

# Физика

9

УЧЕБНИК

Часть 2



## AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASININ DÖVLƏT HİMNİ

Musiqisi *Üzeyir Hacıbəylinin,*  
sözləri *Əhməd Cavadındır.*

Azərbaycan! Azərbaycan!  
Ey qəhrəman övladın şanlı Vətəni!  
Səndən ötrü can verməyə cümlə hazırız!  
Səndən ötrü qan tökməyə cümlə qadiriz!  
Üçrəngli bayrağınla məsud yaşa!

Minlərlə can qurban oldu,  
Sinən hər bə meydan oldu!  
Hüququndan keçən əsgər,  
Hərə bir qəhrəman oldu!

Sən olasan gülüstan,  
Sənə hər an can qurban!  
Sənə min bir məhəbbət  
Sinəmdə tutmuş məkan!

Namusunu hifz etməyə,  
Bayrağını yüksəltməyə  
Cümlə gənclər müştəqdir!  
Şanlı Vətən! Şanlı Vətən!  
Azərbaycan! Azərbaycan!



**ГЕЙДАР АЛИЕВ**  
**ОБЩЕНАЦИОНАЛЬНЫЙ ЛИДЕР**  
**АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО НАРОДА**

Learn  
English

Расим Абдуразагов  
Дуньямалы Мамедов  
Али Агаджанлы  
Замир Дадашов

# ФИЗИКА

Учебник по предмету физика для 9-х классов  
общеобразовательных заведений (часть II)

9

ЧАСТЬ 2

УЧЕБНИК

©Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi



**Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0International  
(CC BY-NC-SA 4.0)**

Bu nəşr Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International  
lisensiyası (CC BY-NC-SA 4.0) ilə [www.trims.edu.az](http://www.trims.edu.az) saytında əlçatandır. Bu nəşrin  
məzmunundan istifadə edərkən sözügedən lisenziyanın şərtlərini qəbul etmiş olursunuz:

İstinad zamanı nəşrin müəllif(lər)inin adı göstərilməlidir. 

Nəşrdən kommersiya məqsədilə istifadə qadağandır. 

Törəmə nəşrlər orijinal nəşrin lisenziya şərtlərilə yayılmalıdır. 

Замечания и предложения, связанные с этим изданием,  
просим отправлять на электронные адреса:  
[trm@arti.edu.az](mailto:trm@arti.edu.az) и [derslik@edu.gov.az](mailto:derslik@edu.gov.az)  
Заранее благодарим за сотрудничество!

# Содержание

## Раздел 3 Электрический ток в различных средах

### 3.1 ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ

3.1.1	Проводники и диэлектрики в электрическом поле.....	6
3.1.2	Сопротивление металлов .....	12
3.1.3	Цепь распределения напряжения.....	17
3.1.4	Зависимость сопротивления металлов от температуры.....	19
3.1.5	Работа электрического тока .....	23
3.1.6	Мощность электрического тока .....	26
3.1.7	Влияние электрического тока на живые организмы.....	30

### 3.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ГАЗОВ

3.2.1	Электрический ток в газах: несамостоятельный газовый разряд.....	34
3.2.2	Электрический ток в газах: самостоятельный газовый разряд.....	38

### 3.3 ПОЛУПРОВОДНИКИ

3.3.1	Собственная проводимость полупроводников.....	42
3.3.2	Примесная проводимость полупроводников.....	47
3.3.3	$p$ – $n$ переход в полупроводниковом кристалле. Полупроводниковый диод .....	50
	Наука, технология, жизнь .....	53
	Обобщение.....	54
	Обобщающие задания.....	55

## Раздел 4 Магнитное поле

### 4.1 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

4.1.1	Природа магнитного поля. Магнитное поле Земли .....	58
4.1.2	Индукция магнитного поля.....	63
4.1.3	Магнитная индукция прямого проводника с током.....	67
4.1.4	Магнитное поле кругового проводника и катушки с током .....	71
4.1.5	Электромагнит и его применения .....	75
4.1.6	Магнитное взаимодействие проводников с током.....	79

### 4.2 ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ И ДВИЖУЩУЮСЯ ЗАРЯЖЕННУЮ ЧАСТИЦУ

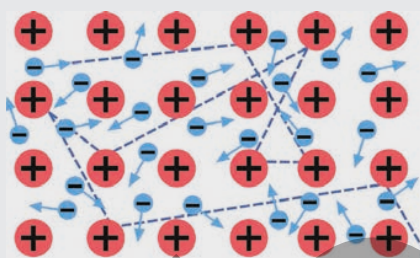
4.2.1.	Действие магнитного поля на прямой проводник с током-сила Ампера.....	82
4.2.2.	Действие магнитного поля на рамку с током.....	87
4.2.3.	Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы – сила Лоренца.....	92

### 4.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

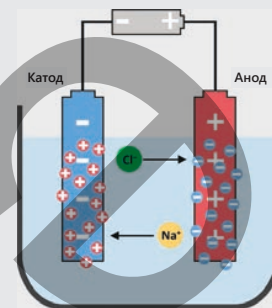
4.3.1.	Явление электромагнитной индукции.....	96
4.3.2.	Направление индукционного тока. Правило Ленца .....	100
	Наука, технология, жизнь .....	104
	Обобщение.....	105
	Обобщающие задания.....	106
	<b>СЛОВАРЬ .....</b>	<b>108</b>

# Электрический ток в различных средах

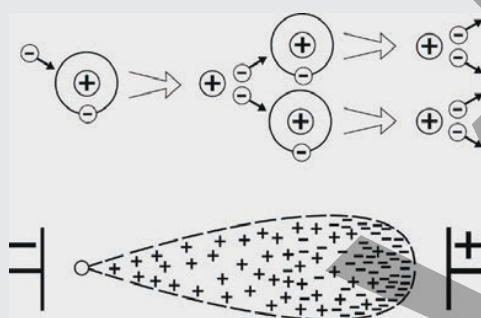
Электрический ток, помимо металлов, может возникать также в растворах электролитов, газах и полупроводниках. Однако механизмы, возникновения электрического тока в различных средах, отличаются.



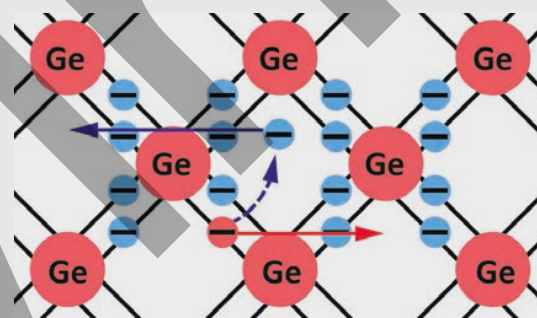
Свободные носители заряда в металлах



Электропроводность электролитов



Электропроводность газов



Электропроводность полупроводников

- Какие условия должны быть соблюдены для возникновения электрического тока?
- Одинаковы ли носители электрического заряда, создающие ток в различных средах?
- Какие типы проводников используются в бытовых электроприборах и современных электронных устройствах, таких как мобильные телефоны, компьютеры и т. д.?

## Из раздела вы узнаете:

- Условия возникновения электрического тока одинаковы для разных сред, но вид свободных носителей заряда зависит от среды.
- Механизмы электропроводности в металлах, газах и полупроводниках различны.
- Свойства окружающей среды оказывают существенное влияние на электрический ток. Существуют среды (например, полупроводники), электропроводность которых резко зависит от внешних воздействий.
- Хотя физическая природа тока в разных средах различна, действия электрического тока проявляются одинаково: тепловое, магнитное и химическое действия.
- Наряду с положительным воздействием электрического тока на живые организмы, он также может представлять для них опасность.

## 3.1. Электропроводность металлов

**Согласно классической электронной теории проводимости металлов:**

- свободные электроны в металле ведут себя как «электронный газ»;
- в отсутствие внешнего электрического поля электроны совершают хаотическое тепловое движение;
- под действием внешнего электрического поля «электронный газ» движется упорядоченно в направлении, противоположном направлению электрического поля;
- электрическое сопротивление в металлах возникает в результате столкновений свободных электронов с положительными ионами находящимися в узлах кристаллической решетки металла;
- в металлическом проводнике с электрическим током тепло выделяется в результате столкновений электронов с ионами в узлах кристаллической решетки.



### 3.1.1. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Чтобы не промокнуть в дождливую погоду, некоторые из вас, вероятно, спрячутся под деревом с большими листьями, но это очень опасно для жизни.

- Почему во время грозы опасно прятаться под деревом или стоять рядом с большим водоёмом, а находиться в машине – относительно безопасно?

**Ключевые слова:**

проводник, диэлектрик, свободные электроны, диполь, полярный диэлектрик, неполярный диэлектрик

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**Тела, проводящие и непроводящие электрический ток**

**Принадлежности:** металлические шарики на пластмассовых штативах (2 шт.), тонкая бумажная лента, прикреплённая к верхней части пластмассового штатива, алюминиевая (или медная) проволока, полиэтиленовая (или резиновая) нить, стеклянная палочка, шерстяная (или шёлковая) ткань.

**Ход работы:**

1. Расположите пластмассовые штативы на столе вдоль одной линии. Наэлектризуйте стеклянную палочку и прикоснитесь ею к правому шару (рис. 3.1, а). При этом обратите внимание на то, как «ведёт себя» бумажная лента.
2. Соедините шары алюминиевой (или медной) проволокой и повторите эксперимент. Наблюдайте за изменениями, происходящими с бумажной лентой (рис. 3.1, б).
3. Замените проволоку, соединяющую шары, полиэтиленовой нитью и повторите эксперимент еще раз, и наблюдайте за изменениями происходящими с бумажной лентой (рис. 3.1, с).

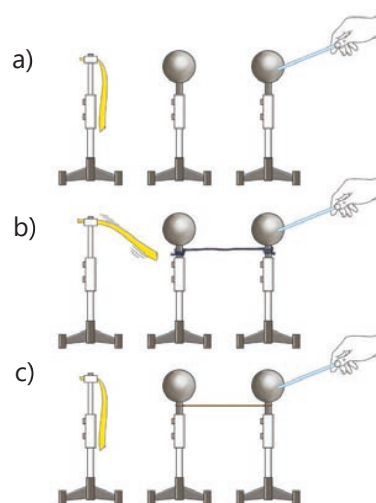


Рисунок 3.1

**Обсудите**

- Как изменилось положение бумажной полоски вблизи левого шарика, когда правый шарик наэлектризовали с помощью стеклянной палочки?
- Почему бумажная полоска притянулась к левому металлическому шарiku, когда правый шарик, соединенный с ним проводом, наэлектризовали?
- Когда шарики были соединены полиэтиленовой (или резиновой) нитью, и правый шарик был наэлектризован, почему бумажная полоска около левого шарика осталась неподвижной?
- Какой вывод можно сделать из исследования?

**Проводники**

В ходе исследования вы обнаружили новое свойство тел: они могут проводить или не проводить электрический заряд. Когда вы соединили металлические шарики проволокой, электрический заряд от правого шарика перешел к левому, и бумажная полоска притянулась. Таким образом, металлическая проволока хорошо проводит электрические заряды.

• **Вещества, проводящие электрический заряд, называются проводниками.**

К проводникам относятся металлы, растворы электролитов и т. д.

• **Почему проводники, например, металлы, легко проводят электрический ток?**

Это обусловлено строением металлов. Они состоят из положительных ионов, упорядоченно

расположенных в узлах кристаллической решетки, и свободных электронов. Ионы образуются в результате того, что электроны покидают свои атомы. Покинув атомы, электроны становятся свободными и распределяются по всему объему металла. Такие электроны называются свободными электронами. На ионы и свободные электроны металлического проводника, помещенного во внешнее электрическое поле, действует электрическая

**Знаете ли вы?**

Металлы обладают большим количеством свободных электронов. Например, концентрация свободных электронов в медном проводнике равна  $10^{29} - 10^{32} \text{ м}^{-3}$ .

сила  $\vec{F} = \vec{E}q$ . Сила, действующая на положительные ионы, направлена в ту же сторону, что и напряженность поля, а сила, действующая на свободные электроны, направлена противоположно вектору напряженности. Однако положительные ионы в кристаллической решетке не могут перемещаться под действием электрической силы, в то время как свободные электроны под действием электрической силы начинают направленно двигаться в сторону, противоположную вектору напряженности внешнего поля, обеспечивая электропроводность (рис. 3.2). Таким образом, за направление электрического тока условно принято:

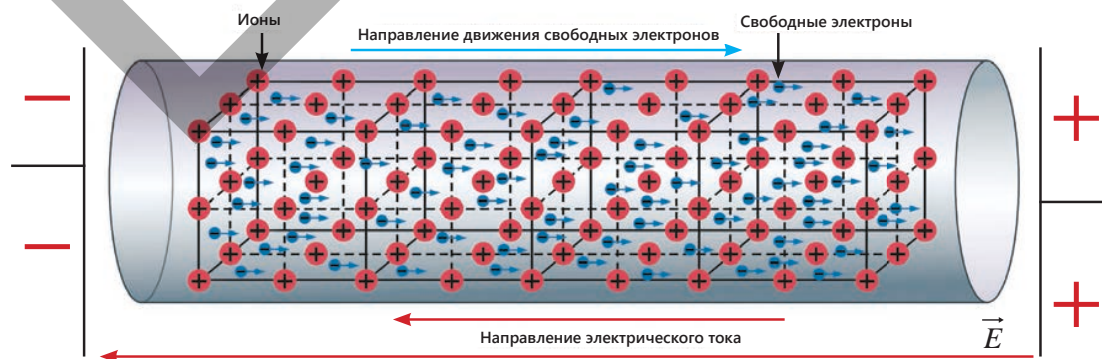


Рисунок 3.2. За направление электрического тока условно принимают направление напряженности поля.

- а) направление напряженности поля;
- б) направление движения положительных зарядов;
- с) направление, противоположное движению свободных электронов.

Однако, поскольку положительные ионы, расположенные в узлах кристаллической решетки металлов, не могут двигаться, за направление тока условно принимают направление действующей на них силы.

• ПОДУМАЙ  
• ОБСУДИ  
• ПОДЕЛИСЬ

Почему за направление электрического тока принято направление движения положительных зарядов?

### Диэлектрики

В проведённом вами ранее исследовании, при соединении металлических шариков полиэтиленовой (или резиновой) нитью, электрический заряд не передавался от правого шарика к левому. Поэтому бумажная лента оставалась неподвижной. Следовательно, полиэтиленовая нить не проводит электрические заряды.

• **Вещества, не проводящие электрические заряды, называются диэлектриками.**

К диэлектрикам относятся пластик, резина, стекло, эбонит, сухая древесина, воздух, керамика, спирт и т. д.

*Тела, изготовленные из диэлектриков, называются изоляторами.* Рукоятки инструментов, используемых для работы с электричеством, изготавливают из изоляторов. Диэлектрики также можно наэлектризовать, но электрические заряды в них не перемещаются: электрические заряды, возникающие в диэлектрике при трении или прикосновении, остаются там, где они появились.

Например, если потереть один конец стеклянной палочки о кусок шерсти, её можно наэлектризовать отрицательным зарядом, а если потереть другой конец о кусок шелка – положительным.

?

Почему диэлектрики не проводят электрический ток?

*Диэлектрик – это вещество, в котором очень мало свободных носителей заряда, поэтому оно практически не проводит электрический ток.*

Его главная особенность: электроны и ионы не могут свободно перемещаться в диэлектрике. Эти частицы могут только «менять свои места» внутри атома или молекулы. Диэлектрики бывают двух типов: полярные и неполярные.

**1. Полярный диэлектрик.** Это диэлектрик, состоящий из полярных молекул, то есть «центры» положительных и отрицательных зарядов в молекуле этого вещества не совпадают. По своим электрическим свойствам молекулы полярных диэлектриков ведут себя как диполи.

• **Диполь – система, состоящая из двух зарядов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга, равных по модулю и противоположных по знаку.**

В отсутствие внешнего электрического поля дипольные молекулы полярного диэлектрика могут ориентироваться в разных направлениях, совершая хаотическое тепловое движение. Поскольку электрические поля этих диполей полностью компенсируют друг друга, электрическое поле в конечном итоге равно нулю в любой части диэлектрика (рис. 3.3, а).

Однако, когда такой диэлектрик помещают во внешнее электрическое поле напряжённостью  $E_0$ , это поле «поворачивает» диполи и ориентирует их параллельно линиям напряжённости поля. Отрицательные полюса диполей при этом будут направлены влево – к положительным зарядам, создающим поле (рис. 3.3, b). Таким образом, в диэлектрике создается внутреннее электрическое поле, направление которого противоположно направлению внешнего поля, и в результате суммарное поле ослабевает.

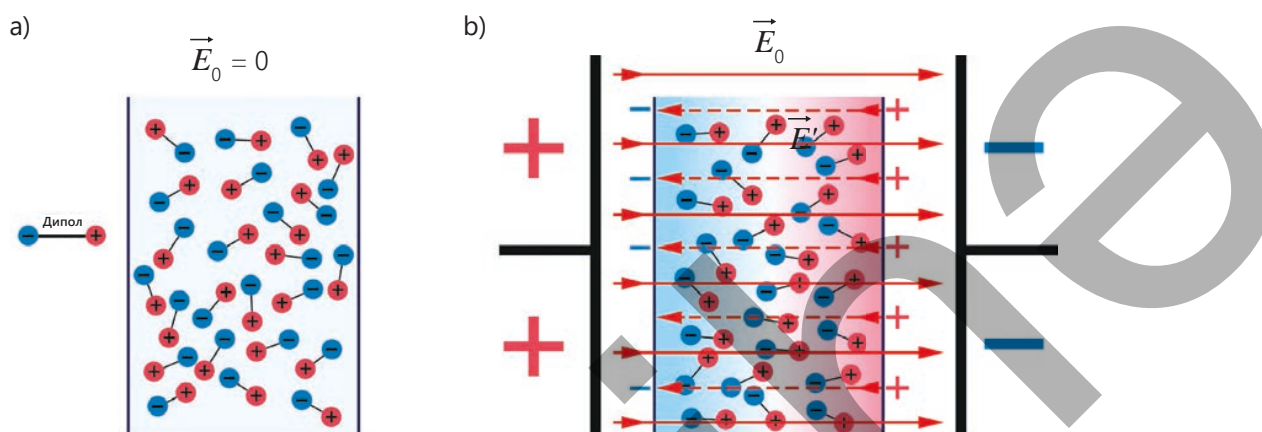


Рисунок 3.3. Полярный диэлектрик

## 2. Неполярные диэлектрики.

В атоме диэлектрика этого типа орбиты электронов обычно расположены симметрично, то есть центры положительных зарядов и орбит отрицательных зарядов совпадают (рис. 3.4. а).

Когда диэлектрик помещается во внешнее электрическое поле, эта симметрия нарушается: электронные орбиты несколько смещаются в сторону положительного полюса, создающего поле. В результате центры положительных и отрицательных зарядов внутри атома слегка смещаются друг относительно друга, и атом «ведёт себя» как диполь.

Таким образом, неполярный диэлектрик также частично поляризуется во внешнем поле, и внутреннее поле, создаваемое этими диполями, ослабляет общее поле (рис. 3.4, b). К неполярным диэлектрикам относятся инертные газы, кислород, водород, полиэтилен и др.

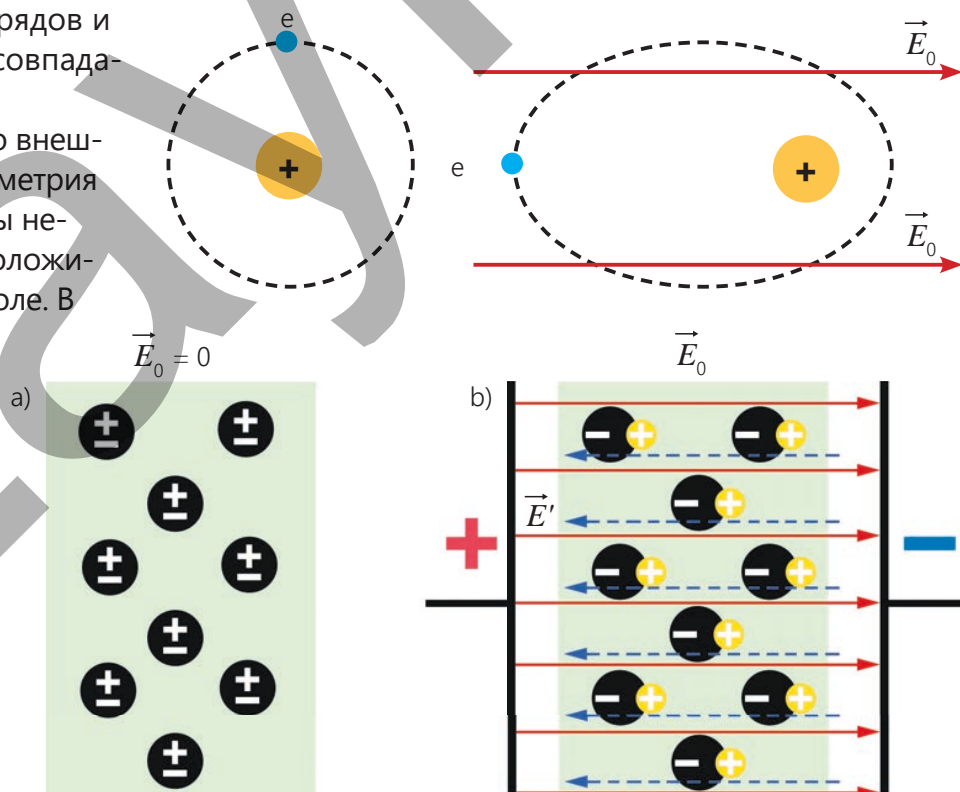


Рисунок 3.4. Неполярный диэлектрик

**Примените полученные знания****Почему металлический стержень не наэлектризовался?**

**Принадлежности:** металлический шарик, закреплённый на пластмассовом штативе, тонкая бумажная полоска, прикрепленная к концу пластмассового штатива, металлический стержень, стеклянная палочка, шерстяная (или шелковая) ткань, резиновые перчатки, медная проволока.

**Ход работы**

1. Разместите штативы близко друг к другу на столе. Наэлектризуйте стеклянную палочку, потерев её о ткань, и прикоснитесь ею к шарикам (рис. 3.5, а). Обсудите с одноклассниками причину притяжения бумажной полоски к шару.
2. Прикоснитесь рукой к шару, чтобы разрядить его. Затем потрите металлический стержень о шерстяную ткань и прикоснитесь им к металлическому шарикам, наблюдая за поведением бумажной полоски (рис. 3.5, б).

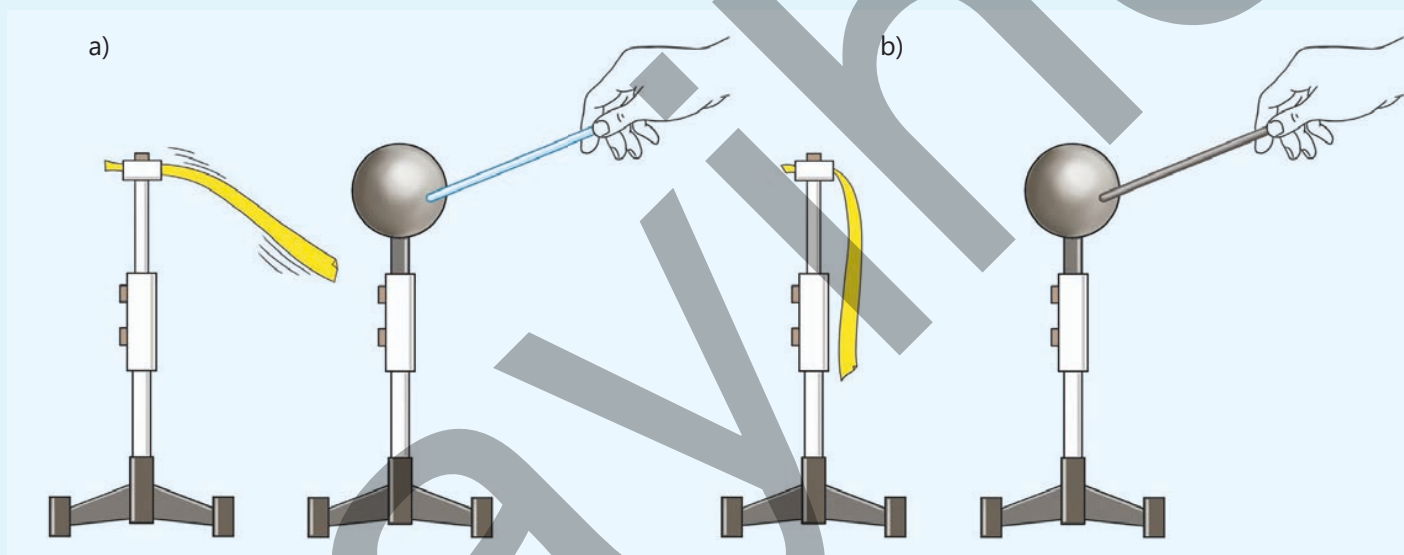


Рисунок 3.5

**Обсудите:**

- Почему бумажная полоска осталась неподвижной, когда вы натёрли металлический стержень о шерсть и коснулись им шарика?

**Проверьте полученные знания**

1. Айтадж хочет подключить адаптер своего мобильного телефона к электрической розетке. Поскольку провод адаптера покрыт материалом, похожим на пластик, брат говорит ей: «Не волнуйся, этот провод не причинит тебе вреда».

**Вопрос 1.** Какова функция пластикового покрытия в данном случае? Какие из следующих ответов верны?

- а) пластик используется для украшения провода
- б) пластик проводит электрический ток, и это помогает устройству работать
- в) пластик является диэлектриком и защищает пользователя от электрического тока
- г) пластик защищает провод от нагрева, это не имеет отношения к току

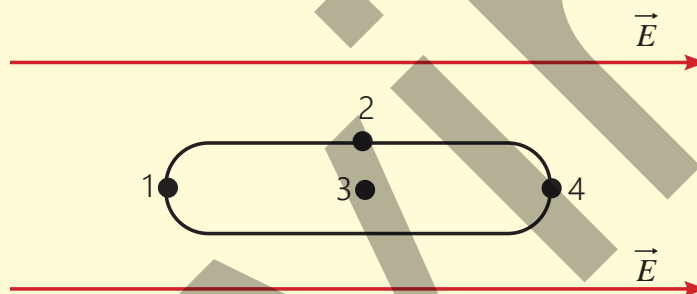
**Вопрос 2.** Если пластиковая оболочка провода повреждена и видна его металлическая часть, какое действие будет наиболее правильным?

- Его можно использовать, поскольку он не проводит ток.
- Достаточно обернуть его бумагой.
- Провод необходимо заменить или покрыть изоляционным материалом.
- Оголённую часть необходимо обернуть вокруг медной проволокой.

2. На рисунке показано поперечное сечение медной проволоки, помещенной в однородное электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$ .

**Вопрос 1.** В какой точке медной проволоки концентрация свободных электронов наибольшая? Обоснуйте свой ответ.

**Вопрос 2.** В какой точке проволоки тока нет?

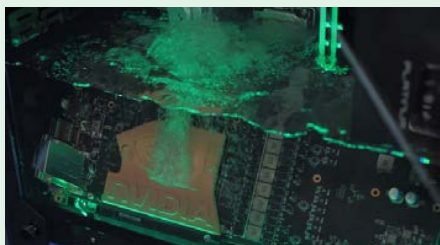


3. В сухом помещении пластиковый корпус кондиционера или телевизора быстро покрывается пылью.

**Вопрос.** Почему пластиковые поверхности так сильно притягивают пыль? Как поляризация диэлектриков в электрическом поле объясняет это явление?

## 3.1.2. Сопротивление металлов

Зимой некоторые смартфоны внезапно выключаются или уровень зарядки батареи показывает 1%.



Ключевые слова

сопротивление, удельное сопротивление

• **Как по-вашему, почему некоторые смартфоны отключаются сами по себе на холоде?**

Известно, что *Google, Amazon, NVIDIA* используют специальные системы водяного охлаждения в своих серверах искусственного интеллекта.

• **Почему серверы с искусственным интеллектом охлаждают водой, а не обычным кондиционером?**



Согласно закону Ома для участка электрической цепи, сопротивление данного металлического проводника является постоянной величиной и не зависит от напряжения на концах проводника и силы тока (см.: Физика 7, Часть II, стр. 51):

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

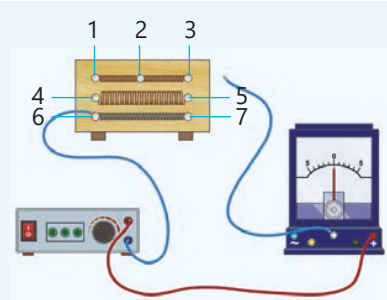
ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**От чего зависит сопротивление металлического проводника?**

**Принадлежности:** источник постоянного напряжения (выпрямитель с  $U = 4\text{В}$ ), амперметр, соединительные провода, деревянная доска с прикрепленными к ней исследуемыми проводниками.

**Устройство панели**

Исследуемые проводники представляют собой три нихромовые и одну железную спираль одинаковой длины и площади поперечного сечения. Одна из нихромовых спиралей закреплена на зажимах 1–3, проходя через центральный зажим 2. Две оставшиеся нихромовые спирали расположены друг над другом и соединены с зажимами 4–5 (площадь поперечного сечения удваивается). Железная спираль закреплена на зажимах 6–7.



**Ход работы**

1. Соберите электрическую цепь, состоящую из выпрямителя, амперметра и представленной доски. Сначала измерьте силу тока в нихромовой спирали, прикрепленной к зажимам 1–3 на доске. Затем, подключив зажимы 1–2 спирали к цепи, измерьте силу тока в половине нихромовой спирали и сравните результаты.
2. Сначала измерьте силу тока в одной спирали, прикрепленной к зажимам 1–3, а затем в двух спиралях, подключенных к зажимам 4–5, и сравните результаты.
3. Поочередно подключив зажимы 1–3 и 6–7 к цепи, измерьте силу тока в нихромовой и железной спиралях одинаковой длины и площади поперечного сечения и сравните результаты.
4. Нарисуйте схему электрической цепи на рабочем листе и запишите результаты.

**Обсудите**

- Во сколько раз сила тока, протекающего через весь проводник, отличается от силы тока, протекающего через его половину? Как сопротивление проводника зависит от его длины?
- Во сколько раз сила тока, протекающего через проводник, подключенный к одному и тому же источнику напряжения, отличается от силы тока, протекающего через проводник с площадью поперечного сечения вдвое больше? Как сопротивление проводника зависит от площади его поперечного сечения?
- Одинакова ли сила тока, протекающего по проводникам одинаковой длины и площади поперечного сечения, но изготовленным из разных веществ? От чего еще зависит сопротивление проводника?

Итак, в результате, проведённого исследования, вы пришли к следующим выводам:

1. Сила ток в проводнике определенной длины, подключенном к источнику постоянного напряжения ( $U = const$ ), в 2 раза меньше силы тока через половину этого провода. Это означает, что согласно закону Ома ( $I = \frac{U}{R}$ ), сопротивление всего проводника в 2 раза больше сопротивления половины этого провода.

• **Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине.**

2. Сила тока, в проводнике, подключённом к источнику постоянного напряжения ( $U = const$ ), в 2 раза меньше силы тока в проводнике той же длины, но с площадью поперечного сечения вдвое большей. Это означает, что согласно закону Ома ( $I = \frac{U}{R}$ ), сопротивление проводника, площадь поперечного сечения которого вдвое больше, в 2 раза меньше.

• **Сопротивление проводника обратно пропорционально его площади поперечного сечения.**

3. Сила тока в железном проводнике, подключённом к источнику постоянного напряжения ( $U = const$ ), в 10 раз больше силы тока, в нихромовом проводнике, подключённом к тому же источнику постоянного напряжения, и его сопротивление в 10 раз меньше.

• **Сопротивление проводника зависит от материала, из которого он изготовлен.**

Таким образом, формула сопротивления проводника записывается следующим образом:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (2)$$

Здесь  $R$  – сопротивление проводника,  $l$  – длина проводника,  $S$  – площадь поперечного сечения проводника,  $\rho$  – удельное сопротивление проводника. *Удельное сопротивление – это физическая величина, зависящая от материала, из которого изготовлен проводник.* В таблице 3.1 показаны экспериментально полученные значения удельного сопротивления некоторых веществ.

Если длина проводника равна  $l = 1$  м, а площадь поперечного сечения  $S = 1$  м<sup>2</sup>, то численное значение удельного сопротивления равно  $\rho = R$ , то есть:

Из формулы  $\rho = \frac{RS}{l}$  видно, что:

• **Удельное сопротивление — это сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>. Единица измерения удельного сопротивления в СИ – Ом · метр (1 Ом · м):**

$$[\rho] = \frac{[R] \cdot [S]}{[l]} = \frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$



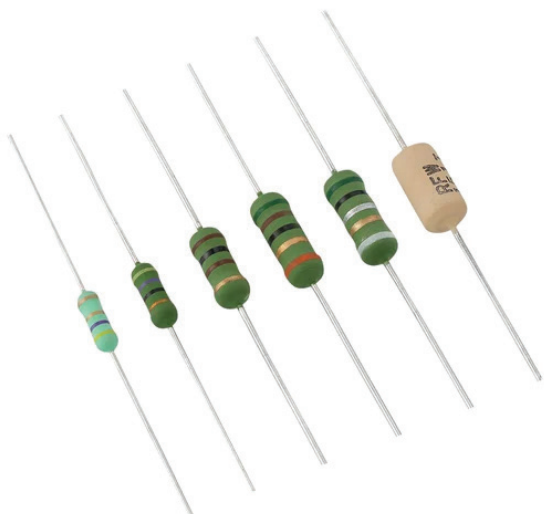


Рисунок 3.6

Поскольку площадь поперечного сечения проводника обычно мала, она часто измеряется в мм<sup>2</sup>. Поэтому единицей измерения удельного сопротивления является также:

$$[\rho] = 1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

**Резисторы.** Элементы цепи, обладающие электрическим сопротивлением, называются резисторами (от англ. resistor). Резистор уменьшает силу тока в электрической цепи до значения, необходимого для отдельных компонентов или устройств цепи. Резисторы, используемые в электрических цепях, различаются по размеру и форме (Рисунок 3.6).

**Таблица 3.1.** Удельное сопротивление некоторых веществ (при t = 20°C)

Вещество	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Вещество	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,016	Манганин (сплав марганца и никеля)	0,43
Медь	0,017	Константан (сплав меди и никеля)	0,5
Золото	0,024	Ртуть	0,96
Алюминий	0,028	Нихром (сплав никеля и хрома)	1,1
Вольфрам	0,055	Фехраль (сплав Fe+Cr+Al)	1,3
Железо	0,1	Графит	13
Свинец	0,21	Керамика	10 <sup>19</sup>
Никель	0,4	Эбонит	10 <sup>20</sup>

- ПОДУМАЙ
- ОБСУДИ
- ПОДЕЛИСЬ

Как отличается сопротивление серебряной проволоки от сопротивления медной проволоки одинаковых размеров?

### Примените полученные знания

**Задача.** Отец Мурада планирует заменить электропроводку в своем летнем домике. Мурад хочет помочь отцу в этом. Из интернета он узнает, что при выборе электропроводки следует учитывать 3 основные характеристики: длину, толщину и материал провода. Мурад рассматривает 3 разных типа проводников в магазине электротоваров.

Проводник	$l, м$	$S, мм^2$	$\rho, \frac{Ом \cdot мм^2}{м}$
А – медь	10	1,0	0,017
В – алюминий	20	1,5	0,028
С – алюминий	10	1,0	0,028

**Вопрос 1.** Какой проводник следует выбрать Мураду – с бóльшим электрическим сопротивлением или с мёньшим? Почему?

**Вопрос 2.** Почему при выборе проводника Мураду следует обратить внимание не только на его длину, но и на материал, из которого он изготовлен, и площадь поперечного сечения?

**Вопрос 3.** Вычислите и сравните сопротивления проводников А, В и С, используя таблицу.

### Проверьте полученные знания

1. Почему сопротивление проводника не зависит от напряжения на его концах и силы тока в нем?
2. Адиль и Лала провели эксперимент по изучению электрического сопротивления металлических проводников, используя проволоки из никеля и фехраля различной длины и толщины. Результаты эксперимента представлены в таблице ниже.

