



**Виртуальный курс физики**  
**Электричество и магнетизм**  
**Лекция 10. Постоянный электрический**  
**ТОК.**

**ТЕОРИЯ, ЗАДАЧИ, ПОДГОТОВКА К ЕГЭ**



**Уважаемые друзья!**

**Вы выбрали Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I и поступили, несомненно, правильно!**

**Наш университет основан в 1809 году. Это старейший инженерный транспортный вуз России. Это "особенный институт" - так в манифесте назвал его Император Александр I.**

**Для того, чтобы успешно пройти вступительные испытания и стать студентом одного из лучших технических вузов России, необходимо иметь высокую подготовку по физике.**

**Как правило, уровень подготовки выпускников школ не всегда соответствует требованиям, предъявляемым к поступающим в высшие учебные заведения. Повысить этот уровень и качественно подготовиться к вступительным испытаниям по физике в технический университет помогут преподаватели факультета довузовской подготовки.**

**Факультет довузовской подготовки организует и проводит курсы по подготовке к поступлению в вуз по программам, соответствующим требованиям ЕГЭ.**

**Занятия проводятся по очной и заочной формам обучения. Занятия по очной форме обучения проводятся в дневное время - с 16.25 (тел. [457-84-04](tel:457-84-04)), и в вечернее время - с 18.00 (тел. [457-87-83](tel:457-87-83)). Мы с удовольствием ответим на все Ваши вопросы.**

**Факультет довузовской подготовки**

***Курс дистанционного обучения по физике  
изложен в авторской редакции доцента  
Петербургского государственного университе-  
та путей сообщения Императора Александра I  
Кытина Юрия Александровича***

# Электричество и магнетизм

## Постоянный электрический ток

### Лекция 10

**Тема: Электрический ток. Сила и плотность тока. Электродвижущая сила источника тока. Закон Ома для участка цепи и для полной цепи. Последовательное и параллельное соединение проводников. Работа и мощность тока. Электронная проводимость металлов. Электрический ток в электролитах. Полупроводники. Электрический ток в газах. Ток в вакууме.**

#### 10.1. Электрический ток. Сила и плотность тока

*Электрическим током* называется упорядоченное движение электрических заряженных тел или частиц. Ток в проводнике, обусловленный движением свободных зарядов под действием электрического поля, называется *током проводимости*. Ток проводимости в металлах создается упорядоченным движением свободных электронов, в электролитах – движением ионов, в газах – положительными ионами и свободными электронами. За направление тока принимается направление движения положительных зарядов.

*Силой тока* называется величина  $I$ , равная электрическому заряду, переносимому через поперечное сечение проводника за единичный промежуток времени.

Электрический ток, сила и направление которого сохраняются неизменными, называется *постоянным током*. Сила постоянного тока

$$I = \frac{q}{t},$$

где  $q$  – заряд, переносимый за время  $t$  через поперечное сечение проводника.

Сила тока измеряется в амперах (А):  $1\text{ А} = 1\text{ Кл/1с}$ .

Сила тока в металлическом проводнике зависит от значения заряда носителя (в металлических проводниках такими носителями являются электроны с зарядом  $e$  каждый), их концентрации  $n$ , средней скорости  $v_{\text{ср}}$  упорядоченного движения носителей и площади поперечного сечения  $S$  проводника. Действительно, число носителей в элементе проводника длиной  $l$  и площадью сечения  $S$  (рис.10.1)

