

В. А. Касьянов

# ФИЗИКА

Учебник

Рекомендовано  
Министерством просвещения  
Российской Федерации

*8-е издание, стереотипное*

Москва



2020

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

# 11

к л а с с

 | российский  
учебник

УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я72  
К28

Одобрено Научно-редакционным советом корпорации  
«Российский учебник» под председательством академиков  
Российской академии наук В. А. Тишкова и В. А. Черешнева

**Касьянов, В. А.**

К28 Физика. Базовый уровень. 11 класс : учебник / В. А. Касьянов. — 8-е изд., стереотип. — М. : Дрофа, 2020. — 288 с. : ил., 6 л. цв. вкл. — (Российский учебник).

ISBN 978-5-358-23441-3

Учебник предназначен учащимся 11 класса, изучающим физику на базовом уровне, и является продолжением учебника «Физика. 10 класс» того же автора.

Учебник создан с учётом современных научных представлений, соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту среднего общего образования и включает следующие разделы: «Электродинамика», «Электромагнитное излучение», «Физика высоких энергий», «Элементы астрофизики».

Достоинством учебника является тщательно разработанный методический аппарат, включающий вопросы, задачи, творческие задания, описания лабораторных работ. Синим цветом выделены названия параграфов, необязательных для изучения.

К учебнику изданы дидактические материалы.

Раздел «Лабораторные работы» подготовлен Г. Г. Никифоровым.

Творческие задания составлены О. А. Крысановой и Н. В. Ромашкиной.

УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я72

РОССИЙСКИЙ УЧЕБНИК

Учебное издание

**Касьянов Валерий Алексеевич**

**ФИЗИКА. Базовый уровень. 11 класс**

Учебник

Зав. редакцией *И. Г. Власова*. Ответственный редактор *А. О. Тупикин*

Оформление *М. В. Мандрыкина*. Художник *Л. Я. Александрова*

Художественный редактор *М. В. Мандрыкина*. Технический редактор *И. В. Грибкова*

Компьютерная вёрстка *Г. А. Фетисова*. Корректор *Г. И. Мосякина*

Подписано в печать 12.07.19. Формат 70 × 90<sup>1/16</sup>. Гарнитура «Школьная».

Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,06 + 0,88 цв. вкл. Тираж 2000 экз. Заказ №

ООО «ДРОФА». 123112, г. Москва, Пресненская набережная,  
дом 6, строение 2, помещение № 1, этаж 14.



[rosuchebnik.rf/метод](http://rosuchebnik.rf/метод)

Предложения и замечания по содержанию и оформлению книги  
можно отправлять по электронному адресу: [expert@rosuchebnik.ru](mailto:expert@rosuchebnik.ru)

По вопросам приобретения продукции издательства обращайтесь:  
тел.: 8-800-700-64-83; e-mail: [sales@rosuchebnik.ru](mailto:sales@rosuchebnik.ru)

Электронные формы учебников, другие электронные материалы и сервисы:  
[lecta.rosuchebnik.ru](http://lecta.rosuchebnik.ru), тел.: 8-800-555-46-68

В помощь учителю и ученику: регулярно пополняемая библиотека дополнительных  
материалов к урокам, конкурсы и акции с поощрением победителей, рабочие программы,  
вебинары и видеозаписи открытых уроков [rosuchebnik.rf/метод](http://rosuchebnik.rf/метод)

ISBN 978-5-358-23441-3

© ООО «ДРОФА», 2014

© ООО «ДРОФА», 2019, с изменениями

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

## 1

## Постоянный электрический ток

### § 1. Электрический ток

**Движение электрических зарядов в проводнике.** В соответствии с современными научными представлениями, изложенными в разделе «Электростатика» в 10 классе, с неподвижными электрическими зарядами связано электрическое поле. Движущиеся электрические заряды способны создавать электрический ток и магнитное поле.