№	Металлический проводник	$S, мм^2$	$l, м$	$R, Ом$
1	Никель	0,2	1	$2,0 \pm 0,2$
2	Никель	0,2	2	$4,0 \pm 0,2$
3	Никель	0,4	2	$2,0 \pm 0,2$
4	Фехраль	0,2	0,5	$3,0 \pm 0,2$

**Вопрос 1.** Какие утверждения соответствуют результатам эксперимента? Выберите два правильных утверждения из приведенного списка. Укажите их цифрами.

- 1– Электрическое сопротивление проводника зависит от материала, из которого он изготовлен.
- 2– Электрическое сопротивление проводника увеличивается с увеличением его длины.
- 3– С увеличением длины проводника его электрическое сопротивление остается неизменным.
- 4– Электрическое сопротивление проводника прямо пропорционально площади его поперечного сечения.
- 5– С увеличением толщины проводника его электрическое сопротивление уменьшается.

**Вопрос 2.** Считаете ли вы целесообразным использовать проволоки из никеля и фехраля при прокладке электрических линий в доме? Обоснуйте свой ответ.

3. На рисунке 3.7 изображен реостат и его части.

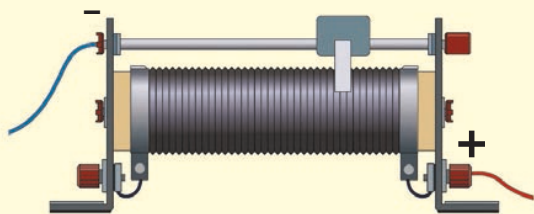


Рисунок 3.7

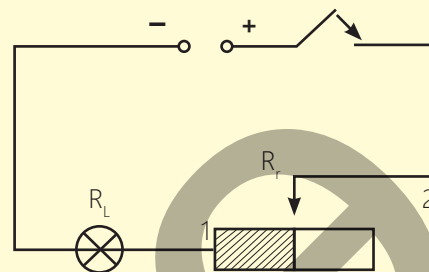


Рисунок 3.8

**Вопрос 1.** Используя рисунок, объясните принцип работы реостата. Каково назначение реостата?

**Вопрос 2.** На рисунке 3.8 показана схема электрической цепи с подключённым реостатом. Чему равно общее сопротивление этой цепи?

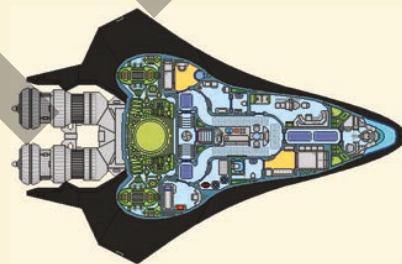
### 3.1.3. Цепь распределения напряжения

**НАПОМИНАНИЕ:** Физика 7. Учебник. Последовательное и параллельное соединение ламп.

В таблице показаны схемы последовательного и параллельного соединения двух резисторов и характеристики соответствующих соединений.

Соединение	Последовательное	Параллельное
Схема		
Сила тока	$I = I_1 = I_2$	$I = I_1 + I_2$
Напряжение	$U = U_1 + U_2$	$U = U_1 = U_2$
Сопротивление	$R = R_1 + R_2$	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

Один из датчиков космического аппарата может работать только при напряжении 3 В. Однако напряжение на входе от источника питания составляет 9 В. Если напряжение в электрической цепи не будет правильно распределено, датчик может мгновенно выйти из строя. Инженеры НАСА легко решили эту проблему, используя делитель напряжения.



- Из каких элементов состоит простейший делитель напряжения?
- Какой принцип используется для получения требуемого значения напряжения в такой цепи?

Делитель напряжения — это простая цепь, позволяющая получить более низкое напряжение из более высокого. В этой цепи используется свойство распределения напряжения между двумя последовательно соединенными резисторами для передачи определенной части постоянного входного напряжения ( $U_{Вход}$ ) на выход цепи ( $U_{Выход}$ ). Простейший делитель напряжения состоит из источника входного напряжения и двух резисторов (рис. 3.9).

Для определения требуемого выходного напряжения делителя используются закон Ома и характеристики последовательного соединения. Таким образом, формула, для расчёта  $U_{Выход}$  выводится следующим образом:

$$U_{Выход} = I \cdot R_2. \quad (3)$$

Согласно закону Ома, выражение для силы тока имеет вид:

$$(4)$$

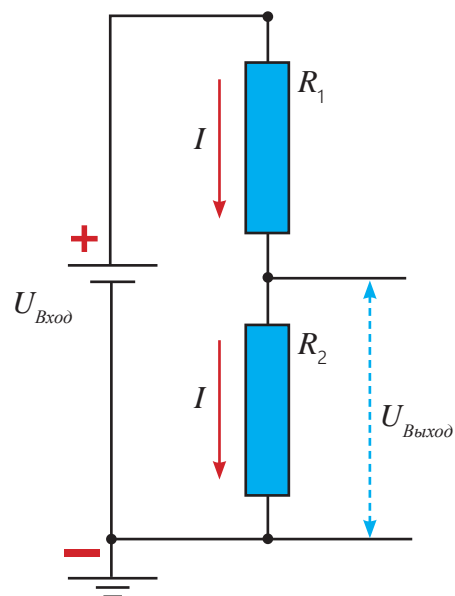


Рисунок 3.9 Схема делителя напряжения

$$I = \frac{U_{\text{Вход}}}{R} = \frac{U_{\text{Выход}}}{R_1 + R_2}$$

При последовательном соединении  $R = R_1 + R_2$ .

Подставляя выражение (4) в (3), получаем для напряжения на выходе:

$$U_{\text{Выход}} = \frac{U_{\text{Вход}}}{R_1 + R_2} \cdot R_2. \quad (5)$$

Таким образом, из формулы (5) видно, что, используя резисторы подходящего сопротивления, можно уменьшить высокое входное напряжение до требуемого малого выходного напряжения с помощью делителя напряжения.

• ПОДУМАЙ  
• ОБСУДИ  
• ПОДЕЛИСЬ

Аккумулятор мобильного телефона дает напряжение 4,2 В. Однако экран, датчики, микрофон и камера работают при различных напряжениях.

**Вопрос.** Как в одном устройстве получают различные напряжения с помощью делителя напряжения?

### Примените полученные знания

**Задача 1.** Джавид, занимающийся в робототехническом кружке, хочет протестировать своего робота. Для этого он подключает панель управления робота к источнику питания 12 В. Однако «мозг» робота, микроконтроллер, может безопасно работать только при напряжении 5 В. Джавид знает, что если напряжение, подаваемое на микроконтроллер, превысит максимальный предел, он сгорит и выйдет из строя.

У Джавида есть два резистора:  $R_1 = 7 \text{ кОм}$  и  $R_2 = 5 \text{ кОм}$ . Он решает, что для защиты микроконтроллера ему следует собрать делитель напряжения и понизить напряжение с 12 В до 5 В.

**Вопрос 1.** По какой схеме Джавид должен собрать делитель напряжения из этих резисторов?

**Вопрос 2.** Обеспечит ли делитель напряжения, который Джавид хочет собрать, необходимое микроконтроллеру напряжение 5 В?

### Проверьте полученные знания

1. Ариф хочет подключить небольшую светодиодную лампу к батарее 9 В. Светодиодная лампа безопасно работает только при напряжении 3 В. Ариф находит в своем электрооборудовании два резистора сопротивлениями 2 кОм и 1 кОм.

**Вопрос 1.** Если Ариф соберет делитель напряжения из этих резисторов, какие значения напряжения он сможет получить на выходе?

**Вопрос 2.** Сможет ли светодиодная лампа безопасно работать при подключении к этому делителю?

2. Цепь делителя напряжения построена с использованием двух резисторов:  $R_1 = 2 \text{ кОм}$  и  $R_2 = 3 \text{ кОм}$ . На выходе цепи, то есть на концах резистора  $R_2$ , получается напряжение  $U_{\text{Выход}} = 3 \text{ В}$ .

**Вопрос.** Чему равно напряжение на входе  $U_{\text{Вход}}$ ?

### 3.1.4. Зависимость сопротивления металлов от температуры

Азербайджанские космические инженеры разрабатывают новый спутник связи. При движении спутника по орбите температура его поверхности, освещенной солнечными лучами, достигает  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в то время как температура неосвещенной поверхности иногда опускается до  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Система электропитания спутника обычно выполнена из медных проводов, сопротивление которых изменяется в зависимости от температуры. Знание зависимости сопротивления от температуры чрезвычайно важно для безопасности космических миссий.



- Как изменение температуры на поверхности спутника от  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  влияет на изменение электрического сопротивления медных проводов? Как изменение температуры изменяет сопротивление?
- Как изменения сопротивления проводов могут повлиять на работу устройств спутника?

#### Ключевые слова

зависимость сопротивления от температуры, температурный коэффициент сопротивления, резисторный термометр

#### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

#### Исследование зависимости сопротивления проводника от температуры

**Принадлежности:** источник постоянного тока (выпрямитель), стальная спираль, амперметр, спиртовка (или свеча), зажигалка, штатив, соединительные провода.

#### Ход работы

1. Соберите последовательно соединенную электрическую цепь, как показано на рисунке 3.10.
2. Включите выпрямитель и запишите значение силы тока в цепи (рисунок 3.10, а). Зажгите спиртовку и нагревайте спираль с протекающим по ней током в течение 1–2 минут, наблюдая за изменением значения силы тока (рисунок 3.10, б).
3. Погасите спиртовку и наблюдайте за показаниями амперметра по мере охлаждения стальной спирали.

#### Обсудите

- Как изменилось значение силы тока в цепи при нагревании и охлаждении стальной спирали с электрическим током?
- Какой вывод вы сделали из проведенного исследования?

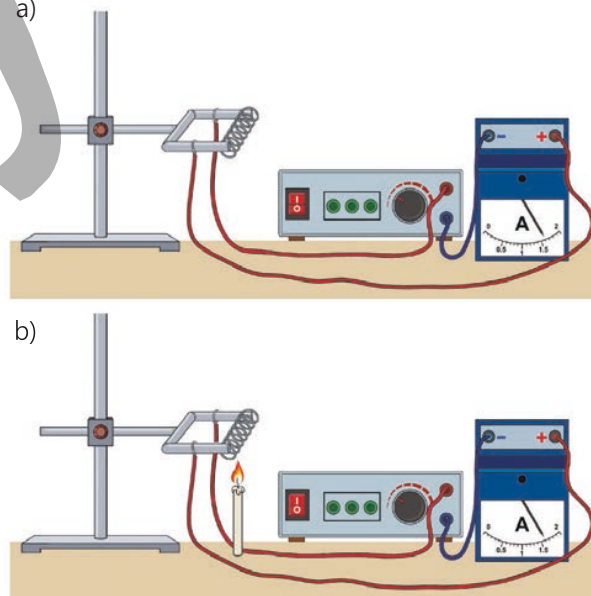
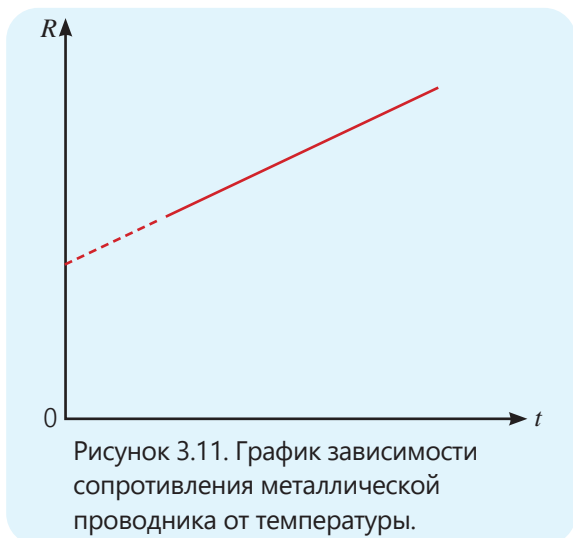


Рисунок 3.10



Какой закономерности подчиняется изменение сопротивления металлического проводника в зависимости от температуры?



Исследование показывает, что сопротивление металлического проводника меняется с изменением температуры. А именно, *при повышении температуры сопротивление металлического проводника увеличивается, а при понижении — уменьшается.* Согласно классической электронной теории проводимости металлов, при нагревании металлического проводника с электрическим током, усиливаются колебательные движения положительных ионов, расположенных в узлах его кристаллической решетки. В результате увеличивается число столкновений упорядоченно движущихся свободных электронов с ионами — сила тока в металлическом проводнике уменьшается. Следовательно, при нагревании металлического проводника его сопротивление возрастает. В небольшом диапазоне изменений температуры сопротивление металлических проводников линейно зависит от температуры, и эта зависимость выражается следующей формулой (рис. 3.11):

$$R = R_0 (1 + \alpha t). \quad (6)$$

Здесь  $R_0$  – сопротивление проводника при температуре  $0^\circ\text{C}$ ,  $R$  – сопротивление проводника при определенной температуре  $t$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

- Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при его нагревании на  $1^\circ\text{C}$

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 t}. \quad (7)$$

Температурный коэффициент сопротивления для чистых металлов всегда  $\alpha > 0$  и, согласно теоретическим расчетам, его значение равно:

$$\alpha \approx \frac{1}{273} \frac{1}{^\circ\text{C}}. \quad (8)$$

Значения температурного коэффициента сопротивления некоторых веществ приведены в таблице 3.2.

**Таблица 3.2.** Температурный коэффициент сопротивления некоторых веществ (при  $20^\circ\text{C}$ )

Вещество	$\alpha, 1/^\circ\text{C}$	Вещество	$\alpha, 1/^\circ\text{C}$
Манганин	0,00003	Цинк	0,004
Никелин	0,0001	Свинец	0,004
Нихром	0,0001	Серебро	0,004
Фехраль	0,0002	Медь	0,0043
Ртуть	0,0009	Вольфрам	0,005
Латунь	0,001	Сталь	0,006
Алюминий	0,004	Железо	0,0066

Формулу зависимости удельного сопротивления металлического проводника от температуры можно записать аналогично выражению (6) следующим образом:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (9)$$

•ПОДУМАЙ  
•ОБСУДИ  
•ПОДЕЛИСЬ

Астронавт ходит по поверхности Луны в обуви с металлическими подошвами и специальной системой подогрева. Температура на поверхности Луны в тени равна  $-150^{\circ}\text{C}$ , а на участке, освещённом Солнцем, равно  $+120^{\circ}\text{C}$ .

**Вопрос.** Как, по-вашему, изменится ли сопротивление подошв обуви астронавта (увеличится или уменьшится) при переходе из тени на участок, освещённый Солнцем? Как это изменение может повлиять на работу системы подогрева?

Зависимость сопротивления металлов от температуры используется в специальных устройствах, например в электронных датчиках, называемых резисторными термометрами. Эти термометры, изготовленные из чистых металлов, позволяют измерять очень высокие или очень низкие температуры. Например, платиновый резисторный термометр может измерять температуру в диапазоне от  $-264^{\circ}\text{C}$  до  $1064^{\circ}\text{C}$ , а медный резисторный термометр — в диапазоне от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $180^{\circ}\text{C}$ .

### Примените полученные знания

**Задача 1.** Сопротивление медного проводника при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  равно 4 Ом.

**Вопрос 1.** Чему равно сопротивление проводника при  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $120^{\circ}\text{C}$  и  $180^{\circ}\text{C}$  соответственно (с учетом погрешности измерения сопротивления  $\Delta R = \pm 0,2$  Ом)?

**Вопрос 2.** На основе полученных результатов как можно изобразить график зависимости сопротивления медного проводника от температуры?

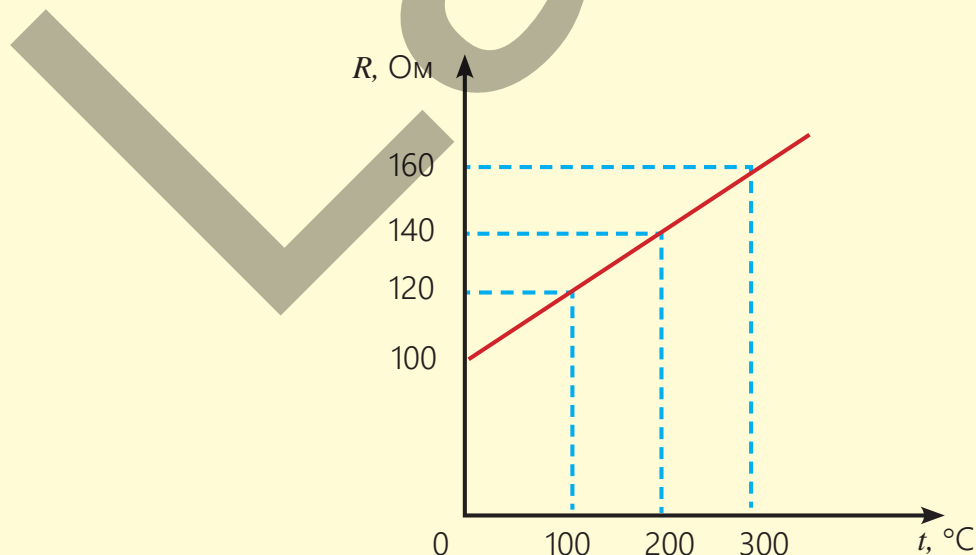
### Проверьте полученные знания

1. На рисунке показан график зависимости сопротивления металла от температуры.

**Вопрос 1.** Какова формула изменения сопротивления металла в зависимости от температуры?

**Вопрос 2.** Чему равен температурный коэффициент сопротивления металла?

2. Сопротивление нагревательного элемента, изготовленного из фехраля, при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  равно 16 Ом.



**Вопрос.** При какой температуре сопротивление металла станет равным 16,4 Ом ( $\alpha_{\text{Фехраль}} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ )?

Решение.

Дано	Решение
$t_1 = 20^\circ\text{C},$ $R_1 = 16 \text{ Ом},$ $R_2 = 16,4 \text{ Ом},$ $\alpha_{\text{Фехраль}} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}.$ $t_2 = ?$	$\begin{cases} R_1 = R_0 (1 + \alpha t_1) \\ R_2 = R_0 (1 + \alpha t_2) \end{cases} \Rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_0(1 + \alpha t_2)}{R_0(1 + \alpha t_1)} = \frac{(1 + \alpha t_2)}{(1 + \alpha t_1)}$ $(1 + \alpha t_2) = \frac{R_2}{R_1} \cdot (1 + \alpha t_1) \rightarrow \alpha t_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (1 + \alpha t_1) - 1$ <p>Разделив обе стороны последнего уравнения на <math>\frac{1}{\alpha}</math>, получим:</p> $t_2 = \frac{R_2}{\alpha R_1} [(1 + \alpha t_1) - 1].$
<b>Вычисления</b>	
$t_2 = \frac{16,4 \text{ Ом}}{2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}} \cdot 16 \text{ Ом}} \cdot [(1 + 2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}} \cdot 20^\circ\text{C}) - 1] = 145,5^\circ\text{C}.$ <p style="text-align: right;">Ответ: <math>t_2 = 145,5^\circ\text{C}.</math></p>	

3. Сопротивление нихромового нагревательного элемента при  $18^\circ\text{C}$  равно 14,2 Ом.

**Вопрос.** При какой температуре сопротивление элемента станет равным 14,8 Ом?

## 3.1.5. Работа электрического тока

**ВСПОМНИТЕ:** Физика 7, Учебник. Электрический ток. Напряжение.

**Сила тока.** Электрический ток характеризуется физической величиной, называемой «силой тока».

• Сила тока – величина, равная электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (10)$$

Сила тока – скалярная величина, её единица измерения в СИ – ампер (1А):  $[I] = \frac{[q]}{[t]} = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = 1\text{А}$

**Электрическое напряжение.** Количество энергии, которое источник тока передает электрическим зарядам, характеризуется физической величиной, называемой напряжением:

$$U = \frac{W}{q}.$$

Здесь  $U$  – напряжение,  $q$  – электрический заряд, а  $W$  – количество энергии.

**Внимание!** Энергия  $W$  равна работе, совершаемой полем при перемещении единичного заряда  $q$  между двумя точками в электрическом поле, то есть:

$$A = qU. \quad (11)$$

Из последней формулы следует, что:

• Электрическое напряжение численно равно работе, совершаемой полем при перемещении единичного заряда между двумя точками в электрическом поле.

Электрическое напряжение – это скалярная физическая величина, её единицей измерения в СИ является вольт (1 В):

$$[U] = \frac{[W]}{[q]} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1\text{В}.$$

На столе лежат четыре простых устройства: светодиодная лампа, мини-вентилятор USB, аккумулятор и печь. В этих устройствах происходит одно и то же: через них проходит электрический ток. Однако в каждом из них электрическая энергия преобразуется в различные виды энергии. Процесс преобразования энергии является результатом совершения работы. Таким образом, электрический ток, проходящий по проводнику, совершает работу.



Можно ли измерить

• работу, совершаемую электрическим током?

• От каких физических величин она зависит?

Ключевые слова

работа, совершаемая током, джоуль, закон Джоуля-Ленца.



Вы знаете, что электрический ток – это направленное движение свободных носителей заряда, например, свободных электронов в металлических проводниках, под воздействием электрического поля. Следовательно, работа, совершаемая током в проводнике, зависит от величины электрического заряда, прошедшего через его поперечное сечение, и напряжения на концах этого проводника, согласно формуле (11):

$$A = qU.$$

Выразив  $q$  из формулы (10) и подставив в последнюю формулу, получим общее выражение для работы, совершаемой электрическим током:

$$A = IUt. \quad (12)$$

**• Работа, совершаемая током на участке цепи, равна произведению силы тока, напряжения на концах этого участка и времени его протекания.**

Единицей измерения работы в СИ является джоуль (1 Дж):  $[A] = [I] \cdot [U] \cdot [t] = 1 \text{ А} \cdot \text{В} \cdot \text{с} = 1 \text{ Дж}$ . Если в формуле (12) учесть выражения  $U=IR$  или  $I=U/R$ , используя закон Ома, то для работы, совершаемой электрическим током, можно получить следующие два выражения:

$$A = I^2 R t, \quad (13)$$

$$A = \frac{U^2}{R} \cdot t. \quad (14)$$

Согласно закону сохранения энергии, при отсутствии каких-либо других превращений энергии работа, совершаемая током в проводнике, расходуется только на увеличение его внутренней энергии, то есть на нагревание проводника. В результате в проводнике выделяется количество теплоты  $Q$ :  $A = Q$ . Отсюда следует, что:

$$Q = IUt. \quad (15)$$

В результате многочисленных экспериментов были установлены две закономерности.

1. Количество теплоты, выделяющееся при прохождении тока через последовательно соединённые проводники, прямо пропорционально их общему сопротивлению этих проводников (поскольку сила тока одинакова при последовательном соединении):

$$Q = I^2 R t. \quad (16)$$

Поскольку эту зависимость впервые экспериментально установили английский физик Дж. Джоуль и русский учёный Э. Ленц, она называется законом Джоуля – Ленца.

**• Количество теплоты, выделяющееся в проводнике с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени его протекания.**

2. Количество теплоты, выделяющееся при прохождении тока через параллельно соединённые проводники, обратно пропорционально их общему сопротивлению этих проводников (поскольку напряжение при параллельном соединении одинаково):

$$Q = \frac{U^2}{R} t. \quad (17)$$

• ПОДУМАЙ  
• ОБСУДИ  
• ПОДЕЛИСЬ

На зарядку аккумулятора телефона и нагревание металлической спирали может расходоваться одинаковое количество электроэнергии.

**Вопрос.** Почему результаты действия тока в этих случаях совершенно различны?



**Джеймс Джоуль** (1818–1889)  
Английский физик.  
Изучал тепловое действие электрического тока. Единица измерения энергии в СИ – **джоуль** – названа в его честь.



**Ленц Эмиль Христианович** (1804–1865)  
Русский физик немецкого происхождения. Он определил направление тока, создаваемого действием магнита, и изучал тепловое действие электрического тока.

### Примените полученные знания

**Задача.** Напряжение на участке электрической цепи, состоящем из двух параллельно соединенных резисторов сопротивлением  $R_1 = 30$  Ом и  $R_2 = 10$  Ом равно 4 В.

**Вопрос 1.** Какую работу совершает электрический ток в каждом резисторе за 1 минуту?

**Вопрос 2.** Какое количество теплоты выделяется на этом участке цепи за 10 минут протекания тока?

### Проверьте полученные знания

1. Напишите три формулы для расчёта работы электрического тока и объясните, в каких случаях их удобно использовать.
2. Интеллектуальный нагревательный кабель. Проводится эксперимент с «умным» нагревательным кабелем (используемым, например, для предотвращения замерзания труб). При подаче на кабель напряжения 110 В в нём выделяется 260 кДж теплоты.

**Вопрос 1.** В течение какого времени через кабель должен протекать ток силой 5 А, чтобы выделилось указанное количество теплоты?

**Вопрос 2.** Где еще можно использовать эту технологию зимой?

3. На рисунке 3.12 показана схема параллельного подключения двух ламп к источнику тока (выпрямителю). При замыкании выключателя одна из ламп ярко светится, а другая тускло.

**Вопрос.** В какой лампе работа электрического тока больше? Обоснуйте свой ответ.

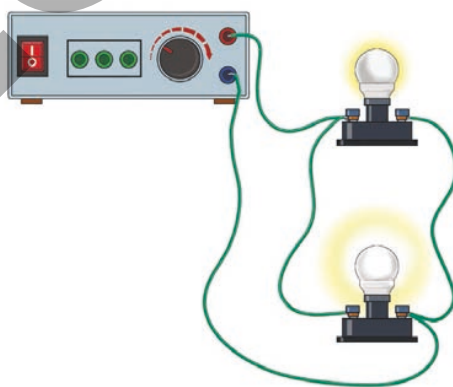


Рисунок 3.12

## 3.1.6. Мощность электрического тока

Мобильный телефон работает при напряжении 5 В. Но при смене адаптера скорость накопления энергии может резко увеличиться или уменьшиться.

- Сам телефон не меняется, источник питания не меняется — как же получается, что один адаптер заряжает разряженную батарею телефона за 60 минут, а другой – за 20 минут?
- В чём причина этой разницы?



### Ключевые слова

быстрота выполнения работы, мощность электрического тока, ватт, 1 кВт·ч

### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

#### Почему же процессы происходят с разной скоростью, при неизменной батарее?

**Принадлежности:** источник тока (батарея с напряжением 4,5 В или выпрямитель на 4 В), небольшие лампы (двух разных типов: яркий LED, лампа с тонкой нитью накаливания), небольшой электродвигатель (двух разных мощностей), амперметр, вольтметр, секундомер, выключатель, соединительные провода.

#### Ход работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме (рис. 3.13), состоящую из источника тока, ключа, LED лампы, амперметра, вольтметра и соединительных проводов.
  2. На этом этапе выполните два действия:
    - а) замкните ключ и наблюдайте, как быстро меняется яркость лампы;
    - б) запишите значения напряжения на лампе и силы тока, проходящего через неё, в течение 20 секунд.
  3. Повторите эксперимент, включив в цепь сначала лампу накаливания, а затем электродвигатель вместо LED лампы. Каждый раз выполняйте следующие два действия:
    - а) замкните ключ и наблюдайте за изменением яркости лампы накаливания. В опыте с электродвигателями сравните скорость их изменения, поочередно подключая их к цепи;
    - б) в течение 20 секунд измерьте и запишите напряжение на лампе (или электродвигателе) и силу тока, проходящего через них.
- Запишите результаты в таблицу 1.

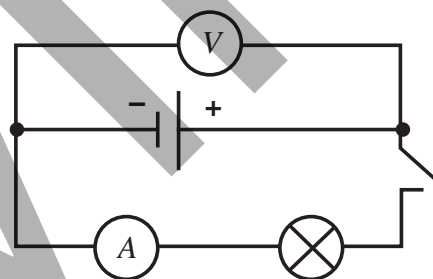


Рисунок 3.13

Таблица 1.

№	Приборы	t, с	I, А	U, В	A, С
1	LED лампа	20			
2	Лампа накаливания				
3	Электродвигатель				

#### Обсудите

- Какие отличия вы заметили в проведенных экспериментах?
- Батарея не меняется, так почему же процессы происходят с разной скоростью: например, LED лампа светится ярко, лампа накаливания загорается относительно медленно, а двигатель вращается быстро?
- В чём заключается различие в работе, совершаемой током в этих устройствах?

В проведённом вами исследовании причина, по которой изменение энергии в разных устройствах с одним и тем же источником тока происходит с разной скоростью, заключается в быстроте, с которой электрический ток совершает работу. Быстрота передачи электрической энергии или быстрота её преобразования в другие виды энергии характеризуется физической величиной, называемой *мощностью электрического тока*.

• **Мощность электрического тока численно равна отношению работы, совершаемой током, ко времени, затраченному на её выполнение:**

$$P = \frac{A}{t}. \quad (18)$$

Здесь  $P$  – мощность тока.

Подставив формулу (12) в выражение (18), получим:

$$P = \frac{IUt}{t} = IU. \quad (19)$$

• **Мощность электрического тока равна произведению силы тока и напряжения.**

Единица измерения мощности

электрического тока в СИ ватт (1 Вт):

$$[P] = \frac{[A]}{[t]} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{Вт}.$$

Как видно из выражения (19):

$$1 \text{Вт} = 1 \text{А} \cdot \text{В}.$$

Мощность электрического тока можно рассчитать, используя следующие формулы, наряду с формулами (18) и (19):

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (20)$$

$$P = I^2 R. \quad (21)$$

Зная мощность потребителя электроэнергии, мы можем вычислить работу, совершаемую электрическим током за заданное время:

$$A = Pt. \quad (22)$$

Эта работа равна электрической энергии  $W$ , получаемой потребителем от источника тока. Например, если электрический обогреватель мощностью  $P = 1800$  Вт работает непрерывно в течение одного месяца (30 суток), то энергия, которую он получает от источника тока, может быть вычислена следующим образом:

$$W = Pt = 1800 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} \cdot 24 \cdot 30 = 46,656 \cdot 10^8 \text{ Дж} = 4665600 \text{ кДж}$$

• ПОДУМАЙ  
• ОБСУДИ  
• ПОДЕЛИСЬ

Аккумулятор электромобиля можно зарядить за 20 минут на станции быстрой зарядки, а дома – за 10 часов.

**Вопрос.** Почему станция быстрой зарядки передает электромобилу гораздо больше энергии в секунду, чем домашняя сеть?

Очень часто при вычислении потребленной электроэнергии ее значение выражается в киловатт-часах, а не в джоулях:

• **1 Киловатт-час – равен работе, совершаемой электрическим током мощностью 1 кВт за 1 час:**

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{час} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3600 \text{ кДж}$$

или наоборот:

$$1 \text{ кДж} = \frac{1 \text{ кВт} \cdot \text{час}}{3600}$$

Таким образом, электроэнергию потребленную электрическим обогревателем за месяц, можно легко вычислить:

$$W = \frac{4665600 \cdot 1 \text{ кВт} \cdot \text{час}}{3600} = 1296 \text{ кВт} \cdot \text{час}$$

### Примените полученные знания

#### Задача

В нашей стране цена электроэнергии для населения рассчитывается по разным тарифам за каждый

1 кВт · ч электроэнергии, в зависимости от объема потребления:

- За первые 200 кВт · ч каждый 1 кВт · ч электроэнергии стоит 8,4 гяпика;
- От 200 кВт · ч до 300 кВт · ч каждый 1 кВт · ч электроэнергии стоит 10 гяпиков;
- От 300 кВт · ч и выше каждый 1 кВт · ч электроэнергии стоит 15 гяпиков.

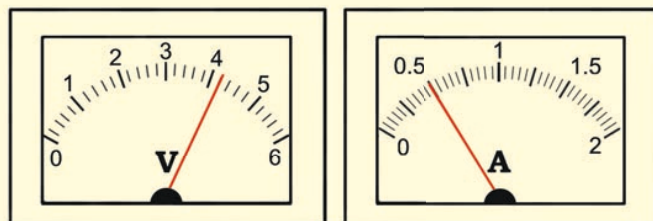
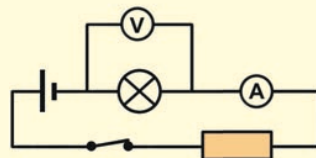
**Вопрос 1.** Сколько необходимо платить за энергию, потребляемую электрообогревателем мощностью 1800 Вт при непрерывной работе в течение месяца?

**Вопрос 2.** Если этот обогреватель работает непрерывно всю зиму (4 месяца), сколько необходимо платить за потребляемую им энергию?

### Проверьте полученные знания

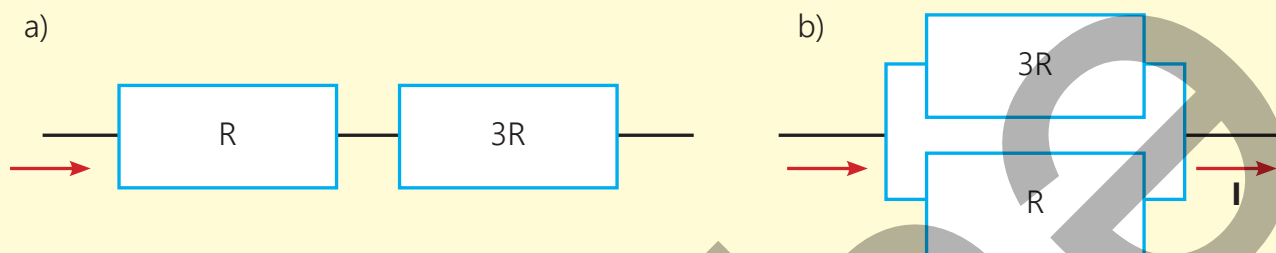
На рисунке показана электрическая цепь.

**Вопрос.** Чему равна мощность тока, проходящего через лампу?



2. На рисунке показаны схемы участков цепи с последовательным (а) и параллельным (b) соединением двух резисторов, подключенных к одному и тому же источнику напряжения.

**Вопрос.** На каком участке цепи выделяется бóльшая мощность?



### 3.1.7. Влияние электрического тока на живые организмы

Тогрул вынужден мыться в то время, когда по телевизору показывают его любимый фильм «Волшебный халат», поэтому он обустраивает свою ванную комнату так, как изображено на рисунке. Он думает, что этим он добился своего.



• **Что должен сделать Тогрул для обеспечения своей безопасности?**

Родители Тогрула обсуждали, куда поставить недавно купленную стиральную машину. Отец предложил установить её на кухне, а мать – в ванной. Тогрул вмешался в дискуссию и встал на защиту предложения матери.

• **Чье предложение более целесообразно с точки зрения безопасности? Укажите две причины.**

**Ключевые слова**

действие тока на живые организмы, правила техники безопасности, применение электрического тока.

• **Негативное действие электрического тока на живые организмы**

Человеческий организм хорошо проводит электрический ток. Проводимость отдельных тканей организма различна. Костная ткань, кожа и соединительная ткань проводят ток плохо. Удельное сопротивление этих частей очень велико и находится в диапазоне  $10^7$ – $10^9$  Ом·м. Спинномозговая жидкость, сыворотка крови, сама кровь и нервно-мышечная ткань – это среды, которые хорошо проводят ток. Удельное сопротивление этих жидкостей и тканей варьируется от 0,6 до 0,7 Ом·м. Электрический ток в человеческом организме создается ионами. К ним относятся ионы железа, кальция, фосфора, калия, натрия и других химических элементов. Прохождение тока через человеческий организм сопровождается рядом физиологических явлений.

Прохождение электрического тока через тело человека может вызвать раздражение, мышечные спазмы, нарушение дыхания, паралич и смерть. Последствия поражения электрическим током зависят от силы тока, проходящего через тело, от характера тока (постоянный или переменный), а также от продолжительности и пути его прохождения. Прохождение тока через сердце и мозг крайне опасно.

В таблице 3.4 показана зависимость действия тока, проходящего по пути «рука – рука» и «рука – нога» взрослого человека, от силы тока.

