

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721
Г78

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

Грaчëв, А. В.
Г78 Физика. Базовый и углублённый уровни : 11 класс : учебник /
А. В. Грaчëв, В. А. Погожев, А. М. Салецкий и др. — 6-е изд., стерео-
тип. — М. : Вентана-Граф, 2020. — 462, [2] с. : ил. + 8 пол. вкл. : ил. —
(Российский учебник).

ISBN 978-5-360-11403-1

Учебник предназначен для изучения физики в 11 классе общеобразова-
тельных организаций. Дополнительные к базовому уровню материалы позво-
ляют изучить предмет на углублённом уровне, подготовиться к единому
государственному экзамену по физике.

Учебник вместе с рабочими тетрадями, тетрадь для лабораторных
работ и методическим пособием для учителей составляет учебно-методиче-
ский комплект по физике для 11 класса. Представлены разделы: «Электромаг-
нитные явления», «Оптические явления» и «Квантовые явления», «Строение
Вселенной».

Учебник соответствует Федеральному государственному образова-
тельному стандарту среднего общего образования.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721

Условные обозначения



Это важно: основные положения в тексте параграфа



Комментарии: вспомогательные тексты, поясняющие отдельные по-
ложения параграфа, различные напоминания и т. п.



Справочные материалы: сведения из истории физики, интересная
дополнительная информация, данные для решения задач и др.



Для углублённого уровня: материалы, дополняющие базовый курс
физики и предназначенные для тех, кто изучает предмет на углублён-
ном уровне

* *Задания повышенной сложности*



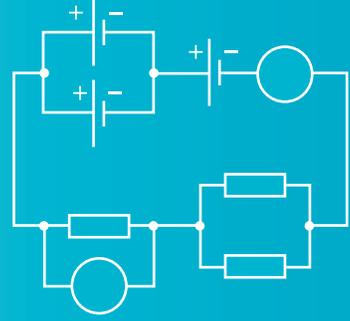
Задания для совместной работы



Задания по проектной и исследовательской деятельности

© Грaчëв А. В., Погожев В. А., Салецкий А. М., Боков П. Ю., 2012
© Издательский центр «Вентана-Граф», 2012
© Грaчëв А. В., Погожев В. А., Салецкий А. М., Боков П. Ю., 2019,
с изменениями
© Издательский центр «Вентана-Граф», 2019, с изменениями

ISBN 978-5-360-11403-1

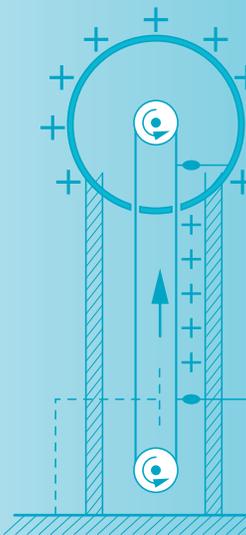


Электродинамика

(продолжение)

Проявление электромагнитных взаимодействий очень разнообразно. Кроме взаимодействий неподвижных электрических зарядов, которые изучают в электростатике, электромагнитные взаимодействия имеют место при любом движении заряженных частиц, в том числе при их упорядоченном движении — электрическом токе. Движущиеся электрические заряды, токи, а также постоянные магниты создают магнитные поля. В то же время при изменении магнитного поля возникает электрическое поле, в результате чего индуцируются токи в проводниках. Это явление называют электромагнитной индукцией. Электрическое и магнитное поля взаимосвязаны и образуют единое электромагнитное поле. Это поле может существовать и при отсутствии зарядов — в виде электромагнитных волн. Видимый свет, инфракрасное, ультрафиолетовое излучения, которые изучают в оптике, могут быть рассмотрены как электромагнитные волны.

Таким образом, продолжение изучения электродинамики связано с изучением электрических токов, магнитных явлений, электромагнитной индукции, электромагнитных колебаний и волн, а также оптических явлений.



