

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^{1/16}. 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

Предложения и замечания по содержанию и оформлению книги
можно отправлять по электронному адресу: expert@rosuchebnik.ru

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

Электронные формы учебников, другие электронные материалы и сервисы:
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

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.

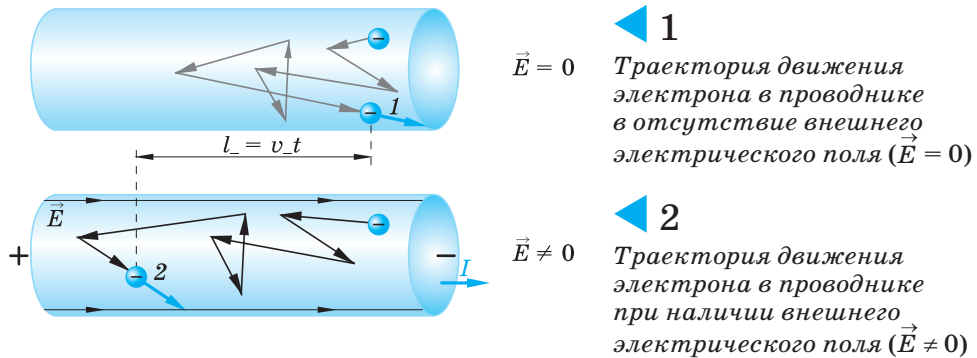
В проводнике концентрация свободных зарядов, которые могут перемещаться по всему объёму тела, наибольшая в сравнении с другими веществами.

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-



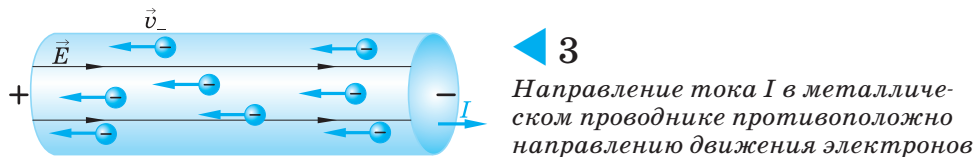
рического поля, или *направленную скорость*. За промежуток времени t электрон «дрейфует» на расстояние $l_ = v_ t$ ($v_$ — скорость дрейфа в направлении, противоположном напряжённости электрического поля).

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):

$$1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с} .$$

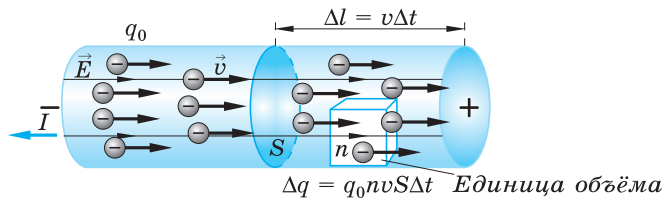
Точное определение ампера будет дано в § 17.

Связь силы тока с направленной скоростью. Для того чтобы рассчитать силу тока, найдём заряд Δq , протекающий через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt (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 мм², сила тока 1,6 А. Концентрация электронов в проводнике 10^{28} м⁻³ 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.

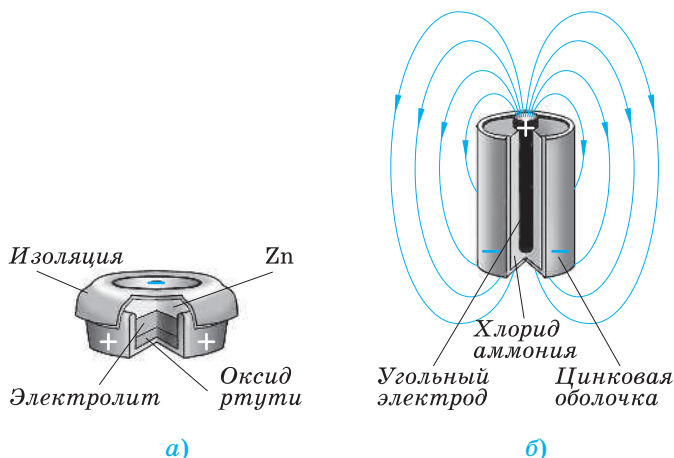
Источники тока. Разделение зарядов возможно в результате преобразования механической, тепловой, химической, световой энергий в электрическую. Так, в гальваническом элементе заряды на электродах оказываются разноимёнными за счёт энергии химической реакции между электродами и электролитом.

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



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.

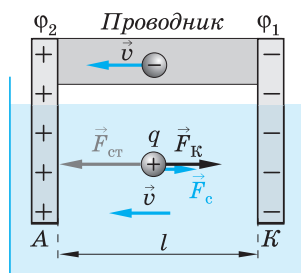
ЭДС источника тока. Изменение потенциальной энергии заряда при его перемещении между электродами источника тока равно суммарной работе сторонней силы и силы сопротивления:

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

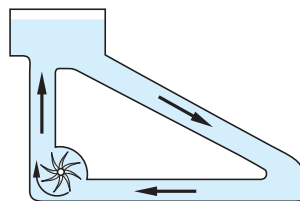
Постоянной величиной для данного источника тока является *электродвижущая сила (ЭДС)*.

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 .

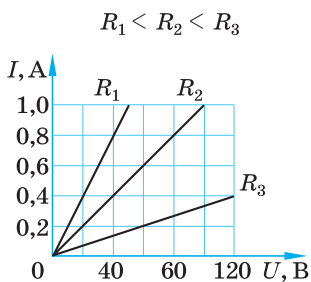
Впервые зависимость силы тока от напряжения была экспериментально получена в 1826 г. немецким учёным *Георгом Омом*.

