы распадаются на заряженные ионы. Эти ионы способны перемещаться в жидкости, то есть являются свободными носителями заряда. При опускании в раствор электродов, между которыми создана разность потенциалов, ионы придут в движение (отрицательные анионы – к положительно заряженному **аноду**, положительные катионы – к отрицательно заряженному **катоду**) – возникнет ток. Но при этом вместе с переносом заряда будет происходить и перенос вещества. Поскольку каждый ион данного вещества имеет определенное соотношение заряда и массы, то масса выделившегося на электроде вещества пропорциональна прошедшему через электролит заряду (закон Фарадея для электролиза). Если выделяющееся в электролизе вещество – газ, то при приведении его к нормальным условиям его объем будет пропорционален массе, то есть снова протекшему заряду.

**Полупроводниковый диод:** существуют два разных механизма проводимости полупроводников – *электронный* и *дырочный*. Если большая часть электронов в веществе сильно связана с отдельными атомными ядрами, и лишь небольшая часть может перемещаться по всему веществу, то это – электронный («донорный», *n*) полупроводник. Если все электроны связаны, и, более того, каждый атом способен еще захватить («привязать к себе») электроны, то атомы будут отнимать друг у друга недостающие электроны, и тогда мы будем наблюдать «перемещение» по веществу электронной вакансии в атомной оболочке – *дырки*. В этом случае вещество является дырочным («акцепторным», *p*) полупроводником.

При контакте таких полупроводников (*pn*-переход) за счет диффузии дырок и электронов на границе раздела возникает слой, создающий разность потенциалов, которая **облегчает** движение носителей зарядов через область перехода в одном направлении и **затрудняет** – в

другом. Поэтому такое устройство – **полупроводниковый диод** – обладает односторонней проводимостью. Идеальный диод (а в ЕГЭ практически всегда рассматриваются именно такие) имеет **нулевое** сопротивление в открытом состоянии и **бесконечно большое** – в закрытом. На схемах изображение диода (см. рисунок) напоминает «стрелку» указывающую направление тока в открытом состоянии.



**Закон Джоуля-Ленца:** при протекании тока в любой среде (и, соответственно, в любом элементе схемы), обладающей сопротивлением, носители заряда теряют энергию при взаимодействии с молекулами среды. Эта энергия выделяется в среде в виде тепла. При постоянном токе эти энергетические потери компенсируются работой электростатических сил, создающих движение заряда. Поэтому мощность «джоулевых» тепловых потерь на элементе схемы, в котором при приложенном напряжении  $U$  течет ток  $I$  равна:

$P = \frac{U \cdot \Delta q}{\Delta t} = I \cdot U$ . Если известно сопротивление элемента, то можно использовать еще две

формулы для мощности:  $P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$ . Обратим внимание, что в этих формулах

сопротивление не зависит от силы тока только для **линейных** элементов! Для **нелинейных элементов** нужно использовать общую формулу  $P = I \cdot U$  и функцию, связывающую ток через такой элемент с напряжением на нем  $P(U) = U \cdot f(U)$ .