$$N = nV,$$

где  $V$  – объем элемента проводника ( $V = lS$ ), а их общий заряд

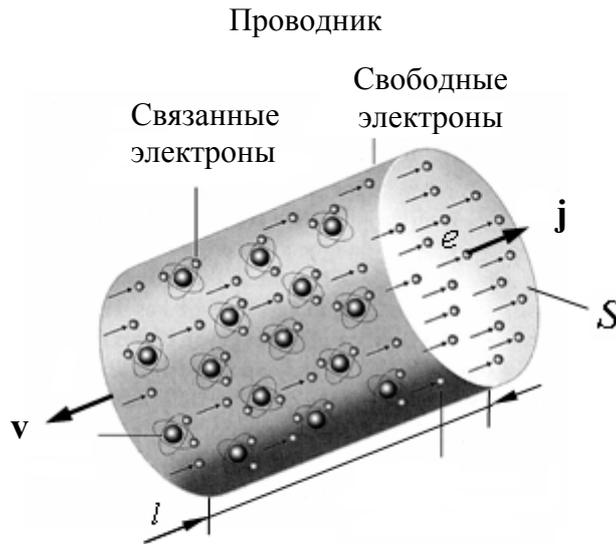


Рис. 10.1

$$q = enlS.$$

Если средняя скорость направленного движения носителей заряда  $v_{\text{cp}}$ , то все носители пройдут через сечение  $S$  за промежуток времени  $t = \frac{l}{v_{\text{cp}}}$ .

Таким образом, сила тока

$$I = \frac{q}{t} = env_{\text{cp}}S.$$

Распределение переносимого заряда по поперечному сечению проводника и направление тока характеризуются *вектором плотности тока*  $\mathbf{j}$ , модуль которого для металлических проводников

$$j = \frac{I}{S} = nev_{\text{cp}}.$$

Направление вектора плотности тока  $\mathbf{j}$  совпадает с направлением тока.

## 10.2. Сторонние силы. Электродвижущая сила источника тока

Для возникновения тока в проводниках и его поддержания в течение конечного промежутка времени на носители заряда должны действовать силы, которые обеспечивают их упорядоченное движение. Действие

электростатических сил приводит к такому распределению зарядов внутри проводника, при котором напряженность поля в нем оказывается равной нулю, а потенциалы всех его точек одинаковы. Вследствие этого кулоновское электростатическое поле не может обеспечить появления тока в проводнике. Для существования тока необходимо поддерживать разность потенциалов на концах проводника и тем самым обеспечивать внутри него создание электрического поля. Этой цели можно достичь с помощью сил неэлектрического происхождения, которые называются *сторонними силами*. Сторонние силы обеспечиваются *источниками тока* (электрические генераторы, аккумуляторы и т. д.).

Таким образом, для того чтобы постоянный ток в проводнике возник и существовал в течение конечного промежутка времени, необходимо выполнение следующих условий:

- а) наличие свободных носителей заряда;
- б) напряженность поля внутри проводника должна быть отличной от нуля и не зависеть от времени;
- в) наличие сторонних сил неэлектрического происхождения, которые должны поддерживать существование электрического поля внутри проводника;
- г) электрическая цепь должна быть замкнутой.

Работа источников тока характеризуется электродвижущей силой (ЭДС). *Электродвижущей силой*  $\varepsilon$  источника тока называется величина, численно равная работе, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда по цепи:

$$\varepsilon = \frac{A}{q},$$

где  $A$  – работа сторонних сил по перемещению заряда  $q$ .

Единицей измерения ЭДС служит вольт (В):  $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/1 Кл}$ .

### 10.3. Закон Ома. Сопротивление проводников

В общем случае при перемещении заряда по цепи совершается работа как сторонними, так и кулоновскими силами. Работа, совершаемая этими силами при перемещении единичного положительного заряда на участке цепи  $1 - 2$ , называется *напряжением*  $U$ :

$$U = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{2-1},$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2$  – разность потенциалов между концами участка цепи;  $\varepsilon_{2-1}$  – ЭДС, действующая на участке цепи.

Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы (отсутствует источник тока), называется *однородным участком* (рис. 10.2).

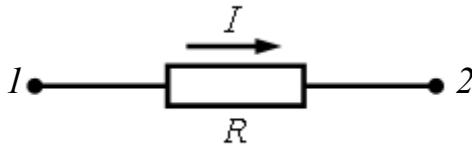


Рис. 10.2

Напряжение  $U$  на однородном участке равно разности потенциалов между его концами:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Сила тока на таком участке цепи подчиняется *закону Ома*: сила тока  $I$  на однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению  $U$  и обратно пропорциональна сопротивлению  $R$  этого ее участка:

$$I = \frac{U}{R}.$$

*Электрическое сопротивление*  $R$  характеризует способность проводников проводить электрический ток. Оно зависит от материала проводника, его геометрической формы и размеров, температуры и других внешних факторов. Сопротивление однородного металлического цилиндрического проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника – величина, зависящая от его материала.