**Таблица 3.4.** Влияние тока, проходящего по пути «рука – рука» и «рука – нога» взрослого человека

I, (vA)	Действия тока	
	Постоянный ток	Переменный ток
2–3	Не ощущается.	Сильная дрожь пальцев рук.
5–10	Ощущается нагревание.	Ощущается боль. Мышцы рук сводит судорогой.
12–15	Нагревание возрастает.	Возникает сильная боль в пальцах и костях кистей рук. Можно терпеть 5–10 секунд.
20–25	Повышается нагревание. Мышцы рук слегка сокращаются.	Руки парализуются, их невозможно отделить от проводника. Дыхание становится затрудненным. Можно терпеть 5 секунд.
50–80	Мышцы рук сокращаются. Дыхание затрудняется.	Паралич дыхания. Нарушение функции сердца.
90–110	Паралич дыхания.	Паралич дыхания. Остановка сердца, если воздействие длится 3 секунды и более. Смерть.

В таблице показано, что смерть может наступить при силе тока 100 мА.

Сопротивление тела непостоянно. Оно зависит от состояния человека, его кожи и наличия пота. Сопротивление сухой и грубой кожи очень высокое, в то время как сопротивление тонкой, нежной и влажной кожи – низкое. Сопротивление сухой кожи на участке от пальцев одной руки до пальцев другой примерно равно  $10^5$  Ом. Когда руки потеют, сопротивление снижается до значений порядка 1500 Ом. Вычислим значения напряжения, которые могут стать смертельными, в зависимости от этих сопротивлений:

$$U_{\text{сухой}} = 100 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 10^5 \text{ Ом} = 10000 \text{ В};$$

$$U_{\text{влажный}} = 100 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 1500 \text{ Ом} = 150 \text{ В}.$$

#### • Положительные действие электрического тока

Также существуют положительные эффекты от воздействия электрического тока, широко используемые в диагностике и профилактике заболеваний живых организмов, в косметологии и промышленности. Краткая информация об этом представлена в таблице 3.5.

**Таблица 3.5.** Области, в которых применяется электрический ток

<b>МЕДИЦИНА</b>	<p>Электротерапия – это метод лечения и реабилитации, основанный на использовании электрических токов и полей. К ее областям применения относятся:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Электромышечная стимуляция – ток помогает восстановить функцию мышц после травм, операций или таких состояний, как паралич.</li> <li>• Обезболивание – например, чрескожная электростимуляция нервов (ЧЭНС) использует слабые электрические импульсы для снятия хронической боли при артрите и других заболеваниях.</li> <li>• Дефибрилляция – в случаях остановки сердца электрический разряд может восстановить нормальный сердечный ритм и т. д.</li> </ul>
-----------------	--

<p><b>ПРОМЫШЛЕННОСТЬ</b></p>	<p>Тепловое действие электрического тока используется в различных процессах, таких как:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Электросварка – ток выделяет тепло в месте контакта двух металлических деталей, обеспечивая их прочное соединение.</li> <li>• Плавка специальных марок стали и других металлов – в электродуговых печах для их расплавления используется ток силой до нескольких тысяч ампер.</li> </ul>
<p><b>КОСМЕТОЛОГИЯ</b></p>	<p>Микротоковая терапия – метод физиотерапии, в котором используются слабые электрические токи для улучшения состояния кожи. К преимуществам относятся:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Улучшение кровообращения – микротоки стимулируют приток крови к мышцам лица и коже, что способствует увеличению поступления кислорода к клеткам.</li> <li>• Увеличение выработки коллагена и эластина – микротоки стимулируют клетки кожи (фибробласты) к выработке необходимых белков, что помогает уменьшить видимые признаки старения.</li> <li>• Улучшение мышечного тонуса – микротоковая терапия помогает укрепить мышцы лица, подтянуть кожу и т.д.</li> </ul>

### Примените полученные знания

#### Первая помощь пострадавшим от поражения электрическим током

При работе с электрическими цепями необходимо проявлять особую осторожность и соблюдать определенные правила техники безопасности.

В каждом кабинете физики есть стенды с этими правилами.

На рисунке ниже показано, как отдалить пострадавшего от действия электрического тока и оказать ему первую помощь. Прокомментируйте эти действия.



**Проверьте полученные знания**

1. Какие части тела хорошо проводят электрический ток?
2. Прокомментируйте следующие рисунки.



3. Электрическое сопротивление человеческого тела определяется, в основном, сопротивлением верхнего слоя кожи (эпидермиса). Тонкая, нежная, вспотевшая (или влажная), а также поврежденная кожа хорошо проводит электрический ток. Напротив, сухая и огрубевшая кожа проводит ток очень плохо. В зависимости от состояния кожи и направления тока сопротивление человеческого тела может принимать значения от  $9,5 \div 10$  Ом до 100 кОм. Установлено, что при напряжении 220 В между влажными руками человека сопротивление его тела равно 1,5 кОм.

**Вопрос 1.** На основании этих данных определите силу тока, проходящего через тело человека.

**Вопрос 2.** При каких значениях сопротивления тела человека при напряжении 220 В электрический ток может стать для него смертельным?

## 3.2. Электрическая проводимость газов

В обычных условиях воздух является диэлектриком, то есть окружающие нас газы не проводят электрический ток. Если бы газы обладали электропроводностью, использование электричества в повседневной жизни было бы невозможно. Открытые провода линий электропередачи и электрические розетки в домах представляли бы большую опасность для жизни человека. Однако при определенных условиях газы могут проводить электрический ток.

### 3.2.1. Электрический ток в газах: несамостоятельный газовый разряд

В своем естественном состоянии газы являются диэлектриками, поскольку их атомы и молекулы нейтральны. В них нет свободных частиц, способных переносить заряд. Однако в некоторых устройствах, например в газовой плите или зажигалке, электрический ток (искра) легко проходит через пламя.

- Как, по-вашему, почему пламя проводит электрический ток?
- Какие свободные носители заряда позволяют электрическому току проходить через пламя?

**Ключевые слова** газовой разряд, ионизация, рекомбинация, несамостоятельный газовый разряд

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**За счёт каких носителей заряда воздух, являющийся диэлектриком, проводит электрический ток?**

**Принадлежности:** эбонитовая (или стеклянная) палочка, шелковая (или шерстяная) ткань, параллельные плоские пластины (2 шт.), электрометр, свеча (или спичка), соединительные провода.

**Ход работы**

1. Подсоедините одну из пластин к металлическому шару электрометра, а другую – к зажиму на корпусе электрометра.
2. Сообщите заряд одной из пластин, прикоснувшись к ней эбонитовой палочкой, предварительно наэлектризованной трением о шерстяную ткань. При повторении процесса несколько раз на пластинах накопятся разноименные электрические заряды. В это время стрелка электрометра отклонится, указывая на возникновение электрического поля между пластинами (рис. 3.14, а).

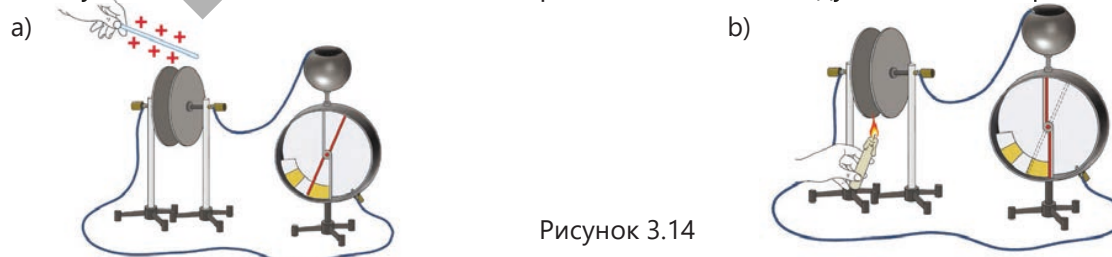


Рисунок 3.14

3. Сдвиньте пластины ближе друг к другу, и понаблюдайте за происходящим.
4. Снова раздвиньте пластины, оставив между ними слой воздуха. Наэлектризуйте пластины эбонитовой палочкой. Электромметр снова покажет, что между пластинами образовалось электрическое поле. Наблюдайте за положением стрелки электромметра в течение нескольких минут, не прикасаясь к приборам.
5. Поместите пламя свечи (или спички) в слой воздуха между пластинами и быстро уберите его. Наблюдайте, проводит ли слой воздуха электричество (см.: Рисунок 3.14, б).

### Обсудите

- Почему стрелка электромметра опустилась до нулевого деления, когда наэлектризованные пластины были прижаты друг к другу?
- Почему, несмотря на то, что пластины долго оставались заряженными, они не разрядились, то есть почему стрелка электромметра не опустилась до нулевого деления?
- Что вы наблюдали, когда поместили пламя свечи или спички в воздушный промежуток между наэлектризованными пластинами и быстро убрали его? Сформулируйте свою гипотезу о причине произошедшего?

Обычно газы являются диэлектриками, но при благоприятных условиях они могут также становиться проводниками. Процесс протекания электрического тока через газ называется газовым разрядом.

• Газовый разряд – это упорядоченное движение электронов, положительных и отрицательных ионов в газе под воздействием электрического поля.

Носители электрического заряда в газе могут быть созданы двумя способами:

#### 1. Ионизацией нейтральных атомов и молекул газа внешним воздействием.

Внешние факторы, ионизирующие нейтральные атомы и молекулы газа, называются ионизаторами.

#### Ионизация бывает трех типов:

- 1) Термическая ионизация – это нагревание газа до очень высокой температуры.
- 2) Облучение – это воздействие на газ рентгеновским, радиоактивным, ультрафиолетовым и другими видами излучения.
- 3) Помещение газа в сильное электрическое поле. В это время атомы и молекулы «бомбардируются» заряженными частицами обладающими большой энергией, ускоренными в электрическом поле.

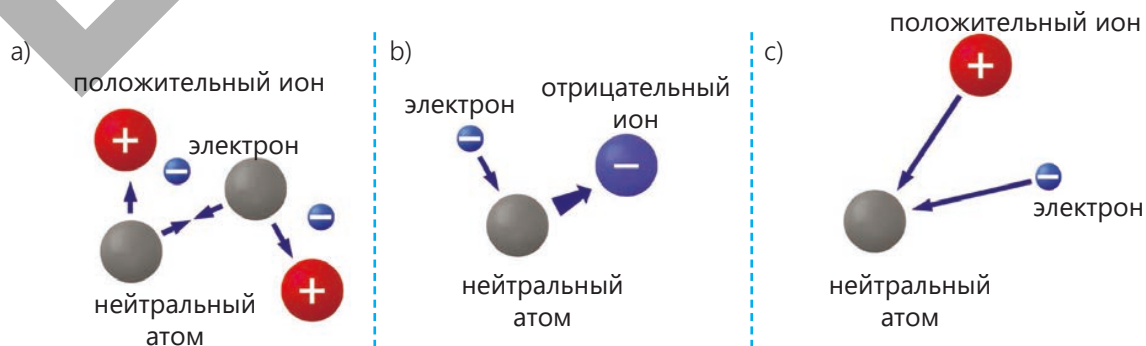


Рисунок 3.15. Ионизация атомов газа и рекомбинация частиц.

## 2. Введением заряженных частиц (электронов, положительных и отрицательных ионов) в газовую среду извне.

Например, поскольку пламя свечи, спирта или спички состоит из электронов и ионов, оно снабжает воздух этими частицами.

**Как происходит ионизация газа под воздействием внешних факторов?** Тепловое движение атомов (или молекул) газа, нагретого до высокой температуры, становится настолько интенсивным, что при столкновении друг с другом они распадаются на электроны и положительные ионы (рис. 3.15, а).

В ходе этого процесса атомы нейтрального газа присоединяют освободившиеся электроны и превращаются в отрицательные ионы, и в газе образуются отрицательные ионы (рис. 3.15, b). Таким образом, происходит ионизация газа. При помещении ионизированного газа во внешнее электрическое поле, освободившиеся электроны, положительные и отрицательные ионы начинают двигаться упорядоченно, образуя газовый разряд — электрический ток в газе.

•ПОДУМАЙ  
•ОБСУДИ  
•ПОДЕЛИСЬ

Когда вы трете спичку о коробку, химические вещества на кончике спички воспламеняются, вызывая быструю ионизацию и нагрев.

**Вопрос.** Какой этап этого процесса соответствует самостоятельному разряду? Обоснуйте свой ответ.

При прекращении действия ионизатора электроны и положительные ионы сближаются и снова превращаются в нейтральные атомы (рис. 3.15, с). Этот процесс называется рекомбинацией. В результате рекомбинации частиц газ снова становится диэлектриком, и, несмотря на наличие внешнего электрического поля, газовый разряд прекращается.

• *Газовый разряд, существующий только при воздействии ионизатора, называется самостоятельным газовым разрядом.*

### Примените полученные знания

**Задача (образец) 1.** В Воздух в двухэлектродной стеклянной трубке объемом  $V = 600 \text{ см}^3$  под воздействием ионизирующего излучения создает каждую секунду  $n = 5 \cdot 10^{15}$  ионно-электронных пар с единичным зарядом в объеме  $1 \text{ см}^3$ .

**Вопрос.** Какова максимальная сила тока самостоятельного газового разряда, образующегося в трубке (т.е. при условии, что все частицы достигают электрода)?

**Решение**

Дано	Решение
$V = 600 \text{ см}^3 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3,$ $t = 1 \text{ с},$ $n = 5 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{м}^3}.$  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$ $I_{\text{макс}} = ?$	Сила тока, согласно определению: $I = \frac{q}{t}$ Количество заряда при этом: $q = N \cdot e.$ Количество ионно-электронных пар, образующихся во всем объеме за время $t$ : $N = n \cdot V.$ Одна пара ионов передает во внешнюю цепь элементарный заряд $e$ , поэтому: $q = n \cdot V \cdot e.$ Итак: $I_{\text{макс}} = \frac{q}{t} = \frac{nVe}{t}$
Вычисления	
$I_{\text{макс}} = \frac{nVe}{t} = \frac{5 \cdot 10^{15} \cdot 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{1 \text{ с} \cdot \text{м}^3} = 48 \cdot 10^{-8} \text{ А} = 480 \text{ нА}.$	

**Задача 2.** Воздух в двухэлектродной стеклянной трубке объемом  $V = 450 \text{ см}^3$  под действием ионизирующего излучения создает каждую секунду  $n = 2,5 \cdot 10^{14}$  ионно-электронных пар однозарядных ионов в объеме  $1 \text{ м}^3$

**Вопрос 1.** Какова максимальная сила тока самостоятельного газового разряда, возникающего в трубке (т.е. при условии, что все частицы достигают электрода)?

**Вопрос 2.** Почему ток, возникающий в трубке, называется самостоятельным газовым разрядом?

**Проверьте полученные знания**

1. В естественных условиях газы являются диэлектриками.

**Вопрос 1.** При каких условиях газы могут быть проводниками?

**Вопрос 2.** Как называется электрическая проводимость газов и чем она отличается от проводимости металлов?

2. Учащиеся под руководством учителя проводят эксперимент по изучению газового разряда. Они наблюдают возникновение газового разряда при освещении слоя воздуха между двумя заряженными параллельными пластинами ультрафиолетовыми лучами.

**Вопрос 1.** Почему возник газовый разряд, когда воздух между заряженными параллельными пластинами осветили ультрафиолетовыми лучами?

**Вопрос 2.** Что произойдет, если прекратить действие излучения? Обоснуйте свой ответ.

3. Почему заряженный электроскоп быстро разряжается, если поблизости работает электросварка?

4. Что такое процессы ионизации и рекомбинации?

## 3.2.2. Электрический ток в газах: самостоятельный газовый разряд

Каждый из вас неоднократно наблюдал разряд молнии в атмосфере. Это атмосферное явление, представляющее собой гигантские искры, происходит между облаками или между облаками и поверхностью Земли. Отметим, что молния – это мощный газовый разряд, происходящий в воздухе, который в обычных условиях является диэлектриком.

- Под действием каких факторов происходит первичная ионизация атомов и молекул воздуха?
- Как процесс ионизации может продолжаться самостоятельно?



ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

### Plasma globe (Плазменный шар)

**Принадлежности:** плазменный шар, сухие кусочки бумаги, люминесцентная лампа.

#### Устройство плазменного шара (кратко)

Плазменный шар обычно представляет собой прозрачный стеклянный шар, заполненный смесью инертных газов (в основном неона, но иногда и другими, такими как аргон, ксенон и криптон) при низком давлении (приблизительно атмосферном). В центре шарика находится электрод, на который подается высокое напряжение от источника питания. При включении шарика смесь газов под действием высокого напряжения ионизируется, образуя светящиеся плазменные нити характерных цветов: неон дает красное свечение, аргон – сине-белое, создавая внутри колбы эффект красивых молний.

Стеклянная колба служит хорошим изолятором, а сила проходящего через нее тока ничтожно мала, поэтому устройство безопасно при соблюдении правил эксплуатации.



### Ход работы

1. Включите шар и опишите наблюдаемую картину.
2. Поднесите люминесцентную лампу ближе к плазменному шару, не касаясь её металлических контактов, и наблюдайте за происходящим.
3. Прикоснитесь пальцем к шару и наблюдайте, как плазменные нити собираются вокруг вашего пальца.
4. Положите кусочки бумаги на поверхность плазменного шарика и наблюдайте за происходящим.

### Обсудите

- Почему люминесцентная лампа начинает светиться рядом с плазменным шаром, даже если она не подключена к сети?
- Почему плазменные нити стягиваются к вашему пальцу, когда вы касаетесь стекла?
- Почему кусочки бумаги движутся к потоку плазмы?
- Какой вывод можно сделать о природе газового разряда на основе всех этих экспериментов?

При определенных условиях газы могут проводить электрический ток даже без воздействия внешнего ионизатора

• **Прохождение электрического тока в газах без внешнего воздействия называется самостоятельным газовым разрядом.**

Хотя газ в нормальных условиях является диэлектриком, он содержит небольшое количество свободных электронов. Под воздействием сильного электрического поля каждый свободный электрон приобретает очень высокую скорость и при столкновении с нейтральными атомами или молекулами ионизирует их. Новое поколение электронов, образовавшееся в результате ионизации, также ускоряется и ионизирует другие атомы и молекулы. Таким образом, в газе образуется электронно-ионная лавина: электроны ускоряются к аноду (положительно заряженному электроду), а положительные ионы — к катоду (отрицательно заряженному электроду) (рис. 3.16). Однако на этом разряд газа не заканчивается. Электроны, получившие достаточно большую энергию на длине свободного пробега (т.е. расстоянии между двумя последовательными столкновениями) в электрическом поле, ионизируют нейтральные атомы при столкновении с ними. Это явление называется ударной ионизацией. Такие непрерывные и последовательные столкновения электронов создают электронную лавину. Образующиеся положительные ионы, двигаясь к катоду, приобретают достаточную энергию, бомбардируют его и вызывают эмиссию электронов с его поверхности.

Таким образом, самостоятельный газовый разряд происходит за счет ударной ионизации и эмиссии электронов с поверхности катода. Существует четыре типа самостоятельного газового разряда: тлеющий разряд, искровой разряд, дуговой разряд и коронный разряд.

• **Тлеющий разряд** – наблюдается в виде светящейся полосы между анодом и катодом внутри стеклянной трубки при низком давлении. Этот разряд широко используется в рекламных трубках в качестве источника света. В зависимости от вида инертного газа в трубке можно получить свечение различных цветов (рис. 3.17).

• **Искровой разряд** – возникает при высоком напряжении между электродами в воздухе и наблюдается в виде тонких зигзагообразных светящихся каналов. Примером такого разряда является вспышка молнии или искра, возникающая при снятии синтетической одежды.

*Молния – это кратковременное свечение в виде изломанной линии, возникающее при электрическом разряде между облаком и землей, между двумя облаками или внутри облака. Свет молнии яркий и ослепительный, распространяется по изогнутым*

?

Как происходит самостоятельный газовый разряд?

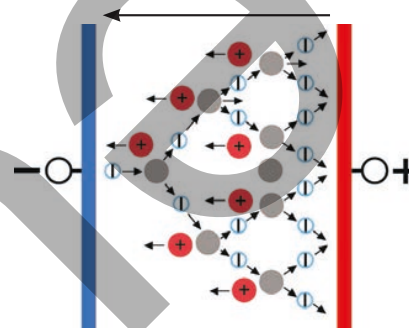


Рисунок 3.16



Рисунок 3.17

?

Как возникает молния?

линиям на несколько километров, разветвляясь на множество ветвей, которые и называются молнией. В результате интенсивных восходящих потоков воздуха внутри облака происходит электризация капель воды при их столкновении и разрушении. Положительные ионы собираются в верхней части облака, а отрицательные — в нижней. Между наэлектризованными частями образуется сильное электрическое поле. Когда напряжение между положительно заряженной частью одного облака и отрицательно заряженной частью другого облака (или между облаком и заряженными телами на поверхности Земли) достигает определенного уровня, происходит электрический пробой воздуха (мгновенное прохождение электрического тока). В это время отрицательные заряды из облака устремляются к Земле, а положительные заряды с Земли — в облако; происходит газовый разряд. При этом стремительном движении зарядов наблюдается сильное свечение и слышен мощный раскат грома. Гром возникает в результате взрывообразного расширения мгновенно нагретого воздуха (рис. 3.18). В канале разряда температура может достигать 20 000 °С, сила тока — до 500 000 А, а напряжение - 10<sup>9</sup> В.

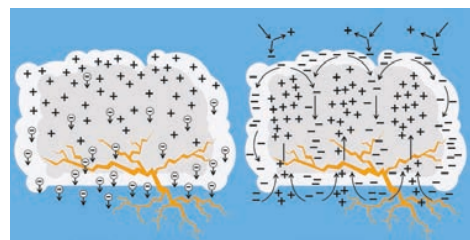


Рисунок 3.18

•ПОДУМАЙ  
•ОБСУДИ  
•ПОДЕЛИСЬ

Согласно современным научным представлениям, начальная ионизация атмосферы также происходит под воздействием высокоэнергетического космического излучения.

**Вопрос.** Какую роль играют космические частицы в возникновении самостоятельного разряда в атмосфере? Как бы вы объяснили этот процесс?

• **Дуговой разряд** – возникает когда два угольных электрода, подключенных к источнику тока, приводятся в контакт друг с другом, а затем разъединяются, между ними наблюдается очень яркое, непрерывное дугообразное свечение (рис. 3.19). В этом разряде сила тока достигает очень больших значений. Причиной поддержания дугового разряда является интенсивная ионизация воздуха между катодом и анодом, вызванных их нагревом до высокой температуры. Дуговой разряд используется при электросварке и в мощных кинопроекторах.

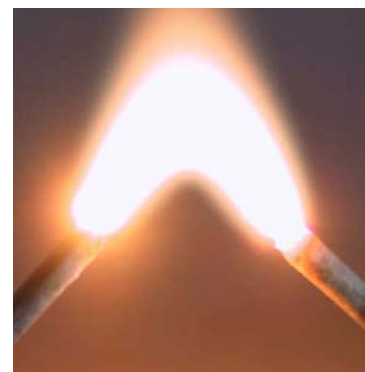


Рисунок 3.19

• **Коронный разряд** – это ионизация, вызванная ударом электронов, ускоренных сильным электрическим полем, создаваемым вокруг заряженных проводов с острыми концами. Ионизация воздуха наблюдается в виде светящейся короны на концах этих проводов. Коронный разряд часто можно наблюдать на металлических наконечниках вблизи высоковольтных линий (рис. 3.20).

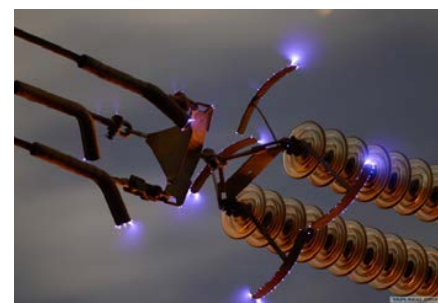


Рисунок 3.20

**Плазма.** Частично или полностью ионизированный газ называется *плазмой*. В целом плазма является электрически нейтральным газом, поскольку количество положительных и отрицательных зарядов в ней практически одинаково. Плазма бывает низкотемпературной и высокотемпературной. Она обладает высокой электропроводностью и по этому свойству близка к сверхпроводникам. Плазма широко распространена во Вселенной: атмосфера Солнца и других звезд также состоит из высокотемпературной плазмы (рис. 3.21).

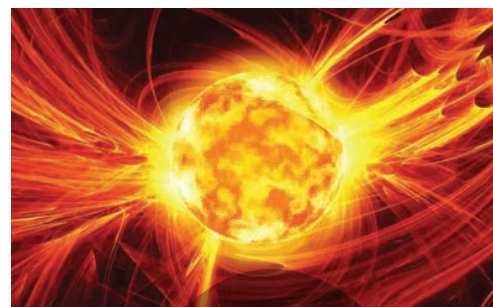


Рисунок 3.21

### Примените полученные знания

**Задача.** Как перевести несамостоятельный газовый разряд в самостоятельный?

### Проверьте свои знания

1. В газах существует два типа разрядов: самостоятельный и несамостоятельный газовый разряд.

**Вопрос 1.** В чем разница между механизмами возникновения самостоятельного и несамостоятельного газового разряда?

**Вопрос 2.** Какие частицы являются носителями заряда при самостоятельном и несамостоятельном газовом разряде соответственно?

2. Существуют различные виды самостоятельного газового разряда.

**Вопрос 1.** Какие это виды?

**Вопрос 2.** Какой вид самостоятельного газового разряда может возникать при атмосферном давлении?

**Вопрос 3.** Какой вид самостоятельного газового разряда возникает в разреженных газах?

**Вопрос 4.** Какие частицы являются носителями заряда в плазме?

### ПРОЕКТ

Напишите эссе на тему "Плазменный шарик и физический механизм его принципа работы"

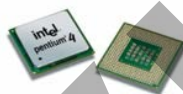
## 3.3. Полупроводники

Все используемые нами цифровые устройства – мобильные телефоны, компьютеры, датчики, солнечные батареи и «умные» бытовые приборы – основаны на особых электрических свойствах полупроводниковых материалов.

Главная особенность полупроводников заключается в том, что они хорошо проводят электрический ток при определенных условиях и практически не проводят его при других. Благодаря этому уникальному свойству создаются транзисторы, диоды, светодиоды (LED) и другие электронные компоненты. Компактность, высокое быстродействие и низкое энергопотребление современной электроники стали возможными благодаря применению полупроводников. Поэтому сегодня полупроводники – это не только предмет изучения физики, но и основа информационных технологий, медицинского оборудования, энергетических систем, систем искусственного интеллекта и космической техники.



Плата смартфона



Компьютерный процессор

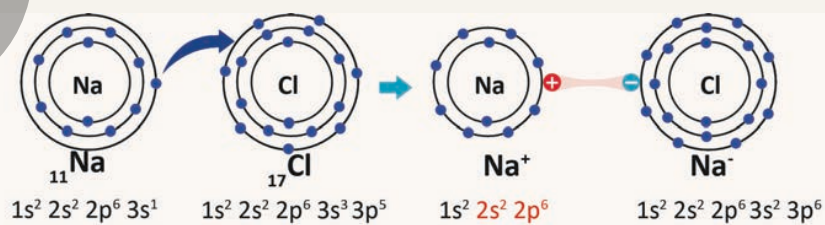


Вычислительный модуль систем искусственного интеллекта

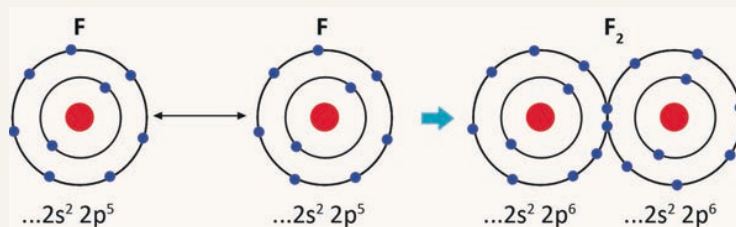
### 3.3.1. Собственная проводимость полупроводников

**НАПОМИНАНИЕ:** *Химия 8. Учебник. Химическая связь*

В химических соединениях простые вещества атомы, ионы и молекулы связаны друг с другом различными способами. Эти связи между частицами обусловлены действием электростатических сил.



Ионная связь между ионами  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$



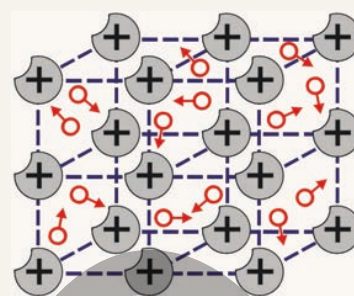
Ковалентная связь между двумя атомами фтора

• Силы электростатического взаимодействия, связывающие атомы и ионы, образуют химические связи. Существуют ионные, ковалентные и металлические связи.

• **Ионная связь** – это химическая связь, возникающая между разноименно заряженными ионами в результате их электростатического притяжения.

• **Ковалентная связь** – это связь, образующаяся между атомами неметаллов за счет образования общих электронных пар.

• **Металлическая связь** – это связь, возникающая между положительными ионами металла и делокализованными (свободными) электронами.



Металлическая связь

Вы уже знаете, что электрическая проводимость как проводников (например, металлов), так и диэлектриков (например, газов) может изменяться под действием внешних факторов. Например, при нагревании удельное сопротивление металлов увеличивается, а их проводимость уменьшается. Газы, являющиеся диэлектриками, становятся проводниками под действием высокой температуры или сильного излучения.

Однако существуют вещества, удельное сопротивление которых чрезвычайно чувствительно к внешним воздействиям. При нагревании, интенсивном освещении или введении в их состав небольшого количества атомов примесей можно добиться резкого уменьшения удельного сопротивления этих веществ и, следовательно, резкого увеличения их проводимости. Это свойство позволяет управлять сопротивлением кристаллов, что является основой работы современных электронных устройств.

• **Что происходит во внутренней структуре этих веществ, почему в результате внешних воздействий их удельное сопротивление резко уменьшается, а проводимость резко увеличивается?**

#### Ключевые слова

полупроводник, ковалентная связь, электронная проводимость, дырочная проводимость, собственная проводимость

#### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**Определите химические элементы, которые можно отнести к полупроводникам.**

**Принадлежности:** таблица «Периодическая система химических элементов».

#### Ход работы

1. Определите химические элементы, которые можно отнести к полупроводникам, используя таблицу «Периодическая система химических элементов», и выпишите их символы на рабочий лист.
2. На основе знаний, полученных из курса «Химия», запишите рядом с каждым из этих элементов их основные химические свойства.
3. Исследуйте, какие химические связи существуют между атомами этих элементов (см.: Химия 8. Учебник. Химические связи. Ковалентные связи).

#### Обсудите:

- **Какие химические элементы можно отнести к полупроводникам? Выдвиньте гипотезу.**
- **Какой тип химической связи определяет свойства выявленных вами химических элементов?**

К полупроводникам относятся:

- 12 элементов средних групп (в основном групп IV, V и VI) периодической системы химических элементов (обозначены фиолетовым цветом в таблице) (см.: Рисунок 3.22);
- Различные соединения элементов групп II и IV, III и V, III и VI;
- множество органических и неорганических химических соединений.

Как и у элементов средней группы, так и у полупроводников, связь валентных электронов с ядром сильнее, чем у металлов, но слабее, чем у диэлектриков. Свойства полупроводников определяются наличием ковалентных (или парноэлектронных) химических связей.

Рассмотрим в качестве примера кристалл кремния.

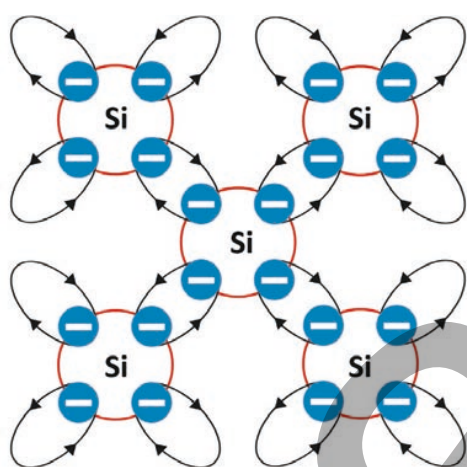


Рисунок 3.23. Ковалентная связь в кристалле кремния (Si)

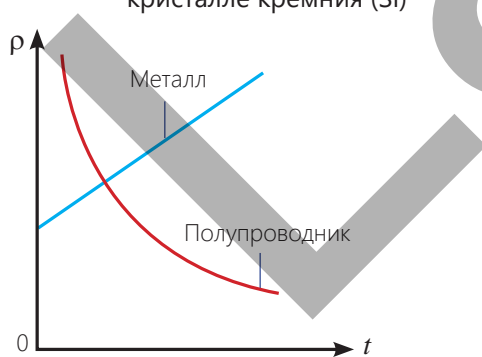


Рисунок 3.24. График зависимости удельного сопротивления от температуры

Период	ГРУППЫ				
	III	IV	V	VI	VII
1					
2	B	C	N	O	F
3	Al	Si	P	S	Cl
4	Ga	Ge	As	Se	Br
5	In	Sn	Sb	Te	I
6	Tl	Pb	Bi	Po	At

Рисунок 3.22. Полупроводниковые элементы

Кремний – элемент IV группы. Его атом имеет 4 валентных



Как образуется ковалентная связь?

электрона на внешней электронной оболочке. Четыре валентных электрона каждого атома кремния (Si) образуют ковалентную связь с валентными электронами четырех соседних атомов, достраивая орбиту до 8 электронов и образуя кристаллическую решетку. В этом случае валентные электроны каждого атома кристаллической решетки образуют общую орбиту (с двумя электронами на каждой орбите) с валентными электронами соседних атомов.

• *Общие электроны соединяют атомы в кристаллической решетке друг с другом, образуя между ними ковалентную или парноэлектронную связь (рис. 3.23).*

### Природа собственной электропроводности полупроводников

• *Полупроводник – это вещество, количество свободных носителей заряда, в котором зависит от внешних воздействий (температуры, освещения, добавления примесей и т.д.).*

*Если полупроводник чистый (не содержит посторонних веществ), его проводимость называется собственной проводимостью.*

*В полупроводниках существует два типа проводимости: электронная проводимость и дырочная проводимость.*

• **Электронная проводимость** – это электрическая проводимость, обусловленная движением свободных электронов в полупроводнике.

В нормальных условиях (например, при комнатной температуре) электрическое сопротивление полупроводника выше, чем у металлов, поскольку количество свободных электронов в нем меньше, чем в металлах. Когда такой полупроводник подключается к электрической цепи, свободные электроны в нем упорядоченно движутся в кристаллической решетке, создавая слабую электронную проводимость. Наилучшая электронная проводимость присуща металлам.

• **Дырочная проводимость** – это электрическая проводимость, обусловленная движением дырок в полупроводнике. Когда полупроводник подвергается внешнему воздействию, например, нагреванию, некоторые из его валентных электронов приобретают большую кинетическую энергию. В результате в полупроводниковом кристалле одновременно происходят два процесса:

1. **Валентные электроны разрывают ковалентные связи за счет полученной энергии и покидают атомы.** В результате количество свободных электронов в кристалле резко возрастает, а сопротивление полупроводника резко уменьшается. На рисунке 3.24 показана зависимость удельного сопротивления полупроводника и металла от температуры.
2. **Когда валентный электрон покидает атом, в ковалентной связи образуется свободное место, называемое "дыркой".** Другой валентный электрон, разорвавший ковалентную связь соседнего атома, может занять это свободное место – первичная связь восстанавливается. Однако на прежнем месте эти электроны создают новое вакантное место, называемое «дыркой». Если освободившееся место занимает валентный электрон одного из соседних атомов, то в том же месте образуется новая «дырка». Таким образом, такие последовательные скачки валентных электронов, замещающих друг друга, также перемещают созданные ими "дырки" по всему кристаллу. Когда полупроводниковый кристалл подключается к источнику постоянного напряжения, освободившиеся валентные электроны движутся в направлении, противоположном вектору напряженности поля, а положительно заряженные дырки — в направлении вектора напряженности поля, создавая электрический ток (рис. 3.25). Таким образом, в полупроводнике возникает собственная электрическая проводимость.

• **Собственная электрическая проводимость чистых полупроводников обусловлена наличием в них равного количества свободных электронов и дырок.**

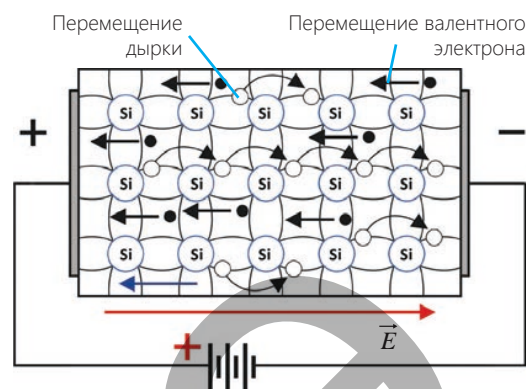


Рисунок 3.25. Собственная проводимость

• ПОДУМАЙ  
• ОБСУДИ  
• ПОДЕЛИСЬ

Чистый полупроводниковый кремний охлаждают от  $+25^{\circ}\text{C}$  до  $-5^{\circ}\text{C}$ .

