

## Постоянный электрический ток

Темы кодификатора ЕГЭ: постоянный электрический ток, сила тока, напряжение.

Электрический ток обеспечивает комфортом жизнь современного человека. Технологические достижения цивилизации — энергетика, транспорт, радио, телевидение, компьютеры, мобильная связь — основаны на использовании электрического тока.

*Электрический ток — это направленное движение заряженных частиц, при котором происходит перенос заряда из одних областей пространства в другие.*

Электрический ток может возникать в самых различных средах: твёрдых телах, жидкостях, газах. Порой и среды никакой не нужно — ток может существовать даже в вакууме! Мы поговорим об этом в своё время, а пока приведём лишь некоторые примеры.

- Замкнём полюса батарейки металлическим проводом. Свободные электроны провода начнут направленное движение от «минуса» батарейки к «плюсу».

Это — пример тока в металлах.

- Бросим в стакан воды щепотку поваренной соли  $\text{NaCl}$ . Молекулы соли диссоциируют на ионы, так что в растворе появятся свободные заряды: положительные ионы  $\text{Na}^+$  и отрицательные ионы  $\text{Cl}^-$ . Теперь засунем в воду два электрода, соединённые с полюсами батарейки. Ионы  $\text{Na}^+$  начнут направленное движение к отрицательному электроду, а ионы  $\text{Cl}^-$  — к положительному.

Это — пример прохождения тока через раствор электролита.

- Грозовые тучи создают столь мощные электрические поля, что оказывается возможным пробой воздушного промежутка длиной в несколько километров. В результате сквозь воздух проходит гигантский разряд — молния.

Это — пример электрического тока в газе.

Во всех трёх рассмотренных примерах электрический ток обусловлен движением заряженных частиц внутри тела и называется *током проводимости*.

- Вот несколько иной пример. Будем перемещать в пространстве заряженное тело. Такая ситуация согласуется с определением тока! Направленное движение зарядов — есть, перенос заряда в пространстве — присутствует. Ток, созданный движением макроскопического заряженного тела, называется *конвекционным*.

Заметим, что не всякое движение заряженных частиц образует ток. Например, хаотическое тепловое движение зарядов проводника — не направленное (оно совершается в каких угодно направлениях), и потому током не является<sup>1</sup>.

Не будет током и поступательное движение электрически нейтрального тела: хотя заряженные частицы в его атомах и совершают направленное движение, не происходит переноса заряда из одних участков пространства в другие.

---

<sup>1</sup>При возникновении тока свободные заряды продолжают совершать тепловое движение! Просто в этом случае к хаотическим перемещениям заряженных частиц добавляется их упорядоченный дрейф в определённом направлении.

## Направление электрического тока

Направление движения заряженных частиц, образующих ток, зависит от знака их заряда. Положительно заряженные частицы будут двигаться от «плюса» к «минусу», а отрицательно заряженные — наоборот, от «минуса» к «плюсу». В электролитах и газах, например, присутствуют как положительные, так и отрицательные свободные заряды, и ток создаётся их встречным движением в обоих направлениях. Какое же из этих направлений принять за направление электрического тока?

Направлением тока принято считать направление движения положительных зарядов. Попросту говоря, по соглашению *ток течёт от «плюса» к «минусу»* (рис. 1; положительная клемма источника тока изображена длинной чертой, отрицательная клемма — короткой).

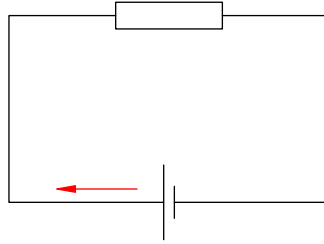


Рис. 1. Направление тока

Данное соглашение вступает в некоторое противоречие с наиболее распространённым случаем металлических проводников. В металле носителями заряда являются свободные электроны, и двигаются они от «минуса» к «плюсу». Но в соответствии с соглашением мы вынуждены считать, что направление тока в металлическом проводнике противоположно движению свободных электронов. Это, конечно, не очень удобно.