Удельное сопротивление численно равно сопротивлению проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>.

В системе СИ сопротивление измеряется в омах, 1 Ом = 1 В/А.

Наряду с ом для измерения сопротивления применяются кратные единицы: килоом (1 кОм = 10<sup>3</sup> Ом), мегаом (1 МОм = 10<sup>6</sup> Ом).

Единицей удельного сопротивления в системе СИ служит 1 Ом·м. Сопротивление металлических проводников увеличивается с ростом температуры по закону

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $R_0$  – сопротивление при 0 °С;  $t$  – температура проводника;  $R_t$  – сопротивление проводника при  $t$  °С,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, показывающий относительное изменение сопротивления проводника при увеличении его температуры на 1 °С.

## 10.4. Закон Ома для полной цепи

Замкнутая цепь, состоящая из источника тока с ЭДС  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ , а также внешнего сопротивления  $R$ , называется *полной электрической цепью* (рис.10.3).

*Закон Ома для полной цепи* формулируется следующим образом: сила тока  $I$  в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС  $\varepsilon$ , действующей в этой цепи, и обратно пропорциональна сумме внешнего  $R$  и внутреннего  $r$  сопротивлений:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

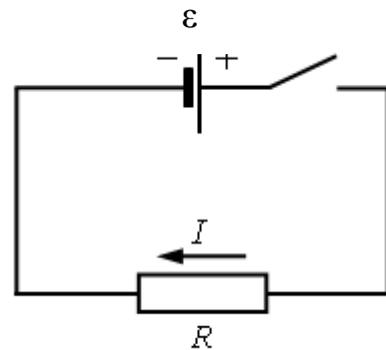


Рис. 10.3

## 10.5. Последовательное и параллельное соединение проводников

При составлении электрических цепей используются *последовательное* и *параллельное соединения* проводников.

При последовательном соединении  $n$  проводников (рис. 10.4):

а) сила тока во всех частях, входящих в цепь, одинакова:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I = \text{const};$$

б) падение напряжения во всей цепи равно сумме падений напряжений на отдельных проводниках:

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

в) падение напряжения на отдельных проводниках прямо пропорционально их сопротивлению:

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

г) общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений, входящих в цепь проводников:

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

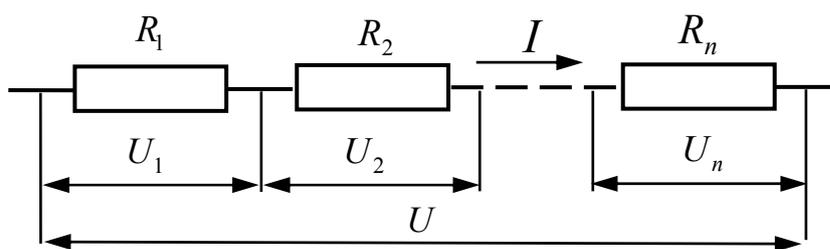


Рис. 10.4

При параллельном соединении  $n$  проводников (рис. 10.5):

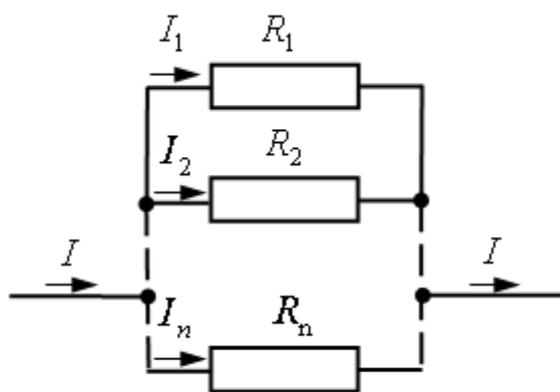


Рис. 10.5

а) общий ток в цепи равен сумме токов, текущих по отдельным проводникам:

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

б) падения напряжения на всех параллельно соединенных проводниках равны друг другу:

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n;$$

в) сила тока на параллельно соединенных проводниках обратно пропорциональна их сопротивлению:

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

г) общее сопротивление параллельно соединенных проводников определяется следующим образом:

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

## 10.6. Работа и мощность тока

При перемещении заряда  $q$  по участку цепи, падение напряжения на котором равно  $U$ , совершается работа

$$A = qU .$$

Так как  $q = It$ , получаем

$$A = IUt .$$

Согласно закону Ома для участка цепи выражение для работы тока можно записать следующим образом:

$$A = I^2 R t, \quad A = \frac{U^2}{R} t.$$

Так как мощность

$$N = \frac{A}{t},$$

для электрического тока ее можно определить следующим выражением:

$$N = IU, \quad N = I^2 R, \quad \text{или} \quad N = \frac{U^2}{R}.$$

В системе СИ работа измеряется в джоулях (Дж), а мощность – в ваттах (Вт). Во внесистемных единицах работу тока принято измерять в киловатт-часах (кВт·ч), мощность – в киловаттах (1 кВт =  $10^3$  Вт). Один киловатт-час численно равен работе, совершаемой током мощностью 1 кВт в течение одного часа (1 кВт·ч =  $3,6 \cdot 10^6$  Дж).

При прохождении электрического тока по проводнику электроны проводимости сталкиваются с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки и передают им свою кинетическую энергию, которая идет на нагревание проводника. Выделяющееся при этом количество теплоты определяется *законом Джоуля–Ленца*: количество теплоты  $Q$ , выделяющееся в проводнике при прохождении по нему тока, прямо пропорционально квадрату силы тока  $I$ , сопротивлению  $R$  проводника и времени  $t$  прохождения тока:

$$Q = I^2 R t.$$

## 10.7. Электронная проводимость металлов

Свободными носителями заряда в металлах являются электроны. Существование свободных электронов объясняется особенностью кристаллической структуры металлов. При образовании кристаллов от атомов металла отделяются наиболее слабо связанные с ними валентные электроны, которые и становятся свободными. Свободные электроны подобно молекулам идеального газа хаотически движутся во всем объеме кристалла. Соударения при хаотическом движении свободных электронов между собой и с ионами в узлах кристаллической решетки создают общее тепловое равновесие внутри металла.

При помещении металла в электрическое поле происходит упорядоченное движение свободных электронов вдоль силовых линий поля, т. е. создается электрический ток. При этом хаотическое движение электронов сохраняется.

Электронная теория проводимости объясняет сопротивление металла соударениями упорядоченно движущихся свободных электронов с ионами в узлах кристаллической решетки, при которых происходит потеря энергии электронами. Потерянная энергия упорядоченного движения электронов переходит во внутреннюю энергию металла, увеличение которой приводит к нагреванию проводника.

## 10.8. Электрический ток в электролитах. Законы электролиза

*Электролитами* называются вещества, в которых перенос электрических зарядов при прохождении тока осуществляется ионами. К таким веществам относятся растворы кислот, щелочей, солей и т. п. Молекулы растворенного вещества в результате взаимодействия с растворителем (например, молекулы поваренной соли NaCl с молекулами воды) распадаются на положительно заряженные ионы (*катионы*) и отрицательно заряженные ионы (*анионы*). Этот процесс называется *электролитической диссоциацией*. Если в электролите с помощью источника тока создать электрическое поле, то оно вызовет направленное движение ионов – анионы будут двигаться к положительно заряженному электроду (аноду), а катионы – к отрицательно заряженному (катоду), т. е. в электролите возникнет электрический ток.

Прохождение тока в электролитах сопровождается выделением на электродах веществ, входящих в состав электролита. Это явление называется *электролизом*.

Количественно электролиз описывается законами Фарадея.

*Первый закон Фарадея*: масса вещества  $m$ , выделившегося на электроде, прямо пропорциональна электрическому заряду  $q$ , прошедшему через электролит:

$$m = kq ,$$

где  $k$  – *электрохимический эквивалент вещества*, который численно равен массе вещества, выделившегося на электроде при прохождении через электролит заряда, равного 1 Кл.

Так как при постоянном токе прошедший заряд  $q = It$ , имеем

$$m = kIt .$$

*Второй закон Фарадея:* электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n},$$

где  $A$  – атомная масса;  $n$  – валентность вещества;  $F$  – постоянная Фарадея.

*Химическим эквивалентом* данного вещества называется отношение атомной массы  $A$  к валентности вещества  $n$ .