**Вопрос.** Как изменится количество носителей электрического заряда в полупроводнике: увеличится, уменьшится или останется неизменным? Обоснуйте свой ответ.

### Примените полученные знания

Укажите соответствие стрелками.

№	Предположение	Заключение выражения
1	Носители заряда в полупроводниках...	увеличивается с уменьшением температуры
2	Удельное сопротивление металлов...	увеличивается с повышением температуры
3	Удельное сопротивление полупроводников...	увеличивается под действием сильного излучения
4	Проводимость газов...	только свободные электроны
5	Носители заряда в металлах...	электроны и дырки
6	Носители заряда в газах...	электроны и ионы

### Проверьте полученные знания

1. Невозможно представить нашу современную жизнь без полупроводников.

**Вопрос 1.** Приведите два примера в подтверждение этого утверждения.

**Вопрос 2.** Элементы каких групп периодической системы являются чистыми полупроводниками?

**Вопрос 3.** В чем основное различие между полупроводниками, металлами и диэлектриками?

**Вопрос 4.** Атомы полупроводника образуют ковалентные химические связи. Каков механизм образования ковалентных связей?

**Вопрос 5.** Какие частицы обеспечивают электропроводность в полупроводниках? Объясните механизм их образования.

**Вопрос 6.** Почему сопротивление чистого полупроводника уменьшается с повышением тогда как у металлов оно увеличивается?

2. Тонкая германиевая пластина, закреплённая на деревянной подставке, подключена к цепи постоянного тока (рис. 3.26). Пластина закрыта светонепроницаемой крышкой.

**Вопрос 1.** Если ключ замкнут, будет ли протекать ток в цепи?

**Вопрос 2.** Если снять крышку, как изменится сила тока в цепи? Объясните причину этого явления.

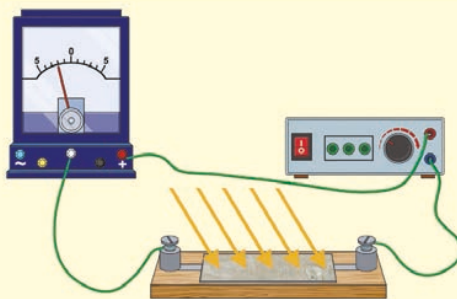


Рисунок 3.26

## 3.3.2. Примесная проводимость полупроводников

Одно из необычных свойств полупроводников заключается в том, что если даже небольшое количество атомов другой группы полупроводниковых элементов добавить в чистый полупроводниковый кристалл в качестве примеси, его проводимость может увеличиться в сотни раз. Например, чистый кристалл кремния (Si), который является элементом IV группы, очень плохо проводит электрический ток при низких температурах.

Однако, если добавить в него в качестве примеси даже небольшое количество атомов бора (B), относящегося к III группе, проводимость полученного примесного полупроводника увеличится в сотни раз при той же температуре.

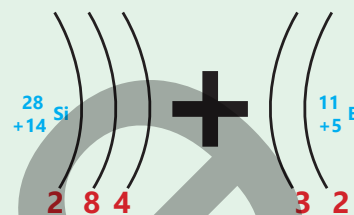


Рисунок 3.27

- Почему проводимость смеси увеличивается во много раз, если в кристалл кремния (Si) добавить атомы элемента III группы бора (B)?
- Какие носители заряда вызывают такое увеличение электропроводности полупроводника?

Ключевые слова

примесная проводимость, донорная примесь, акцепторная примесь

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**От чего зависит соотношение количества носителей заряда в примесных полупроводниках?**

**Принадлежности:** Схемы ковалентных связей кремний-фосфор (Si-P) и кремний-бор (Si-B).

**Ход работы**

1. Элемент V группы, фосфор (P), добавляется в качестве примеси к чистому полупроводниковому кристаллу кремния (Si – элемент IV группы).

Исследуйте изменение строения кристалла на основе схемы, приведённой на рисунке 3.28.

2. Элемент III группы, бор (B), добавляется в качестве примеси к чистому полупроводниковому кристаллу кремния (Si).

Исследуйте изменение строения кристалла на основе схемы, приведённой на рисунке 3.29.

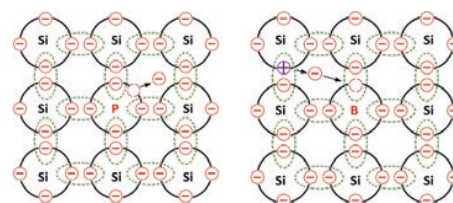


Рисунок 3.28

Рисунок 3.29

**Обсудите**

- Сколько валентных электронов имеет элемент V группы фосфор (P)?
- Если фосфор (P) добавить в качестве примеси в кристалл кремния (Si), увеличится ли количество свободных носителей заряда в кристалле? Почему?
- Сколько валентных электронов имеет элемент III группы бор (B)?
- Как изменится количество свободных носителей заряда в кристалле, если в кристалл кремния (Si) добавить в качестве примеси бор (B)?

При добавлении небольшого количества примеси к чистому полупроводнику его проводимость резко возрастает. Это происходит потому, что, кроме собственной проводимости, в полупроводниках также возникает примесная проводимость.

- Если число валентных электронов атома примеси больше, чем число валентных электронов атома полупроводника, такая примесь называется донорной («донор» – латинское слово, означающее «даю»).
- Если число валентных электронов атома примеси меньше, чем число валентных электронов атома полупроводника, такая примесь называется акцепторной («акцептор» – латинское слово, означающее «принимаю»).

### Полупроводник с донорной примесью

Донорные примеси обеспечивают полупроводниковый кристалл дополнительным электроном, который легко освобождается, увеличивая количество свободных электронов в полупроводнике.

Например, когда фосфор (P), пятивалентный элемент, добавляется в кристалл кремния в качестве примеси, его четыре валентных электрона образуют ковалентные связи с соседними атомами кремния. Пятый электрон фосфора не участвует в ковалентной связи и слабо связан со своим собственным атомом.

Однако, поскольку он слабо связан с атомом, он легко покидает его и становится свободным (см. рис. 3.27). В этом случае "дырка" не образуется, поскольку, ставший свободным, электрон не покинул ковалентную связь.

Если некоторые атомы в кристалле кремния заменить атомом фосфора, каждый из атомов примеси отдаст один электрон из-за теплового движения в решетке.

При внешнем воздействии к этим электронам, добавляются другие электроны, отрывающиеся от ковалентной связи, и при этом образуются положительно заряженные дырки. Когда в полупроводниковом кристалле с такой примесью создается электрическое поле, в нём возникает электрический ток. Однако основными носителями заряда в возникшем токе являются электроны, которых много, а неосновными носителями заряда являются положительно заряженные дырки, которых относительно мало.

Таким образом, полупроводник с донорной примесью – это полупроводник, в котором основными носителями заряда являются преимущественно свободные электроны. Следовательно, в полупроводниках с донорной примесью основными носителями заряда являются электроны, а неосновными носителями заряда – дырки. Поскольку проводимость в полупроводниках с донорной примесью осуществляется в основном за счет электронов, их называют полупроводниками n-типа (n – первая буква латинского слова «отрицательный»).

### Полупроводник с акцепторной примесью

Акцепторные примеси обеспечивают полупроводниковый кристалл дополнительными дырками, то есть, присоединяя к себе валентный электрон, они увеличивают число дырок в полупроводнике. Например, когда в кристалл кремния в качестве примеси добавляется трехвалентный бор (B), его три валентных электрона образуют только три пары электронных связей с соседними атомами кремния. Поскольку для образования четвертой пары связей не хватает одного электрона, на этом месте остается дырка, то есть незавершенная ковалентная связь. Её может занять валентный электрон от соседнего атома кремния. В этом случае связь восстанавливается за счет электрона, отданного соседним атомом.



В соседнем атоме, отдавшем свой электрон, образуется дырка (см.: рис. 3.28). Трехвалентная примесь создает дополнительную дырку в кристалле, захватывая электрон у атома кремния. В результате количество дырок превышает количество электронов. Следовательно, в полупроводниках с акцепторной примесью основными носителями заряда являются дырки, а неосновными носителями заряда – электроны. Таким образом, *полупроводник с акцепторной примесью – это полупроводник, в котором основными носителями заряда являются преимущественно "дырки". Поскольку проводимость в полупроводниках с акцепторной примесью осуществляется в основном за счет "дырок", их называют полупроводниками p-типа (p – первая буква латинского слова «положительный»).*



•ПОДУМАЙ  
•ОБСУДИ  
•ПОДЕЛИСЬ

Когда в чистый кристалл кремния добавляется очень небольшое количество донорной примеси, количество свободных электронов увеличивается, а значит, растет и проводимость. Однако при значительном увеличении концентрации примеси, после определенного момента, проводимость снова начинает уменьшаться.

-Почему это происходит? При дальнейшем росте содержания примеси количество электронов продолжает расти. Так почему же проводимость сначала увеличивается, а затем уменьшается?

### Примените полученные знания.

**Задача 1 (образец).** Концентрация атомов фосфора, добавленных в качестве примеси (донорной примеси) к чистому кремниевому полупроводнику, равна  $n_{\text{Донор}} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Температура такова, что все доноры (100%) ионизированы.

**Вопрос.** Насколько увеличится концентрация свободных электронов в полупроводнике с донорной примесью?

**Решение.** Поскольку атомы донорной примеси полностью ионизированы, концентрация электронов ( $n_e$ ) увеличится на концентрацию атомов примеси ( $n_{\text{Донор}}$ ), т.е.:  $\Delta n_e \approx n_{\text{Донор}}$ . Следовательно:  $\Delta n_e = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

**Ответ.** Концентрация свободных электронов увеличилась на величину концентрации атомов донорной примеси, т.е.:  $\Delta n_e = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

**Задача 2.** Концентрация атомов бора, добавленных в качестве примеси (акцепторной примеси) к чистому кремниевому полупроводнику, равна  $n_{\text{Акцептор}} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Температура такова, что 90% (0,9) акцепторов ионизированы.

**Вопрос.** Насколько увеличится концентрация образующихся дырок?

### Проверьте полученные знания

1. Атомы какой группы элементов необходимо добавить в качестве примесей в чистый полупроводниковый кристалл, чтобы его основными носителями заряда стали электроны? Обоснуйте свой ответ.

2. Атомы какой группы элементов необходимо добавить в качестве примесей в чистый полупроводниковый кристалл, чтобы его основными носителями заряда стали дырки? Обоснуйте свой ответ.

3. Концентрация атомов галлия (Ga) добавленных в качестве примеси (акцепторной примеси) в чистый полупроводник Ge, равна  $n_{\text{Акцептор}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Температура такова, что 70% (0,7) акцепторов ионизированы.

**Вопрос 1.** Какие заряды являются основными носителями заряда в этом примесном полупроводнике?

**Вопрос 2.** Чему равна концентрация дырок, образующихся в примесном полупроводнике?

### 3.3.3. $p$ – $n$ переход в полупроводниковом кристалле. Полупроводниковый диод

При соприкосновении концов двух медных проводов в месте контакта практически ничего не происходит. Однако, когда между полупроводниковыми кристаллами  $p$ -типа и  $n$ -типа создаётся контакт особым образом, на границе их соприкосновения спонтанно возникают необычные явления. К ним относятся диффузия и рекомбинация носителей заряда, образование особого переходного слоя, односторонняя проводимость и т. д. Принцип работы современных «умных» электронных устройств основан на этих явлениях, происходящих при контакте полупроводниковых кристаллов  $p$ -типа и  $n$ -типа.



- В течение какого промежутка времени происходят эти явления при контакте кристаллов  $p$ -типа и  $n$ -типа?

Ключевые слова

$p$ -кристалл,  $n$ -кристалл,  $p$ - $n$  переход, полупроводниковый диод

- Какова физическая основа уникальных свойств контакта кристаллов  $p$ -типа и  $n$ -типа?

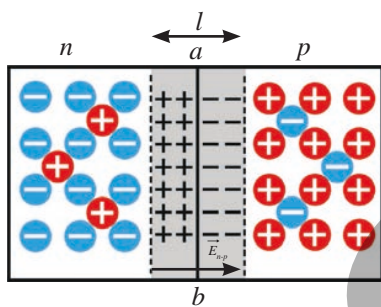


Рисунок 3.30.  $p$ - $n$  переход

#### $p$ - $n$ -переход (электронно-дырочный переход) в полупроводниковом кристалле.

В области контакта полупроводниковых кристаллов  $p$ -типа и  $n$ -типа образуется  $p$ - $n$ -переход. При этом электроны из  $n$ -типа и дырки из  $p$ -типа кристаллов диффундируют через границу контакта навстречу друг другу. В результате в  $n$ -части вблизи границы образуется избыток положительных зарядов (неподвижных ионов с недостатком электронов), а в  $p$ -части — отрицательных зарядов (неподвижных ионов, захвативших электроны). Таким образом, в области контакта кристаллов  $p$ -типа и  $n$ -типа образуется двойной слой разноимённых зарядов толщиной  $l$  —  $p$ - $n$ -перехода (рис. 3.30). Внутреннее электрическое поле между зарядами этого слоя ( $\vec{E}_{n-p}$ ) предотвращает последующий переход электронов из  $n$ -части в  $p$ -часть и дырок из  $p$ -части в  $n$ -часть на границе  $ab$  контакта кристаллов. Следовательно, при подключении кристалла с  $p$ - $n$ -переходом к цепи постоянного тока он будет пропускать ток преимущественно в одном направлении.

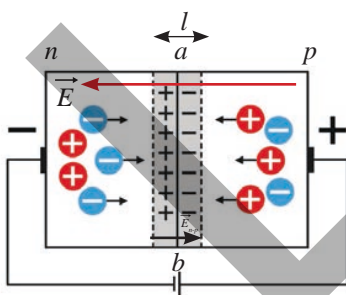


Рисунок 3.31. Прямой переход

#### Прямой переход

Предположим, что  $n$ -кристалл подключен к отрицательному полюсу источника тока, а  $p$ -кристалл — к положительному полюсу. В этом случае под действием внешнего электрического поля, создаваемого источником тока, электроны из  $n$ -кристалла будут перемещаться в сторону  $p$ -кристалла, а дырки из  $p$ -кристалла — в сторону  $n$ -кристалла. Электроны, пересекающие границу



контакта, «заполняют» дырки, уменьшая толщину границы  $a-b$  и, следовательно, общее электрическое сопротивление кристалла. Электрический ток в цепи осуществляется основными носителями заряда, то есть электронами в  $n$ -части и дырками в  $p$ -части. Это обеспечивает свободное прохождение электрического тока через цепь (рис. 3.31). Таким образом, в  $n$ -тип переходе возникнет прямой переход тока.

**Обратный переход**

Предположим, что  $n$ -кристалл подключен к положительному полюсу источника тока, а  $p$ -кристалл — к отрицательному полюсу. В этом случае вектор напряжённости внешнего электрического поля, создаваемого источником тока, будет совпадать с вектором напряжённости электрического поля двойного слоя. Под воздействием внешнего электрического поля электроны из  $n$ -кристалл и дырки из  $p$ -кристалла будут двигаться в противоположных направлениях, от границы соприкосновения  $ab$  к противоположным концам кристалла. В результате толщина двойного слоя  $l$  и, следовательно, общее электрическое сопротивление кристалла возрастают. Электрический ток в цепи создаётся неосновными носителями заряда, то есть дырками в  $n$ -части и электронами в  $p$ -части. Это приводит к резкому уменьшению электрического тока в цепи. В ней сила тока практически равна нулю ( $I \approx 0$ ) (рис. 3.32), то есть  $p$ - $n$ -переход будет заперт для протекания тока.

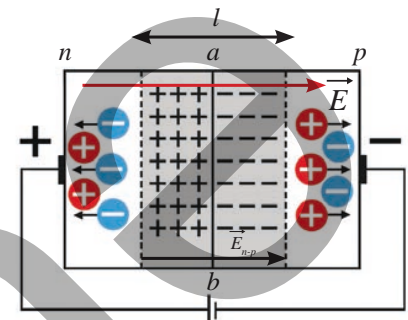


Рисунок 3.32. Обратный переход

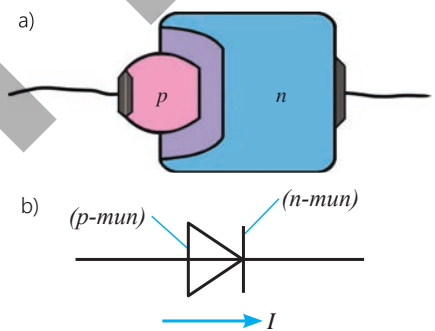


Рисунок 3.33. Полупроводниковый диод

**Полупроводниковый диод**

Полупроводниковый диод — это устройство, состоящее из  $p$ - $n$ -перехода, образованного на контакте  $p$ - и  $n$ -кристаллов, и двух контактов для подключения к электрической цепи (рис. 3.33, а). Полупроводниковый диод изготавливается из чистого кристалла германия или кристалла кремния. Каплю индия припаивают к поверхности кристалла. Благодаря диффузии атомов индия в основной кристалл, в этой части образуется область с проводимостью  $p$ -типа.  $p$ - $n$ -переход образуется на границе  $n$ - и  $p$ -областей кристалла. Контакт, припаянный кристаллу индия, играет роль анода, а контакт, соединённый с основным кристаллом кремния (или германия), играет роль катода. Полупроводниковый диод пропускает электрический ток только в одном направлении. На схемах электрических цепей его обозначают специальным символом (рис. 3.33, b).

- ПОДУМАЙ
- ОБСУДИ
- ПОДЕЛИСЬ

Если заряды находят друг друга и рекомбинируют на  $p$ - $n$ -переходе, почему этот переход остается стабильным в течение длительного времени?

### Примените полученные знания

#### Эксперимент с полупроводниковым диодом

**Принадлежности:** источник постоянного тока (4 В), амперметр, полупроводниковый диод (из набора приборов «Электрический ток в полупроводниках»), ключ, соединительные провода.

#### Ход работы

1. Подключите выводы полупроводникового диода к электрической цепи, замкните ключ и проверьте, протекает ли ток по цепи (рис. 3.34).
2. Поменяйте местами провода, подключенные к зажимам диода, и наблюдайте за происходящими изменениями.

#### Обсудите:

- В каком случае полупроводниковый диод проводит электрический ток?
- Какой вывод вы сделали из исследования?
- Обладает ли полупроводниковый диод собственной или примесной проводимостью?

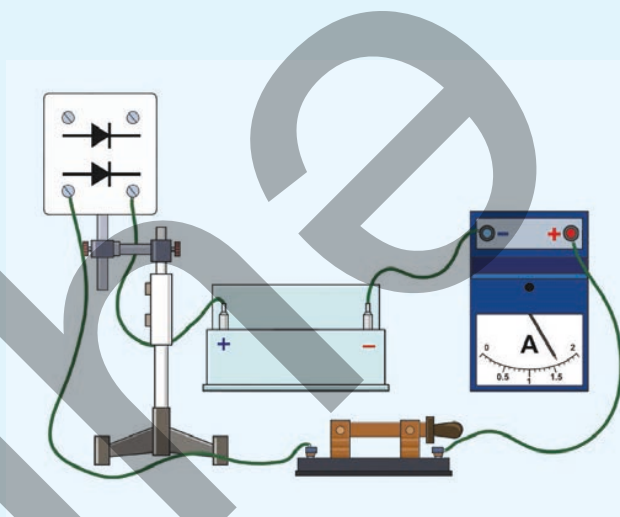


Рисунок 3.34

### Проверьте полученные знания

1.  $p-n$ -переход образуется на контакте полупроводников  $p$ -типа и  $n$ -типа.

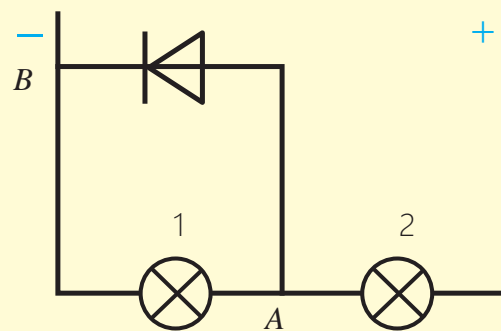
**Вопрос 1.** Какую роль играет двойной электрический слой, образующийся на границе раздела полупроводниковых кристаллов?

**Вопрос 2.** При каких условиях в  $p-n$  переходе возникают прямой и обратный токи?

**Вопрос 3.** Как называется устройство, в котором используется  $p-n$ -переход?

2. На рисунке изображена схема, состоящая из полупроводникового диода и двух ламп.

**Вопрос.** Какая лампа будет светиться ярче (или совсем не будет светиться)? Обоснуйте свой ответ.



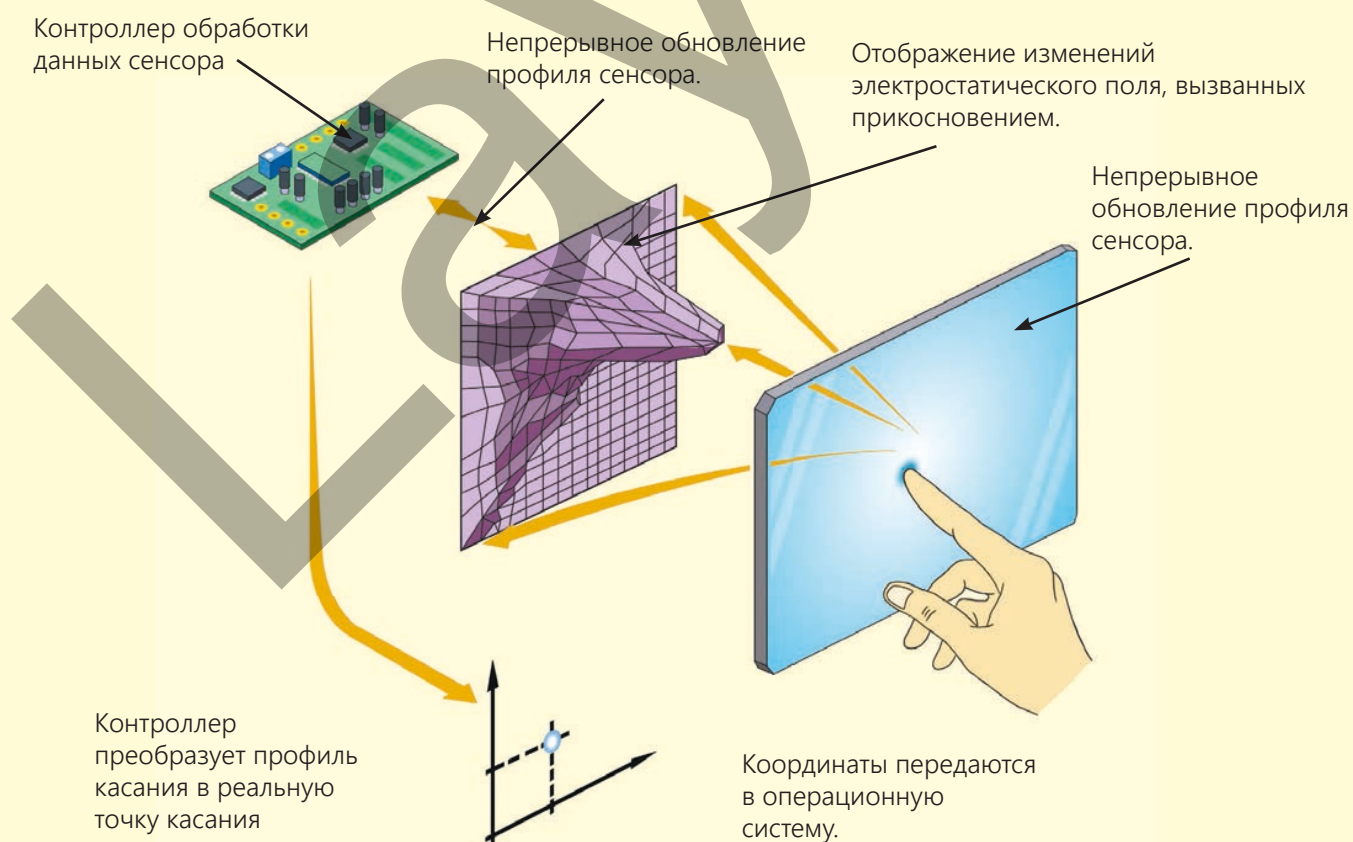
# Наука, технология, жизнь

## Секрет сенсорных экранов

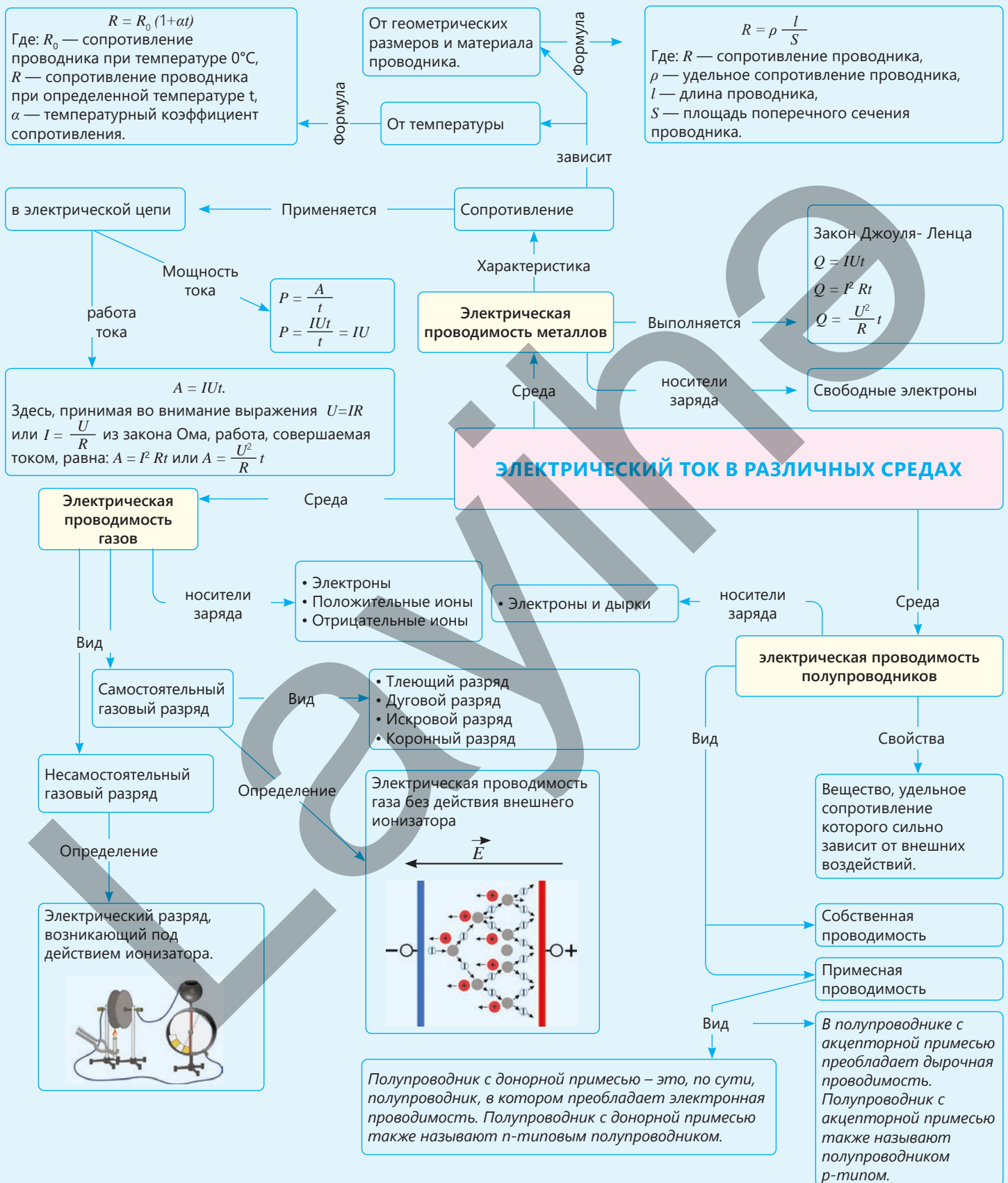
Экраны современных смартфонов, ноутбуков и банкоматов — это емкостные (капацитивные) сенсорные экраны. Этот тип дисплея распознает прикосновения, используя электрические свойства человеческого тела. Он реагирует на изменения электрического поля, создаваемые пальцем или проводящим предметом.

## Конструкция

Основой экрана является стеклянная подложка. На эту подложку наносится прозрачный проводящий слой. Наиболее часто используемый материал — это полупроводник оксид индия-олова (на английском языке: *Indium Tin Oxide - ITO*, полупроводниковый материал, состоящий в основном из оксида индия (III) ( $In_2O_3$ ) и оксида олова (IV)). Он проводит электрический ток и практически полностью прозрачен для видимого света. На этом проводящем слое находится матрица из очень маленьких микроэлектродов. Матрица измеряет емкостные (капацитивные) изменения в разных точках экрана и регистрирует небольшие изменения емкости каждого электрода. Изменения передаются в контроллер в виде электрических сигналов. Контроллер анализирует эти изменения и вычисляет точные координаты касания. Результаты передаются в микросхему управления экраном, которая определяет местоположение касания и соответствующую команду (например, выбор значка, его перемещение и т. д.). Весь этот процесс происходит со скоростью распространения электромагнитных волн, т.е.  $\approx 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ .



# Обобщение

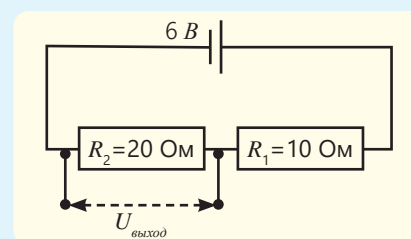


# Обобщающие задания

**1. На рисунке показаны два последовательно соединённых резистора и напряжение на входе.**

**Вопрос 1.** Чему равно выходное напряжение?

**Вопрос 2.** Если резистор  $R_2$  заменить другим резистором с сопротивлением 5 Ом, как изменится напряжение на выходе?



**2. К концам длинного однородного проводника приложено напряжение  $U$ . Проводник заменяется таким же проводником, но вдвое большей длины, и к его концам вновь приложили напряжение  $U$ .**

**Вопрос.** Как в результате этого изменятся следующие физические величины:

- сила тока в проводнике;
- сопротивление проводника;
- мощность, выделяемая в проводнике?

Определите характер изменения каждой величины и запишите её в таблицу.

- 1 – увеличивается,
- 2 – уменьшается,
- 3 – не изменяется.

сила тока в проводнике	сопротивление проводника	мощность, выделяемая в проводнике

**3. В Сабирбаде температура воздуха летом иногда поднимается до  $42^\circ\text{C}$ , а зимой опускается до  $-5^\circ\text{C}$ . Линии электропередачи в сёлах этого района проложены в основном алюминиевыми проводами.** Температурный коэффициент сопротивления алюминиевого провода равен  $\alpha_{\text{Al}} = 0,004 \text{ K}^{-1}$ , а сопротивление при температуре  $20^\circ\text{C}$  равно  $R = 5 \text{ Ом}$ .

**Вопрос 1.** Чему равно сопротивление провода в Омах летом (при температуре  $42^\circ\text{C}$ )?

**Вопрос 2.** Как изменится сопротивление провода зимой (при температуре  $-5^\circ\text{C}$ )?

**Вопрос 3.** Как изменение сопротивления влияет на потери электроэнергии?

**Вопрос 4.** Опираясь на полученные результаты, постройте график зависимости сопротивления алюминиевого провода от температуры.

**4. Электрическая цепь состоит из двух резисторов с сопротивлениями  $R_1 = 40 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 15 \text{ Ом}$ , соединённых параллельно. Напряжение на концах этого участка цепи равно 9 В.**

**Вопрос 1.** Какую работу совершает электрический ток в каждом резисторе за 1 минуту?

**Вопрос 2.** Какое количество теплоты выделится при прохождении тока через эту цепь за 45 минут?

**Вопрос 3.** Если резисторы соединить последовательно, чему станет равна работа, совершаемая током на каждом резисторе за 1 минуту?

**5. В нашей стране цена электроэнергии для населения рассчитывается по различным тарифам за каждый кВт·ч в зависимости от объема потребления:**

- 8,4 гяпика за каждый 1 кВт·ч электроэнергии за первые 200 кВт·ч;
- 10 гяпиков за каждый кВт·ч в диапазоне от 200 до 300 кВт·ч;
- при объеме потребления свыше 300 кВт·ч каждый кВт·ч стоит 15 гяпиков.

**Вопрос 1.** Какую сумму следует заплатить за электроэнергию, потребленную электрическим обогревателем мощностью 2500 Вт при его непрерывной работе в течение одного месяца?

**Вопрос 2.** Если этот обогреватель работает непрерывно в течение всей зимы (4 месяца), какую сумму следует заплатить за потребленную им электроэнергию?

**6. Процесс протекания электрического тока через газ называется газовым разрядом.**

**Существует два вида газовых разрядов – самостоятельный и несамостоятельный газовый разряд.**

**Вопрос 1.** В чем заключается отличие самостоятельного газового разряда от несамостоятельного?

**Вопрос 2.** Какие частицы являются основными носителями заряда при самостоятельном и несамостоятельном газовом разряде?

**Вопрос 3.** К какому типу газового разряда относится молния?

**Вопрос 4.** Какой газовый разряд используется в качестве источника очень сильного тепла и света?

**Вопрос 5.** Какой газовый разряд используется в неоновых вывесках?

**Вопрос 6.** В каких источниках света используется газовый разряд?

**7. Полупроводник – это вещество, удельное сопротивление которого сильно зависит от внешних воздействий. Полупроводники обладают собственной и примесной электрической проводимостью.**

**Вопрос 1.** Какой проводимостью обладает чистый кристалл кремния? Какие частицы являются основными носителями заряда в этом кристалле?

**Вопрос 2.** Какие частицы станут основными носителями заряда в этом кристалле кремния после добавления донорной примеси?

**Вопрос 3.** Какие частицы станут основными носителями заряда в этом кристалле кремния после добавления акцепторной примеси?

**Вопрос 4.** Каким видом проводимости станет обладать кристалл кремния, если добавить в качестве примеси индий, и какие частицы станут основными носителями заряда в этом кристалле?

**8. В современной электронике кристалл арсенида галлия (GaAs) широко используется в качестве полупроводникового материала.**

**Вопрос 1.** Если количество атомов мышьяка и галлия в кристалле одинаково, какой тип проводимости будет иметь такой кристалл?

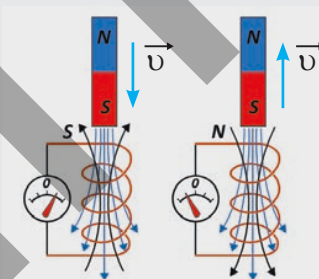
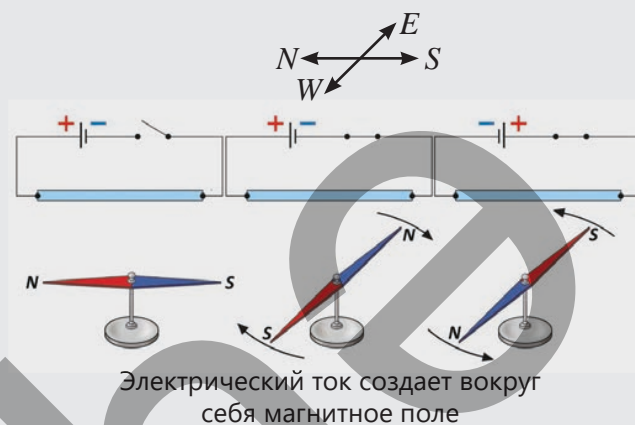
**Вопрос 2.** Как следует изменить соотношение числа атомов этих элементов в кристалле, чтобы получить полупроводник *p-типа*?

**Вопрос 3.** Как следует изменить соотношение числа атомов этих элементов в кристалле, чтобы получить полупроводник *n-типа*?