Постоянный электрический ток

В 10 классе вы изучали электрические явления, при которых электрически заряженные тела покоились в выбранной инерциальной системе отсчёта. **К**

Теперь мы будем рассматривать явления, связанные с упорядоченным движением электрически заряженных частиц — электрическим током. Можно утверждать, что электрические токи играют определяющую роль не только в современной технике. Сама жизнь биологических объектов (в том числе человека) невозможна без электрических токов.

Эта глава посвящена явлениям, которые наблюдаются при протекании электрического тока в различных средах.

§ 1

Условия возникновения и существования электрического тока. Направление и сила тока

Электрическим током называют упорядоченное движение заряженных частиц.

Следовательно, для существования электрического тока необходимо, во-первых, *наличие заряженных частиц* и, во-вторых, *наличие причин, приводящих к упорядоченному движению этих частиц*. Отме-



Напомним, что, согласно основным положениям молекулярно-кинетической теории, частицы (в том числе имеющие электрический заряд), из которых состоит любое тело, совершают тепловое движение относительно центра масс этого тела. Однако, поскольку движение частиц является хаотическим, при изучении электростатики считают, что в среднем эти частицы покоятся.



Рис. 1 Электрический ток создают ученики, несущие положительно заряженные тела

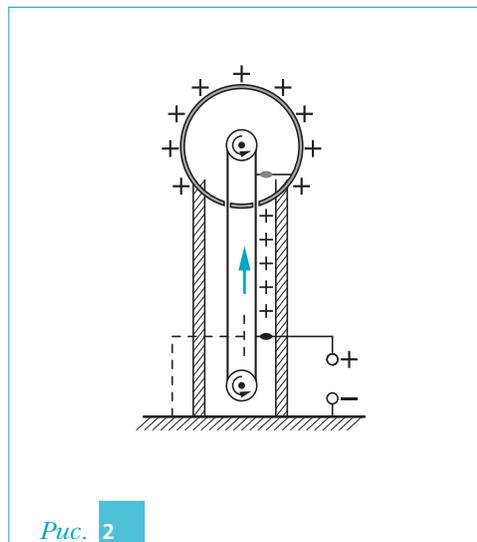


Рис. 2

тим, что причины возникновения упорядоченного движения заряженных частиц могут быть самыми разными. Поясним сказанное на примерах.

Раздадим ученикам класса заряженные тела на изолирующих ручках. Предложим этим ученикам двигаться вместе с заряженными телами друг за другом упорядоченно, например по окружности (рис. 1). В этом случае, согласно определению, мы получим электрический ток.

Другим примером электрического тока является движение зарядов, расположенных на движущейся диэлектрической ленте в генераторе Ван де Граафа (рис. 2).

Электрическим током, согласно определению, будет и движение электронов и α -частиц (ядер атомов гелия ${}^4_2\text{He}$), которые образуются при радиоактивном распаде (рис. 3).

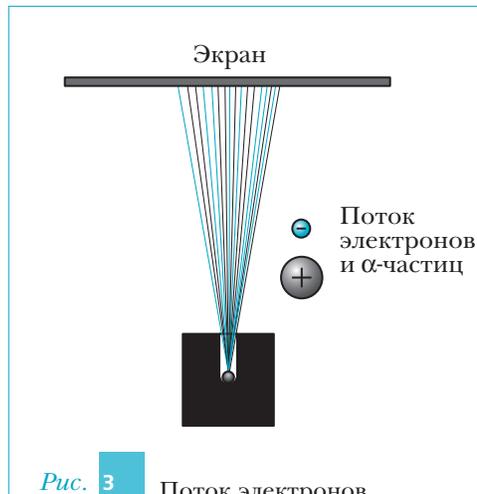


Рис. 3 Поток электронов и α -частиц представляет собой электрический ток



Рис. 4

Электрический ток создают ученики, несущие отрицательно заряженные тела

Как же охарактеризовать электрический ток? Из рассмотренных примеров ясно, что упорядоченное движение заряженных частиц можно охарактеризовать, во-первых, его *направлением*, во-вторых, *знаком заряда этих частиц* и, в-третьих, *интенсивностью*. Другими словами, необходимо ответить на три вопроса:

- 1) куда упорядоченно движутся заряженные частицы;
- 2) каков знак заряда этих частиц;
- 3) какова интенсивность переноса заряда?