Тут, однако, ничего не поделаешь — придётся принять эту ситуацию как данность. Так уж исторически сложилось. Выбор направления тока был предложен Ампером<sup>2</sup> в первой половине XIX века, за 70 лет до открытия электрона. К этому выбору все привыкли, и когда в 1916 году выяснилось, что ток в металлах вызван движением свободных электронов, ничего менять уже не стали.

## Действия электрического тока

Как мы можем определить, протекает электрический ток или нет? О возникновении электрического тока можно судить по следующим его проявлениям.

1. *Тепловое действие тока.* Электрический ток вызывает нагревание вещества, в котором он протекает. Именно так нагреваются спирали нагревательных приборов и лампы накаливания. Именно поэтому мы видим молнию. В основе действия тепловых амперметров лежит тепловое расширение проводника с током, приводящее к перемещению стрелки прибора.
2. *Магнитное действие тока.* Электрический ток создаёт магнитное поле: стрелка компаса, расположенная рядом с проводом, при включении тока поворачивается перпендикулярно проводу. Магнитное поле тока можно многократно усилить, если обмотать провод вокруг железного стержня — получится электромагнит. На этом принципе основано действие амперметров магнитоэлектрической системы: электромагнит поворачивается в поле постоянного магнита, в результате чего стрелка прибора перемещается по шкале.

---

<sup>2</sup>Договорённость о направлении тока понадобилась Амперу для того, чтобы дать чёткое правило определения направления силы, действующей на проводник с током в магнитном поле. Сегодня эту силу мы называем *силой Ампера*, направление которой определяется по *правилу левой руки*.

3. *Химическое действие тока.* При прохождении тока через электролиты можно наблюдать изменение химического состава вещества. Так, в растворе  $\text{CuSO}_4$  положительные ионы  $\text{Cu}^{2+}$  двигаются к отрицательному электроду, и этот электрод покрывается медью.

Электрический ток называется *постоянным*, если за равные промежутки времени через поперечное сечение проводника проходит одинаковый заряд.

Постоянный ток наиболее прост для изучения. С него мы и начинаем.

## Сила и плотность тока

Количественной характеристикой электрического тока является *сила тока*. В случае постоянного тока абсолютная величина силы тока есть отношение абсолютной величины заряда  $q$ , прошедшего через поперечное сечение проводника за время  $t$ , к этому самому времени:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (1)$$

Измеряется сила тока в *амперах* (А). При силе тока в 1 А через поперечное сечение проводника за 1 с проходит заряд в 1 Кл.

Подчеркнём, что формула (1) определяет абсолютную величину, или модуль силы тока. Сила тока может иметь ещё и знак! Этот знак не связан со знаком зарядов, образующих ток, и выбирается из иных соображений. А именно, в ряде ситуаций (например, если заранее не ясно, куда потечёт ток) удобно зафиксировать некоторое направление обхода цепи (скажем, против часовой стрелки) и считать силу тока положительной, если направление тока совпадает с направлением обхода, и отрицательной, если ток течёт против направления обхода<sup>3</sup>.

В случае постоянного тока сила тока есть величина постоянная. Она показывает, какой заряд проходит через поперечное сечение проводника за 1 с.

Часто бывает удобно не связываться с площадью поперечного сечения и ввести величину *плотности тока*:

$$j = \frac{I}{S}, \quad (2)$$

где  $I$  — сила тока,  $S$  — площадь поперечного сечения проводника (разумеется, это сечение перпендикулярно направлению тока). С учётом формулы (1) имеем также:

$$j = \frac{q}{St}.$$

Плотность тока показывает, какой заряд проходит за единицу времени через единицу площади поперечного сечения проводника. Согласно формуле (2), плотность тока измеряется в  $\text{А}/\text{м}^2$ .

## Скорость направленного движения зарядов

Когда мы включаем в комнате свет, нам кажется, что лампочка загорается мгновенно. Скорость распространения тока по проводам очень велика: она близка к  $300000 \text{ км}/\text{с}$  (скорости света в вакууме). Если бы лампочка находилась на Луне, она зажглась бы через секунду с небольшим.

Однако не следует думать, что с такой грандиозной скоростью двигаются свободные заряды, образующие ток. Оказывается, их скорость составляет всего-навсего доли миллиметра в секунду.

