

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
П88

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

Пурышева, Н. С.

П88 Физика. Базовый и углублённый уровни. 11 класс : учебник /
Н. С. Пурышева, Н. Е. Важеевская, Д. А. Исаев, В. М. Чаругин. —
8-е изд., стереотип. — М. : Дрофа, 2020. — 332, [4] с. : ил. — (Рос-
сийский учебник).

ISBN 978-5-358-23327-0

Учебник соответствует Федеральному государственному образовательному стан-
дарту среднего общего образования. Учебник предназначен для учащихся 11 классов
и включает следующие разделы: «Электродинамика», «Элементы квантовой фи-
зики», «Астрофизика», лабораторные работы.

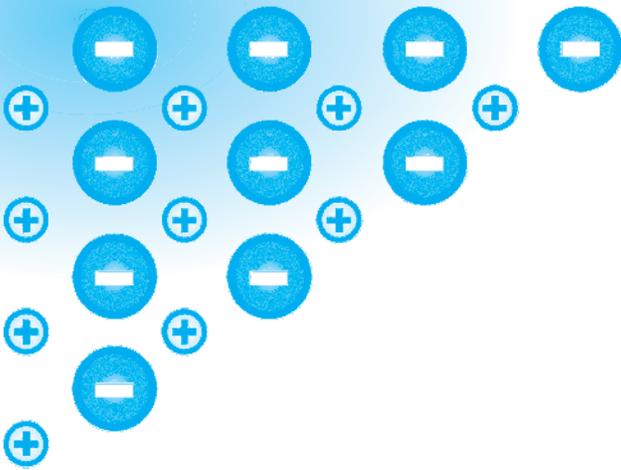
Методический аппарат учебника составляют вопросы для самопроверки, систе-
ма заданий, включающих качественные, графические и вычислительные задачи,
вопросы для дискуссии, исследовательские задания, темы проектов, задания по
работе с электронным приложением. В учебнике имеется рубрика «За страницами
учебника», в которую помещён дополнительный материал.

Раздел «Лабораторные работы» подготовлен С. В. Степановым.

**УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72**

ISBN 978-5-358-23327-0

© ООО «ДРОФА», 2014
© ООО «ДРОФА», 2019, с изменениями



ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

В 10 классе вы начали изучать один из основных разделов курса физики — электродинамику и познакомились с тем, как происходит взаимодействие неподвижных электрических зарядов. Вы рассмотрели такие понятия, как «электрический заряд» и «электростатическое поле»; характеристики электростатического поля, такие как напряжённость, потенциал и разность потенциалов, а также изучили основной закон электростатики — закон Кулона и закон сохранения электрического заряда. В этом году изучение электродинамики будет продолжено, и вы познакомитесь с законами, которым подчиняется взаимодействие движущихся зарядов, с характеристиками поля, созданного движущимися зарядами. Развитие электродинамики имеет большое значение для научно-технического прогресса. Производство электроэнергии, без которой невозможна наша жизнь; современные средства связи; радио, телевидение, сотовая связь — всё это существует благодаря системе научных знаний, которая входит в состав электродинамики — фундаментальной физической теории.



Постоянный электрический ток

В основной школе вы изучали электрические явления и представляете, какие условия необходимо создать для того, чтобы в цепи существовал электрический ток. Вы имели возможность наблюдать тепловое, химическое, магнитное действия тока. Вам знаком закон Ома для участка цепи, закон Джоуля—Ленца. Однако ваши знания о законах электрического тока не являются полными: записывая их математические выражения, вы не учитывали такой элемент цепи, как источник тока, через который, так же как и через другие элементы цепи, протекает электрический ток. В этой главе будут расширены ваши знания об условиях существования электрического тока и о законах, которым подчиняется прохождение тока по цепи.

§ 1. Исторические предпосылки учения о постоянном электрическом токе

1. Опыты Луиджи Гальвани. Начало развитию учения об электрическом токе и практическому его использованию положили Гальвани и Вольты. Итальянский физик и физиолог *Луиджи Гальвани* (1737—1798), препарирруя лягушку, обна-

ружил в её ткани кратковременные импульсы тока, названные им «животным электричеством».