**Электрический ток — упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.**

*Для существования электрического тока необходимы прежде всего свободные заряды — носители заряда, например электроны в металлах и вакууме, ионы в электролитах и т. п.*

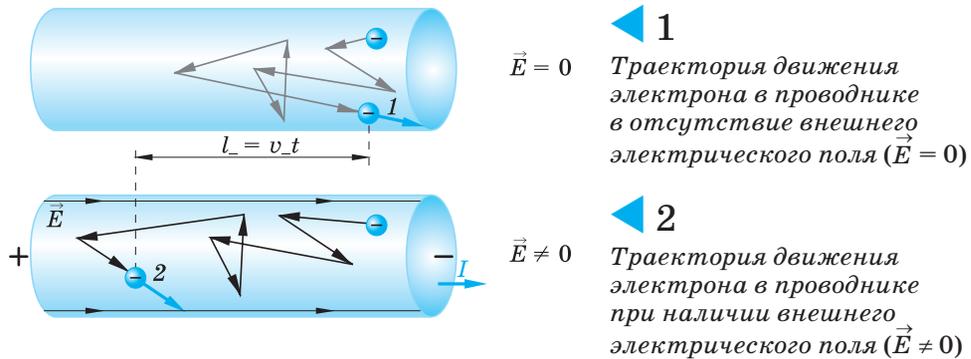
В проводнике концентрация свободных зарядов, которые могут перемещаться по всему объёму тела, наибольшая в сравнении с другими веществами.

Второе условие существования электрического тока в проводнике — наличие внешнего электрического поля.

В отсутствие внешнего электрического поля (его напряжённость  $\vec{E} = 0$ ) движение зарядов в проводнике является хаотическим (рис. 1).

Так движутся, например, положительные и отрицательные ионы в электролитах, электроны в металлических проводниках. После нескольких столкновений с другими частицами заряженные частицы могут вернуться практически к первоначальному положению.

В том случае, когда к проводнику приложено внешнее электрическое поле ( $\vec{E} \neq 0$ ) (рис. 2), на заряды действует дополнительно кулоновская сила. В результате этого электроны, являющиеся носителями свободного заряда в металлах, под действием электрического поля приобретают составляющую скорости  $v_{\perp}$  против напряжённости элект-



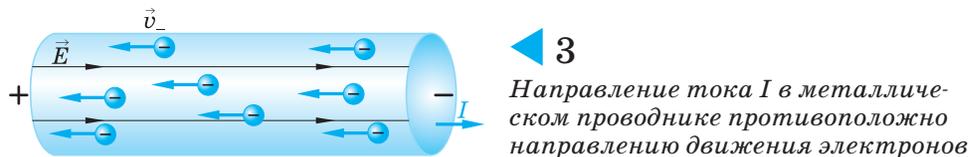
рического поля, или *направленную скорость*. За промежуток времени  $t$  электрон «дрейфует» на расстояние  $l_ = v_ t$  ( $v_$  — скорость дрейфа в направлении, противоположном напряжённости электрического поля).

**Направление электрического тока.** В проводнике, помещённом в электрическое поле, происходит наложение упорядоченного движения зарядов на хаотическое тепловое.

**За направление тока принимают направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц.**

Направление тока совпадает с направлением напряжённости электрического поля, вызывающего этот ток.

Таким образом, в металлах, где носителями электрического заряда являются свободные электроны, направление тока считается противоположным направлению скорости их упорядоченного движения (рис. 3).



### В О П Р О С Ы

1. Дайте определение электрического тока.
2. При каких условиях возникает электрический ток?
3. Почему движение заряженных частиц в проводнике в отсутствие внешнего электрического поля является хаотическим?

4. Чем отличается движение заряженных частиц в проводнике в отсутствие и при наличии внешнего электрического поля?
5. Как выбирается направление электрического тока? В каком направлении движутся электроны в металлическом проводнике, по которому протекает электрический ток?

## § 2. Сила тока

**Определение силы тока.** Степень направленности движения заряженных частиц в проводнике характеризуется величиной электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за 1 с, или *силой тока*. Эта величина может меняться с течением времени.

Сила тока в данный момент времени — скалярная физическая величина, равная отношению электрического заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, к промежутку времени его прохождения:

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

Единица силы тока (основная единица СИ) — *ампер* (А):

$$1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с.}$$

Точное определение ампера будет дано в § 17.

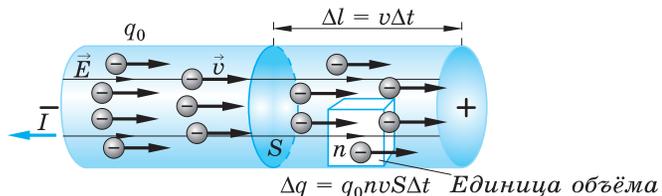
**Связь силы тока с направленной скоростью.** Для того чтобы рассчитать силу тока, найдём заряд  $\Delta q$ , протекающий через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$  (рис. 4). За это время через сечение проводника пройдут только заряды, движущиеся со скоростью  $v$  сонаправленно с напряжённостью внешнего электрического поля, которые находятся внутри цилиндра, площадь сечения которого  $S$  и образующая  $\Delta l = v\Delta t$ . Зная концентрацию  $n$  заряженных частиц (число зарядов в единице объёма), можно найти число заряженных частиц в этом объёме  $N = nSv\Delta t$  и определить их заряд:

$$\Delta q = q_0 N = q_0 n S v \Delta t, \quad (2)$$

где  $q_0$  — заряд одной частицы.