Обычно ответы на первые два вопроса объединяют, указывая *направление* электрического тока. Условились, что если электрический

ток обусловлен упорядоченным движением *положительно* заряженных частиц, то направление тока будет *совпадать* с направлением их движения. Напротив, если ток обусловлен упорядоченным движением *отрицательно* заряженных частиц, то направление тока будет *противоположно* направлению движения частиц.

Например, в случае, показанном на рис. 1, когда ученики несут положительно заряженные тела, направление создаваемого ими электрического тока совпадает с направлением движения учеников. Напротив, если перемещаемые учениками тела заряжены отрицательно (рис. 4), то направление тока противоположно направлению движения учеников.

Таким образом, в случаях, когда ученики несут положительно заряженные тела, двигаясь при этом по ходу часовой стрелки (см. рис. 1), и когда они несут отрицательно заряженные тела, двигаясь против хода часовой стрелки (см. рис. 4), направления электрических токов будут одинаковыми. В обоих случаях токи будут направлены по ходу часовой стрелки. Практически все физические явления, сопутствующие таким электрическим токам, будут одинаковыми.

Чтобы лучше понять, как характеризуют интенсивность переноса электрического заряда, вернёмся к рассмотрению электрического тока, пока-

занного на рис. 1. Пусть за рассматриваемый промежуток времени Δt через сечение S , представляющее собой правый дверной проём на рисунке, проходят N учеников с заряженными телами. Если при этом заряд каждого тела равен Q , то заряд, переносимый через рассматриваемую площадку за время Δt , будет равен $\Delta q = N \cdot Q$. В этом случае среднюю за промежуток времени Δt интенсивность переноса электрического заряда через сечение S логично охарактеризовать физической величиной, равной отношению перенесённого заряда к рассматриваемому промежутку времени:

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{N \cdot Q}{\Delta t}.$$

Физическую величину, равную отношению заряда Δq , прошедшего через данное сечение за промежуток времени Δt , к длительности этого промежутка времени, называют средней силой тока I :

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

При рассмотрении многих явлений вводят физическую величину, характеризующую интенсивность переноса электрического заряда в данный момент времени t . Её называют *мгновенной силой тока* — *силой тока в данный момент времени t* . Для определения этой величины рассматривают достаточно малый промежуток времени Δt , начинающийся сразу после момента времени t .

Силой тока I в данный момент времени t называют физическую величину, равную отношению заряда Δq , прошедшего через рассматриваемое сечение за достаточно малый промежуток времени Δt , начинающийся сразу после момента времени t , к длительности этого промежутка:

$$I(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

В СИ единица силы тока является основной и носит название *ампер* (А). Её определение мы рассмотрим в следующей главе. Сила тока будет равна одному амперу, если через рассматриваемое сечение ежесекундно протекает заряд, равный одному кулону. Во многих используемых в повседневной жизни приборах сила тока может изменяться от микроампер (токи в запоминающих устройствах вычислительной техники) до десятков (токи в различных нагревательных приборах) и даже сотен ампер

■ Электродинамика (продолжение)

(ток в обмотке стартера автомобильного двигателя или мощного электромотора).

Отметим, что для человека воздействие тока силой примерно 50 мА уже может оказаться смертельным.

Вопросы

1. Что называют электрическим током?
2. Какие условия должны быть выполнены, чтобы мог существовать электрический ток?
3. Капли дождя при падении на Землю электризуются. Можно ли говорить, что во время дождя существует электрический ток между дождевым облаком и Землёй?
4. Что принимают за направление тока?
5. Электроны, вылетевшие из катода и летящие к экрану кинескопа, образуют электронный пучок. В какую сторону направлен электрический ток в кинескопе?
6. Что называют: а) средней силой тока через данное сечение; б) силой тока через данное сечение в данный момент времени?