Проделав многочисленные опыты, Гальвани заметил, что если соединить металлическим проводником мышцы лапки и спинной мозг только что препарированной лягушки, то мышцы сразу же сократятся. Этот эффект наблюдался и тогда, когда спинного мозга касался скальпель, если же его касалась костяная ручка ножа, то сокращений не было.

Гальвани установил, что сокращение становится более сильным и заметным, если проводник состоит из двух разнородных металлов, например из железа и меди. Он сделал вывод о том, что сокращение мышц лягушки обусловлено возникновением в них электрического тока.

Это явление Гальвани объяснял тем, что нервы и мышцы представляют собой своего рода электроды, а проводник служит разрядником.

2. Исследования Алессандро Вольты. В дальнейшем Вольта доказал, что гипотеза о существовании «животного электричества» является ложной и что основную роль в возникновении электрического тока играют проводники: электрические токи возникают вследствие соединения тканей живых организмов металлическим проводником.

Проделав серию экспериментов, Вольта обнаружил, что электрический ток появляется только тогда, когда в контакт приведены два проводника из различных металлов.

Он ввёл в науку понятие напряжения и сконструировал достаточно чувствительный прибор для его измерения, который пред-



Алессандро Вольта (1745—1827) — итальянский физик, химик и физиолог. Известен своими работами в области электричества, химии и физиологии. Построил электрометр, конденсатор, электроскоп и другие электрические приборы; обнаружил и исследовал горючий газ — метан; сконструировал первый источник постоянного тока; открыл взаимную электризацию разнородных металлов при их контакте (контактная разность потенциалов) и расположил металлы в ряд по величине возникающего между ними напряжения; обнаружил электрическую раздражимость органов зрения и вкуса у человека.

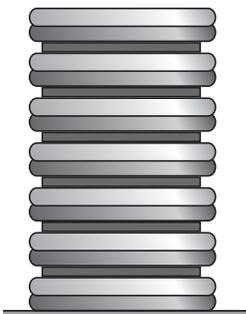


Рис. 1

ставлял собой электрометр с конденсатором. С помощью этого прибора было обнаружено, что при контакте разных пар проводников напряжение различалось.

Вольт поставил перед собой задачу создать устройство, способное служить источником тока. Он изготовил первый источник тока, который состоял из цинковой и медной пластинок, разделённых лоскутком ткани, пропитанной раствором поваренной соли или кислоты. В 1799 г. Вольт сконструировал источник тока «длительного действия» — *вольтов столб*. Этот источник тока представлял собой цилиндрический столбик, состоявший из 20 пар медных и цинковых пластинок, которые были разделены суконными кружочками, смоченными солёной водой (рис. 1).

3. Опыты Георга Ома. Следующий этап развития учения об электричестве связан с поисками количественных закономерностей, характеризующих протекание тока по цепи. Связь между силой тока, напряжением и сопротивлением проводника была установлена экспериментально немецким физиком **Георгом Омом** (1787—1854).

Используя представления о магнитном действии электрического тока, Ом предположил, что если над проводником подвесить на упругой нити магнитную стрелку, а затем по проводнику пропустить электрический ток, то стрелка повернётся на некоторый угол. Значение угла поворота зависит от параметров электрической цепи. Ом использовал идею Кулона и сконструировал крутильные весы. С их помощью он установил, что при увеличении длины проводника сила, действующая на магнитную стрелку, уменьшается. Он также показал, что при увеличении числа элементов вольтова столба угол закручивания нити увеличивается. Ому сразу не удалось получить точную количественную зависимость между силой тока, напряжением и сопротивлением проводника, однако в его опытах была установлена на качественном уровне верная связь между этими величинами.

Более точные эксперименты Ом провёл после того, как были сконструированы усовершенствованные источники тока.

Результаты проведённого Омом исследования имели огромное значение для развития учения об электрическом токе, поскольку стали основой для расчёта параметров электрических цепей.