4 

Движение отрицательных зарядов в проводнике



Тогда из формулы (1) следует, что сила тока

$$I = q_0 n S v. \quad (3)$$

Если скорость движения зарядов не зависит от времени, т. е.  $v = \text{const}$ , то сила тока  $I = \text{const}$ .

**Постоянный электрический ток — ток, значение силы тока и направление которого не изменяются с течением времени.**

Постоянный ток широко используется на транспорте, в электрических схемах автомобилей, в электрометаллургии, в микроэлектронике и т. д.

### В О П Р О С Ы

1. Какая величина характеризует интенсивность направленного движения заряженных частиц?
2. Дайте определение силы тока.
3. Как сила тока связана с зарядом, прошедшим за время  $t$  через поперечное сечение проводника?
4. В каких единицах измеряется сила тока?
5. Какой электрический ток называют постоянным? Как сила тока зависит от концентрации заряженных частиц?

### З А Д А Ч И

1. Какой заряд пройдёт через поперечное сечение проводника за 1 мин, если сила тока в проводнике 2 А?
2. Сколько электронов проходит через спираль лампы накаливания за 1 с при силе тока в лампе 1,6 А?
3. В проводнике, площадь поперечного сечения которого 1 мм<sup>2</sup>, сила тока 1,6 А. Концентрация электронов в проводнике  $10^{28}$  м<sup>-3</sup> при температуре 20 °С. Найдите среднюю скорость направленного движения электронов и сравните её с тепловой скоростью электронов.

## § 3. Источник тока в электрической цепи. ЭДС

**Условие существования постоянного тока в проводнике.** При помещении проводника во внешнее электрическое поле в нём происходит перераспределение *свободных зарядов*, называемое *электростатической индукцией* (см. учебник В. А. Касьянова «Физика. Базовый уровень. 10 класс», § 63).

Электрическое поле индуцированных (наведённых) зарядов достаточно быстро компенсирует внешнее поле. Напряжённость поля вну-

три проводника становится равной нулю, заряды перестают двигаться направленно, ток прекращается. Для того чтобы ток существовал непрерывно, необходимо создание и поддержание в проводнике электрического поля. Напряжённость внешнего поля должна быть больше напряжённости поля индуцированных зарядов. Для этого необходимо иметь устройство — *источник тока*, которое непрерывно генерирует заряды и перемещает их в направлении, противоположном направлению кулоновских сил.

**Источники тока.** Разделение зарядов возможно в результате преобразования механической, тепловой, химической, световой энергий в электрическую. Так, в гальваническом элементе заряды на электродах оказываются разноимёнными за счёт энергии химической реакции между электродами и электролитом.

Наиболее распространённые элементы — источники тока — изображены на рисунке 5. Ртутная батарейка (рис. 5, а) используется в часах, калькуляторах и слуховых аппаратах. В настоящее время ртутные батарейки заменяют серебряно-цинковыми, чтобы ограничить применение вредных веществ. Строение традиционной батарейки для карманных фонарей показано на рисунке 5, б.

**Источник тока в электрической цепи.** Для поддержания постоянной разности потенциалов заряды должны накапливаться на полюсах источника: положительные заряды в электролите должны двигаться к аноду, а отрицательные к катоду. Такое движение в направлении, противоположном действию кулоновских сил отталкивания между одноимёнными зарядами, может происходить лишь под действием сил неэлектрической природы, называемых *сторонними силами*.

## 5

**Источники тока:**  
а — ртутная батарейка;  
б — батарейка для карманного фонаря



а)



б)

**Сторонние силы — силы неэлектростатического происхождения, вызывающие разделение зарядов.**

Например, в электролите гальванического элемента положительно заряженная частица (ион) движется от катода к аноду под действием сторонней силы  $\vec{F}_{\text{ст}}$  (рис. 6, а). Кроме того, на эту частицу в направлении, противоположном скорости её движения, действуют электрическая сила  $\vec{F}_{\text{к}}$  со стороны электродов и сила сопротивления  $\vec{F}_{\text{с}}$ . Сила сопротивления характеризует противодействие движению заряженной частицы со стороны ионов, с которыми она сталкивается в процессе движения в электролите.