*Объединенный закон Фарадея* описывается выражением

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} q, \text{ или } m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} It.$$

Из этого закона следует, что постоянная Фарадея  $F$  численно равна электрическому заряду, который должен пройти через электролит для того, чтобы на электроде выделилось вещество с массой, численно равной химическому эквиваленту данного вещества:  $F = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль.

## **10.9. Полупроводники. Собственная проводимость полупроводников**

*Полупроводниками* называются вещества, удельное сопротивление которых убывает с ростом температуры. К таким веществам относятся германий, кремний, теллур и другие.

Электропроводность полупроводников объясняется следующим образом. У чистых (без примесей) полупроводников при низких температурах практически отсутствуют свободные электроны, и по электрическим свойствам такой полупроводник является диэлектриком. При нагревании или при воздействии на полупроводник излучения валентные электроны, которые слабо связаны с атомом, теряют химические связи с атомом и становятся свободными. Появление таких электронов приводит к возникновению *собственной электронной проводимости (проводимости  $n$ -типа)* чистого проводника. С повышением температуры число свободных электронов возрастает, и собственная проводимость полупроводника увеличивается, а удельное сопротивление падает (рис. 10.6).

При разрыве химической связи электрон освобождается, а в месте его ухода образуется избыточный положительный заряд. Место, в котором образуется этот заряд, называется *дыркой*.

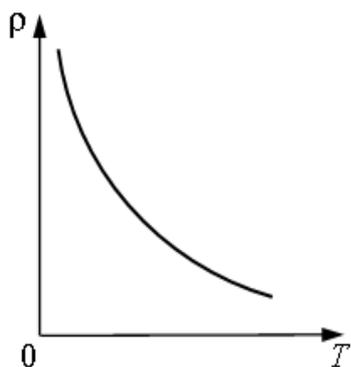


Рис. 10.6

Число дырок в кристалле равно числу образовавшихся свободных электронов.

Дырки могут хаотически замещаться валентными электронами, при этом происходит перемещение дырок. Под действием внешнего электрического поля замещение дырок валентными электронами происходит упорядоченно против направления электрического поля. При этом перемещение самих дырок противоположно направлению перемещения электронов, т. е. совпадает с направлением

электрического поля.

Таким образом, ток в полупроводниках осуществляется двумя типами носителей: электронами и дырками, а проводимость полупроводников называется *электронно-дырочной*.

## 10.10. Примесная проводимость полупроводников

Если, например, в кристалл германия, атомы которого четырехвалентны, ввести пятивалентные атомы (например, мышьяка, фосфора), то один валентный электрон примеси, не участвующий в химической связи, становится свободным. Под действием электрического поля такие электроны вовлекаются в упорядоченное движение в полупроводнике и генерируют электрический ток. Полупроводники с проводимостью такого типа называются *электронными полупроводниками*, или *полупроводниками n-типа*. Атомы примесей, отдающие свои электроны, называются *донорами*, а примесь – *донорной*.

Если в качестве примеси для четырехвалентного полупроводника использовать трехвалентные атомы (например, бор, алюминий, индий), то для образования химических связей возникает нехватка в одном электроны. Для того чтобы образовать недостающую связь, примесный атом берет один электрон у ближайшего атома полупроводника. На месте этого электрона образуется положительная дырка. Под действием электрического поля образовавшиеся дырки перемещаются по полю, и в полупроводнике возникает *дырочная проводимость*. Полупроводники такого типа называются *примесными дырочными*, или *полупроводниками p-типа*. Атомы примесей в этом случае называются *акцепторами*, а примесь – *акцепторной*.

## 10.11. Электрический ток в газах. Несамостоятельный и самостоятельный газы разряды

В отличие от металлов и электролитов газы, состоящие из атомов и молекул, не имеют свободных носителей зарядов, т. е. являются диэлектриками. Свободные носители заряда возникают только при *ионизации* газа. При ионизации от атомов отрываются электроны, которые становятся свободными, атом при этом превращается в положительный ион.

Ионизация газа может происходить при сильном его нагревании, облучении ультрафиолетовыми и рентгеновскими лучами, бомбардировке атомов (молекул) быстрыми частицами – электронами или ионами.