Раньше всех приняли открытие Ома российские физики. **Эмилий Христианович Ленц** (1804—1865) и **Борис Семёнович Якоби** (1801—1874) опирались на него при проведении своих исследований в области электромагнетизма и электротехники. Проверка закона Ома продолжалась в течение почти всего XIX в., его справедливость была доказана не только для металлических, но и для жидких проводников.

Дальнейшие исследования электрических явлений были связаны с поиском ответа на вопросы о природе электрической проводимости различных веществ и о взаимосвязи электричества и магнетизма.

Вопросы для самопроверки

1. В чём заключались эксперименты Гальвани? Проиллюстрируйте на примере опытов Гальвани процесс познания в физике.
2. В чём заключались опыты Вольты? Какое значение имели результаты его экспериментов для развития учения об электрическом токе?
3. Какие исследования проводил Ом? Каковы их результаты?

Упражнение 1

- 1_д. Подготовьте сообщение об одном из опытов, описанных в параграфе.
- 2_д. Подготовьте сообщение об исследованиях российских учёных в области электричества, используя интернет-ресурсы и другие источники информации.
- 3_д. Подготовьте краткое сообщение об электротехнических устройствах, разработанных отечественными учёными. Воспользуйтесь для этого интернет-ресурсами и другими источниками информации.

§ 2. Условия существования электрического тока

1. Электрический ток. Как вы уже знаете, *электрическим током называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.*

Приведённое определение вызывает, по крайней мере, два вопроса. Во-первых, как создать упорядоченное движение заряженных частиц? Вопрос этот связан с тем, что в обычных условиях свободные заряженные частицы в металлических провод-

никах, в электролитах, газах совершают хаотическое движение. Соответственно необходимо выяснить, что следует предпринять, чтобы заряженные частицы двигались в одном направлении.

Во-вторых, направленное движение каких заряженных частиц представляет собой электрический ток? Этот вопрос возникает в связи с тем, что к заряженным частицам, способным свободно перемещаться, относятся электроны, положительно и отрицательно заряженные ионы. В разных средах ток обусловлен движением разных заряженных частиц. Необходимо также понять, как создать заряженные частицы, способные свободно перемещаться.

2. Как создать электрический ток. Для ответа на первый вопрос обратимся к опыту. Зарядим электрометр, коснувшись его эбонитовой палочкой, потёртой о шерсть. Соединим этот электрометр с другим таким же незаряженным электрометром металлическим стержнем на пластмассовой ручке (рис. 2). Увидим, что заряд первого электрометра уменьшился, а на втором электрометре заряд появился. Поскольку электрометры одинаковые, то первоначальный заряд распределился на них поровну.

В опыте наблюдалось кратковременное направленное движение зарядов, т. е. электрический ток. Первый электрометр получил от эбонитовой палочки отрицательный заряд (на нём образовался избыток электронов). При соединении с незаряженным электрометром часть электронов перешла на него по металлическому проводнику. Как только заряды электрометров сравнялись, ток прекратился. Объясним, почему это происходит.

После того как первый электрометр получил заряд, вокруг него возникло электрическое поле напряжённостью \vec{E} , электрометр приобрёл некоторый потенциал φ_1 ($\varphi_1 < 0$). Потенциал незаряженного электрометра был равен нулю $\varphi_2 = 0$, между электрометрами существовала разность потенциалов, или напряжение: $\varphi_1 - \varphi_2 = U$.

При соединении электрометров свободные электроны под действием силы $\vec{F} = -e\vec{E}$ со стороны электрического поля переходили с электрометра, имеющего меньший потенциал, на электрометр с большим потенциалом. Это происходило до тех пор, пока потенциалы электрометров не сравнялись и разность по-

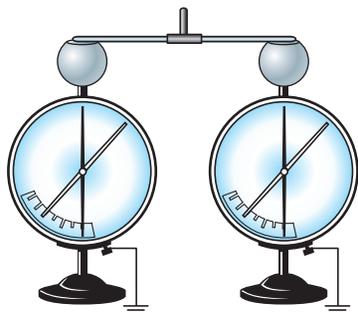


Рис. 2

тенциалов не стала равной нулю $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$. Нулю стала равной и напряжённость электрического поля внутри проводника.