Роль источника тока в электрической цепи подобна роли насоса для перекачивания жидкости (рис. 6, б). Сторонней силой в этом случае является сила давления на воду вращающейся крыльчатки насоса.

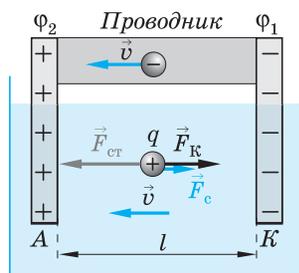
**ЭДС источника тока.** Изменение потенциальной энергии заряда при его перемещении между электродами источника тока равно суммарной работе сторонней силы и силы сопротивления:

$$\Delta W = A_{\text{ст}} + A_{\text{с}}. \quad (4)$$

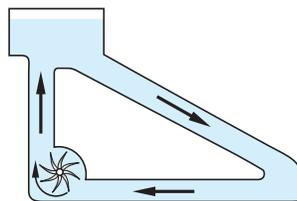
Постоянной величиной для данного источника тока является *электродвижущая сила (ЭДС)*.

**ЭДС — скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению положительного заряда от отрицательного полюса источника тока к положительному к значению этого заряда:**

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (5)$$



а)



б)

## 6

Аналогия между действием источника тока и водяного насоса: а — силы, действующие на заряженную частицу в гальваническом элементе; б — водяной насос

Единица электродвижущей силы — *вольт* (В):

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл.}$$

Изменение потенциальной энергии заряда связано с разностью потенциалов  $U$  между электродами:  $\Delta W = qU$ . Работа силы сопротивления отрицательна, так как эта сила направлена противоположно перемещению заряда, поэтому формулу (4) можно представить в виде

$$U = \mathcal{E} - \frac{|A_c|}{q}. \quad (6)$$

*Разность потенциалов между полюсами источника тока (напряжение), приложенная к подключённому к полюсам проводнику, меньше ЭДС.*

Если полюсы источника разомкнуты, ток через источник не протекает, а работа силы сопротивления равна нулю. Следовательно,

$$\mathcal{E} = U.$$

*ЭДС равна напряжению между полюсами разомкнутого источника тока.* Например, ЭДС ртутной батарейки около 1,4 В, а батарейки для карманного фонаря — 1,5 В.

## В О П Р О С Ы

1. Каково назначение источника тока?
2. Какие силы называют сторонними? Почему накопление зарядов на полюсах источника тока может происходить лишь под действием сторонних сил?
3. Опишите особенности движения заряженной частицы в электролите источника тока.
4. Дайте определение ЭДС. В каких единицах она измеряется?
5. Может ли напряжение источника тока равняться его ЭДС? Если да, то при каком условии?

## § 4. Закон Ома для однородного проводника (участка цепи)

**Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения.** Для существования тока в однородном проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах.

Однородным является проводник, в котором не действуют сторонние силы.

Для каждого проводника — твёрдого, жидкого, газообразного, плазменного — существует определённая зависимость силы тока от приложенной к нему разности потенциалов (или приложенного напряжения). Наиболее простой вид эта зависимость имеет для однородного металлического проводника.

*Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению.*

**Сопротивление проводника.** Коэффициентом пропорциональности между силой тока и напряжением, как вам известно из курса физики основной школы, является электрическое сопротивление проводника  $R$ .

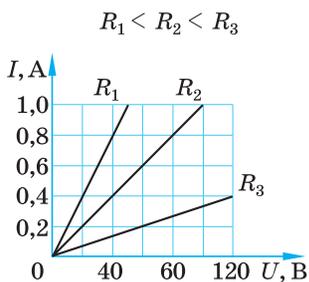
Впервые зависимость силы тока от напряжения была экспериментально получена в 1826 г. немецким учёным *Георгом Омом*.

### Закон Ома для однородного проводника (участка цепи)

Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (7)$$

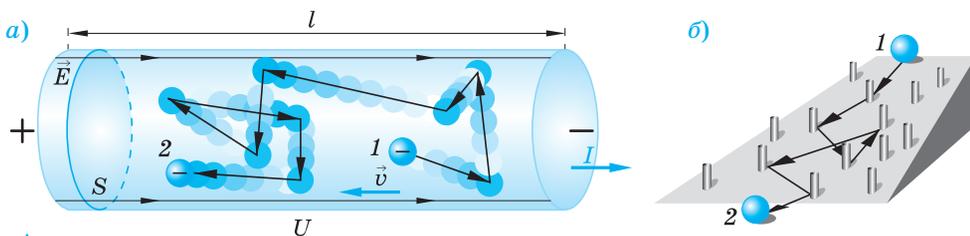
Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения называют *вольт-амперной характеристикой проводника* (рис. 7).