Электрический ток в газе называют *газовым разрядом*. Обычно газовый разряд создают в трубке, заполненной газом, находящимся под действием внешнего ионизатора. В концы трубки впаивают два электрода (положительный – «анод», отрицательный – «катод»), с помощью которых внутри нее можно создать электрическое поле.

На рис. 10.7 показана зависимость силы тока  $I$  от напряжения  $U$  между электродами – *вольтамперная характеристика* газового разряда. С увеличением напряжения  $U$  сила тока  $I$  увеличивается (участок  $0 - 1$ ), при напряжении  $U_H$  достигает значения  $I_H$  и остается неизменной при дальнейшем увеличении напряжения до величины  $U_3$ . Ток, соответствующий напряжению  $U_H$ , называется *током насыщения*. При насыщении все заряженные частицы, образовавшиеся в газе в единицу времени, достигают электродов. Сила тока насыщения

$$I_H = Nq,$$

где  $q$  – заряд свободного носителя;  $N$  – число пар одновалентных ионов, образовавшихся в объеме газа за 1 с.

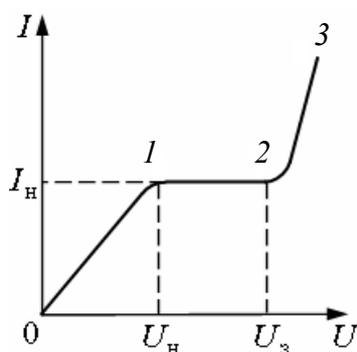


Рис. 10.7

Ток в газе, полученный с помощью внешнего ионизатора, называется *несамостоятельным газовым разрядом* (участок  $0-1-2$  вольтамперной характеристики).

Начиная с  $U_3$  (*напряжение зажигания*) и при дальнейшем увеличении напряжения ток снова начинает возрастать. Это означает, что в газе появились новые свободные заряды сверх тех, которые возникали под действием внешнего ионизатора. Новые носители заряда появляются в результате так называемой *ударной ионизации*.

Электроны и ионы, ускоренные высокой разностью потенциалов ( $U > U_3$ ), соударяясь с атомами или молекулами газа, сами выбивают электроны из атомов. Все свободные заряды вновь ускоряются электрическим полем и, в свою очередь, ионизируют встречные атомы. Число свободных заряженных частиц лавинообразно нарастает, ток резко увеличивается, превышая  $I_H$  во много раз. Такой разряд не нуждается во внешнем ионизаторе и называется *самостоятельным газовым разрядом* (участок 2–3 на рис. 11.7). При самостоятельном газовом разряде источником свободных электронов является катод, который бомбардируют ускоренные положительные ионы, выбивая электроны из атомов вещества катода. Этот процесс называют *электронной эмиссией*.

Различают несколько видов самостоятельного газового разряда в зависимости от давления газа и напряжения:

- а) *тлеющий* разряд наблюдается при низком давлении (примерно 1–0,1 мм рт. ст.);
- б) *искровой* разряд – разряд при нормальном давлении и высоком напряжении между электродами. Этот разряд имеет вид пучка ярких зигзагообразных линий (например, молния);
- в) *коронный* разряд, появляющийся при нормальном давлении около заостренного проводника, имеющего большой электрический заряд;
- г) *дуговой* разряд, образующийся между двумя электродами (стержнями) при атмосферном давлении и сравнительно небольших разностях потенциалов (несколько десятков вольт). Причиной дугового разряда является испускание электронов раскаленным катодом, которые ускоряются электрическим полем и производят ударную ионизацию воздушного промежутка. Яркий дуговой разряд (температура газа достигает 5000 – 6000 °С) используется как мощный источник энергии: в прожекторах, для сварки металлических конструкций и т. д.

## **11.12. Ток в вакууме. Термоэлектронная эмиссия. Диод. Электронно-лучевая трубка**

*Вакуумом* называют такую степень разрежения газа, при которой молекулы его долетают от одной стенки баллона до другой, не испытывая соударений друг с другом. В вакууме концентрация молекул (атомов) столь мала, что их ионизация не обеспечивает электропроводности.

Электрический ток в вакууме можно получить с помощью *электронной эмиссии* – испусканием электронов с поверхности электродов.