Закон Ома для однородного проводника (участка цепи)

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

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

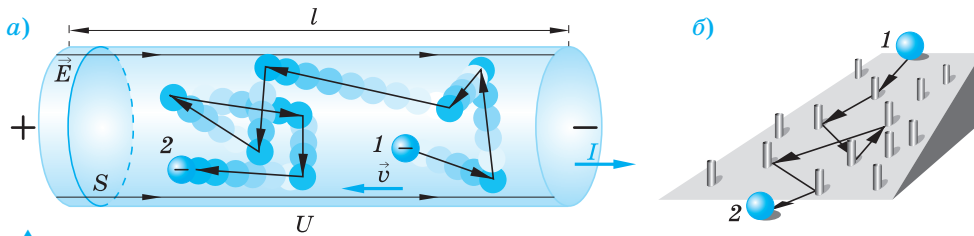
Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения называют *вольт-амперной характеристикой проводника* (рис. 7).



▲ 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, а). 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):

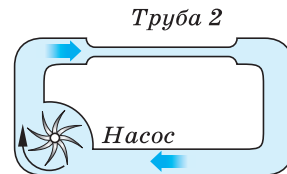
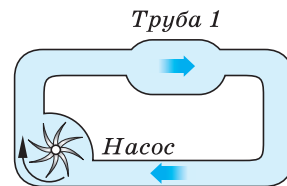
$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А.}$$

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:



▲ 9

Гидродинамическая аналогия электрического сопротивления

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

Удельное сопротивление. Коэффициент пропорциональности ρ в формуле (8) — *удельное сопротивление проводника.*

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

Таблица 1

Удельное сопротивление веществ при 20 °С

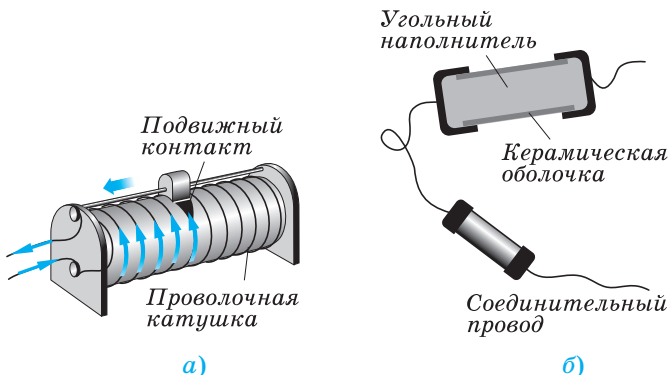
Вещество	ρ , Ом·м	Вещество	ρ , Ом·м								
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Проводники	Углерод								
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$			Поваренная соль (насыщ. р-р)							
Золото	$2,4 \cdot 10^{-8}$				0,044						
Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8}$					0,5					
Вольфрам	$5,5 \cdot 10^{-8}$						1,5				
Платина	10^{-7}							25			
Сталь	$2 \cdot 10^{-7}$								2300		
Манганин	$4,4 \cdot 10^{-7}$									Диэлект- рики	
Константан	$4,9 \cdot 10^{-7}$										Полиэтилен
Ртуть	$9,6 \cdot 10^{-7}$										
Нихром	10^{-6}	$10^8 \div 10^{11}$									
			$10^{10} \div 10^{14}$								
				$5 \cdot 10^{14}$							
					$7,5 \cdot 10^{17}$						
						Кварц					

Чем больше удельное сопротивление материала проводника, тем больше его электрическое сопротивление.

Единица удельного сопротивления — *ом-метр* (Ом·м).

В таблице 1 приведены значения удельного сопротивления различных материалов при температуре $t_0 = 20$ °С. Качественное деление всех веществ по степени подвижности заряженных частиц на проводники, полупроводники и диэлектрики определяется значением удельного сопротивления вещества.

К проводникам относят вещества, имеющие удельное сопротивление $\rho < 10^{-5}$ Ом·м. У полупроводников 10^{-5} Ом·м $< \rho < 10^5$ Ом·м. Диэлектрики (изоляторы) имеют $\rho > 10^5$ Ом·м.



10

Сопротивления:
а — переменное;
б — постоянное

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?

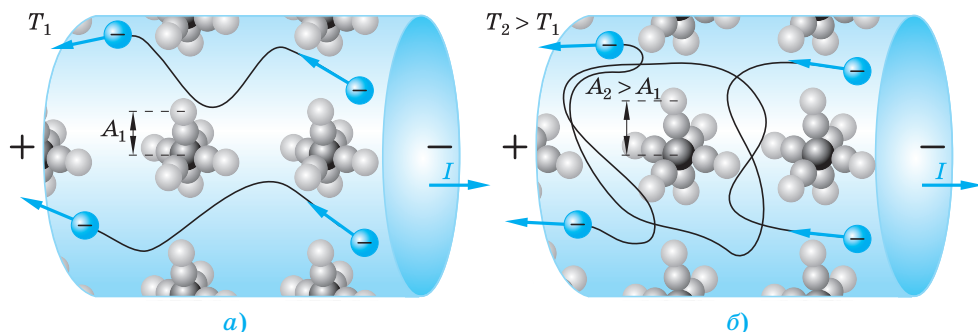
З А Д А Ч И

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 ρ_0 — удельное сопротивление при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ($T_0 = 293\text{ K}$); $\Delta T = T - T_0$; α — температурный коэффициент сопротивления.

Единица температурного коэффициента сопротивления — кельвин в минус первой степени (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 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.