# Магнитное поле

Любой магнит имеет два полюса – северный и южный. Одноимённые полюса отталкиваются друг от друга, а разноимённые полюса притягиваются друг к другу. Взаимное притяжение и отталкивание полюсов магнитного поля подобно взаимодействию электрических зарядов. В действительности существует общее сходство между математическими формулами, описывающими магнитное, электрическое и гравитационное взаимодействия. Однако сходство магнитных и электрических полей не ограничивается лишь сходством их формул; связь между ними гораздо теснее и носит взаимный характер. Данный раздел посвящен более глубокому изучению этого взаимодействия.

- Какая взаимосвязь существует между электрическим током и магнитным полем?
- Какова силовая характеристика магнитного поля?
- Как можно определить направление линий магнитного поля тока?
- Как на практике применяется взаимодействие магнитного поля и электрического тока?
- Можно сказать, что «электрический ток является источником магнитного поля», а может ли магнитное поле также создавать электрический ток?



## Из раздела вы узнаете

- Свойства магнитного поля легко описать на основе знаний о линиях магнитной индукции.
- Зная механизм возникновения магнитного поля Земли, можно объяснить, какой из его магнитных полюсов расположен вблизи Северного и Южного географических полюсов Земли.
- Символы "x" и "•" используются для условного обозначения направления электрического тока и вектора магнитной индукции, перпендикулярных плоскости чертежа.
- Для определения направления линий магнитного поля прямого и кругового токов удобно использовать «правило правой руки» или «правило буравчика».
- Экспериментально показана практическая значимость электромагнита (на примере принципа работы электрического крана, электродвигателя и электроизмерительных приборов).
- При изменении магнитного поля, пронизывающего замкнутый контур, возникает индукционный ток, который широко используется на практике.

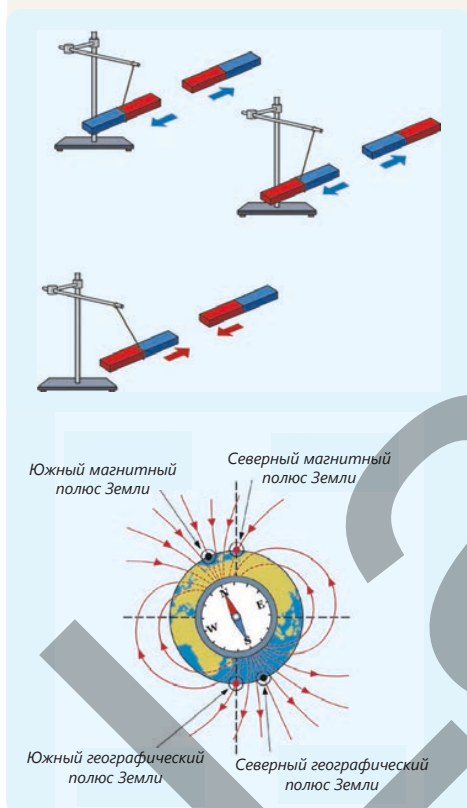
## 4.1. Магнитное поле.

### Магнитное поле электрического тока

Электрический ток, протекающий по электрическим цепям, не только приводит в действие лампы и другие электроприборы, но и изменяет физическое состояние окружающего пространства. Таким образом, электрический ток создает вокруг себя невидимое, но объективно существующее физическое поле – магнитное поле. Это поле воздействует на другие токи, магниты и даже на саму Землю.

#### 4.1.1. Природа магнитного поля.

##### Магнитное поле Земли



**ВСПОМНИТЕ:** *Физика 7. Учебник. Часть II.*

*Постоянный магнит и магнитное поле.*

Магниты, изготовленные из материалов, сохраняющих свои магнитные свойства в течение длительного времени, называются постоянными магнитами. В пространстве вокруг магнитов всегда существует магнитное поле. Те участки магнита, где магнитное действие проявляется наиболее сильно, называются магнитными полюсами. Независимо от своей формы, все магниты имеют два полюса: северный (N – первая буква английского слова «North») и южный (S – первая буква английского слова «South»). Одноимённые полюса взаимодействующих магнитов (S и S, или N и N) отталкиваются друг от друга, в то время как разноимённые полюса (N и S) притягиваются друг к другу. Землю также можно рассматривать как постоянный магнит. Южный полюс её магнитного поля расположен вблизи географического Северного полюса, а северный магнитный полюс – вблизи географического Южного полюса. Как известно, одним из классических экспериментов, сыгравших важную роль в развитии физики, является обнаружение свойства электрического тока создавать магнитное поле (см.: Физика 9. Учебник, Часть I, стр. 59).

Таким образом, в 1820 году датский учёный Х. Эрстед опре-

делил, что ток, проходящий через электрическую цепь, действует на магнитную стрелку, выводя её из равновесия. Когда цепь размыкается, стрелка возвращается в исходное положение. Таким образом, Х. Эрстед обнаружил, что проводник с током создаёт вокруг себя магнитное поле.

- **Может ли электрический ток быть источником магнитного поля?**
- **Существует ли в природе «магнитный заряд», являющийся источником магнитного поля?**

Ключевые слова

магнитосфера, молекулярные токи, компас, пояса Ван-Аллена

### Природа магнитного поля

На основе результатов эксперимента Х. Эрстеда французский физик Андре Ампер выдвинул гипотезу о «круговых молекулярных токах». Согласно этой гипотезе, в природе не существует «магнитного заряда», создающего магнитное поле, а существуют элементарные круговые токи внутри атомов и молекул. Позже было установлено, что элементарные токи возникают в результате движения электронов в атомах по их орбитам. Когда плоскости, в которых циркулируют миллионы элементарных токов, расположены упорядоченно относительно друг друга, создаваемые ими элементарные магнитные поля складываются (усиливают друг друга). В результате вещества приобретают магнитные свойства (рис. 4.1, а), к ним относятся постоянные магниты и предметы из железа, стали и т. д. Когда плоскости элементарных токов расположены неупорядоченно, создаваемые ими элементарные магнитные поля взаимно компенсируют друг друга (рис. 4.1, б). Поэтому такие вещества не обладают магнитными свойствами, например, стекло, резина, дерево, пластик и т. д.

Следует отметить, что относительно выбранной системы отсчёта электрические заряды в состоянии покоя создают вокруг себя только электростатическое поле. Однако, если эти заряды приходят в направленное движение, они создают вокруг себя как электрическое, так и магнитное поле.

*Магнитное поле – это вид материи, создаваемый движущимися электрическими зарядами.*

### Природа магнитного поля Земли

Земля на самом деле является гигантским планетарным «динамо», то есть её магнитное поле создаётся не постоянным магнитом, а конвективными потоками электрических зарядов во внешнем ядре планеты. Механизм этого явления следующий. Внешнее ядро Земли состоит из жидкого расплава железа и никеля. Движение этой жидкости обусловлено тепловыми потоками из внутреннего ядра и мантии, а также вращением Земли. При этом горячий жидкий металл поднимается, а относительно холодный — опускается; так образуются замкнутые конвективные потоки. В результате вращения Земли вокруг своей оси эти конвективные потоки приобретают спиралевидную форму. Такие конвективные циклы жидкого металла создают в них направленное движение свободных носителей заряда, то есть электрический ток. Эти токи, в свою очередь, создают магнитное поле вокруг Земли (рис. 4.2). Этот процесс называется «геодинамо».

Именно благодаря этому механизму планета Земля способна поддерживать своё магнитное поле на протяжении миллионов лет.

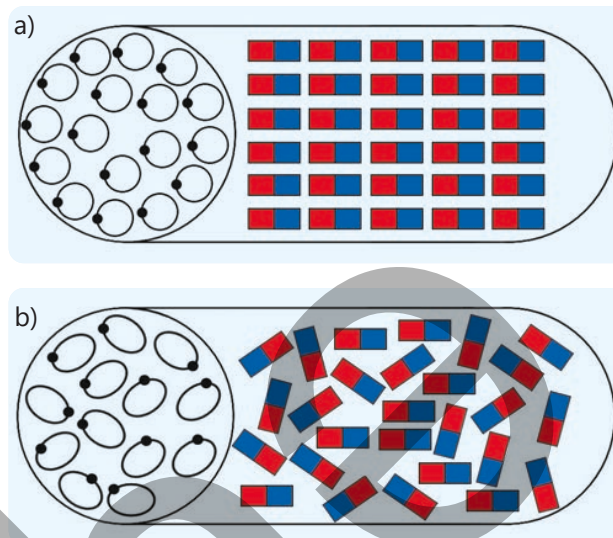


Рисунок 4.1. Элементарные токи

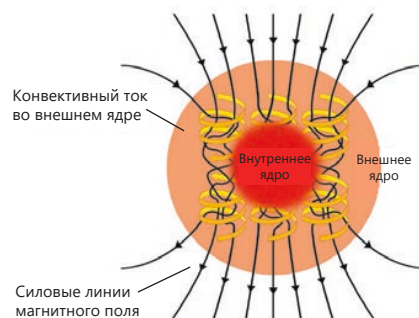


Рисунок 4.2. Конвективные потоки во внешнем ядре Земли создают магнитное поле планеты.

## Магнитосфера

Магнитное поле Земли называется магнитосферой (рис. 4.3, а). Магнитосфера была впервые описана американским астрофизиком Джеймсом Альфредом Ван Алленом и поэтому называется «поясами ван Аллена». «Пояса Ван Аллена», простирающиеся на десятки тысяч километров от поверхности Земли, действуют как «щит», защищающий живые организмы на Земле от разрушительной энергии и вредных космических лучей из космоса и Солнца (рис. 4.3, б).

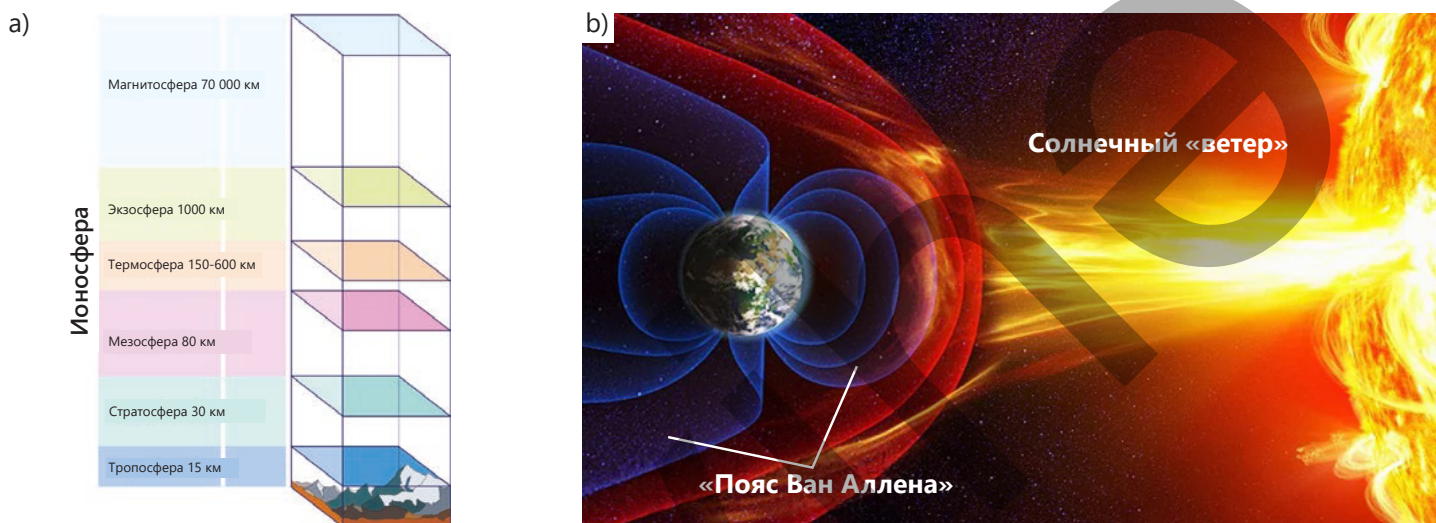


Рисунок 4.3. – Магнитосфера Земли

### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

#### Какой прибор вы смоделировали?

**Принадлежности:** постоянный магнит, игла, стеклянный сосуд с водой, пробка, магнитная стрелка, цветная изолента.

#### Ход работы

1. Намагнитьте иглу, проведя ею в одном направлении 20–25 раз по магниту, и закрепите её на пробке. Поместите пробку с иглой на поверхность воды.
2. Раскрутите пробку с иглой на поверхности воды и отпустите её. После того как пробка остановится, отметьте направление, на которое указывают кончики иглы, приклеив кусочки изоленты к краю сосуда (рис. 4.4). Сравните направление, в котором установилась игла, с направлением магнитной стрелки компаса, лежащего рядом на столе.
3. Повторите эксперимент несколько раз, закручивая пробку, и каждый раз после её остановки сравнивайте направление, которое указывают кончики иглы, с направлением магнитной стрелки.

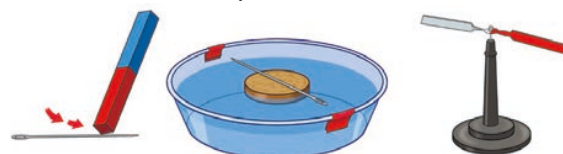


Рисунок 4.4.

#### Обсудите

- После того как пробку прокрутили и отпустили, в каком направлении установились (уравновесились) концы иглы на ее поверхности?
- Что вы заметили при сравнении этого направления с направлением магнитной стрелки?
- Что вы наблюдали при повторении эксперимента?
- Какой вывод вы сделали из эксперимента: какой прибор вы смоделировали?

## Магнитные полюса Земли

Магнитные компасы на Земле всегда указывают на Северный и Южный географические полюса планеты (за исключением областей вблизи самих полюсов Земли и мест залегания железных руд). Это указывает на то, что магнитные полюса Земли также находятся вблизи её Северного и Южного географических полюсов.

•ПОДУМАЙ  
•ОБСУДИ  
•ПОДЕЛИСЬ

Земля обладает как гравитационным, так и магнитным полем.

**Вопрос:** Каковы общие свойства этих физических полей?

Знаете ли Вы?

В VII-VIII веках китайские жрецы заметили, что намагниченный железный стержень, подвешенный на шелковой нити, всегда указывает в направлении Полярной звезды, то есть на северо-запад Земли. Это свойство намагниченного металла привело к изобретению корабельного компаса в XI веке, сначала в Китае, а затем в Аравии.

На картинке изображен такой компас, изготовленный в Средние века в Багдадской академии. Он состоит из намагниченной металлической ложки, которая свободно вращается на медной (или деревянной) пластине. Независимо от направления вращения ложки, ее ручка всегда поворачивается и указывает в направлении Южного полюса Земли.



## Примените полученные знания.

### Задача. Магнитная буря

Когда в солнечной атмосфере происходят мощные взрывы, магнитосфера нашей планеты – «пояса Ван Аллена» – защищает от смертоносного воздействия потока быстро движущихся заряженных частиц, выброшенных в космос, на живые организмы на Земле, включая людей. Однако, несмотря на это, магнитные бури также возникают на Земле после мощных взрывов в солнечной атмосфере.

**Вопрос 1.** Что, по вашему мнению, представляет собой магнитная буря и как она возникает?

**Вопрос 2.** Можно ли защититься от магнитной бури?

**Вопрос 3.** На что еще на Земле, помимо живых организмов, магнитная буря оказывает негативное воздействие?

## Проверьте полученные знания

1. Земля – гигантский природный магнит. Как и у обычного магнита, её магнитное поле имеет замкнутые силовые линии, а сама планета имеет Северный и Южный магнитные полюса.

**Вопрос 1.** На магнитное поле чего, по своей форме, похоже магнитное поле Земли?

1– подковообразный магнит      2– полосовой магнит      3– прямой проводник с током  
4– магнит произвольной формы      5– круговой ток

A) только 1      B) только 3      C) только 2 и 5      D) только 2 и 3      E) только 4

**Вопрос 2.** Из какого материала следует строить исследовательские суда, изучающие магнитное поле Земли: из стали или дерева? Обоснуйте свой ответ.

**Вопрос 3.** Какое направление всегда указывает южный полюс стрелки компаса?

1– На Южный географический полюс Земли

2– На Южный магнитный полюс Земли

3– На экватор Земли

4– На Северный географический полюс Земли

5– На Северный магнитный полюс Земли

A) только 1 и 2

B) только 2

C) только 1 и 5

D) только 3

E) только 2 и 4

**Вопрос 4.** В каких областях Земли использование компаса бесполезно?

2. В первой половине XIX века французский учёный Франсуа Араго опубликовал книгу под названием «Гром и молния» и описал интересный случай: «8 июля 1681 года в корабль «Квик» ударила молния. С наступлением ночи выяснилось, что северный конец стрелки двух из трёх компасов на корабле указывал на юг, а не на север. Северный конец стрелки третьего компаса указывал на запад...»

**Вопрос.** Как бы вы объяснили причину этого явления?

## 4.1.2. Индукция магнитного поля



Если плоский магнит поместить на подставку, а вокруг него расположить магнитные стрелки, то они повернутся и выстроятся определенным образом (рис. 4.5).

Если вокруг полосового магнита рассыпать железные опилки, то они образуют узор, называемый «магнитным спектром», как показано на рисунке 4.6.

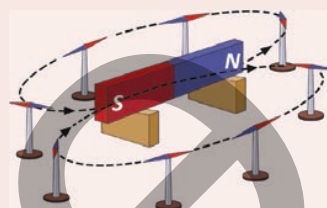


Рисунок 4.5.

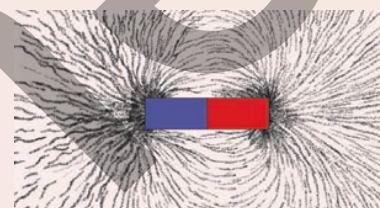


Рисунок 4.6.

- Какова общая закономерность в узорах, образованных магнитными стрелками и железными опилками в этих экспериментах с плоским магнитом?
- Какие выводы о форме и характеристиках магнитного поля можно сделать из этих наблюдений?

### Ключевые слова

силовые линии магнитного поля, индукция магнитного поля, «магнитный спектр»

### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

#### Исследование взаимодействия магнитных полей

**Принадлежности:** источник тока (выпрямитель), реостат, лампа, амперметр, магнитная стрелка, соединительные провода.

#### Ход работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме, изображённой на рисунке 4.7.
2. Замкните ключ, поднесите магнитную стрелку к проводнику и наблюдайте за изменением её первоначального положения.
3. Увеличивайте и уменьшайте ток в цепи с помощью реостата, удаляйте магнитную стрелку от цепи, а затем снова приближайте её. Каждый раз обращайте внимание на изменение направления магнитной стрелки.
4. Наконец, разомкните цепь и наблюдайте за поведением магнитной стрелки.

#### Обсудите

- Что наблюдалось при приближении магнитной стрелки к проводнику с током?
- Как реагировала магнитная стрелка на изменение направления тока в цепи?

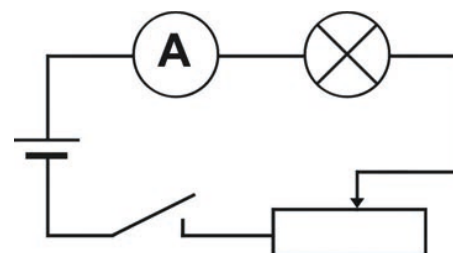


Рисунок 4.7.

- Какие изменения наблюдались со стрелкой при увеличении и уменьшении тока в цепи, а также при удалении магнитной стрелки от проводника и приближении к нему?
- Что произошло с направлением магнитной стрелки при размыкании цепи?
- Какой вывод можно сделать из эксперимента? Сформулируйте свою гипотезу.

### Индукция магнитного поля

Силовая характеристика магнитного поля условно называется *индукцией магнитного поля* (или сокращенно «магнитная индукция»). Она обозначается буквой  $\vec{B}$  и имеет единицу измерения в СИ тесла (Тл).

Экспериментально установлено, что индукция магнитного поля на произвольном расстоянии  $R$  от провода, по которому течет ток  $I$ , зависит от следующих величин:

$$B \sim \frac{I}{r}$$

Индукция магнитного поля – это векторная физическая величина.

Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением северного полюса магнитной стрелки, расположенной в данной точке этого поля (рис. 4.8, а).

### Линии индукции магнитного поля

Магнитное поле невидимо, но его можно изобразить с помощью *силовых линий магнитного поля* (или *линий магнитной индукции*).

- *Линии магнитной индукции* – это такие линии магнитного поля, касательная к которым в любой точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в этой точке (рис. 4.8, б).
- «Цепочки», образованные магнитными стрелками в магнитном поле, повторяют форму линиям магнитной индукции. Вне магнита линии магнитной индукции выходят из его северного полюса и входят в его южный полюс. Внутри магнита линии магнитной индукции продолжают и замыкаются.
- *Магнитное поле является вихревым: линии индукции поля всегда замкнуты, то есть у них нет ни начала, ни конца.*

Очевидно, что через произвольную точку магнитного поля может быть проведена только одна линия индукции магнитного поля, поскольку вектор магнитной индукции в любой точке пространства

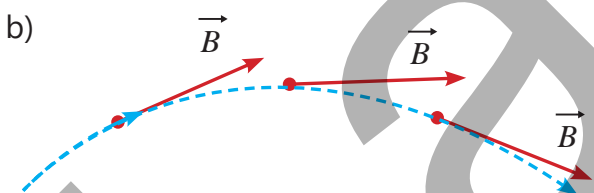
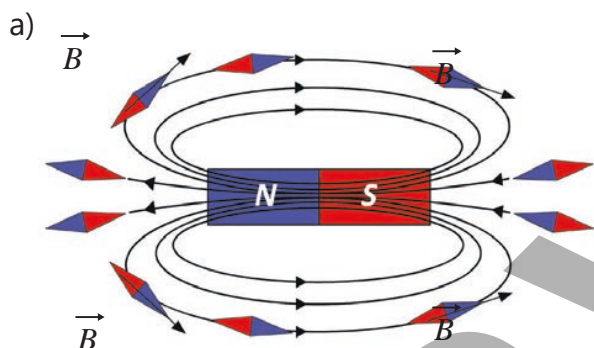


Рисунок 4.8. Вектор индукции магнитного поля

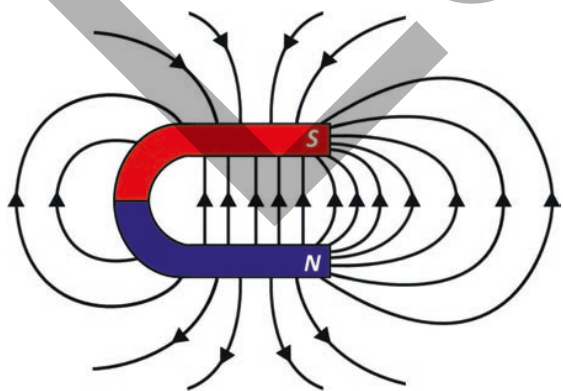


Рисунок 4.9. Линии магнитного поля постоянного подковообразного магнита.

имеет только одно определённое направление. Это означает, что линии магнитной индукции никогда не пересекаются.

•ПОДУМАЙ  
•ОБСУДИ  
•ПОДЕЛИСЬ

Чем магнитное поле отличается от электростатического поля? Перечислите два отличия.

Картину линий магнитной индукции можно «увидеть» более наглядно с помощью железного порошка (железных опилок). При этом каждая частичка железного порошка, рассыпанного в постоянном магнитном поле, превращается в маленькую магнитную стрелку и под действием поля направляется вдоль линий индукции. Эта картина, созданная железным порошком, даёт визуальное представление о линиях индукции магнитного поля (см.: рис. 4.6). Такая картина называется «*магнитным спектром*». В некоторых случаях можно создать магнитное поле, в котором линии магнитной индукции параллельны друг другу и распределены с одинаковой плотностью. Такое поле называется однородным магнитным полем. Примером однородного магнитного поля является поле между полюсами дугообразного магнита (рис. 4.9).

### Примените полученные знания

**Пример.** На рисунке 4.10 показаны «фотографии» линий магнитного поля, полученные в ходе эксперимента с использованием железного порошка от немаркированных плоских магнитов. Магнитная стрелка направлена к магниту 1 своим южным полюсом. На обоих рисунках один и тот же полюс одного и того же магнита обозначен цифрой «2».

**Вопрос.** Какие из следующих утверждений верны?

- a – Магнитное действие магнита зависит от материала, из которого он изготовлен.
- b – На рисунке А магнит 1 направлен к магниту 2 своим северным полюсом.
- c – На рисунке А магниты 1 и 2 повернуты друг к другу одинаковыми полюсами.
- d – На рисунке В магнит 3 направлен к магниту 2 своим южным полюсом.
- e – На рисунке В магниты 2 и 3 повернуты друг к другу одноименными полюсами.
- f – Сила взаимодействия между магнитами зависит от расстояния между ними.

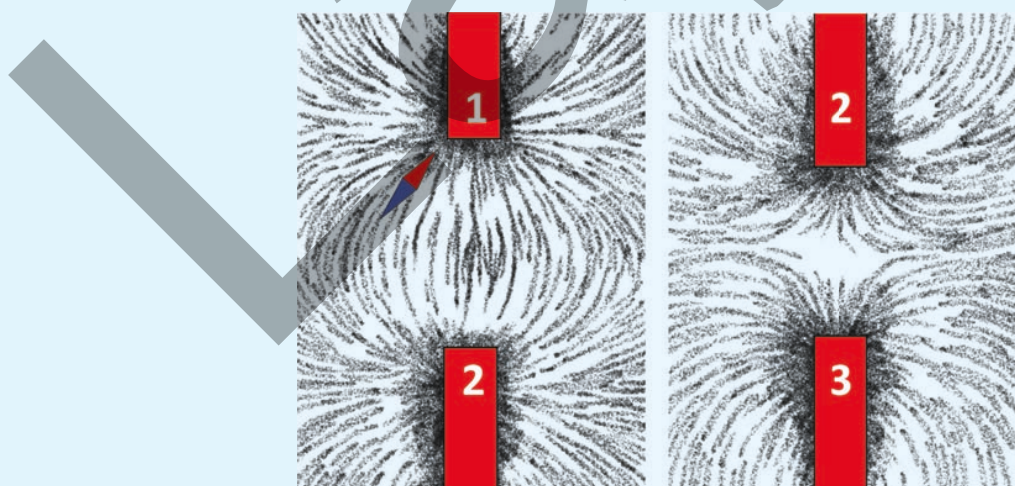


Рисунок А

Рисунок В

Рисунок 4.10. Линии магнитного поля прямого постоянного магнита.

### Проверьте полученные знания

1. Почему такие материалы, как дерево, стекло и пластилин, не намагничиваются в магнитном поле

2. На рисунке 4.11 показан плоский магнит и линии его магнитного поля. Опыт показывает, что в любой точке магнитного поля направление линий индукции совпадает с направлением силы, действующей на северный полюс плоского магнита, помещенного в эту точку. Густота линий магнитного поля характеризует величину (модуль) магнитного действия в данной области пространства.

**Вопрос 1.** В какой из точек X и Y северный полюс другого магнита будет подвержен большему воздействию?

**Вопрос 2.** Куда будет направлена сила, действующая на северный полюс другого магнита, помещенного в точку Y – вверх или вниз в плоскости рисунка?

3. Сила тока в длинном прямом проводнике равна 8 А.

**Вопрос 1.** Как изменится модуль магнитной индукции, если сила тока увеличится в два раза?

**Вопрос 2.** На каком из расстояний от данного проводника с током – 12 мм, 8 мм или 2 мм – индукция магнитного поля больше?

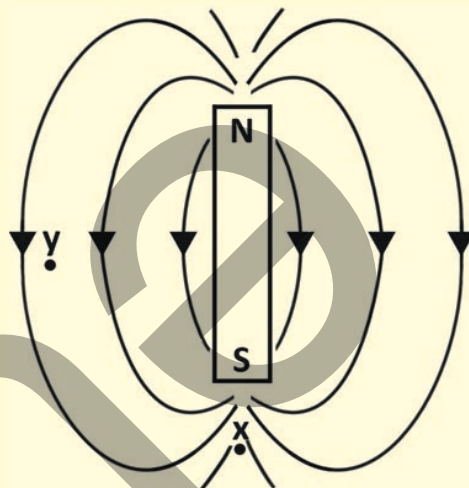


Рисунок 4.11.

### 4.1.3. Магнитная индукция прямого проводника с током

На рисунке изображен прямой проводник с током.



• Как направлена магнитная индукция в «верхней» и «нижней» частях проводника с током, расположенного в плоскости изображения, а также в воздухе между проводом и наблюдателем?

**Ключевые слова** прямой проводник с током, вихревое поле, правило буравчика, правило правой руки

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**Линии магнитной индукции прямого проводника с током.**

**Принадлежности:** лабораторный комплект «Магнитное поле», источник постоянного тока, гальванометр, реостат, ключ, железный порошок, магнитные стрелки (4-5 штук), соединительные провода.

**Ход работы**

1. Соберите схему, показанную на рисунке (рис. 4.12, а).

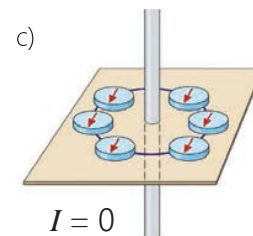
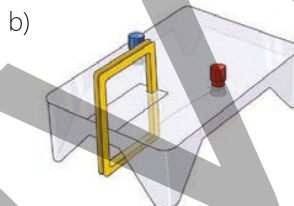
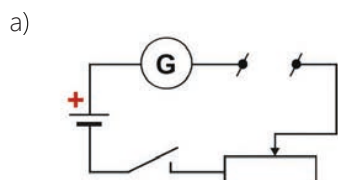


Рисунок 4.12

- Подключите к разомкнутым концам цепи клеммы устройства из лабораторного комплекта, представляющего собой плоскую пластину с закрепленным перпендикулярно ей прямым участком провода (рис. 4.12, б).
- Насыпьте на поверхность пластинки железный порошок, замкните цепь и обратите внимание на форму линий магнитного поля прямого проводника с током.
- Разомкните цепь, удалите железный порошок и расположите вокруг проводника магнитные стрелки (рис. 4.12, в). Замкните цепь и определите направления векторов индукции в разных точках магнитного поля тока.
- Повторите эксперимент, изменив направление тока в проводнике (для этого поменяйте местами провода, подключенные к клеммам устройства), и наблюдайте за происходящим.

**Обсудите**

- Какую форму принимают силовые линии магнитного поля, создаваемого вокруг прямого проводника с током?
- Какое изменение наблюдалось в положении магнитных стрелок компаса, когда ток проходил вертикально вверх и вниз по прямому проводу?
- Какой вывод можно сделать о направлении вектора индукции магнитного поля прямого проводника с током?



Таким образом, результаты исследования, следующие:  
 1. Эксперимент с железным порошком продемонстрировал, что магнитное поле, создаваемое вокруг прямого проводника с током, имеет вихревую форму и представляет собой замкнутые concentрические круги (рис. 4.13).

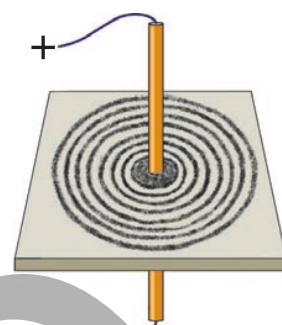


Рисунок 4.13. Магнитное поле прямого проводника с током.

2. При изменении направления тока в проводнике стрелки компаса поворачиваются на  $180^\circ$ . Следовательно, направление вектора индукции магнитного поля, создаваемого током, зависит от направления тока в проводнике.

Направление магнитной индукции удобнее определять без использования магнитной стрелки, с помощью двух практических правил. Это правила буравчика и правило правой руки.

### Правило буравчика для прямого проводника с током

Если поступательное движение правостороннего буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения рукоятки буравчика будет указывать направление вектора магнитной индукции, создаваемого этим током (Рисунок 4.14).

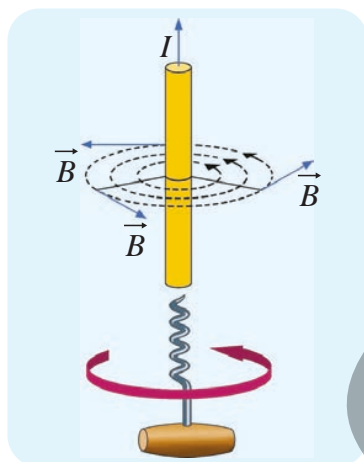


Рисунок 4.14. Правило буравчика

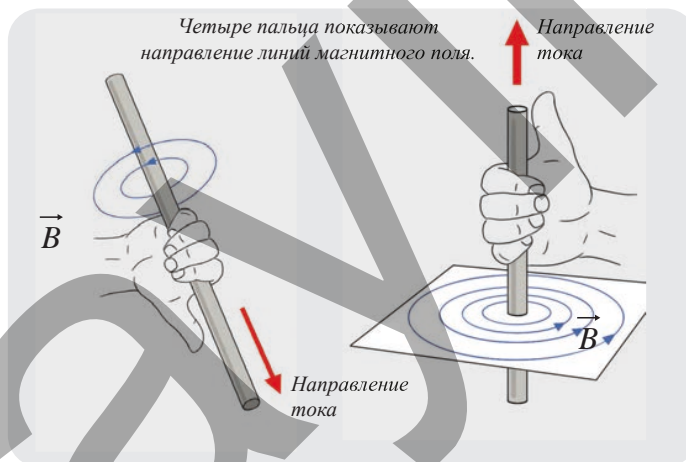


Рисунок 4.15. Правило правой руки

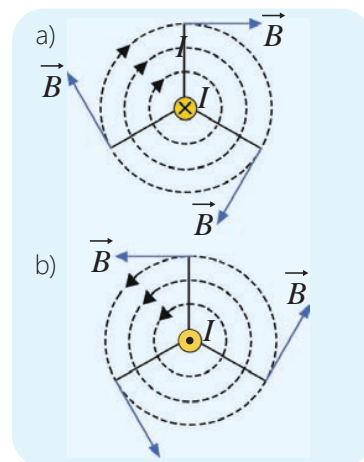


Рисунок 4.16. Схема линий магнитного поля прямого проводника с током.

### Правило правой руки для прямого проводника с током

Если мысленно обхватить прямой проводник с током правой рукой так, чтобы отогнутый большой палец указывал направление тока, то четыре согнутых пальца укажут направление линий магнитного поля (рис. 4.15).

Если прямой проводник с током расположен перпендикулярно плоскости рисунка, направление тока в нём на схемах указывается следующим образом:

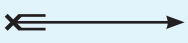
- если ток направлен от нас за плоскость рисунка, он обозначается знаком «x» внутри окружности. В этом случае индукция магнитного поля направлена по часовой стрелке (рис. 4.16, а);
- если ток направлен из-за плоскости рисунка к нам, он обозначается знаком «•» (точка) внутри окружности. В этом случае индукция магнитного поля направлена против часовой стрелки (рис. 4.16, б).

**ВНИМАНИЕ!**

Линии магнитной индукции, перпендикулярные плоскости чертежа, обозначаются на схемах точками и крестиками. Если вектор магнитной индукции представить себе в виде стрелки (рис. 4.17), то линии магнитной индукции, направленные перпендикулярно плоскости рисунка к нам, обозначаются точкой (как если бы мы видели острие стрелки).

Линии индукции магнитного поля, направленные перпендикулярно от нас за плоскость рисунка, обозначаются крестиком (как если бы мы видели оперение удаляющейся стрелки) (рис. 4.17). Например, линии индукции магнитного поля, создаваемого прямым проводником с током, расположенным в плоскости рисунка, справа и слева от проводника обозначаются точками и крестиками в зависимости от направления этого тока (рис. 4.18). Эти знаки определяются по правилу буравчика или правилу правой руки.

$\vec{B}$  Вектор индукции



•  $\vec{B}$  Направлен перпендикулярно плоскости рисунка к нам

×  $\vec{B}$  Направлен перпендикулярно плоскости рисунка от нас

Рисунок 4.17. Условный знак направления вектора индукции в плоскости рисунка.