*Термоэлектронной эмиссией* называют испускание электронов металлами при нагревании. Число испускаемых электронов зависит от рода металла, состояния поверхности и температуры. Обычно термоэмиссия электронов происходит при таких температурах, при которых наблюдается свечение раскаленного металла. С увеличением температуры металла число испускаемых электронов увеличивается. Термоэлектронная эмиссия находит широкое применение в электровакуумных приборах. Простейшим среди них является диод (рис. 10.8).

*Диод* представляет собой баллон, из которого откачан воздух. В баллон впаяны два электрода – анод *A* и катод *K*. Раскаленный катод испускает электроны, которые под действием электрического поля движутся от катода к аноду, в результате чего через лампу течет ток *I*. Величина тока зависит от напряжения  $U_a$ , возникающего между анодом и катодом. График зависимости тока *I* от напряжения  $U_a$  между анодом и катодом (анодное напряжение) приведен на рис. 10.9. При некотором напряжении достигается ток насыщения  $I_{нас}$ . В этом случае все вылетающие в единицу времени с поверхности катода электроны достигают анода.

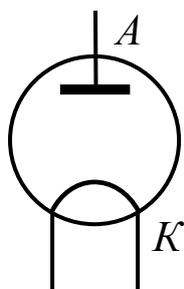


Рис. 10.8

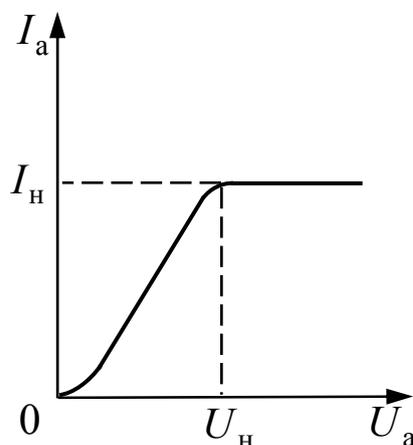


Рис. 10.9

Диод обладает односторонней проводимостью: если потенциал анода выше, чем потенциал катода, диод проводит ток, если потенциал анода ниже потенциала катода – не проводит. Это свойство диода используется для выпрямления переменного тока.

К электровакуумным приборам относится также *электронно-лучевая трубка*, работа которой связана с явлением термоэлектронной эмиссии с катода (рис. 10.10).

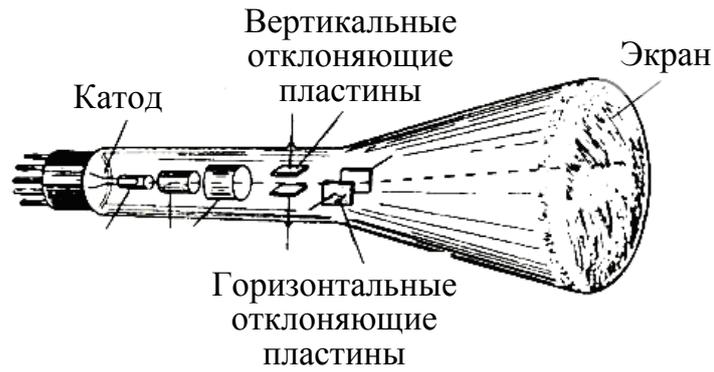


Рис. 10.10

Электроны, испускаемые катодом, проходят через систему, состоящую из управляющих электродов и ускоряющих анодов, предназначенных для фокусирования электронного пучка. Сфокусированный пучок проходит через систему вертикально и горизонтально отклоняющих пластин, которые называются *управляющими электродами*. С помощью этих электродов электронный пучок можно перемещать на экране в любом направлении. Электронно-лучевые трубки применяются в телевидении, электронных осциллографах и т. д.

## **От авторов**

***Возникли трудности в усвоении теоретического курса или в его применении при решении конкретных задач, тестов – записывайтесь на наши курсы и мы поможем Вам подойти к экзамену во всеоружии.***

***Наш адрес:***

***190031, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 9, ПГУПС, факультет довузовской подготовки.***

***Наши телефоны отдела заочной формы обучения:***

***8 (931) 214-51-45;  
8 (812) 457-88-07 .***