В описанном опыте мы получили кратковременный электрический ток. Очевидно, для того чтобы ток существовал длительное время, необходимо поддерживать постоянную разность потенциалов. Для этого можно, например, соединить электрометры с устройством, которое обеспечивало бы перемещение заряда со второго электрометра на первый, т. е. в сторону, противоположную направлению действия на отрицательные заряды электрического поля. Значит, для того чтобы в цепи существовал электрический ток, электрическая цепь должна быть, во-первых, замкнутой, а во-вторых, содержать устройство, создающее разность потенциалов. Такое устройство называют **источником тока**.

3. Сторонние силы. Выясним, что происходит внутри любого источника тока и позволяет поддерживать в цепи электрический ток.

Полые металлические шары с отверстиями *1* и *2*, насаженные на стержни электрометров, соединим металлическим проводником *П*, а проводниками *П₁* и *П₂* соединим шары с источником тока (рис. 3). Таким образом, получается замкнутая электрическая цепь, состоящая из двух участков: внешнего (шары и проводники) и внутреннего (источник тока).

На внешнем и внутреннем (внутри источника) участках цепи на заряды действуют кулоновские силы. Как вам известно, электростатическое поле потенциально, т. е. работа, совершаемая им по перемещению зарядов по любой замкнутой траектории, равна нулю. Следовательно, работа по перемещению заряда на внешнем участке цепи равна по модулю и противоположна по знаку работе кулоновских сил внутри источника. Получается, что и внутри источника, и вне его заряды движутся от шара *1* к шару *2*, и если действуют только кулоновские силы, то разности потенциалов не возникает.

Очевидно, внутри источника должны действовать силы другой, не электростатической природы, которые заставляли бы перемещаться отри-

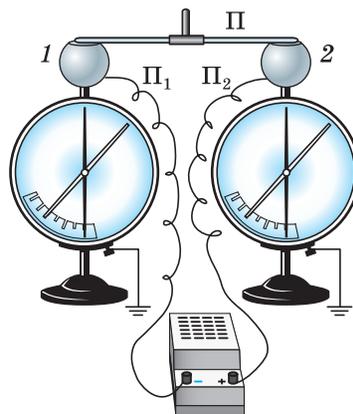


Рис. 3

цательные заряды к отрицательному полюсу источника, преодолевая силы кулоновского отталкивания. Такие силы называют **сторонними**.

Сторонними силами называют силы неэлектростатической природы, вызывающие направленное движение электрически заряженных частиц.

Сторонними силами, в частности, являются силы электромагнитной природы, возникающие в гальваническом элементе или в аккумуляторе за счёт химической реакции; силы, возникающие в фотоэлементе при облучении его светом; силы магнитной природы, возникающие в генераторе электрического тока за счёт явления электромагнитной индукции.

4. Электродвижущая сила (ЭДС). Из курса физики основной школы вам известно, что существуют разные источники тока. Каждый из них характеризуется определённой работой сторонних сил по перемещению единичного заряда от одного полюса источника к другому. Принято говорить о перемещении единичного положительного заряда от отрицательного полюса источника к положительному.

Физической величиной, связанной с работой сторонних сил и характеризующей источник тока, является **электродвижущая сила (ЭДС)**.

Электродвижущей силой \mathcal{E} называют физическую величину, равную отношению работы сторонних сил $A_{\text{ст}}$ по перемещению положительного электрического заряда q внутри источника тока от его отрицательного полюса к положительному к этому заряду.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

ЭДС численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда внутри источника тока между его полюсами.

Если электрическая цепь замкнута, то можно говорить, что ЭДС численно равна работе сторонних сил по перемещению заряда по всей замкнутой цепи, поскольку суммарная работа кулоновских сил в замкнутой цепи равна нулю.

В СИ единицей ЭДС, как и разности потенциалов (напряжения), является **вольт (В)**.