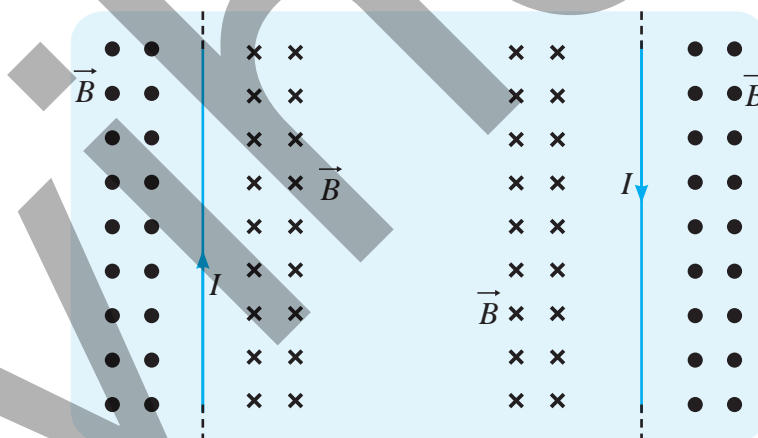


Рисунок 4.18. Направление вектора магнитной индукции в плоскости рисунка справа и слева от прямого проводника, по которому протекает ток.

- ПОДУМАЙ
- ОБСУДИ
- ПОДЕЛИСЬ

Ток в прямом проводнике направлен из плоскости рисунка к нам.

**Вопрос:** Если рядом с проводником поместить компас, как установится его магнитная стрелка?

**Примените полученные знания**

**Пример.** На рисунке показаны два проводника с током.

**Вопрос 1.** Куда направлен вектор магнитной индукции над и под проводником с током, изображенным на рисунке 4.19? Перерисуйте изображение в тетрадь и укажите направления векторов индукции.

**Вопрос 2.** На рисунке 4.20 изображено поперечное сечение прямого проводника с током. Ток направлен из плоскости рисунка к наблюдателю. Куда направлен вектор магнитной индукции в точках 1, 2 и 3?

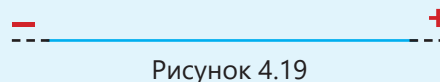


Рисунок 4.19

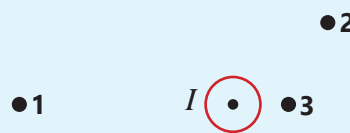


Рисунок 4.20



**Вопрос 3.** В какой из точек 1, 2 и 3 магнитного поля тока численное значение индукции магнитного поля будет наибольшим? Почему?

**Проверьте полученные знания**

1. На рисунке 4.21 изображен прямой проводник с током.

**Вопрос 1.** Как направлено магнитное поле в точке А?

**Вопрос 2.** Как направлен вектор магнитной индукции в пространстве между проводником и наблюдателем?

**Вопрос 3.** Как направлен вектор магнитной индукции в точке В?

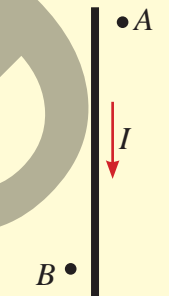
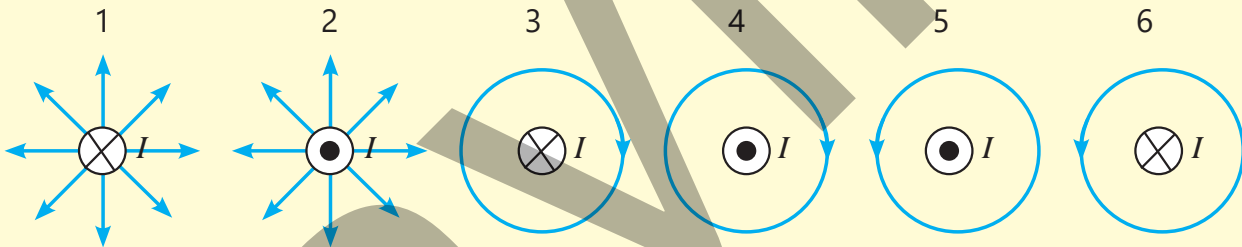


Рисунок 4.21

2. Проводник с током расположен перпендикулярно плоскости рисунка.

**Вопрос.** На каких схемах правильно изображены линии индукции его магнитного поля?



## 4.1.4. Магнитное поле кругового проводника и катушки с током

Вы научились легко определять направление линий магнитной индукции прямого проводника с током, используя правило буравчика или правило правой руки.

- Как определить направление линий магнитной индукции кругового проводника с током (рис. 4.22, а) и катушки с током (рис. 4.22, б)?
- Если магнитная стрелка помещена в точку М на плоской поверхности, через которую проходит круглый проводник с током, то как будет направлена стрелка?
- Если магнитная стрелка помещена в точку N рядом с катушкой, то как будет направлен ее северный полюс?

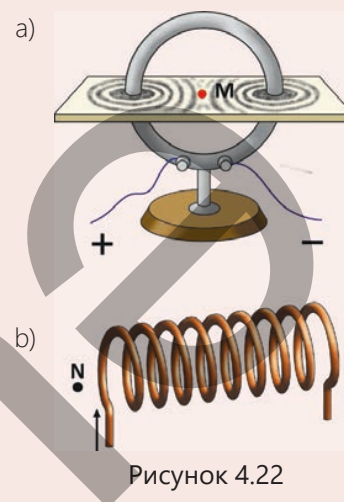


Рисунок 4.22

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**Определение магнитного поля кругового проводника и катушки с током.**

Ключевые слова

круговой проводник, катушка

**Принадлежности:** плоская пластина с круговым проводником (рис. 4.23, а) и катушка, пропущенная через плоскую пластину (рис. 4.23, б) из лабораторного комплекта «Магнитное поле», источник постоянного тока, гальванометр, реостат, ключ, железные опилки, две небольшие магнитные стрелки, соединительные провода.

### Ход работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме, изученной на предыдущем уроке (см. рис. 4.12, а).
2. Подсоедините зажимы устройства с круговым проводником к открытым концам цепи.
3. Посыпьте поверхность пластины железным порошком (опилками), замкните ключ и, слегка постукивая по пластине карандашом, получите четко видимый «спектр» магнитного поля кругового проводника с током.
4. Разомкните цепь и поместите магнитную стрелку в центр кругового проводника на плоскости. Замкните ключ и обратите внимание на ориентацию магнитной стрелки.
5. Измените направление тока и наблюдайте за изменением положения магнитной стрелки.
6. Повторите эксперимент с катушкой с током и обратите внимание на форму создаваемого ею «спектра» магнитного поля.
7. Поместите магнитные стрелки рядом с концами катушки с током и наблюдайте за их направлением.
8. Измените направление тока в катушке и наблюдайте за происходящим.

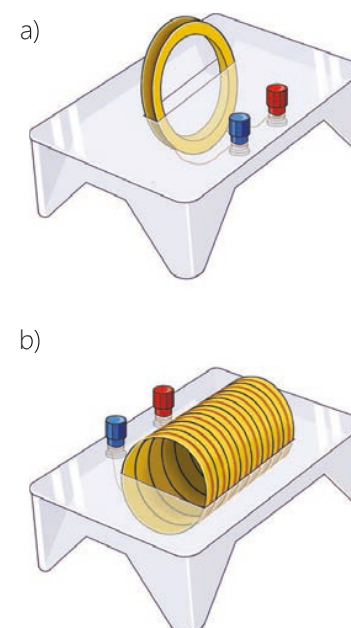


Рисунок 4.23

Обсудите

- Чем линии магнитной индукции кругового проводника с током отличаются от линий магнитной индукции прямого проводника с током?
- Какое направление указывала магнитная стрелка, расположенная в центре плоскости, которую пронизывает круговой проводник с током?
- При повторении опыта с катушкой с током, на магнитное поле какого тела будут похожи по форме созданные ею линии магнитной индукции?



**Магнитное поле кругового тока**

Направление магнитной индукции кругового тока зависит от направления тока и легко определяется с помощью магнитной стрелки. Если магнитной стрелки нет, для этой цели удобно использовать правило правой руки или правило буравчика.

*Правило правой руки для кругового тока: если мысленно обхватить правой рукой произвольный участок кругового проводника так, чтобы отставленный большой палец указывал направление тока в этом участке, то четыре согнутых пальца укажут направление линий магнитной индукции в этом участке (рис. 4.24).*

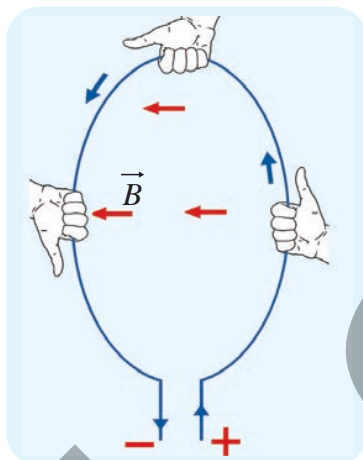


Рисунок 4.24. Правило правой руки для кругового тока

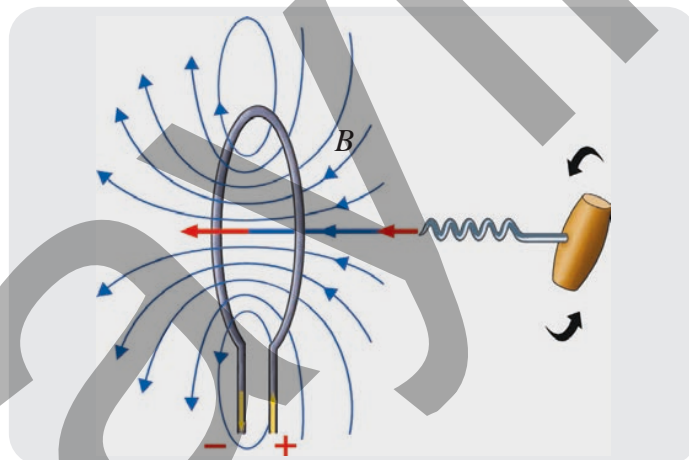


Рисунок 4.25. Правило буравчика с правой резьбой для кругового тока

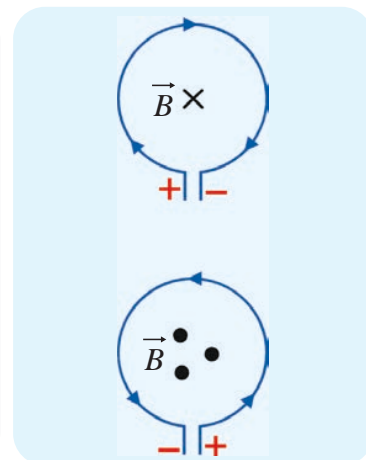


Рисунок 4.26. Полюса магнитного поля кругового тока.

**Правило буравчика с правой резьбой для кругового тока:** когда рукоятка винта вращается в направлении кругового тока, направление его поступательного движения будет указывать направление индукции магнитного поля внутри кругового тока (рис. 4.25). Часть, где линии магнитной индукции выходят из плоскости кругового тока, является северным полюсом его магнитного поля, а часть, где линии индукции входят, является южным полюсом этого поля (рис. 4.26).

**Магнитное поле катушки с током**

Из проведенного вами опыта выяснилось, что картина линий магнитной индукции катушки с током напоминает картину линий индукции плоского магнита (рис. 4.27).

Как и в плоском магните, магнитное поле катушки с током имеет два полюса: северный и южный. Полюса катушки расположены на её краях.

Полюса магнитного поля катушки с током также можно определить с помощью правила правой руки или правила буравчика.

**Правило правой руки для катушки с током:** если обхватить катушку ладонью правой руки так, чтобы четыре пальца указывали направление тока в её витках, то отогнутый большой палец укажет направление линий магнитной индукции внутри катушки (рис. 4.28).

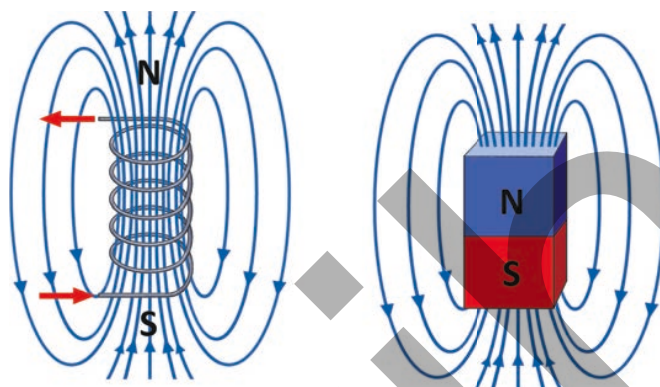


Рисунок 4.27. Сходство линий магнитной индукции катушки с током и плоского магнита.

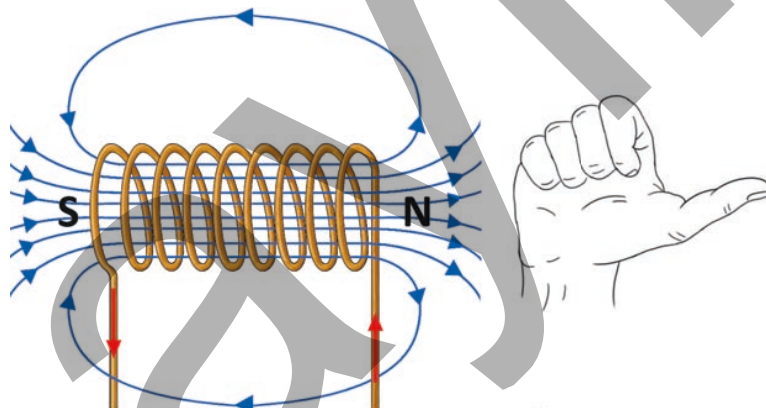


Рисунок 4.28. Правило правой руки для катушки с током.

•ПОДУМАЙ  
•ОБСУДИ  
•ПОДЕЛИСЬ

Как можно сформулировать правило буравчика для катушки с током, проиллюстрировав его схемой?

### Примените полученные знания

**Пример.** На рисунке 4.29 показан круговой проводник с током.

**Вопрос 1.** Как направлен вектор магнитной индукции в точках Y и Z?

**Вопрос 2.** Какой полюс магнитного поля, создаваемого круговым током, обращен к наблюдателю (находится перед плоскостью рисунка): северный или южный?

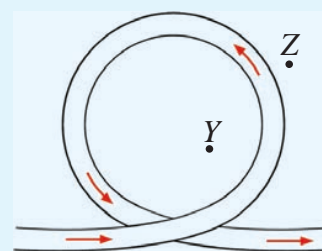


Рисунок 4.29

### Проверьте полученные знания

1. Магнитная стрелка, расположенная на плоскости, через которую пропущен круговой проводник с током, установилась так, как показано на рисунке 4.30.

**Вопрос 1.** Как направлен ток в проводнике?

**Вопрос 2.** Как направлены линии индукции магнитного поля, создаваемые круговым током?

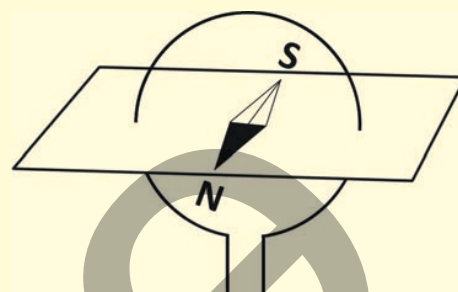


Рисунок 4.30

2. На рисунке 4.31 показаны катушка с током и магнитная стрелка, находящаяся в равновесии рядом с её левым концом.

**Вопрос 1.** К каким полюсам источника постоянного тока подключены левый и правый концы катушки соответственно?

**Вопрос 2.** Как направлена индукция магнитного поля, созданная катушкой с током, в точках А и В?

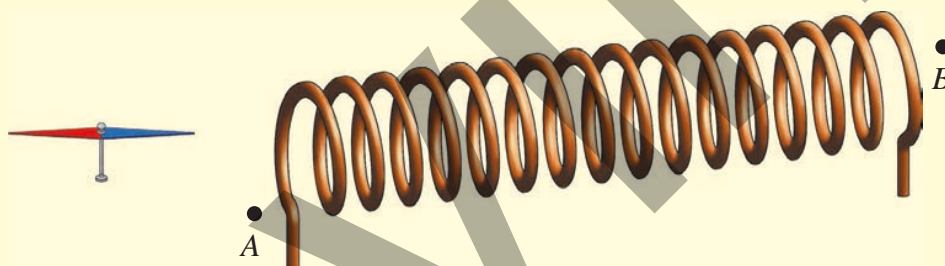


Рисунок 4.31

## 4.1.5. Электромагнит и его применения

Представьте, что на территории крупного металлургического завода скопились тонны металлических отходов. Сортировать их вручную невозможно. Здесь подъемный кран подносит к куче отходов огромное устройство, которое мгновенно притягивает большое количество металлических кусков. Затем, по нажатию маленькой кнопки, куски тут же падают на землю.



- **Может ли это устройство быть обычным постоянным магнитом?**
- **Если нет, то что создает магнитное действие в таких устройствах и как его можно мгновенно размагнитить?**

### Ключевые слова

электромагнит, катушка, железный сердечник, электрический кран, электрический звонок

### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

#### Исследование магнитного действия катушки с током

**Принадлежности:** источник постоянного тока (выпрямитель), гвоздь, гальванометр, реостат, выключатель, железные скрепки, соединительные провода.

#### Ход работы

1. Соберите электрическую цепь по известной вам схеме (см.: рис. 4.12, а).
2. Изготовьте катушку. Для этого намотайте медную проволоку на гвоздь, затем выньте гвоздь катушки (рис. 4.32. а).
3. Соедините свободные концы катушки с разомкнутой частью цепи и замкните цепь. Поднесите один конец катушки с током ближе к железным скрепкам с определенной высоты и наблюдайте.
4. Разомкните цепь, вставьте гвоздь в катушку, замкните выключатель и повторите эксперимент (рис. 4.32. б). На этот раз обратите внимание, изменилось ли магнитное действие катушки с железным сердечником на скрепки.
5. Повторите эксперимент, увеличивая количество витков, намотанных на гвоздь. Понаблюдайте, изменилось ли при этом магнитное действие катушки.
6. Повторите эксперимент, увеличив силу тока в катушке с помощью реостата, и наблюдайте за тем, как изменится магнитное воздействие катушки с железным сердечником на скрепки.

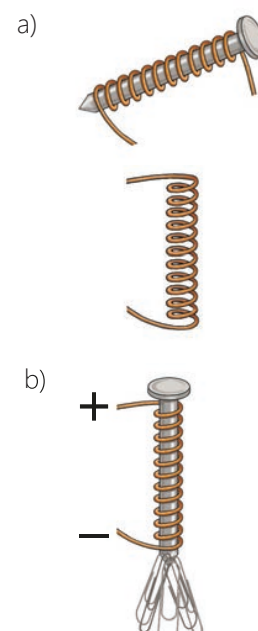


Рисунок 4.32

#### Обсудите

- **К какому выводу вы пришли после эксперимента? Как, по вашему мнению, магнитное действие катушки с током зависит от наличия железного сердечника, количества витков в катушке и силы тока?**

Итак, в ходе эксперимента вы заметили, что магнитное действие катушки изменяется в зависимости от силы тока. По мере увеличения силы тока магнитное действие катушки многократно усиливается, но при выключении тока электромагнит немедленно размагничивается. Эта зависимость была впервые установлена в 1820 году французским физиком А. Ампером.

Еще один важный момент, касающийся электромагнитов, — это размещение металлического (обычно железного) сердечника внутри катушки. В 1825 году английский изобретатель Уильям Стёрджен определил, что если в катушку с током поместить железный сердечник, то её магнитное действие увеличивается в несколько раз. Причина этого в том, что железный сердечник также намагничивается, еще больше усиливая магнитное поле, создаваемое катушкой. В 1828 году американский физик Дж. Генри установил, что при увеличении числа витков электромагнита его магнитное действие также многократно усиливается. Он использовал это свойство электромагнита для создания первого электромагнитного крана, способного поднимать тяжелые железные грузы.

*Таким образом, электромагнит представляет собой катушку с железным сердечником внутри. Когда по виткам катушки проходит ток, создается магнитное поле, и железный сердечник приобретает магнитные свойства; при прерывании тока магнитное поле исчезает, и сердечник размагничивается.*

Устройства и приспособления, основанные на этом свойстве электромагнита, широко используются в быту, технике, промышленности, медицине и других областях. Например, электромагнитные краны используются для разгрузки или погрузки тяжелых железных изделий (рис. 4.33). Электромагнитные сепараторы (вращающиеся электромагнитные диски) применяются для отделения частиц железа от других предметов (грунта, камней и т. д.) в месторождениях руды (рис. 4.34).

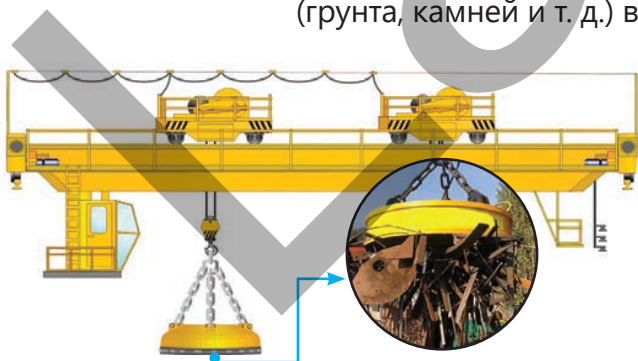


Рисунок 4.33. Электромагнитный кран

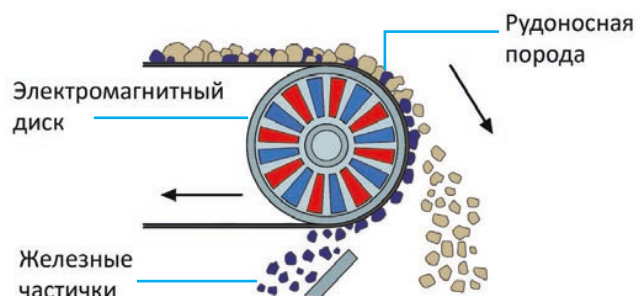


Рисунок 4.34. Электромагнитный сепаратор

- ПОДУМАЙ
- ОБСУДИ
- ПОДЕЛИСЬ

Укажите одно преимущество и один недостаток электромагнитных устройств, используемых в промышленности (например, подъемный кран для металлов, электромагнитное реле, электромагнитный сепаратор и т. д.).

Знаете ли вы?

Основной частью электрического звонка в вашей школе является электромагнит. Давайте познакомимся с его строением и принципом работы.

### Строение и принцип работы электрического звонка.

Основные части электрического звонка показаны на рисунке 4.35.

При нажатии кнопки электрического звонка цепь замыкается, в электромагните появляется ток, и он намагничивается. Молоточек якоря, притянутого к электромагниту, ударяет по чаше звонка, издавая звук.

Однако, когда якорь притягивается к электромагниту, он отсоединяется от контакта, и цепь размыкается в точке С. Ток прекращается, и электромагнит размагничивается. В это время якорь под действием упругой пружины возвращается в исходное положение, восстанавливая электрическую цепь, и процесс повторяется. Этот цикл многократно повторяется всё время, пока нажата кнопка.

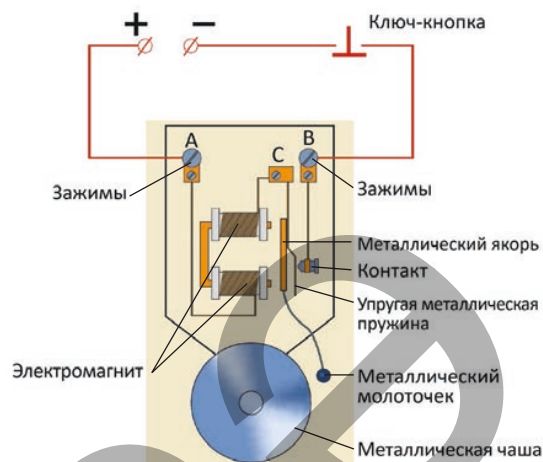


Рисунок 4.35. Схема электрического звонка.

### Примените полученные знания

**Задача.** Работа с моделью электромагнитного крана  
**Принадлежности:** модель электромагнитного крана (электромагнит – 2 шт., железный якорь с крючком), комплект разновесов, источник тока (выпрямитель) (рис. 4.36, а), соединительные провода, штатив.

#### Ход работы

1. Подвесьте модель электромагнитного крана на штатив и соедините её верхние зажимы друг с другом, а нижние зажимы — с выпрямителем (рис. 4.36, б).
2. Включите выпрямитель и подайте напряжение 4 В на концы цепи. Поднесите железный якорь к электромагниту и подвешивайте к его крючку грузы (разновесы) до тех пор, пока он не оторвётся от электромагнита.
3. Подайте напряжение 8 В на концы цепи, повторите эксперимент и определите, в каком случае кран удерживает большую нагрузку.

#### Обсудите

- От чего зависит грузоподъемность электромагнитного крана?

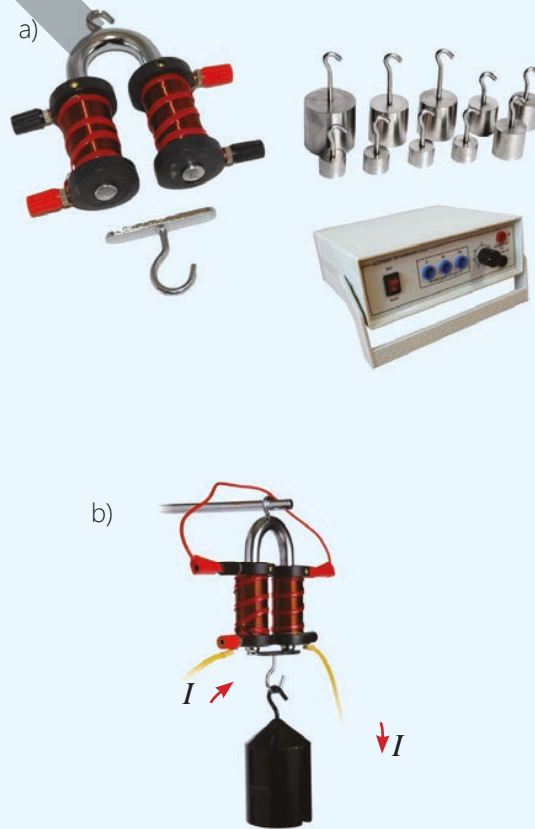


Рисунок 4.36.

### Проверьте полученные знания

1. На рисунке 4.37 показана катушка с железным сердечником, расположенная на столе, и плоские магниты А и В у её левого и правого торцов.

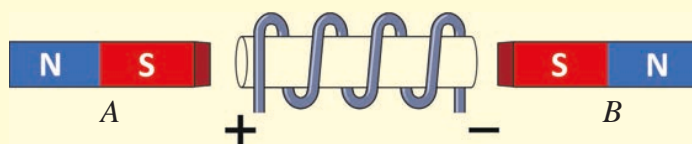


Рисунок 4.37.

**Вопрос 1.** Как изменятся положения магнитов при пропускании тока через катушку?

**Вопрос 2.** Как следует расположить магниты, чтобы они оба притягивались к катушке с током?

**Вопрос 3.** Как изменится движение магнитов, если удалить железный сердечник катушки? Обоснуйте свой ответ.

2. На рисунке 4.38 показана электрическая цепь с подключенным электромагнитным краном.

**Вопрос.** Если ползунок реостата переместить вправо, как изменится подъемная сила электромагнита?

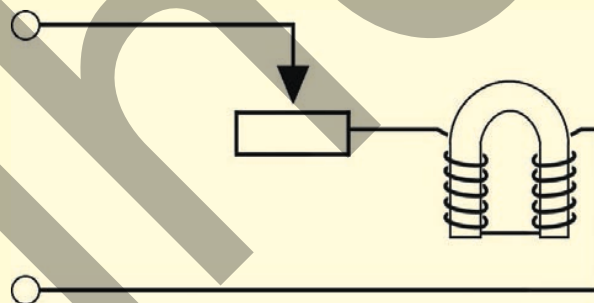


Рисунок 4.38.

3. Направление тока в катушках электромагнита можно менять. Известно, что сила притяжения электромагнита к телам максимальна, когда на концах сердечника образуются разноимённые магнитные полюса.

**Вопрос.** Какое изображение соответствует данному случаю (изображение 4.39)?

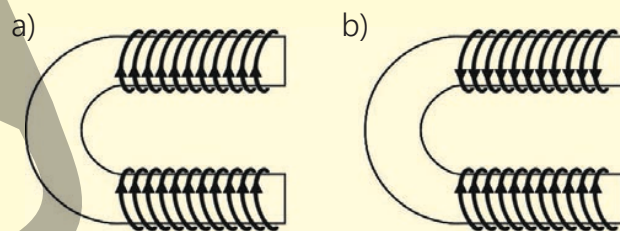


Рисунок 4.39.

## 4.1.6. Магнитное взаимодействие проводников с током

### С ТОКОМ

Даже без проведения реального опыта вы можете легко предсказать характер взаимодействия двух параллельно подвешенных на нитях плоских магнитов и точно определить результат с помощью воображаемого эксперимента (см. рис. 4.40).

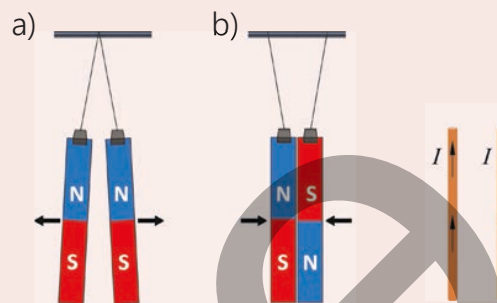


Рисунок 4.40. Взаимодействие параллельных плоских магнитов.

Рисунок 4.41. Параллельные провода с током.

- Можете ли вы предсказать характер магнитного взаимодействия между параллельными проводниками с током (рис. 4.41)?
- Если ток течет по параллельным проводникам в одинаковом и в противоположных направлениях, каков будет характер магнитного взаимодействия между ними? То есть, в каком случае эти проводники будут притягиваться друг к другу, а в каком – отталкиваться?

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**Изучение магнитного взаимодействия**

**Ключевые слова**

параллельные токи, магнитное взаимодействие

**параллельных круговых токов**

**Принадлежности:** маленькая катушка (2 шт.), источник постоянного тока (2 шт.), амперметр (2 шт.), реостат (2 шт.), лампа (2 шт.), выключатель (2 шт.), штатив с диэлектрическим стержнем, соединительные провода.

**Ход работы**

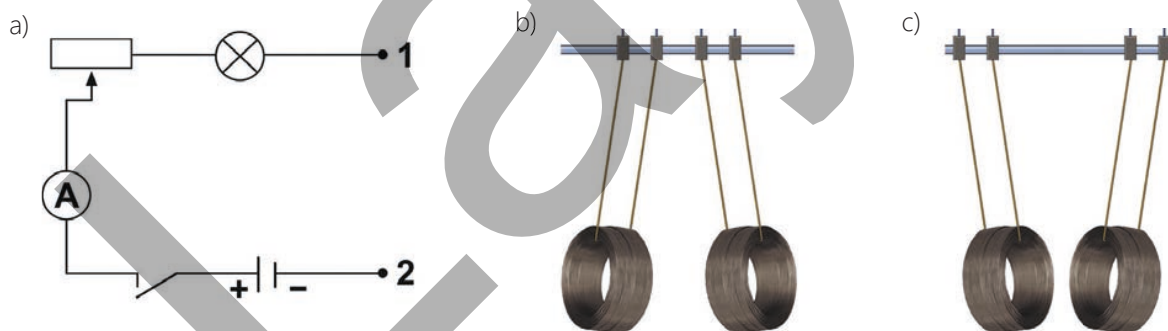


Рисунок 4.42.

1. Соберите две цепи по схеме, показанной на рисунке 4.42, а. Концы 1 и 2 частей цепи оставьте разомкнутыми.
2. Подвесьте две небольшие катушки параллельно друг другу к диэлектрическому стержню штатива. Подключите каждую из катушек отдельно к концам 1 и 2 соответствующей цепи.
3. Замкните выключатели и убедитесь, что через катушки протекает постоянный ток в одинаковом направлении, и наблюдайте за характером магнитного взаимодействия катушек.
4. Повторите эксперимент, изменив направление тока в одной из катушек, и наблюдайте за изменением магнитного взаимодействия между ними.

Обсудите

- В каком случае параллельные катушки с током отталкивались друг от друга, а в каком – притягивались? (Рисунок 4.42, b и c)
- Какой вывод вы сделали из эксперимента?



В 1820 году А. Ампер на основе многочисленных экспериментов с параллельными проводниками с током пришел к выводу, что между ними, как и между постоянными магнитами, существует магнитное взаимодействие. Они также взаимодействуют друг с другом посредством магнитных полей. В зависимости от направления тока в проводниках магнитное взаимодействие может носить характер отталкивания, либо притягивания. С помощью правила

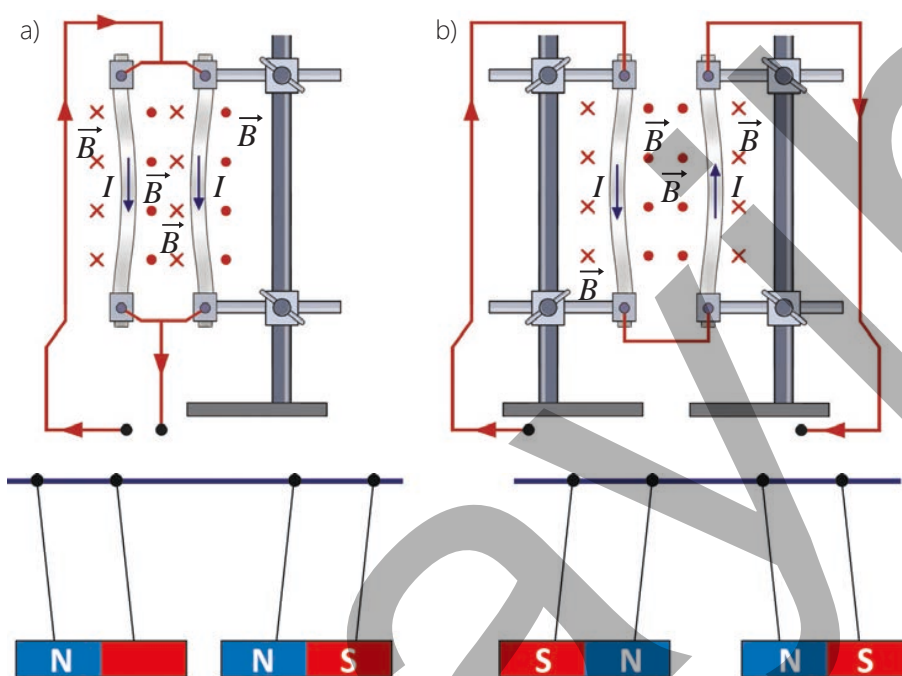


Рисунок 4.43. Электромагнитный кран

буравчика (или правила правой руки) легко определить, что если токи в параллельных проводниках направлены в одну сторону, то между ними (в плоскости рисунка) располагаются разноименные магнитные полюса. В этом случае проводники притягиваются друг к другу, как постоянные магниты, подвешенные на нитях (рис. 4.43, а). Если же токи в параллельных проводниках направлены в противоположные стороны, то между ними возникают одноименные магнитные полюса (в плоскости рисунка), и проводники отталкиваются друг от друга (рис. 4.43, b).

Взаимодействие между параллельными проводниками с током количественно характеризуется силой магнитного взаимодействия.

- Сила, действующая со стороны одного из двух бесконечно длинных параллельных проводников с током, на участок  $l$  другого проводника, прямо пропорциональна произведению сил токов в проводниках и обратно пропорциональна расстоянию между ними:

$$F_m = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r}$$

Здесь  $F_m$  – модуль силы магнитного взаимодействия между параллельными проводниками с током,  $I_1$  и  $I_2$  – силы токов в параллельных проводниках, а  $r$  – расстояние между ними.

На основе силы магнитного взаимодействия между параллельными проводниками установлена единица измерения силы тока в СИ – ампер (А):

•  $1 \text{ А}$  – это такая сила постоянного тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным в вакууме на расстоянии  $1 \text{ м}$  друг от друга, вызывает на каждом участке проводника длиной  $1 \text{ м}$  силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ .

• ПОДУМАЙ  
• ОБСУДИ  
• ПОДЕЛИСЬ

Возникнет ли магнитное взаимодействие, если поднести один проводник с током к другому, параллельно расположенному проводнику без тока? Обоснуйте свой ответ.

### Примените полученные знания

**Пример.** На рисунке 4.44 показаны два параллельных проводника одинаковой длины, по которым протекают токи. Расстояние между ними равно  $r$ . Ток в проводнике 1 равен  $2I$ , а ток в проводнике 2 равен  $I$ .