#### ▲ 7

*Вольт-амперные характеристики проводников с различным электрическим сопротивлением*

**Гидродинамическая аналогия сопротивления проводника.** Сопротивление — основная электрическая характеристика проводника. Чем больше электрическое сопротивление при заданном напряжении, тем меньше сила тока в проводнике. Сопротивление характеризует степень противодействия проводника направленному движению зарядов. Из-за столкновений с неоднородностями кристаллической решётки (возникающими, например, при образовании кристалла) или атомами примесей другого элемента в металле электроны движутся по сложной траектории (рис. 8, *a*). Она напоминает траекторию движения шарика, скатывающегося с наклонной плоскости под действием силы тяжести



▲ 8

*Движение электрона в проводнике:*  
 а — траектория движения электрона в проводнике;  
 б — моделирование движения электрона в проводнике

и сталкивающегося с выступающими цилиндрическими штырями (рис. 8, б).

Единица сопротивления — ом (Ом):

$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А.}$$

*Электрическое сопротивление зависит от геометрических размеров и материала проводника.*

Зависимость сопротивления от длины и площади поперечного сечения проводника легко понять с помощью гидродинамической аналогии.

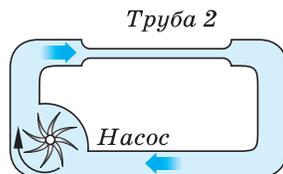
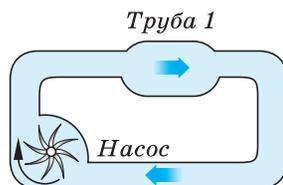
Сопротивление движению, которое испытывает вода, текущая по трубе, возрастает при увеличении длины трубы и уменьшении площади её сечения (рис. 9). Соответственно масса жидкости, перекачиваемая насосом в единицу времени по трубе 2, будет меньше, чем по трубе 1. Сила тока подобна массе жидкости, перекачиваемой насосом в единицу времени.

*Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S:*

$$R = \rho \frac{l}{S}. \tag{8}$$

**Удельное сопротивление.** Коэффициент пропорциональности  $\rho$  в формуле (8) — *удельное сопротивление проводника.*

**Удельное сопротивление** — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади.



▲ 9

*Гидродинамическая аналогия электрического сопротивления*



Изменение сопротивления проводника в соответствии с формулой (8) возможно либо при изменении его длины (как в реостате — проводнике с переменным сопротивлением) (рис. 10, *а*), либо при различном составе и объёме наполнителя (как в резисторе — проводнике с постоянным сопротивлением) (рис. 10, *б*).

Резисторы широко используются в электрических приборах и микроэлектронике.

### В О П Р О С Ы

1. Сформулируйте закон Ома для однородного проводника.
2. Опишите механическую аналогию движения заряженных частиц в проводнике и гидродинамическую аналогию сопротивления.
3. Во сколько раз изменится сила тока в проводнике при увеличении приложенного к нему напряжения вдвое?
4. Что такое вольт-амперная характеристика проводника?
5. Что такое удельное сопротивление проводника? При каких значениях удельного сопротивления вещество можно считать проводником, полупроводником, диэлектриком?

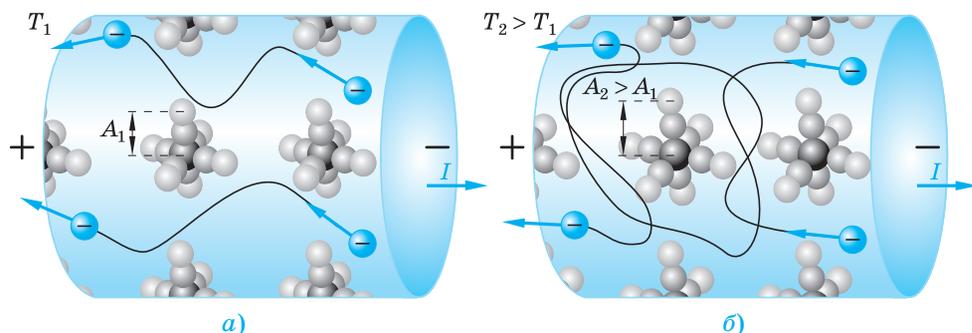
### З А Д А Ч И

1. Электрический обогреватель, имеющий сопротивление 44 Ом, включён в сеть с напряжением 220 В. Найдите силу тока, протекающего через обогреватель.
2. Определите разность потенциалов на концах проводника сопротивлением 5 Ом, если за минуту через его поперечное сечение пройдёт заряд 2,88 кКл.
3. Сопротивление цилиндрического алюминиевого провода диаметром 1 мм равно 4 Ом. Найдите его длину.