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл.}$$

Вопросы для самопроверки

1. Какие условия необходимы для существования электрического тока?
2. Почему в опыте (см. рис. 2) ток был кратковременным?
3. Какова природа сторонних сил? Могут ли сторонние силы быть электростатической природы?
4. Дайте определение ЭДС по плану (см. Приложение).

Упражнение 2

1. Будет ли существовать постоянный электрический ток в замкнутой цепи, если резистор заменить конденсатором?
- 2*. В поле постоянного магнита вносят перпендикулярно линиям магнитной индукции проводник, замкнутый на чувствительный гальванометр. При движении проводника гальванометр фиксирует электрический ток. Это означает, что в цепи происходит разделение зарядов под действием сторонних сил. Какие силы в данном случае играют роль сторонних сил и почему происходит разделение зарядов?
3. Чему равна ЭДС источника тока, если сторонние силы при перемещении заряда 10^{-3} Кл совершают работу 24 мДж?

Вопросы для дискуссии

Какие типы автомобильных аккумуляторов существуют? Каковы преимущества аккумуляторов разных типов? Как осуществляется зарядка аккумуляторов?

За страницами учебника

Стационарное электрическое поле

Как вы уже знаете, одним из условий существования электрического тока в проводнике является наличие электрического поля. Уточним, о каком электрическом поле идёт речь.

При изучении электростатики вы узнали, что свободные заряды располагаются на поверхности заряженного проводника. Внутри проводника свободных электрических зарядов нет. Соответственно внутри проводника электрическое поле отсутствует и существует лишь вне проводника. При этом линии напряжённости электрического поля перпендикулярны поверхности проводника (рис. 4).

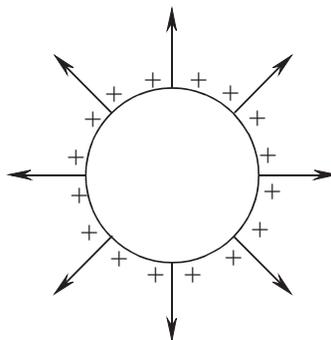


Рис. 4

Вернёмся к опыту, описанному ранее (см. рис. 3). Он свидетельствует о том, что в проводнике существует ток, если имеется разность потенциалов, и ток прекращается, когда разность потенциалов становится равной нулю, т. е. точки проводника (в данном случае шары) имеют одинаковые потенциалы. Напряжённость поля при этом равна нулю.

Таким образом, можно сделать вывод, что в проводнике существует электрическое поле при наличии в нём тока (направленно движущихся зарядов). Это поле называют **электрическим стационарным полем**. Оно отличается от электростатического поля.

На рисунке 5, а показаны линии напряжённости однородного электростатического поля двух заряженных параллельных пластин. Эти линии перпендикулярны пластинам. Если соединить пластины и подключить их к источнику тока, то картина линий напряжённости будет иной. В источнике тока положительные заряды скапливаются на одном полюсе, а отрицательные — на другом. Между полюсами существует электростатическое поле. При соединении источника тока с проводником заряды начинают двигаться как вдоль проводника, так и к его поверхности. В результате линии напряжённости поля в проводнике будут параллельны его оси, а вне проводника расположены наклонно к нему (рис. 5, б).

Стационарное поле, так же как и электростатическое, потенциально, т. е. совершаемая им работа по перемещению заряда по замкнутой траектории равна нулю.

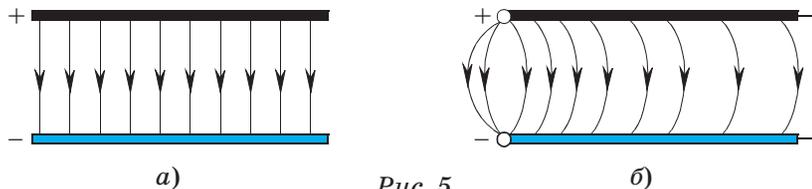


Рис. 5

§ 3. Электрический ток в металлах

1. Экспериментальное доказательство электронной природы проводимости металлов. Выясним, движение каких заряженных частиц представляет собой электрический ток в металлах.

Металлический проводник содержит свободные электроны, которые в отсутствие электрического поля участвуют в тепловом движении. Под действием электрического поля электроны совершают упорядоченное движение. То, что электрический ток в металле обусловлен движением электронов, было доказано экспериментально.