**Вопрос.** Как направлена сила магнитного взаимодействия между проводниками с током в каждом случае?

- А) Проводник 1 действует на проводник 2 в два раза большей силой.
- В) Проводник 2 действует на проводник 1 в два раза большей силой.
- С) Проводники не действуют друг на друга с какой-либо силой.
- Д) Проводники действуют друг на друга с равной силой.
- Е) Проводник 1 действует на проводник 2 с силой, большей в четыре раза.

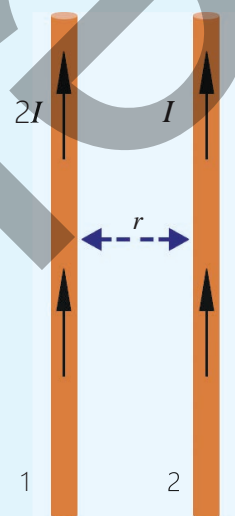


Рисунок 4.44

### Проверьте полученные знания

На рисунке 4.45 показаны поперечные сечения параллельных проводников с током.

**Вопрос.** Как направлена сила магнитного взаимодействия между проводниками с током в каждом случае? Обоснуйте свой ответ.

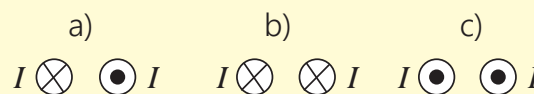


Рисунок 4.45

2. На рисунке 4.46 показаны параллельные катушки с током.

**Вопрос 1.** На каком конце катушек находится северный полюс магнитного поля?

**Вопрос 2.** Какова природа магнитного взаимодействия между катушками?

**Вопрос 3.** Как изменится магнитное взаимодействие между ними, если изменить направление тока в катушке слева?

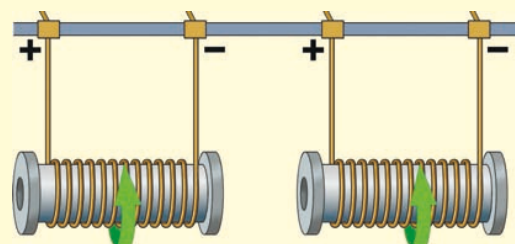


Рисунок 4.46.

## 4.2. Действие магнитного поля на проводник с током и движущуюся заряженную частицу

Известно, что электрический ток – это упорядоченное направленное движение заряженных частиц. Также известно, что электрический ток взаимодействует не только с электрическим полем, но и с магнитным полем.

Действия на проводник с током, помещенного в магнитное поле, а также изменение направления движения заряженных частиц, движущихся в магнитном поле, демонстрируют важные свойства этого поля. Силы, возникающие в результате этого взаимодействия, составляют физическую основу как технических устройств (электродвигателей, измерительных приборов и т. д.), так и природных явлений (например, распространение космических лучей). Таким образом, действие магнитного поля на электрический ток и движущиеся заряженные частицы подчиняется определенным законам, изучение которых имеет большое научное и практическое значение.

### 4.2.1. Действие магнитного поля на прямой проводник с током – сила Ампера



Вы уже узнали, что если один проводник с током приблизить к другому

параллельному проводнику с током, между ними возникнет магнитное взаимодействие. В результате эти проводники притягиваются друг к другу, либо отталкиваются друг от друга.

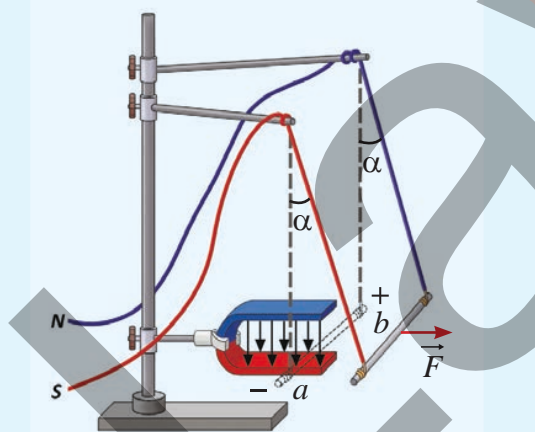


Рисунок 4.47

• **От чего зависит характер магнитного взаимодействия между параллельными проводниками с током, то есть они будут притягиваться или отталкиваться?**

Представьте, что прямой проводник с током помещен во внешнее магнитное поле, например, в постоянное магнитное поле. Можно наблюдать, как проводник отклоняется, как если бы внешнее поле действовало на него с определенной механической силой. На самом

деле между собственным магнитным полем проводника с током и внешним магнитным полем возникает сила магнитного взаимодействия. Эта сила и приводит проводник в движение (рис. 4.47).

- **Как можно заранее определить направление движения проводника с током во внешнем магнитном поле?**
- **Как изменится движение проводника, если мы изменим направление внешнего магнитного поля?**

Ключевые слова

сила Ампера, правило левой руки, тесла

### Действие магнитного поля на проводник с током

**Принадлежности:** небольшие подковообразные магниты (2 шт.), большие подковообразные магниты (2 шт.), источник постоянного тока, реостат, амперметр, лампа, выключатель, толстый прямой провод (ab) (длиной 6–8 см), соединительные провода, штатив с диэлектрическим плечом.

**Правило техники безопасности:** электрическая цепь должна быть разомкнута при подготовке каждого этапа работы.

#### Ход работы

1. Соберите электрическую цепь по известной вам схеме, оставив концы 1 и 2 части цепи разомкнутыми (см. рис. 4.42, а).
2. Закрепите подковообразный магнит на штативе в вертикально так, чтобы линии магнитного поля между его концами были направлены вертикально. Подвесьте прямой провод к соединительным проводам и поместите его между полюсами магнита так, чтобы он был перпендикулярен линиям магнитной индукции.
3. Соедините концы а и b провода, подвешенного на штативе, с клеммами 1 и 2 цепи, замкните выключатель и наблюдайте за взаимодействием прямого проводника с внешним магнитным полем (см. рис. 4.47).
4. Исследование зависимости направления силы магнитного взаимодействия:
  - а) повторите эксперимент, поворачивая магнит и изменяя положение его полюсов;
  - б) повторите эксперимент, изменив направление тока в прямом проводнике (изменив положение проводов, подключенных к концам 1 и 2 электрической цепи), и обратите внимание на результат эксперимента в обоих случаях.
5. Проверка величин, от которых зависит сила магнитного взаимодействия:
  - а) от тока в прямом проводнике путем увеличения или уменьшения силы тока через проводник с помощью реостата;
  - б) от индукции магнитного поля путем замены магнита на более сильный магнит;
  - в) от длины проводника путем размещения прямого проводника с током между двумя магнитами, то есть путем увеличения длины проводника, находящегося под действием магнитного поля, в два раза.

#### Обсудите

- От чего зависит направление магнитной силы, действующей со стороны магнитного поля на проводник с током?
- От чего и как зависит численное значение (модуль) этой силы?

Впервые А. Ампер экспериментально установил, что когда проводник с током расположен перпендикулярно или под определенным углом к линиям индукции однородного магнитного поля, магнитное поле действует на него с определенной силой. В ходе эксперимента вы наблюдали, что эта магнитная сила возрастает с увеличением силы тока, а при прекращении тока магнитная сила исчезает. Направление этой силы, называемой **силой Ампера**, зависит от направления линий индукции постоянного магнита и электрического тока в проводнике. Удобно определять направление силы Ампера, используя правило левой руки.

**Правило левой руки для силы Ампера:** левую руку следует поместить

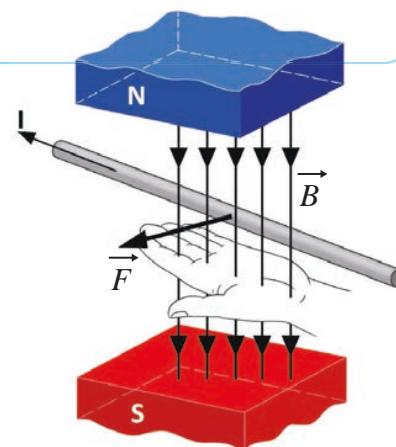


Рисунок 4.48

в магнитное поле так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь перпендикулярно, а четыре вытянутых пальца соответствовали направлению тока. В этом случае большой палец, открытый под углом  $90^\circ$ , указывает направление силы Ампера, действующей на проводник с током (рис. 4.48).

### Чему равен модуль силы Ампера?

Если проводник с током помещен в однородное магнитное поле, то модуль действующей на него силы Ампера равен произведению силы тока, модуля вектора магнитной индукции, длины участка проводника в магнитном поле и синуса угла между направлением тока и вектором магнитной индукции:

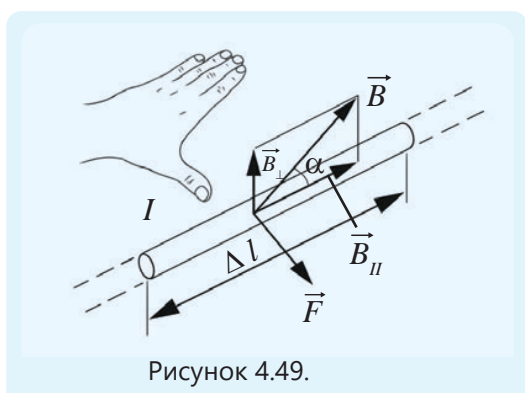


Рисунок 4.49.

$$F_A = IBl \sin \alpha. \quad (1)$$

Здесь  $F_A$  – модуль силы Ампера,  $I$  – сила тока, проходящего через проводник,  $B$  – модуль индукции магнитного поля,  $l$  – длина участка проводника в магнитном поле,  $\alpha$  – угол между направлением тока и вектором магнитной индукции.

Как видно из формулы, если:

- проводник с током параллелен вектору индукции магнитного поля

(если  $\alpha = 0^\circ$  или  $\alpha = 180^\circ$ ), сила Ампера на проводник не действует (поскольку  $\sin 0^\circ = 0$  и  $\sin 180^\circ = 0$ ):  $F = 0$ ;

- если проводник с током расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции, то есть если  $\alpha = 90^\circ$ , то сила Ампера принимает максимальное значение, поскольку  $\sin 90^\circ = 1$ :

$$F_{\text{макс}} = IBl.$$

### Модуль индукции магнитного поля

Модуль индукции магнитного поля равен отношению модуля силы Ампера ( $F_{\text{макс}}$ ) к произведению силы тока ( $I$ ) в проводнике и его длине  $l$ :

$$B = \frac{F_{\text{макс}}}{I \cdot l}$$

Вы знаете, что единицей измерения индукции магнитного поля в СИ является тесла. Она была названа тесла (1Тл) в честь сербского учёного Николы Теслы (1856–1943):

$$[B] = \frac{[F_{\text{макс}}]}{[I][l]} = 1 \frac{H}{A \cdot m} = 1 \text{Тл}.$$

- 1 Тесла (1 Тл) – это индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с силой 1 Н на прямой проводник длиной 1 м при силе тока в нем 1 А, расположенный перпендикулярно вектору магнитной индукции.

• ПОДУМАЙ  
• ОБСУДИ  
• ПОДЕЛИСЬ

**Задача 1.** На рисунке 4.49 показан проводник с током в однородном магнитном поле.

**Вопрос.** Как направлена сила Ампера, действующая на проводник?

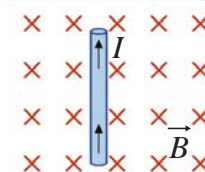


Рисунок 4.49

### В чём причина возникновения силы Ампера?

Причиной возникновения магнитного взаимодействия является пересечение силовых линий собственного магнитного поля проводника с током и внешнего магнитного поля. В этом случае магнитные поля двух разных источников в месте пересечения полей нейтрализуют друг друга, когда направлены в противоположные стороны, и усиливают друг друга, когда направлены в одну сторону. Таким образом, когда прямой проводник с током помещён в сильное однородное внешнее магнитное поле, вокруг него существуют два магнитных поля:

- 1) *собственное магнитное поле проводника – в виде концентрических окружностей;*
- 2) *внешнее однородное магнитное поле – в виде прямых линий.*

Когда индукционные линии этих двух полей совпадают, магнитное взаимодействие между ними также изменяется в зависимости от направления векторов индукции.

На рисунке 4.50, а показано поперечное сечение прямого проводника с током, расположенным перпендикулярно плоскости рисунка в однородном магнитном поле. Как видно из рисунка, линии индукции магнитного поля проводника с током направлены так же, что и линии индукции магнитного поля магнита в его верхней части, и в противоположном направлении в его нижней части. В части, где линии индукции направлены в одном направлении, поля складываются и усиливают друг друга, в результате чего линии индукции становятся более плотными. Однако в той части, где линии индукции направлены противоположно, поля ослабляют друг друга, и в результате линии индукции становятся более разреженными (см. рис. 4.50, б).

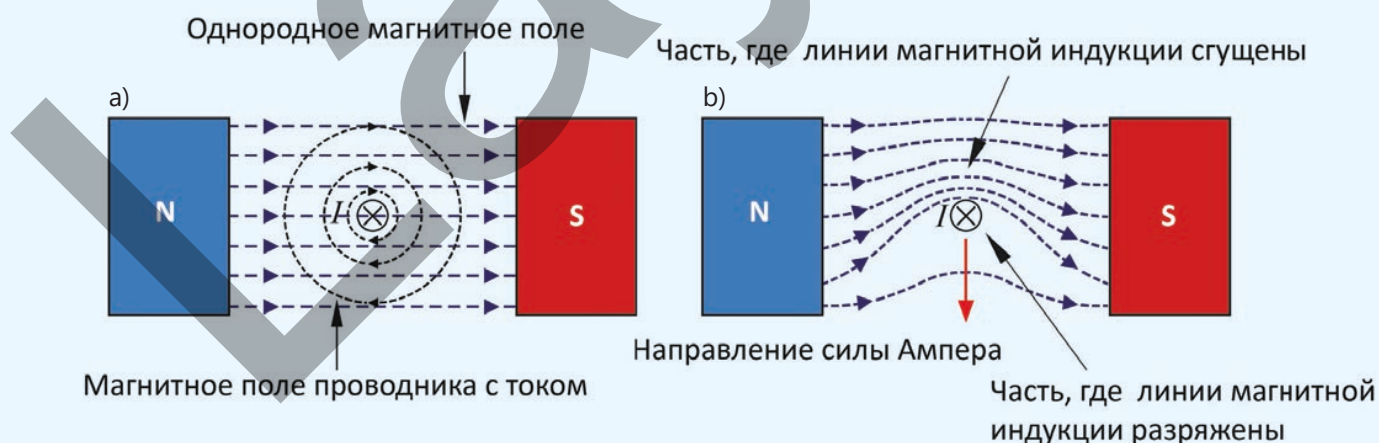


Рисунок 4.50. Механизм возникновения силы Ампера.

Таким образом, магнитное поле распределено неравномерно над и под прямым проводником с током относительно плоскости изображения. Сгущенные линии индукции действуют как «растянутая пружина» и создают силу Ампера, которая толкает провод вертикально вниз относительно плоскости изображения (см. рис. 4.50, б).

### Примените полученные знания

**Задача 2.** Прямой проводник с током, прикрепленный к штативу, проходит между неподвижными магнитами, расположенными на чувствительных электронных весах (рис. 4.51). Сила, действующая на проводник, направлена вертикально вверх относительно поверхности весов, поэтому она увеличивает показания весов. При изменении направления тока весы показывают ту же величину, но на этот раз она имеет отрицательное значение.

**Вопрос 1.** Почему меняются показания весов при прохождении тока через проводник?

**Вопрос 2.** Как можно объяснить силу, действующую на проводник и приводящую к изменению показаний весов, с помощью законов Ньютона?

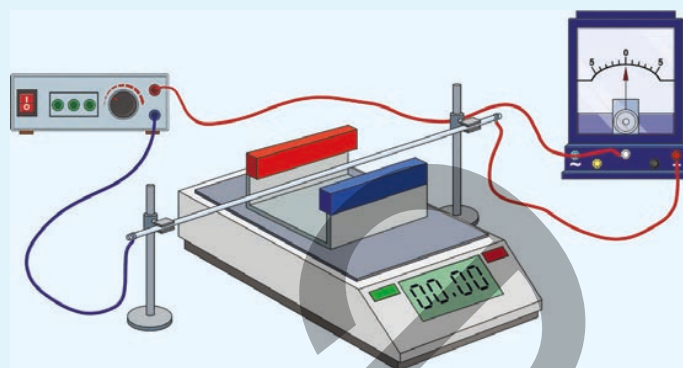


Рисунок 4.51.

### Проверьте полученные знания

1. На рисунке 4.52 изображен прямой проводник с током в однородном магнитном поле

**Вопрос 1.** Как направлена сила Ампера?

**Вопрос 2.** Определите модуль силы Ампера, если сила тока равна 2 А, длина проводника – 0,5 м, а модуль магнитной индукции поля равен  $B = 0,3$  Тл

**Вопрос 3.** Если ток в проводе образует угол  $30^\circ$  с вектором индукции однородного магнитного поля, то как изменяется сила Ампера, действующая на проводник?

2. Когда ток направлено к наблюдателю, проводник движется влево (рисунок 4.53).

**Вопрос.** Какой полюс магнита является северным, а какой – южным?

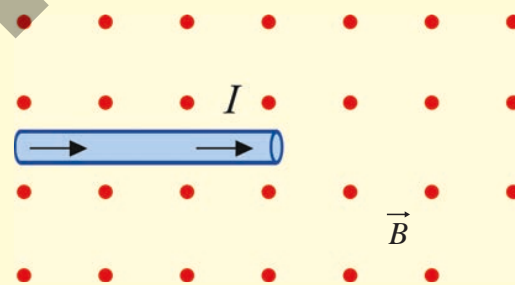


Рисунок 4.52

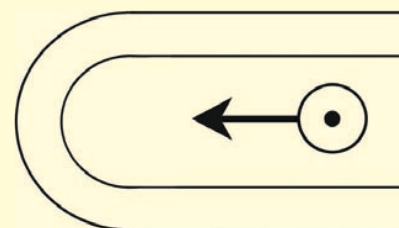
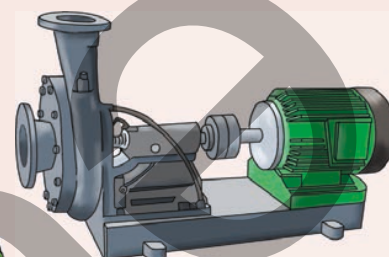
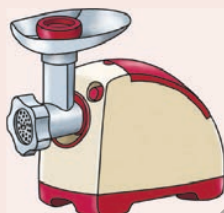


Рисунок 4.53

## 4.2.2. Действие магнитного поля на рамку с током

Трудно представить нашу повседневную жизнь без электроприборов и оборудования. Например, вентиляторы, соковыжималки, мясорубки, электрические водяные насосы, миксеры, дрели и т.д. – это наиболее часто используемые электроприборы.



- Какое превращение энергии происходит в основном в этих устройствах?
- На каком физическом явлении основано такое превращение энергии?

**Ключевые слова** рамка с током, коллектор, контактная щетка, электродвигатель, ротор, статор

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

### Рамка с током в однородном магнитном поле

**Принадлежности:** источник тока (выпрямитель), устройство для демонстрации вращения проводящей рамки в магнитном поле, плоские магниты (2 шт.), деревянная или пластиковая подставка (2 шт.), соединительные провода

### Ход работы

1. Поместите вращающуюся рамку между северным и южным полюсами плоских магнитов (рис. 4.54).
2. Подсоедините зажимы рамки к источнику тока и замкните цепь и наблюдайте за происходящим.
3. Проведите эксперимент в следующей последовательности, обращая внимание на результат взаимодействия рамки с током и однородного магнитного поля:
  - а) при увеличении или уменьшении силы тока в рамке;
  - б) при смене полюсов плоского магнита;
  - в) при изменении направления тока в рамке.

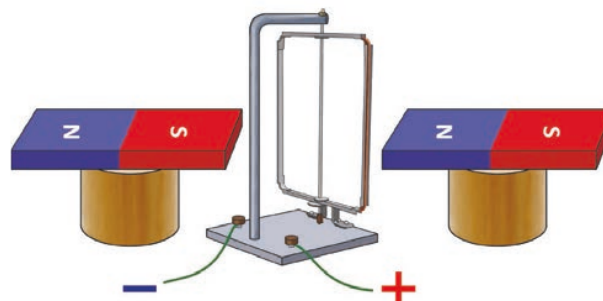


Рисунок 4.54

**Обсудите**

- Что вы наблюдали, когда в рамке, способной вращаться, расположенной в магнитном поле, не было тока?
- Что происходило, когда через рамку проходил ток?
- Что наблюдалось при увеличении или уменьшении тока в рамке, а также при изменении направления тока?
- Как изменение положения полюсов неподвижного магнита влияло на рамку с током?
- Какое обобщение можно сделать на основе результатов эксперимента?



В ходе исследования вы обнаружили, что проводящая рамка, способная вращаться вокруг вертикальной оси и помещенная в однородное магнитное поле, при отсутствии в ней тока остается в состоянии покоя в любом положении. Если плоскость рамки с током расположена параллельно линиям магнитного поля, то она будет вращаться вокруг вертикальной оси. Это происходит потому, что на боковые стороны AB и CD рамки действуют две силы, направленные перпендикулярно линиям магнитного поля. Эта пара сил придает рамке вращательное движение вокруг вертикальной оси (рис. 4.55).

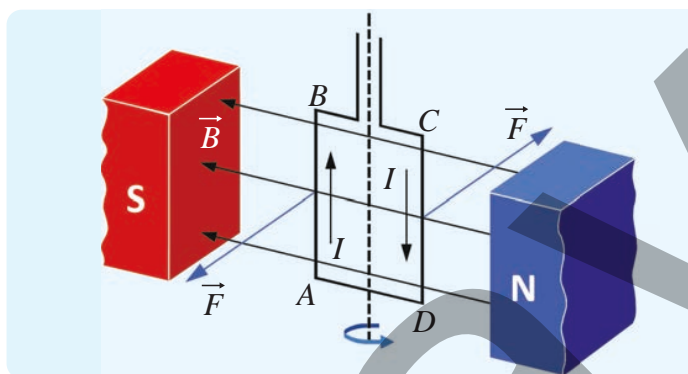


Рисунок 4.55. Рамка с током расположена параллельно линиям индукции однородного магнитного поля.

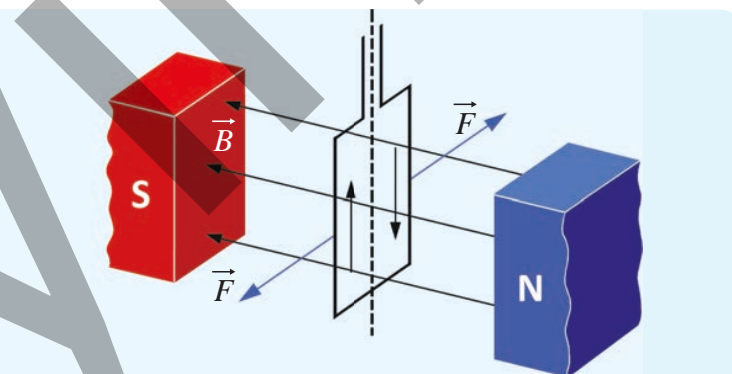


Рисунок 4.56. Рамка с током расположена перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля.

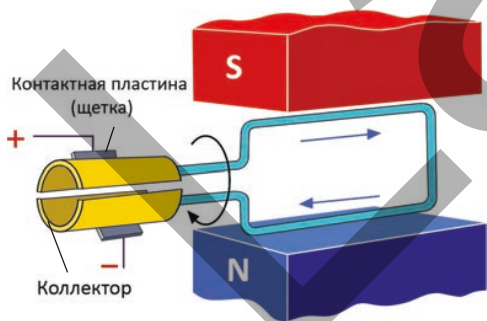


Рисунок 4.57. Обеспечение непрерывного вращения

Когда направление тока в рамке изменяется, две силы Ампера вращают её в противоположных направлениях. Когда плоскость рамки перпендикулярна линиям магнитной индукции, силы Ампера, действующие на её стороны, направлены в противоположных направлениях вдоль прямой линии, поэтому рамка не вращается (рис. 4.56). Для того чтобы рамка вращалась в одном направлении, необходимо периодически изменять направление тока в цепи. Для этого используются металлические полукольца, называемые коллекторами, прикрепленные к рамке (рис.

4.57). По поверхности полуколец скользят контактные пластины, называемые щетками. Щетки соединены с разными полюсами источника тока и обеспечивают прохождение тока через рамку. При повороте рамки на  $180^\circ$  полукольца меняют своё положение. В результате направление тока в рамке изменяется, и она продолжает вращаться в том же направлении до тех пор, пока ток не будет прерван.

- ПОДУМАЙ
- ОБСУДИ
- ПОДЕЛИСЬ

Поделись Что определяет действие силы Ампера, которая придает вращательное движение рамке с током?

### Применение силы Ампера: Электродвигатель

**Электродвигатель.** Основной частью многих электрических приборов и оборудования, широко используемых в быту, технике и промышленности, является электродвигатель.

• *Электродвигатель – это устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую.*

Принцип его работы основан на вращении рамки с током в магнитном поле под действием силы Ампера. Электродвигатели бывают разных конструкций, но наиболее распространенным из них является коллекторный двигатель. Этот двигатель состоит из трех основных частей: *статора, ротора и коллектора*. *Статор* (от латинского «sto» – я стою) – это неподвижная часть электродвигателя, состоящая из неподвижного магнита или катушки с железным сердечником (электромагнита), прикрепленной к корпусу. Статор иногда называют индуктором. В статоре создается сильное магнитное поле (рис. 4.58, а). *Ротор* (лат. «roto» – я вращаю) – это вращающаяся часть двигателя, расположенная внутри статора. Ротор представляет собой электромагнит, состоящий из обмоток и цилиндрического железного сердечника. Его иногда называют *якорем*. Коллектор и щетки используются для подачи электрического тока в обмотки ротора и обеспечения его непрерывного вращения.

#### Как коллекторы и щетки обеспечивают непрерывное вращение ротора?

Таким образом, при пропускании тока через ротор он вращается внутри статора под действием силы Ампера (рис. 4.58, б). Как скорость вращения ротора зависит от силы тока, проходящего через него, а также от количества витков в роторе и статоре?

Электродвигатель на схемах обозначается кружком с буквой **М** внутри (рис. 4.58, с).

Электродвигатели более экологичны, чем тепловые двигатели. Они не загрязняют окружающую среду, работают практически бесшумно и экономичны. КПД электродвигателей выше 90%.

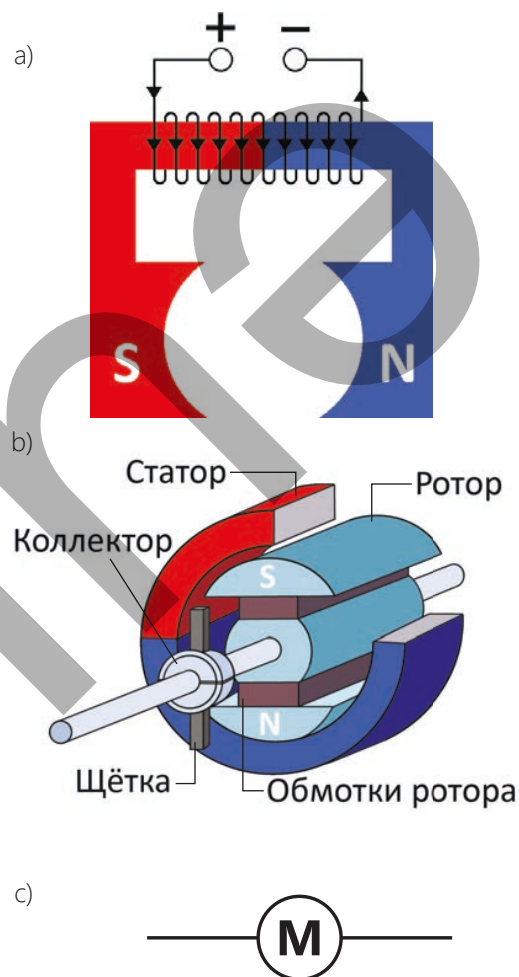


Рисунок 4.58. Схема устройства электродвигателя

### Примените полученные знания

**Задача.** Между полюсами постоянного магнита находится прямоугольная проводящая рамка. Рамка подключена к источнику постоянного тока через ключ (рис. 4.59).

**Вопрос.** В каком направлении будет вращаться рамка после замыкания ключа? Обоснуйте свой ответ.

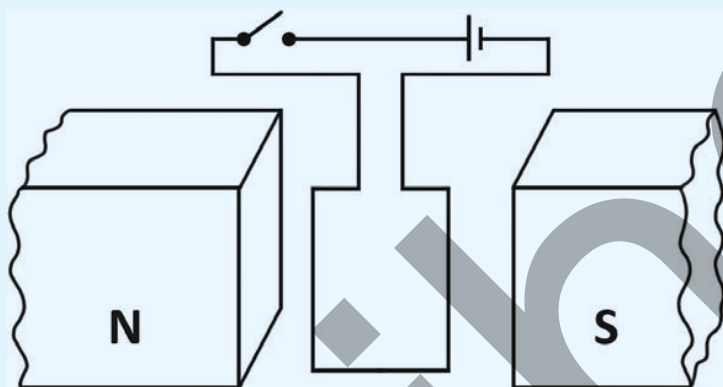


Рисунок 4.59

### Проверьте полученные знания

1. На рисунке 4.60 показано направление вращения рамки с током, помещенной в магнитное поле.

**Вопрос 1.** Как можно изменить направление вращения рамки? Назовите два способа.

**Вопрос 2.** Как можно увеличить скорость вращения рамки?

2. На рисунке 4.61 показана упрощенная схема устройства электродвигателя.

**Вопрос 1.** Какие части электродвигателя обозначены цифрами?

**Вопрос 2.** Почему на этом рисунке устройства присутствуют металлические полукольца и щетки? Какова их функция?

**Вопрос 3.** Как увеличение силы тока в рамке изменит действие на нее магнитной силы?

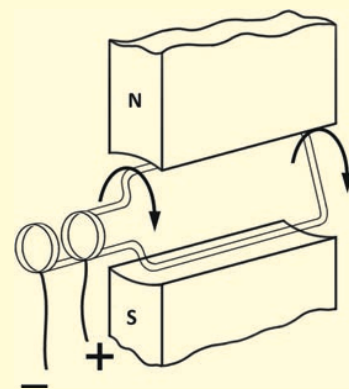


Рисунок 4.60

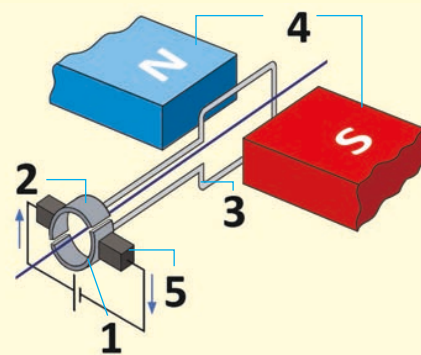


Рисунок 4.61

### ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ –ПРОЕКТ STEAM

#### Проект 1. Изготовление модели двигателя

**Принадлежности:** батарея (2 шт.), медная проволока (длина

1 м, толщина 1,2–1,5 мм), круговой постоянный магнит, выключатель, диэлектрическая основа (2 шт.), прикрепленная к алюминиевой опоре на своем основании, соединительные провода.

#### Ход работы

1. Сделайте катушку из медной проволоки и закрепите её концы в стойках на опорах. Поместите магнит в нижнюю часть катушки (рис. 4.62).

2. Соедините полюса батареи с алюминиевыми держателями. В этот момент катушка начнет вращаться.

Вы сделали двигатель!

Подумайте над следующими вопросами:

**Вопрос 1.** Как надо разместить катушку над поверхностью магнита, что бы она начала вращаться? Почему?

**Вопрос 2.** Какова роль постоянного магнита в движении катушки?



Рисунок 4.62

#### Проект 2. Подготовка модели «рамка с током в магнитном поле»

**Принадлежности:** батарея, медная проволока, круговой магнит.

#### Ход работы

1. Поместите полюс «-» батареи на неподвижный магнит.

2. Изготовьте рамку из медной проволоки, так как показано на рисунке 4.63, и расположите её так, чтобы сложенная посередине часть касалась полюса «+» батареи, а свободные концы касались кругового магнита у основания батарейки.

Подумайте над следующими вопросами:

**Вопрос 1.** Почему медная рамка вращается, когда касается полюсов батареи?

**Вопрос 2.** Можете ли вы на схеме описать силы и линии внешнего магнитного поля, вызывающие вращение рамки?

**Вопрос 3.** Как направлен ток через рамку?

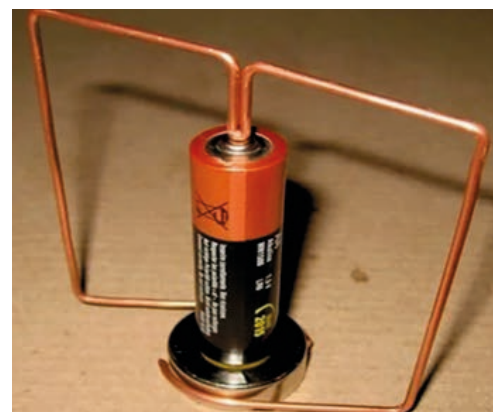


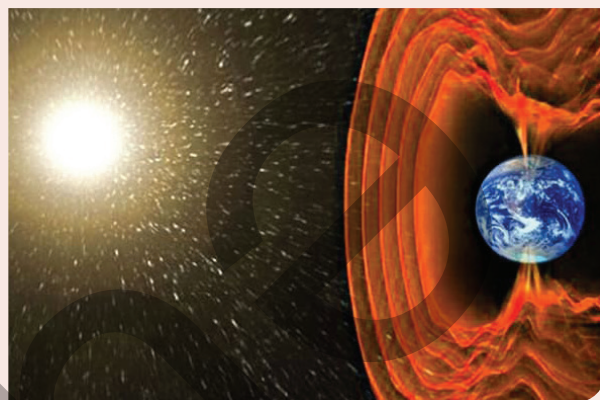
Рисунок 4.63

#### Проект 3. Эссе на тему «Электроизмерительные приборы»

Существуют различные системы электроизмерительных приборов. Это *магнитоэлектрические, электромагнитные и электродинамические системы*. Принцип работы всех этих устройств основан на действии магнитного поля на проводник с током. Наиболее часто используются устройства с магнитоэлектрической системой. Используя интернет-ресурсы, напишите эссе о строении и принципе работы этого устройства.

## 4.2.3. Действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы – сила Лоренца

Частицы с высокой энергией, прилетающие из космоса, не падают непосредственно на Землю. Траектория некоторых из этих частиц изменяется под воздействием магнитного поля Земли, и они огибают поверхность Земли. Другая часть продолжает свой путь прямолинейно, как если бы магнитного поля Земли не существовало, и достигает поверхности Земли.



- **На какие свойства частиц может влиять магнитное поле, и от чего зависит это влияние?**

### Ключевые слова

сила Лоренца, правило левой руки для силы Лоренца

### ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**Принадлежности:** источник постоянного тока, неглубокая двухэлектродная электролитическая ванна (прозрачная ванна), дистиллированная вода, соль сульфат меди (II), лампа, ключ, соединительные провода, постоянные магнитные диски (2-3 шт.), деревянные опилки, клейкая лента, штатив с лапкой.

### Ход работы

1. Закрепите электролитическую ванну на штативе на высоте 6-8 см. Поместите один из электродов в центр ванны, а другой прикрепите к стенке емкости (рис. 4.64, а).