## **§ 5. Зависимость удельного сопротивления проводников и полупроводников от температуры**

**Проводники.** Удельное сопротивление проводника тем больше, чем чаще сталкиваются электроны. В свою очередь, частота столкновений тем больше, чем больше поперечное сечение атомов и ионов, с которыми сталкивается электрон.

На характер движения электронов в проводнике влияет температура проводника. При малой температуре  $T_1$  амплитуда  $A_1$  тепловых колебаний атомов и ионов около положения равновесия невелика, и электроны почти беспрепятственно движутся в кристаллической решётке металлического проводника под действием электрического поля (рис. 11, *а*).



### ▲ 11

Траектория электронов в металлическом проводнике под действием электрического поля:

*a* — при малой температуре;

*б* — при увеличении температуры

С увеличением температуры ( $T_2 > T_1$ ) амплитуда колебаний возрастает (рис. 11, б). Движение электронов в кристаллической решётке затрудняется: сопротивление их упорядоченному движению возрастает.

**Удельное сопротивление металлического проводника линейно возрастает с температурой:**

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T), \quad (9)$$

где  $\rho_0$  — удельное сопротивление при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 293\text{ K}$ );  $\Delta T = T - T_0$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Единица температурного коэффициента сопротивления — кельвин в минус первой степени ( $\text{K}^{-1}$ ).

Линейная зависимость (9) удельного сопротивления от температуры справедлива в сравнительно небольшом интервале температур ( $\alpha\Delta T < 1$ ).

Для большинства чистых металлов температурный коэффициент сопротивления лежит в диапазоне от 0,002 до 0,006  $\text{K}^{-1}$ .

По изменению сопротивления металлов можно определить температуру, что используется при измерениях температуры в диапазоне, недоступном жидкостным термометрам.

**Сверхпроводимость.** При охлаждении проводника его удельное сопротивление уменьшается достаточно плавно по линейному закону. Однако при снижении температуры ниже некоторой критической величины  $T_{\text{кр}}$ , близкой к абсолютному нулю, удельное сопротивление

некоторых веществ скачкообразно падает практически до нуля. Это явление, наблюдавшееся впервые при охлаждении ртути в 1911 г. голландским учёным *Гейке Камерлинг-Оннесом*, назвали *сверхпроводимостью*.

**Сверхпроводимость — физическое явление, заключающееся в скачкообразном падении сопротивления вещества до нуля при некотором критическом значении температуры  $T_{кр}$ .**

*Критическая температура* — температура скачкообразного перехода вещества из нормального состояния ( $T > T_{кр}$ ) в сверхпроводящее ( $T < T_{кр}$ ).

*Сверхпроводник — вещество, которое может переходить в сверхпроводящее состояние.* Свойством сверхпроводимости обладают около половины металлов и свыше тысячи сплавов и соединений металлов. Ток в сверхпроводнике может протекать неограниченно долгое время из-за отсутствия сопротивления.

Основным препятствием для широкого применения металлических сверхпроводников является необходимость их эксплуатации при очень низкой температуре (~ 4 К). Поиск сверхпроводников с большой критической температурой привёл к получению в 1988—1989 гг. высокотемпературных металлокерамических сплавов с большой критической температурой. Получение сверхпроводящих состояний для этих сплавов возможно с помощью недорогого и безопасного в эксплуатации жидкого азота, имеющего температуру кипения 77 К.

В настоящее время усилия физиков направлены на получение сверхпроводников с критической температурой, близкой к комнатной.

Техническое использование таких сверхпроводников позволяет уменьшить потери энергии в линиях электропередачи, совершенствует электронику, увеличивает быстродействие компьютеров, существенно удешевляет электроэнергию.

**Полупроводники.** Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры принципиально другая, чем у проводников.

**Удельное сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры.**

С увеличением температуры возрастает число свободных зарядов, создающих электрический ток, и соответственно уменьшается сопротивление полупроводника.