Одним из таких доказательств являются опыты российских физиков **Леонида Исааковича Мандельштама** (1879—1944) и **Николая Дмитриевича Папалекси** (1880—1947) (1913) и американских физиков Р. Толмена и Т. Стюарта (1916). Они использовали установку, основным элементом которой является катушка, состоящая из большого числа витков. Концы проволоки припаяны к металлическим дискам, к которым в опыте Мандельштама и Папалекси присоединены наушники, а в опыте Толмена и Стюарта — гальванометр (рис. 6). Катушку приводили в быстрое вращение, а затем резко останавливали. При этом гальванометр фиксировал кратковременный ток. Появление тока объясняется тем, что свободные заряженные частицы после остановки катушки продолжают своё движение вследствие инерции.

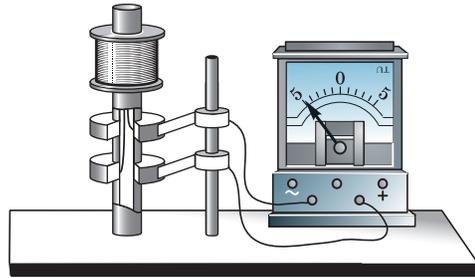


Рис. 6

По направлению отклонения стрелки гальванометра сделали вывод о том, что ток создаётся отрицательно заряженными частицами. Измерив силу тока и время его существования, удалось вычислить полный заряд, прошедший через гальванометр, а затем определить отношение заряда частиц к их массе. Оно оказалось равным известному в то время отношению заряда электрона к его массе.

2. Сила тока. Как вы знаете, характеристикой электрического тока, протекающего по цепи, является сила тока.

Силой тока I называют физическую величину, равную отношению заряда q , переносимого через поперечное сечение проводника за некоторый промежуток времени Δt , к этому промежутку времени.

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

Формула (1) выражает среднее за промежуток времени Δt значение силы тока. Если за любые равные промежутки времени через любое поперечное сечение проводника проходят одинаковые заряды, т. е. если сила тока и его направление не изменяются с течением времени, то электрический ток называют *постоянным*.

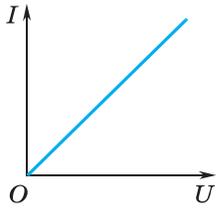


Рис. 7

Сила постоянного тока численно равна заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за 1 с:

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

В СИ единица силы тока — ампер (А).

$$1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с.}$$

1 А равен силе постоянного тока, который при прохождении по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Силу тока измеряют с помощью амперметра.

3. Вольт-амперная характеристика металлического проводника. В курсе физики основной школы вы изучали закон Ома для участка цепи: сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению.

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

Зависимость силы тока в проводнике от напряжения на его концах называют **вольт-амперной характеристикой** проводника. Для металлического проводника сила тока прямо пропорциональна напряжению, поэтому графиком его вольт-амперной характеристики при неизменной температуре является прямая, проходящая через начало координат (рис. 7).

4. Зависимость сопротивления металлического проводника от температуры. Исследуем зависимость сопротивления металлического проводника от температуры. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, ключа, реостата, амперметра и куска медной проволоки, свёрнутой в спираль

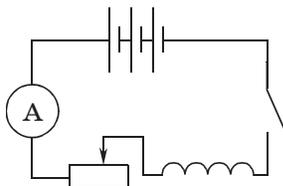


Рис. 8

(рис. 8). Замкнув цепь, установим определённую силу тока в ней. При прохождении тока спираль будет нагреваться, и можно заметить, что сила тока в цепи уменьшится. Если заменить медную спираль на спираль из другого металла, то будет наблюдаться то же самое явление. Поскольку напряжение не менялось, а сила тока умень-

шила, можно сделать вывод: *сопротивление металлического проводника увеличивается с повышением температуры.*

Это можно объяснить следующим образом. Сопротивление металлического проводника обусловлено тем, что электроны, участвуя в направленном движении под действием электрического поля, сталкиваются с ионами кристаллической решётки и передают им часть своей энергии. При повышении температуры проводника увеличивается амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решётки, соответственно возрастает число соударений электронов с ионами, что приводит к увеличению сопротивления проводника. Одновременно с упорядоченным электроны участвуют и в тепловом движении. При повышении температуры проводника увеличивается скорость теплового движения электронов и растёт сопротивление направленному движению электронов.