Упражнения

1. Каждый из учеников, изображённых на рис. 1, несёт тело, заряд которого $q = 30$ нКл. Зная, что расстояние между соседними заряженными телами $l = 0,5$ м, а ученики движутся со скоростью, модуль которой равен $v = 2$ м/с, определите среднюю силу тока через показанную на рисунке площадку S .
2. При радиоактивном распаде куска урана за время Δt из него вылетает N_α α -частиц и N_β электронов. Определите среднюю силу тока, обусловленного: а) только вылетающими α -частицами; б) только электронами; в) всеми заряженными частицами.



Для углублённого уровня

3. Ширина ленты генератора Ван де Граафа $b = 20$ см. Заряженный участок ленты движется вертикально вверх со скоростью, модуль которой $v = 10$ см/с. Поверхностная плотность избыточных зарядов на ленте $\sigma = 40$ мкКл/м². Определите направление и силу электрического тока, обусловленного движением ленты.

§ 2 Свободные носители заряда. Электрический ток в проводниках

В рассмотренных в предыдущем параграфе примерах электрический ток был обусловлен движением заряженных тел либо частиц. Однако наибольший практический интерес представляют токи в веществе, обусловленные упорядоченным движением заряженных частиц этого вещества.

Носители заряда, которые могут свободно перемещаться по всему телу, называют свободными носителями заряда.

Вещества и состоящие из них тела, в которых свободные носители заряда присутствуют в большом количестве, называют проводниками.

Проводниками являются тела, изготовленные из металлов и их сплавов, а также электролиты — растворы и расплавы многих солей, кислот и щелочей.

В металлах и их сплавах роль свободных носителей заряда играют электроны, потерявшие связь с ядрами своих атомов, — свободные электроны (это утверждение основано на опытах, которые будут рассмотрены в § 9). Эти электроны хаотически движутся по всему объёму вещества. При этом положительные ионы металла совершают хаотические тепловые колебания в узлах кристаллической решётки (около положений своего равновесия). Поэтому часто говорят, что свободные электроны принадлежат одновременно всем ионам данного металлического тела.

В растворах и расплавах электролитов свободные носители заряда — это положительные и отрицательные ионы (см. опыты, описанные в § 10). Они образуются в результате распада (диссоциации) молекул электролита.



Ионы в электролитах так же, как и свободные электроны в металлах, способны перемещаться по всему объёму вещества.

Вещества, в которых нет свободных носителей заряда, называют диэлектриками.

При обычных условиях диэлектриками являются, например, все газы, многие керамики, стёкла, резина, эбонит, янтарь. Тела, изготовленные из диэлектриков, часто называют *изоляторами*. Отметим, что при определённых условиях диэлектрик может стать проводником.

Наличие свободных носителей заряда в проводнике обеспечивает выполнение первого условия существования электрического тока. Для выполнения же второго условия необходимо наличие сил, вызывающих упорядоченное движение этих носителей заряда. Роль таких сил может выполнять, например, сила электрического поля.



Если в проводнике создать электрическое поле, то свободные носители заряда, помимо хаотического (теплового) движения, начнут совершать и упорядоченное движение.

Может создаться впечатление, что под действием сил электрического поля свободные носители заряда в проводнике в соответствии со вторым законом Ньютона будут непрерывно разгоняться. Однако это не так! При движении свободные носители заряда взаимодействуют с совершающими хаотическое (тепловое) движение остальными частицами проводника. Хаотический характер этого взаимодействия нарушает упорядоченность движения свободных носителей заряда. Другими словами, проводящая среда как бы сопротивляется упорядоченному движению заряженных частиц, т. е. «тормозит» это движение. В свою очередь, действие силы электрического поля на каждый свободный носитель заряда в промежутках времени между его последовательными соударениями с другими частицами проводника «восстанавливает» упорядоченное движение свободных носителей заряда. В результате конкурирующих действий сил электрического поля и сил взаимодействия с остальными частицами проводника в проводнике устанавливается упорядоченное движение свободных носителей заряда.