Почему же ток распространяется по проводам так быстро? Дело в том, что свободные заряды взаимодействуют друг с другом и, находясь под действием электрического поля источника

---

<sup>3</sup>Сравните с тригонометрическим кругом: углы считаются положительными, если отсчитываются против часовой стрелки, и отрицательными, если по часовой стрелке.

тока, при замыкании цепи приходят в движение почти одновременно вдоль всего проводника. Скорость распространения тока есть скорость передачи электрического взаимодействия между свободными зарядами, и она близка к скорости света в вакууме. Скорость же, с которой сами заряды перемещаются внутри проводника, может быть на много порядков меньше.

Итак, подчеркнём ещё раз, что мы различаем две скорости.

1. *Скорость распространения тока.* Это — скорость передачи электрического сигнала по цепи. Близка к 300000 км/с.
2. *Скорость направленного движения свободных зарядов.* Это — средняя скорость перемещения зарядов, образующих ток. Называется ещё *скоростью дрейфа*.

Мы сейчас выведем формулу, выражающую силу тока  $I$  через скорость  $v$  направленного движения зарядов проводника.

Пусть проводник имеет площадь поперечного сечения  $S$  (рис. 2). Свободные заряды проводника будем считать положительными; величину свободного заряда обозначим  $e$  (в наиболее важном для практики случае металлического проводника это есть заряд электрона). Концентрация свободных зарядов (т. е. их число в единице объёма) равна  $n$ .

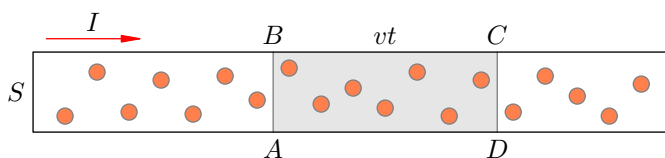


Рис. 2. К выводу формулы  $I = envS$

Какой заряд  $q$  пройдёт через поперечное сечение  $AB$  нашего проводника за время  $t$ ?

С одной стороны, разумеется,

$$q = It. \tag{3}$$

С другой стороны, сечение  $AB$  пересекут все те свободные заряды, которые спустя время  $t$  окажутся внутри цилиндра  $ABCD$  с высотой  $vt$ . Их число равно:

$$N = nV_{ABCD} = nSvt.$$

Следовательно, их общий заряд будет равен:

$$q = eN = enSvt. \tag{4}$$

Приравнивая правые части формул (3) и (4) и сокращая на  $t$ , получим:

$$I = envS. \tag{5}$$

Соответственно, плотность тока оказывается равна:

$$j = env.$$

Давайте в качестве примера посчитаем, какова скорость движения свободных электронов в медном проводе при силе тока 1 А.

Заряд электрона известен:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Чему равна концентрация свободных электронов? Она совпадает с концентрацией атомов меди, поскольку от каждого атома отщепляется по одному валентному электрону. Ну а концентрацию атомов мы находить умеем:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_A}{V} = \frac{m N_A}{\mu V} = \frac{\rho N_A}{\mu} = \frac{8900 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{0,0635} \approx 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Положим  $S = 1 \text{ мм}^2$ . Из формулы (5) получим:

$$v = \frac{I}{enS} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} \approx 7,4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Это порядка одной десятой миллиметра в секунду.

## Стационарное электрическое поле

Мы всё время говорим о направленном движении зарядов, но ещё не касались вопроса о том, *почему* свободные заряды совершают такое движение. Почему, собственно, возникает электрический ток?

Для упорядоченного перемещения зарядов внутри проводника необходима сила, действующая на заряды в определённом направлении. Откуда берётся эта сила? Со стороны электрического поля!

*Чтобы в проводнике протекал постоянный ток, внутри проводника должно существовать стационарное<sup>4</sup> электрическое поле. Иными словами, между концами проводника нужно поддерживать постоянную разность потенциалов.*

Стационарное электрическое поле должно создаваться зарядами проводников, входящих в электрическую цепь. Однако заряженные проводники сами по себе не смогут обеспечить протекание постоянного тока.