Запишем формулу зависимости сопротивления проводника от температуры. Пусть R_0 — сопротивление проводника при $0\text{ }^\circ\text{C}$, R — сопротивление проводника при температуре $t\text{ }^\circ\text{C}$. Абсолютное изменение сопротивления проводника при нагревании на $\Delta t = t$ равно $R - R_0$. Относительное изменение сопротивления проводника при нагревании на $t\text{ }^\circ\text{C}$ равно $\frac{R - R_0}{R_0}$, а относительное изменение сопротивления при нагревании на $1\text{ }^\circ\text{C}$ равно $\frac{R - R_0}{R_0 t}$. Эта величина обозначается буквой α и называется *температурным коэффициентом сопротивления*.

Температурным коэффициентом сопротивления называют величину, равную относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на $1\text{ }^\circ\text{C}$ (1 K).

Зависимость сопротивления проводника от температуры выражается следующей приближённой формулой:

$$R = R_0(1 + \alpha t).$$

Записанная зависимость справедлива и для удельного сопротивления: $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, поскольку, как вам известно, $R = \rho \frac{l}{S}$, где l — длина проводника, S — площадь его поперечного сечения.

Для чистых металлов значение температурного коэффициента сопротивления одинаково и примерно равно $1/273\text{ K}^{-1}$ ($0,004\text{ K}^{-1}$). Подставив значение α в формулу зависимости сопротивления от температуры, получим $R = \alpha R_0 T$, где T — температура в кельвинах.

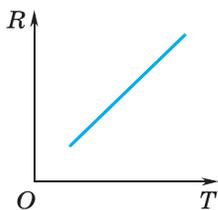


Рис. 9

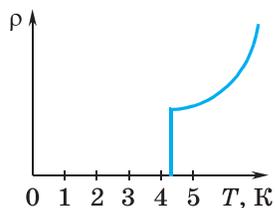


Рис. 10

График зависимости сопротивления металлического проводника от температуры приведён на рисунке 9. Такой же вид имеет и график зависимости удельного сопротивления от температуры.

5. Сверхпроводимость. Из графика (см. рис. 9) видно, что сопротивление проводника уменьшается при понижении температуры и должно было бы обратиться в нуль при температуре, равной абсолютному нулю. Долгое время экспериментально проверить данную зависимость не удавалось, поскольку невозможно было получить столь низкие температуры.

Лишь в 1911 г. голландский учёный **Гейке Камерлинг-Оннес** (1853—1926), исследуя сопротивление ртути при её охлаждении, обнаружил, что при температуре $4,12\text{ К}$ удельное сопротивление ртути скачком уменьшалось до нуля (рис. 10). Подобное явление было обнаружено и для других металлов: их сопротивление при характерной для каждого металла температуре, близкой к абсолютному нулю, падало до нуля. Такую температуру называют **критической**.

Свойство проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже критической температуры, называют **сверхпроводимостью**.

В последние годы XX в. у ряда веществ обнаружена сверхпроводимость при сравнительно высоких температурах. Так, у некоторых материалов, например у керамики на основе иттрия, сверхпроводимость наблюдается при температурах порядка 100 К .

Поскольку сопротивление сверхпроводников при определённой температуре равно нулю, то при прохождении по ним электрического тока отсутствуют потери энергии на их нагревание. Это определяет широкое применение сверхпроводников: из них изготавливают обмотки мощных электромагнитов для генераторов, ускорителей элементарных частиц, трансформаторов и др.

Вопросы для самопроверки

1. Результаты какого опыта доказывают, что электрический ток в металлах обусловлен движением электронов?
2. Дайте определение силы тока.
3. Что представляет собой вольт-амперная характеристика металлического проводника?