Таким образом, *при наличии электрического поля в проводнике свободные носители заряда наряду с хаотическим совершают и упорядоченное движение*. Средняя скорость свободных носителей заряда относительно проводника при наличии в нём электрического поля становится отличной от нуля. Эту скорость, характеризующую упорядоченное движение носителей заряда, называют их *скоростью дрейфа* $\vec{v}_{др}$.

Смысл скорости дрейфа легко понять, если представить себе клубящийся рой комаров, сносимый ветром. Скорость упорядоченного движения комаров, равная скорости ветра, и будет скоростью их дрейфа. Понятно, что она равна скорости движения центра масс роя комаров относительно поверхности Земли.

Если скорость дрейфа свободных носителей заряда в проводнике отлична от нуля, то в соответствии с определением в проводнике протекает электрический ток.

Выясним, как связана сила тока I , обусловленного дрейфом свободных носителей заряда в проводнике, с их концентрацией n , зарядом q каждого носителя и модулем скорости дрейфа $v_{др}$.

Рассмотрим цилиндрический проводник, площадь поперечного сечения которого равна S . Пусть направление скорости дрейфа свободных носителей заряда совпадает с осью проводника (рис. 5). Тогда за время Δt каждый из свободных носителей заряда в результате дрейфа смещается вдоль оси проводника на расстояние $v_{др} \cdot \Delta t$. Следовательно, за это время через поперечное сечение 2 проводника пройдут все свободные носители заряда, находившиеся слева от этого сечения на расстояниях, не превышающих $v_{др} \cdot \Delta t$, т. е. все свободные носители заряда между сечениями 1 и 2. Объём участка проводника между сечениями 1 и 2 равен $V = S \cdot v_{др} \cdot \Delta t$. Число свободных носителей заряда в этом объёме $N = n \cdot V$. Следовательно, через сечение 2 за время Δt пройдёт заряд $\Delta q = q \cdot N = q \cdot n \cdot S \cdot v_{др} \cdot \Delta t$. Таким образом, сила тока в проводнике равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = n \cdot q \cdot S \cdot v_{др}. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что при неизменной концентрации и скорости дрейфа носителей заряда сила тока и его направление в проводнике не будут изменяться с течением времени.

Если сила тока и его направление через любое сечение проводника не изменяются с течением времени, то такой электрический ток называют постоянным.

Можно показать, что скорость дрейфа свободных носителей заряда в проводнике пропорциональна напряжённости созданного в проводнике электрического поля.

 Для поддержания постоянного электрического тока в проводнике требуется наличие в нём неизменного электрического поля.



Воспользуемся формулой (1) для оценки скорости дрейфа свободных носителей заряда при протекании электрического тока в металле, например в меди. Пусть сила тока в медной проволоке с площадью поперечного сечения $S = 1 \text{ мм}^2$ равна $I = 11 \text{ А}$. Это значение силы постоянного тока соответствует предельно допустимому по техническим условиям значению

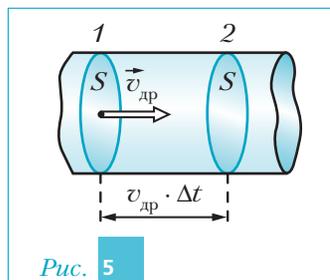


Рис. 5

■ Электродинамика (продолжение)

для такой проволоки. Атомная масса меди $M = 63,5$ г/моль, а её плотность $d \approx 8,9$ г/см³. Следовательно, концентрация атомов меди $n = \frac{N_A \cdot d}{M}$, где N_A — число Авогадро. Известно, что каждый атом меди при образовании куска металла отдаёт «в коллективное пользование» один электрон. Поэтому концентрация свободных электронов в меди равна:

$$n = \frac{N_A \cdot d}{M} \approx 0,8 \cdot 10^{23} \text{ (см}^{-3}\text{)}. \quad (2)$$