Рассмотрим, к примеру, два проводящих шара, заряженных разноимённо. Соединим их проводом. Между концами провода возникнет разность потенциалов, а внутри провода — электрическое поле. По проводу потечёт ток. Но по мере прохождения тока разность потенциалов между шарами будет уменьшаться, вслед за ней станет убывать и напряжённость поля в проводе. В конце концов потенциалы шаров станут равны друг другу, поле в проводе обратится в нуль, и ток исчезнет. Мы оказались в электростатике: шары плюс провод образуют единый проводник, в каждой точке которого потенциал принимает одно и то же значение; напряжённость поля внутри проводника равна нулю, никакого тока нет.

То, что электростатическое поле само по себе не годится на роль стационарного поля, создающего ток, ясно и из более общих соображений. Ведь электростатическое поле потенциально, его работа при перемещении заряда по замкнутому пути равна нулю. Следовательно, оно не может вызывать циркулирование зарядов по замкнутой электрической цепи — для этого требуется совершать ненулевую работу.

Кто же будет совершать эту ненулевую работу? Кто будет поддерживать в цепи разность потенциалов и обеспечивать стационарное электрическое поле, создающее ток в проводниках? Ответ — источник тока, важнейший элемент электрической цепи.

*Чтобы в проводнике протекал постоянный ток, концы проводника должны быть присоединены к клеммам источника тока (батарейки, аккумулятора и т. д.).*

Клеммы источника — это заряженные проводники. Если цепь замкнута, то заряды с клемм перемещаются по цепи — как в рассмотренном выше примере с шарами. Но теперь разность потенциалов между клеммами не уменьшается: источник тока непрерывно восполняет заряды на клеммах, поддерживая разность потенциалов между концами цепи на неизменном уровне.

В этом и состоит предназначение источника постоянного тока. Внутри него протекают процессы неэлектрического (чаще всего — химического) происхождения, которые обеспечивают непрерывное разделение зарядов. Эти заряды поставляются на клеммы источника в необходимом количестве.

---

<sup>4</sup>То есть — постоянное, не зависящее от времени.

Количественную характеристику неэлектрических процессов разделения зарядов внутри источника — так называемую ЭДС — мы изучим позже, в соответствующем листке.

А сейчас вернёмся к стационарному электрическому полю. Каким же образом оно возникает в проводниках цепи при наличии источника тока?

Заряженные клеммы источника создают на концах проводника электрическое поле. Свободные заряды проводника, находящиеся вблизи клемм, приходят в движение и действуют своим электрическим полем на соседние заряды. Со скоростью, близкой к скорости света, это взаимодействие передаётся вдоль всей цепи, и в цепи устанавливается постоянный электрический ток. Стабилизируется и электрическое поле, создаваемое движущимися зарядами.

*Стационарное электрическое поле — это поле свободных зарядов проводника, совершающих направленное движение.*

Стационарное электрическое поле не меняется со временем потому, что при постоянном токе не меняется картина распределения зарядов в проводнике: на место заряда, покинувшего данный участок проводника, в следующий момент времени поступает точно такой же заряд. По этой причине стационарное поле во многом (но не во всём) аналогично полю электростатическому.

А именно, справедливы следующие два утверждения, которые понадобятся нам в дальнейшем (их доказательство даётся в вузовском курсе физики).

1. Как и электростатическое поле, стационарное электрическое поле *потенциально*. Это позволяет говорить о разности потенциалов (т. е. напряжении) на любом участке цепи<sup>5</sup>.

Потенциальность, напомним, означает, что работа стационарного поля по перемещению заряда не зависит от формы траектории. Именно поэтому при параллельном соединении проводников напряжение на каждом из них одинаково: оно равно разности потенциалов стационарного поля между теми двумя точками, к которым подключены проводники.

2. В отличие от электростатического поля, стационарное поле движущихся зарядов проникает внутрь проводника (дело в том, что свободные заряды, участвуя в направленном движении, не успевают должным образом перестраиваться и принимать «электростатические» конфигурации).

Линии напряжённости стационарного поля внутри проводника параллельны его поверхности, как бы ни изгибался проводник. Поэтому, как и в однородном электростатическом поле, справедлива формула  $U = El$ , где  $U$  — напряжение на концах проводника,  $E$  — напряжённость стационарного поля в проводнике,  $l$  — длина проводника.

---

<sup>5</sup>Именно эту разность потенциалов мы измеряем вольтметром.