Поскольку модуль заряда электрона $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, с учётом формулы (2) из уравнения (1) получаем:

$$v_{др} = \frac{I}{n \cdot e \cdot S} \approx 0,9 \text{ (мм/с)}. \quad (3)$$

Сравним полученное значение с модулем среднеквадратичной скорости хаотического (теплого) движения свободных электронов меди. Будем считать, как принято в классической теории электропроводности металлов, что свободные электроны движутся подобно частицам одноатомного идеального газа. В этом случае модуль среднеквадратичной скорости $v_{ср. кв}$

их хаотического движения можно оценить по формуле $v_{ср. кв} = \sqrt{\frac{3k \cdot T}{m}}$, где $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура вещества, $m \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона. Следовательно, при комнатной температуре $v_{ср. кв} \approx 120$ км/с. Таким образом, даже при предельно допустимой силе постоянного тока скорость дрейфа свободных электронов в меди примерно в 10^8 раз меньше среднеквадратичной скорости их теплового движения.



Вопросы

1. Какие носители заряда называют свободными?
2. Какие тела называют: а) проводниками; б) диэлектриками?
3. Как называют тела, изготовленные из диэлектриков?
4. Двигаются ли в проводнике свободные носители заряда, когда по проводнику не течёт ток?
5. Что называют скоростью дрейфа свободных носителей заряда?
6. Чем может быть вызван дрейф свободных носителей заряда?
7. При каких условиях скорость дрейфа свободных носителей заряда будет оставаться неизменной? Как при этом направлена скорость дрейфа?
8. Что называют силой тока в проводнике?

- 9 | Какой ток называют постоянным? При каких условиях ток в проводнике будет постоянным?

Упражнения

-  1 | Проведите анализ формулы (1) из параграфа.
- 2 | Определите силу тока в медном проводнике, через поперечное сечение которого за время $\tau = 2$ с проходят электроны, суммарная масса которых $m = 4 \cdot 10^{-9}$ г.
- 3 | Сила тока, текущего по нити лампы накаливания, равна 1 А. Определите заряд, протекающий по нити накаливания за 30 мин.
- 4 | Определите среднюю силу тока I через аккумулятор, питающий стартер при запуске двигателя автомобиля, если за время $t = 1$ мин через него проходит заряд $q = 18$ кКл.

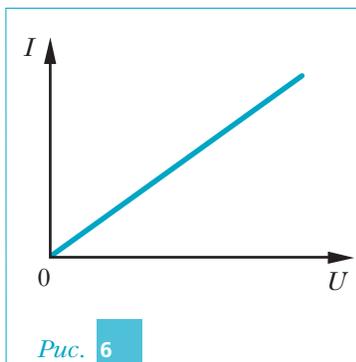
Для углублённого уровня

- 5 | Плотность алюминия $d = 2,7$ г/см³, его атомная масса $M = 27$ г/моль. Считая, что каждый атом алюминия при образовании куска металла отдаёт «в коллективное пользование» $z = 3$ электрона, определите концентрацию свободных электронов в алюминии.
- 6 | Используя результаты из упражнения 5, определите модуль скорости дрейфа свободных электронов в проводнике с площадью поперечного сечения $S = 0,5$ мм² при силе тока $I = 0,5$ А.

§ 3 Вольтамперная характеристика проводника. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводника

Как реализовать постоянный ток в проводнике? Пусть проводник, по которому течёт ток, представляет собой проволоку длиной l . Вы знаете, что сила тока в проводнике будет постоянной, если напряжённость электрического поля в нём не будет изменяться. Для этого, в свою очередь, необходимо поддерживать постоянным напряжение между концами проводника. Следовательно, *для существования постоянного тока в проводнике необходимо поддерживать постоянное напряжение между его концами.* 

-  *Напряжением* между двумя точками проводника называют отношение работы сил электрического поля при перемещении пробного заряда вдоль проводника из начальной точки в конечную к этому заряду: $U = \frac{A}{q}$.



А как зависит сила тока I в проводнике от напряжения U между его концами? Понятно, что при увеличении напряжения U увеличивается напряжённость электрического поля в проводнике. Это приводит к увеличению модуля силы, вызывающей упорядоченное движение свободных носителей заряда, и, следовательно, к увеличению силы тока.

Зависимость силы тока I в проводнике от напряжения U между его концами называют *вольтамперной характеристикой проводника*. Вид этой зависимости для металличе-

ских проводников впервые экспериментально был установлен в 1827 г. немецким физиком Георгом Омом (1789–1854). На рис. 6 показан график подобной зависимости при неизменной температуре металлического проводника. Из приведённой зависимости следует вывод.

При неизменной температуре металлического проводника сила тока I в этом проводнике прямо пропорциональна напряжению U между его концами. ☐

Это утверждение называют **законом Ома для участка цепи**. Прямая пропорциональность между I и U позволяет ввести физическую величину — *сопротивление*, характеризующую проводник.

Сопротивлением R проводника называют отношение напряжения U между концами проводника к силе тока I , текущего по проводнику:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Единица сопротивления проводника в СИ — *ом* (Ом); $1 \text{ Ом} = 1 \text{ В}/1 \text{ А}$.

Сопротивлением 1 Ом обладает проводник, в котором сила тока равна 1 А, если напряжение между его концами равно 1 В.

Таким образом, закон Ома для участка цепи может быть записан в виде:

$$U = I \cdot R \text{ или } I = \frac{U}{R}. \quad (2)$$

☐ Согласно современным экспериментальным данным, закон Ома для проводников из металлов и их сплавов выполняется при всех достижимых напряжённостях электрического поля. Для электролитов закон Ома нарушается, если модуль напряжённости электрического поля в них превышает 5 кВ/см.

Ом также установил, что сопротивление R проводника, имеющего форму цилиндра и изготовленного из однородного вещества, при неизменной температуре прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади S поперечного сечения этого проводника.

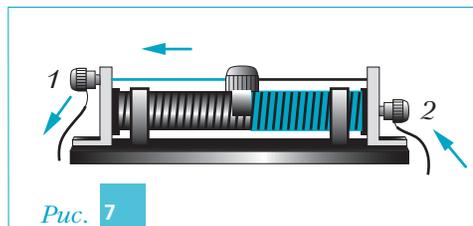


Рис. 7

Зависимость сопротивления проводника от его длины используют для создания резисторов, сопротивление которых можно плавно изменять за счёт перемещения подвижного контакта по поверхности проводника. Такой резистор с регулируемым сопротивлением называют *реостатом*. Он представляет собой проволоку из материала с большим удельным сопротивлением, намотанную на керамический каркас. Проволока покрыта тонким изолирующим слоем. Над обмоткой расположен металлический стержень, по которому можно перемещать подвижный контакт — ползунок (рис. 7). В местах касания ползунком обмотки изолирующий слой с проволоки удалён.

Коэффициент пропорциональности между сопротивлением R однородного цилиндрического проводника и отношением его длины l к площади S его поперечного сечения называют *удельным электрическим сопротивлением* вещества проводника.

Удельным электрическим сопротивлением ρ вещества проводника называют отношение сопротивления R этого проводника

к величине $\frac{l}{S}$:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}.$$

Единица удельного электрического сопротивления в СИ — Ом · м. На практике площадь поперечного сечения проводников обычно измеряют в квадратных миллиметрах, а длину — в метрах. Поэтому во многих справочниках удельное электрическое сопротивление веществ указывают в Ом · мм²/м.

Удельные электрические сопротивления разных чистых металлов при комнатной температуре различаются. Наименьшим удельным сопротивлением ($1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом · м) обладает серебро, а наибольшим ($22,1 \cdot 10^{-8}$ Ом · м) — свинец. Удельное сопротивление сплавов металлов обычно существенно больше, чем удельные сопротивления чистых металлов, образующих этот сплав. Так, удельное сопротивление нихрома (сплав 67,5 % Ni, 15 % Cr, 16 % Fe, 1,5 % Mn) примерно равно 10^{-6} Ом · м. Значительно бóльшие удельные сопротивления имеют электролиты. Так, удельное сопротивление 10%-го