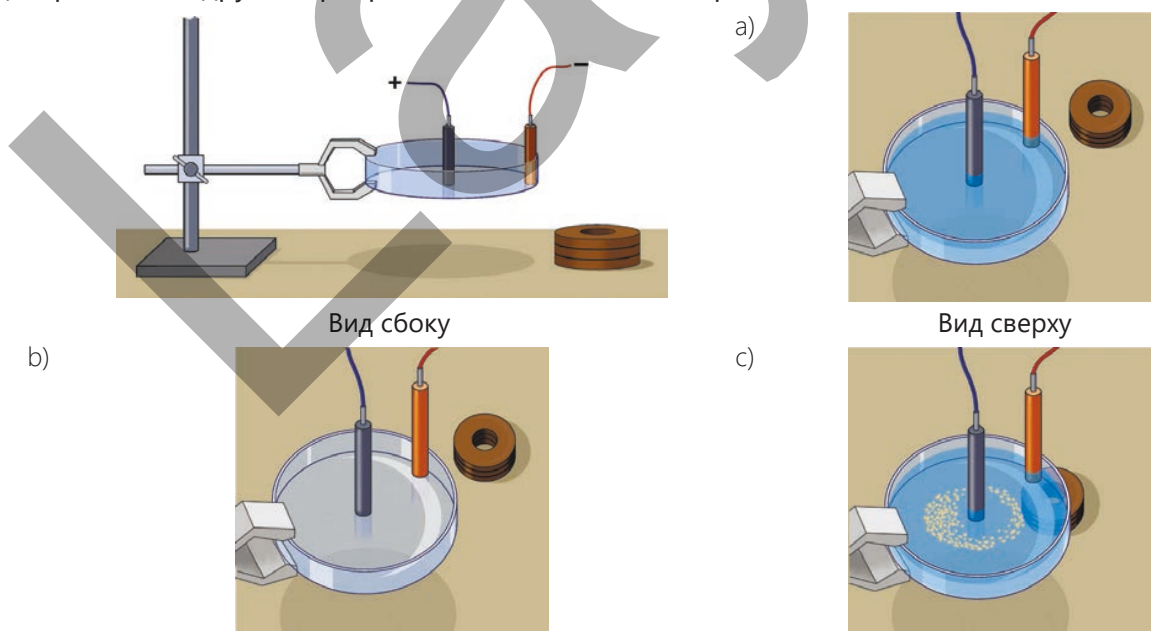


Рисунок 4.64

2. Подсоедините электроды к соответствующим полюсам источника постоянного тока и налейте дистиллированную воду в ванну. Замкните ключ и наблюдайте, возникает ли ток в цепи.
3. Добавьте в воду сульфат меди ( $\text{CuSO}_4$  — соль) и есть серная кислота ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  — кислота). (Рис. 4.64, b).
4. Поместите магнитный диск под ванну, посыпьте поверхность раствора кислоты древесной стружкой и внимательно наблюдайте за происходящим явлением (см.: Рис. 4.64, c).
5. Повторите эксперимент, поменяв местами полюса магнитного диска и полюса тока, подаваемого на электроды, и обратите внимание на происходящие явления.

### Обсудите

- Вспомните явление электролитической диссоциации, что называют электролитической диссоциацией?
- Что вы наблюдали, когда поместили магнитный диск под ванну и посыпали поверхность раствора кислоты древесной стружкой?
- Что заставляет частицы электролитного раствора вращаться вместе со стружкой?
- Что вы наблюдали, когда повторили эксперимент, изменив положение полюсов магнитного диска?
- Что вы наблюдали, когда повторили эксперимент, изменив направление тока, подаваемого на электроды?
- Какие выводы можно сделать из эксперимента?



### Хендрик Антон Лоренц (1853–1928)

Голландский физик. Внёс большой вклад в развитие электродинамики и оптики. Является основателем электронной теории строения материи.

Поскольку электрический ток представляет собой упорядоченное движение заряженных частиц, магнитное поле действует на каждую из этих движущихся заряженных частиц, влияя на ток. Таким образом, силу Ампера можно

рассматривать как сумму сил, действующих на каждую движущуюся частицу.

• Сила, действующая со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу, называется силой Лоренца. Она названа в честь голландского физика Хендрика Антона Лоренца.

### Сила Лоренца

#### Модуль силы Лоренца

$$F_{\text{Л}} = \frac{F_A}{N}$$

может быть определен по формуле. Здесь  $F_A$  — сила Ампера,  $N$  — общее число свободно заряженных частиц на участке длиной  $l$  прямого проводника, расположенного в магнитном поле.

Если модуль заряда частицы равен  $q_0$ , а общий заряд всех частиц равен  $q = N \cdot q_0$ , то сила тока в проводнике определяется следующим образом:  $I = \frac{Nq_0}{t}$

Здесь  $t$  — время, за которое заряженная частица проходит расстояние  $l$  по проводнику (рисунок 4.65).

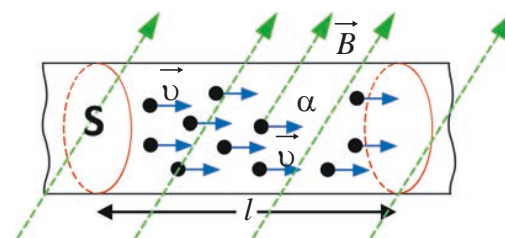


Рисунок 4.65

В этом случае мы получаем:

$$F_{Л} = \frac{F_A}{N} = \frac{IBl \sin \alpha}{N} = \frac{Nq_0Bl \sin \alpha}{Nt} = \frac{q_0Bl \sin \alpha}{t}$$

Здесь, поскольку  $\frac{l}{t} = v$ , получается общая формула для определения модуля силы Лоренца:

$$F_{Л} = q_0Bv \sin \alpha. \quad (4)$$

Где  $v$  – средняя скорость заряженной частицы, движущейся упорядоченно в магнитном поле,  $\alpha$  – угол между вектором индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и вектором скорости заряженной частицы  $\vec{v}$ . Если заряженная частица входит в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции, то есть  $\alpha = 90^\circ$ , то  $\sin 90^\circ = 1$ , и сила Лоренца достигает максимального значения:

$$F_{Л \text{ макс}} = q_0Bv. \quad (5)$$

Сила Лоренца перпендикулярна векторам  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$  и ее направление определяется правилом левой руки.

#### Правило левой руки для силы Лоренца

Левую руку следует расположить в магнитном поле так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь (перпендикулярно ей), а четыре пальца были вытянуты по направлению движения положительного заряда (противоположно направлению движения отрицательного заряда). В этом случае отогнутый на  $90^\circ$  большой палец будет указывать направление силы Лоренца, действующей на заряд (рис. 4.66).

Когда заряженная частица входит в однородное магнитное поле, сила Лоренца действует перпендикулярно вектору скорости частицы, поэтому модуль скорости частицы не изменяется, но меняется направление её движения. Следовательно, заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца по спирали.

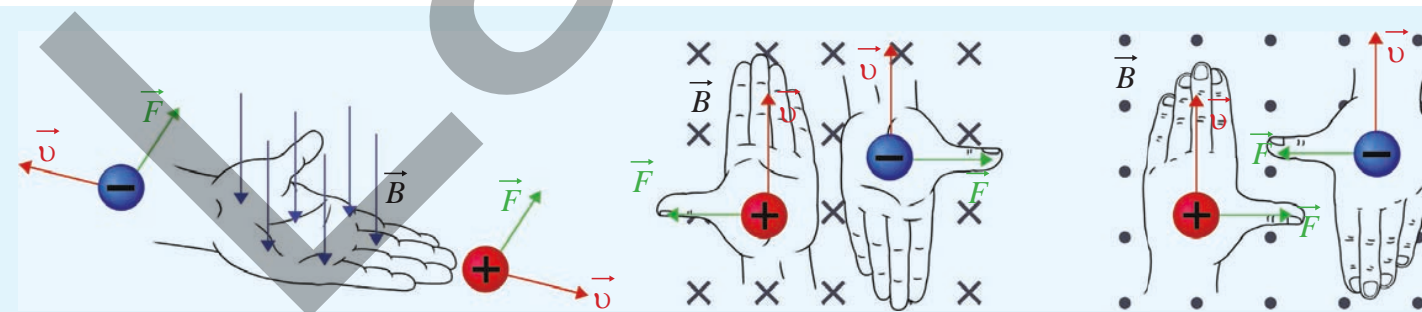


Рисунок 4.66

- ПОДУМАЙ
- ОБСУДИ
- ПОДЕЛИСЬ

Если заряженная частица входит в магнитное поле параллельно линиям индукции, то есть,  $\alpha = 0^\circ$  или  $\alpha = 180^\circ$ , по какой траектории она будет двигаться? Почему? Обоснуйте свой ответ.

### Примените полученные знания

**Пример.** На рисунке 4.67 изображена схема движения положительно заряженной, отрицательно заряженной и незаряженной частиц, входящих в однородное магнитное поле с одинаковой скоростью.

**Вопрос 1.** По какой траектории частицы продолжат свое движение в поле?

**Вопрос 2.** Если заряженная частица неподвижна в магнитном поле, что можно сказать о направлении и численном значении силы Лоренца?

**Вопрос 3.** Как изменятся их траектория, если эти частицы влетают в магнитное поле параллельно друг другу?

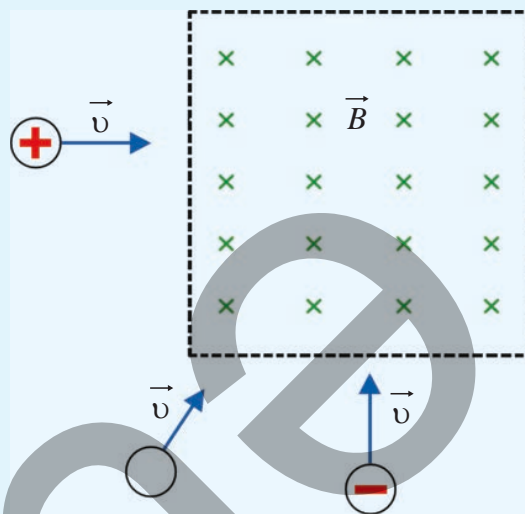


Рисунок 4.67

### Проверьте полученные знания

1. На рисунке 4.68 изображены частицы, входящие в магнитное поле прямого проводника с током.

**Вопрос 1.** Как направлена сила Лоренца, действующая на эти частицы?

**Вопрос 2.** Как изменится направление силы Лоренца, если изменится направление тока в проводнике?

2. Незаряженная частица 1 и отрицательно заряженная частица 2 движутся в однородном магнитном поле (рисунок 4.69).

**Вопрос.** По какой траектории продолжат движение частицы?

3. Электрон влетает в магнитного поля с индукцией  $B = 1,6 \text{ мТл}$  под углом  $30^\circ$  к линиям индукции со скоростью  $v = 5,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ .

**Вопрос.** Чему равен модуль силы Лоренца, действующей на электрон? ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ )

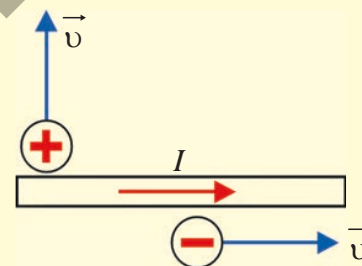


Рисунок 4.68

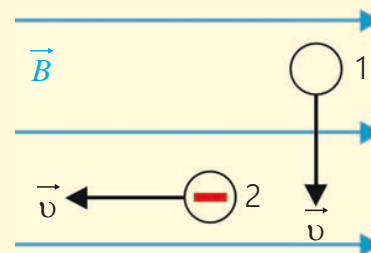


Рисунок 4.69

## 4.3. Электромагнитная индукция

До сих пор мы изучали, что электрический ток создает магнитное поле. Но одно из самых интересных открытий в физике показало, что это взаимодействие является двусторонним. Изменение магнитного поля может вызвать возникновение электрического тока в замкнутом проводнике. Это явление называется *электромагнитной индукцией*, и оно составляет физическую основу большей части современных технологий: от производства электроэнергии до различных устройств, работающих на её основе.

### 4.3.1. Явление электромагнитной индукции

#### Экспериментальная задача

#### Почему в катушке возникает ток?

Медная катушка подключена к гальванометру. Рядом с катушкой находится неподвижный плоский магнит. Гальванометр не показывает ток. Однако, когда магнит приближают к катушке и удаляют от нее, стрелка гальванометра внезапно отклоняется вправо и влево, указывая на возникновение тока в катушке (Рисунок 4.70). Когда магнит останавливается, стрелка возвращается к нулевому делению.

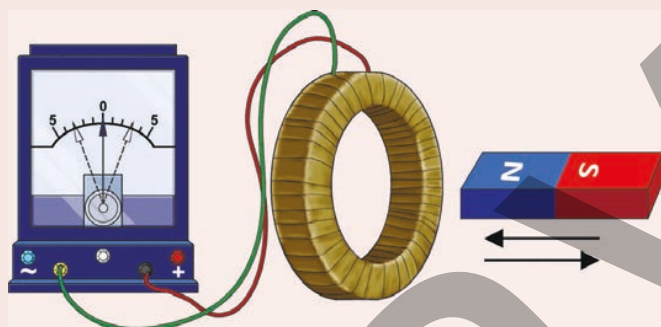


Рисунок 4.70

- **Что вызвало возникновение тока в катушке, не подключенной к источнику тока?**
- **Какой вывод можно сделать из этой экспериментальной задачи?**

#### Ключевые слова

электромагнитная индукция, индукционный ток, переменное магнитное поле

#### Явление электромагнитной индукции

Эксперименты, проведенные Г. Эрстедом (в 1820 году), доказали, что электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. Может ли происходить обратное явление, то есть может ли магнитное поле также порождать электрический ток?

Английский ученый Майкл Фарадей впервые нашел решение этого вопроса в 1831 году. С помощью многочисленных экспериментов он определил, что изменение магнитного поля создает электрический ток в витках катушки (в замкнутой цепи). Вы уже ознакомились с одним из экспериментов Фарадея в экспериментальной задаче. Оказалось, что при приближении или удалении постоянного магнита по отношению к катушке, в ней возникает электрический ток. Отклонение стрелки гальванометра в разных направлениях при движении магнита в ту или иную сторону указывает на изменение направления возникшего в катушке электрического тока.

Если магнит находится в состоянии покоя рядом с катушкой или внутри неё, ток в катушке не возникает. Из этого можно сделать вывод, что произвольное движение магнита вперёд вдоль катушки создаёт электрический ток в её замкнутых катушках. Это явление называется *электромагнитной индукцией*, а ток, созданный в замкнутой цепи, называется *индукционным током*.

**• Явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре в результате изменения магнитного поля называется явлением электромагнитной индукции, а возникший ток называется индукционным током.**

### Что означает изменение магнитного поля?

Изменение количества индукционных линий, пронизывающих замкнутый контур постоянного магнита (увеличение или уменьшение), означает изменение магнитного поля (рис. 4.71).



Рисунок 4.71. Изменение магнитного поля означает изменение числа индукционных линий.

Изменение магнитного поля может быть достигнуто не только перемещением постоянного магнита к катушке или, наоборот, от неё, но и другими способами. Например, если постоянный магнит заменить электромагнитом, изменение магнитного поля в катушке также может быть достигнуто изменением силы тока в электромагните (см.: рис. 4.73). Однако, если катушка движется поступательно в однородном магнитном поле, индукционный ток не возникает, поскольку количество линий индукции, пересекающих плоскость катушки в однородном поле, не изменяется.

• ПОДУМАЙ  
• ОБСУДИ  
• ПОДЕЛИСЬ

Замкнутый контур движется прямолинейно и равномерно в однородном магнитном поле.

**Вопрос.** Возникнет ли в контуре в этом случае индукционный ток? Обоснуйте свой ответ.

### Примените полученные знания

**Принадлежности:** плоский магнит, гальванометр, источник постоянного тока, реостат, катушка (2 шт.), длинный железный сердечник, ключ, соединительные провода.

### Ход работы

#### Этап 1

1. Подсоедините зажимы катушки к гальванометру.
2. Поднесите плоский магнит ближе к катушке, а затем отодвиньте его. В это время следите за стрелкой гальванометра (рис. 4.72, а и б).

3. Поместите плоский магнит внутрь катушки и удерживайте его неподвижно, затем вращайте магнит вокруг своей оси, не отрывая его от поверхности стола, и наблюдайте за стрелкой гальванометра (рис. 4.72, с).

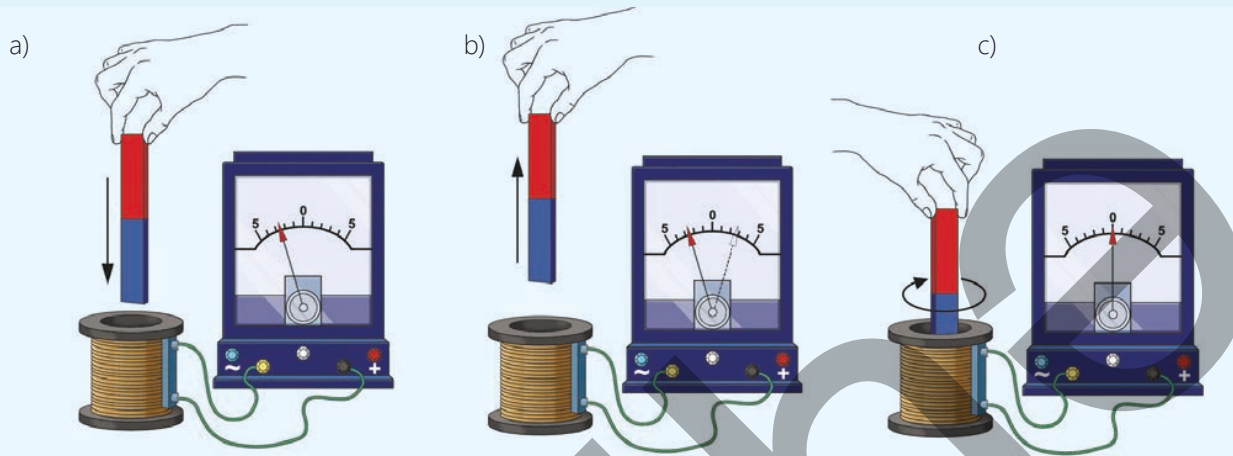


Рисунок 4.72

### Обсудите

- Какой вывод можно сделать из того факта, что стрелка гальванометра отклоняется то вправо, то влево, когда магнит приближается к катушке и удаляется от нее?
- Что означает остановка стрелки гальванометра на нулевом делении, когда магнит находится в состоянии покоя внутри катушки или когда он вращается вокруг своей оси?

### Этап 2

1. Подготовьте электромагнит, вставив железный сердечник в катушку 1. Соедините клеммы электромагнита последовательно с реостатом, ключом и подключите к источнику постоянного тока.

2. Подключите вторую катушку (2) к гальванометру и наденьте ее на выступающую часть железного сердечника электромагнита (рис. 4.73).

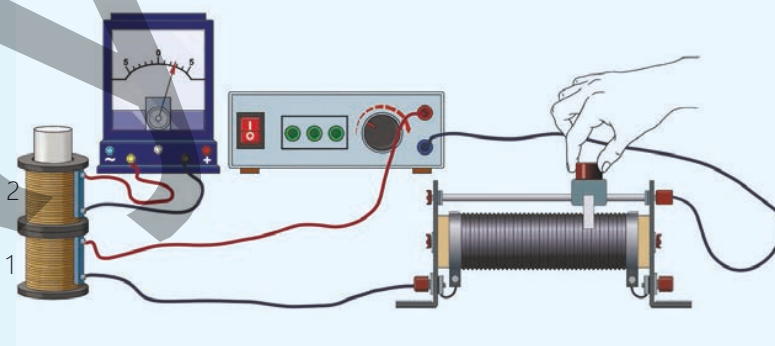


Рисунок 4.73

3. Сначала замкните и разомкните ключ, а затем, при замкнутом ключе, изменяйте силу тока в электромагните 1, перемещая ползунок реостата влево и вправо. Во всех случаях наблюдайте за показаниями гальванометра, подключенного к катушке 2.

### Обсудите

- Почему произвольное изменение силы тока, проходящего через электромагнит 1, привело к возникновению индукционного тока в катушке 2?
- Как увеличение или уменьшение силы тока через электромагнит 1 повлияло на направление индукционного тока в катушке 2?
- Какой вывод можно сделать из проведенного исследования?

**Проверьте полученные знания**

1. Магнит находится в состоянии покоя внутри катушки, а катушка совершает поступательное движение.

**Вопрос.** Возникнет ли в этом случае в катушке индукционный ток? Обоснуйте свой ответ.

2. Замкнутый прямоугольный контур перемещается между полюсами электромагнита, как показано на рисунке 4.74.

**Вопрос.** Возникнет ли в этом контуре индукционный ток? Обоснуйте свой ответ.

3. Длинная катушка, закрепленная на штативе, подключена к гальванометру. Плоский магнит, подвешенный на нити, вводится в катушку, как показано на рисунке 4.75. На рисунке показан момент прохода магнита трех различных состояний относительно катушки – состояний А, В и С.

**Вопрос 1.** Возникнет ли в катушке индукционный ток, если движущийся магнит находится в положении А и С?

**Вопрос 2.** Когда магнит проходит точку В, показания гальванометра равны нулю, несмотря на его движение. В чем причина этого?

**Вопрос 3.** На основе этого эксперимента, как можно сформулировать основное необходимое условие для возникновения индукционного тока?

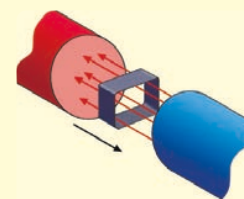


Рисунок 4.74

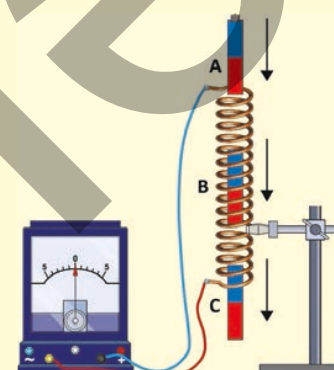


Рисунок 4.75

**ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ – ПРОЕКТ STEAM**

**ПРОЕКТ.** В каком случае в катушке возникает индукционный ток?

**Ход работы**

1. Отсканируйте QR-код с помощью камеры вашего телефона и перейдите на сайт симуляций PhET.

2. Кликните на плоский магнит, который появится на экране, и перемещайте его вправо и влево внутри катушки (Рисунок 4.76, а).

3. В приведенной ниже симуляции необходимо выбрать гальванометр, вставить в катушку магнит и оставить его неподвижным на некоторое время, после чего начните за ним наблюдение (Рисунок 4.76, б).

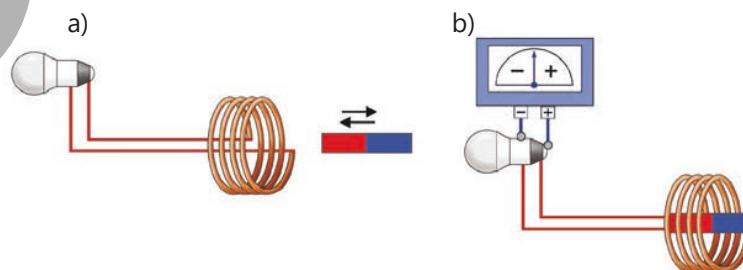


Рисунок 4.76

**Рассмотрите следующие вопросы:**

- Что произошло, когда магнит перемещали внутри катушки?
- Почему загорелась лампочка?
- В чем причина возникновения электрического тока в катушке?

## 4.3.2. Направление индукционного тока. Правило Ленца

### Экспериментальная задача

**Почему замкнутый проводящий контур иногда отталкивается, а иногда притягивается магнитом?**

Замкнутый проводящий контур, состоящий из нескольких витков, подключен к гальванометру. Когда плоский магнит приближают к контуру, одновременно наблюдаются два явления:

- в контуре возникает индукционный ток;
- контур отталкивается магнитом (рис. 4.77, а).

Когда магнит удаляют от контура, происходят обратные процессы:

- изменяется направление индукционного тока;
- контур притягивается к удаляющемуся магниту (рис. 4.77, б).

Из предыдущего урока и этого эксперимента вы еще раз убедились, что возникновение и направление индукционного тока также зависят от изменения магнитного поля.

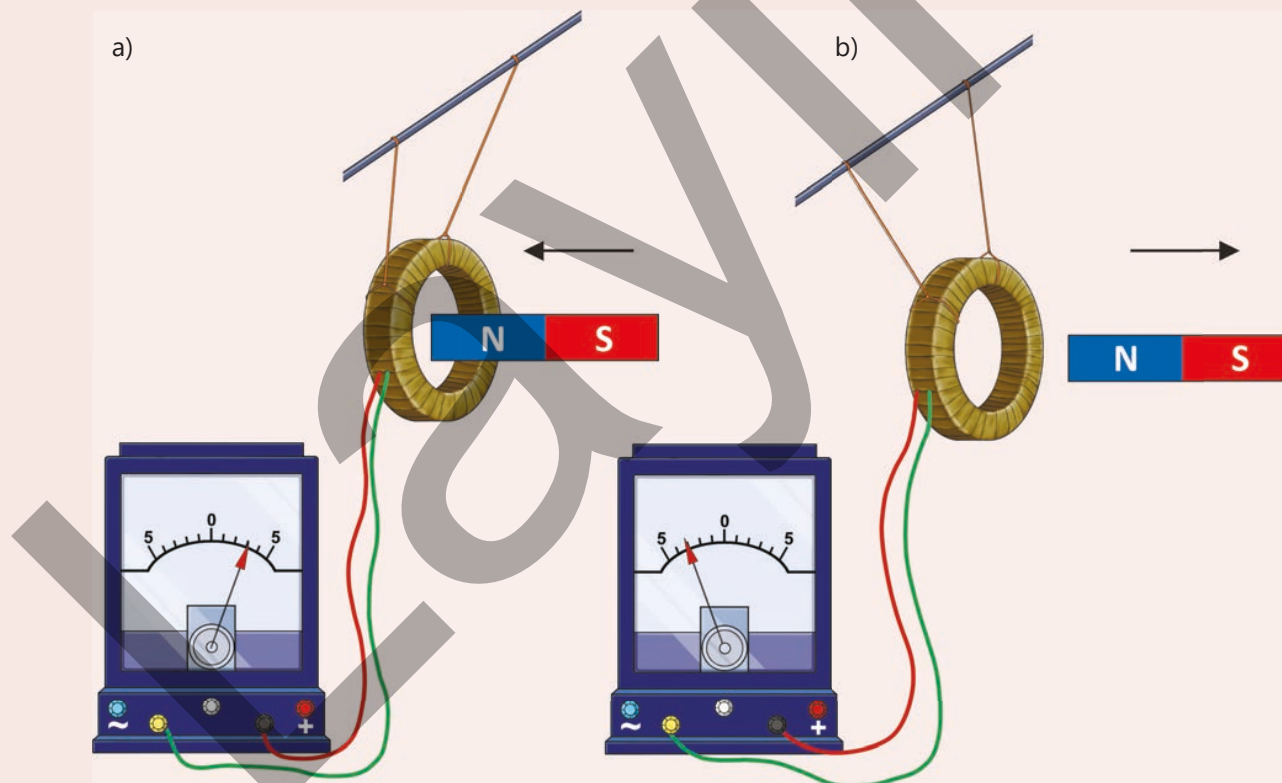


Рисунок 4.77

- Почему замкнутый проводящий контур отталкивается постоянным магнитом, когда его приближают, и притягивается к нему, когда магнит отдаляют?
- Какова связь между изменением направления индукционного тока в контуре и его отталкиванием или притяжением постоянным магнитом?

**Опыт Ленца**

**Принадлежности:** устройство Ленца, постоянный магнит (плоский или подковообразный).

**Описание устройства Ленца:** основная часть этого устройства состоит из стержня с двумя алюминиевыми кольцами, прикрепленными к его концам: одно кольцо сплошное, а другое – с разрезом. Стержень помещен на острие (рис. 4.78, а).

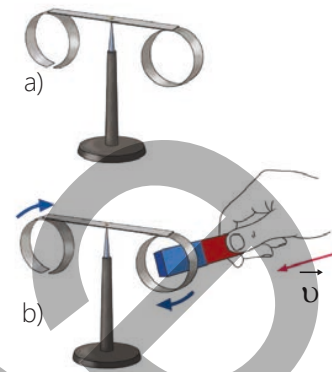


Рисунок 4.78

**Ход работы**

1. Приблизьте один из полюсов магнита к сплошному кольцу и понаблюдайте за происходящим явлением (рис. 4.78, b).
2. Удерживайте магнит неподвижно внутри кольца, а затем удалите его из кольца. Наблюдайте за происходящим явлением.
3. Повторите эксперимент с другим полюсом магнита.
4. Повторите эксперимент с разрезанным кольцом: последовательно приближайте и удаляйте полюса магнита от него.

**Обсудите результат:**

- Что вы наблюдали, когда приближали полюса магнита к сплошному кольцу?
- Что происходило, когда вы удерживали магнит в состоянии покоя в сплошном кольце?
- Что вы наблюдали, когда удаляли магнит от сплошного кольца?
- Что происходило, когда вы повторяли эксперимент с разрезанным кольцом?
- Какое обобщение можно сделать из этих экспериментов?

**Причина возникновения индукционного тока**

Индукционный ток, как и обычный электрический ток, создаётся электрическим полем. Но откуда берётся электрическое поле, создающее индукционный ток? Это поле является индукционным электрическим полем, созданное изменяющимся магнитным полем. Поскольку его источником является изменяющееся магнитное поле, оно имеет замкнутые силовые линии, как и магнитное поле, и по этой причине его также называют вихревым электрическим полем. Вихревое электрическое поле существенно отличается от электростатического поля, поскольку:

- а) электростатическое поле создаётся покоящимся электрическим зарядом, а индукционное электрическое поле создаётся переменным магнитным полем;
- б) линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных;

Линии интенсивности индукционного электрического поля не имеют ни начала, ни конца, они замкнуты, как и линии магнитной индукции.

**Как определить направление индукционного тока?**

В ходе исследования вы обнаружили, что когда вы приближаете магнит к сплошному кольцу, оно отталкивается от магнита, но когда вы отдаляете магнит, кольцо притягивается к нему. То же самое повторяется и при использовании другого полюса магнита. Однако, когда магнит находится в состоянии покоя внутри кольца, взаимодействия между магнитом и кольцом нет.

Когда магнит приближают к кольцу с разрезом, а затем отводят от него, ничего не наблюдается.

Это объясняется тем, что любое изменение магнитного поля, пронизывающего замкнутый контур, приводит к возникновению индукционного тока в этом контуре, тогда как в кольце с разрезом (когда контур разомкнут) индукционный ток не возникает. Следовательно, индукционное электрическое поле, создаваемое в результате изменения числа индукционных линий, проходящих через цепь, вызывает появление индукционного тока в замкнутой проводящей цепи.

Когда магнит приближают к кольцу, индукционный ток направлен таким образом, что создаваемое им магнитное поле противодействует усилению внешнего магнитного поля постоянного магнита. Когда магнит отводят от кольца, индукционный ток направлен таким образом, что создаваемое им магнитное поле противодействует ослаблению внешнего магнитного поля постоянного магнита. Русский физик Эмиль Ленц, изучавший эти явления, в 1833 году сформулировал общее правило, определяющее направление индукционного тока – правило Ленца:

**• Индукционный ток всегда имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле противодействует тому изменению внешнего магнитного поля, которое вызвало этот ток.**

Это означает, что если внешнее магнитное поле усиливается, то магнитное поле индукционного тока будет препятствовать его усилению. В этом случае магнитная индукция поля индукционного тока направлена противоположно индукции внешнего магнитного поля (рис. 4.79, а). Если внешнее магнитное поле ослабевает, то магнитное поле индукционного тока будет препятствовать его ослаблению. В этом случае магнитная индукция магнитного поля индукционного тока направлена в сторону вектора индукции внешнего магнитного поля (рис. 4.79, б)

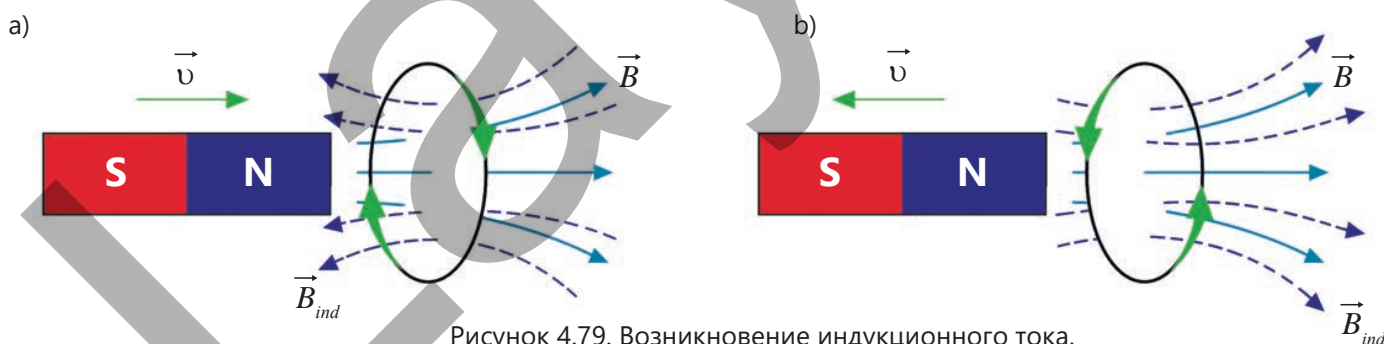


Рисунок 4.79. Возникновение индукционного тока.

- ПОДУМАЙ
- ОБСУДИ
- ПОДЕЛИСЬ

Плоский магнит удаляется от катушки (рис. 4.80).

**Вопрос 1.** Как направлен индукционный ток, возникший в катушке?

**Вопрос 2.** Как направлены линии индукции магнитного поля, создаваемого индукционным током? С помощью какого правила удобнее всего определить это направление?

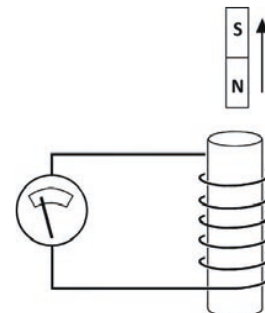


Рисунок 4.80

**Примените полученные знания**

Представьте, что южный полюс плоского магнита удаляется от катушки (см. рис. 4.80).

**Вопрос 1.** Как изменится поле постоянного магнита вокруг катушки: усилится или ослабнет?

**Вопрос 2.** В какую сторону будет направлено это поле?

**Вопрос 3.** Как будет направлено магнитное поле индукционного тока в катушке, чтобы компенсировать ослабление внешнего магнитного поля?

**Вопрос 4.** Как при этом будет направлен индукционный ток в катушке?

**Проверьте полученные знания**

1. На рисунке 4.81 показаны направление индукционного тока в катушке и плоский магнит, удаляющийся от катушки.

**Вопрос.** Какой полюс магнита расположен ближе к катушке?

2. Две неподвижные катушки расположены, так как показано на рисунке 4.82. Гальванометр, подключенный к одной из катушек, фиксирует возникновение индукционного тока.

**Вопрос 1.** В каком случае это возможно?

**Вопрос 2.** Как можно определить направление индукционного тока в катушке?

**Вопрос 3.** Какое правило удобно использовать для определения направления линий магнитной индукции, поля, создаваемого индукционным током? Обоснуйте свой ответ.

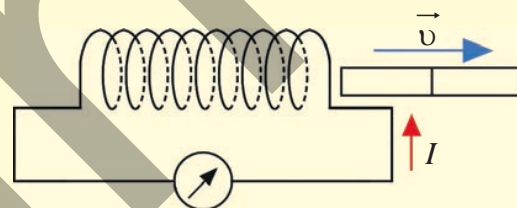


Рисунок 4.81

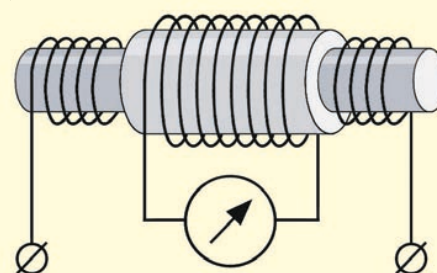


Рисунок 4.82

## Беспроводной адаптер

Некоторые современные смартфоны, «умные» часы и наушники работают с использованием технологии беспроводной передачи энергии (рис. 4.83). Эта технология основана на явлении электромагнитной индукции.

## Принцип работы

*Можно ли зарядить любой телефон или электронные часы с помощью этого адаптера?*

Когда переменный ток проходит через катушку, расположенную внутри беспроводного адаптера, вокруг нее создается переменное магнитное поле. Когда вторая катушка, расположенная внутри телефона, помещается в это магнитное поле, согласно закону Фарадея, в ней создается индукционный ток.

Этот ток заряжает батарею — происходит накопление электрической энергии (рис. 4.84).

## Технологическое значение

Этот метод позволяет осуществлять беспроводную передачу энергии, снижает износ электрических контактов и позволяет создавать водонепроницаемые устройства.



Рисунок 4.83. Беспроводной адаптер.

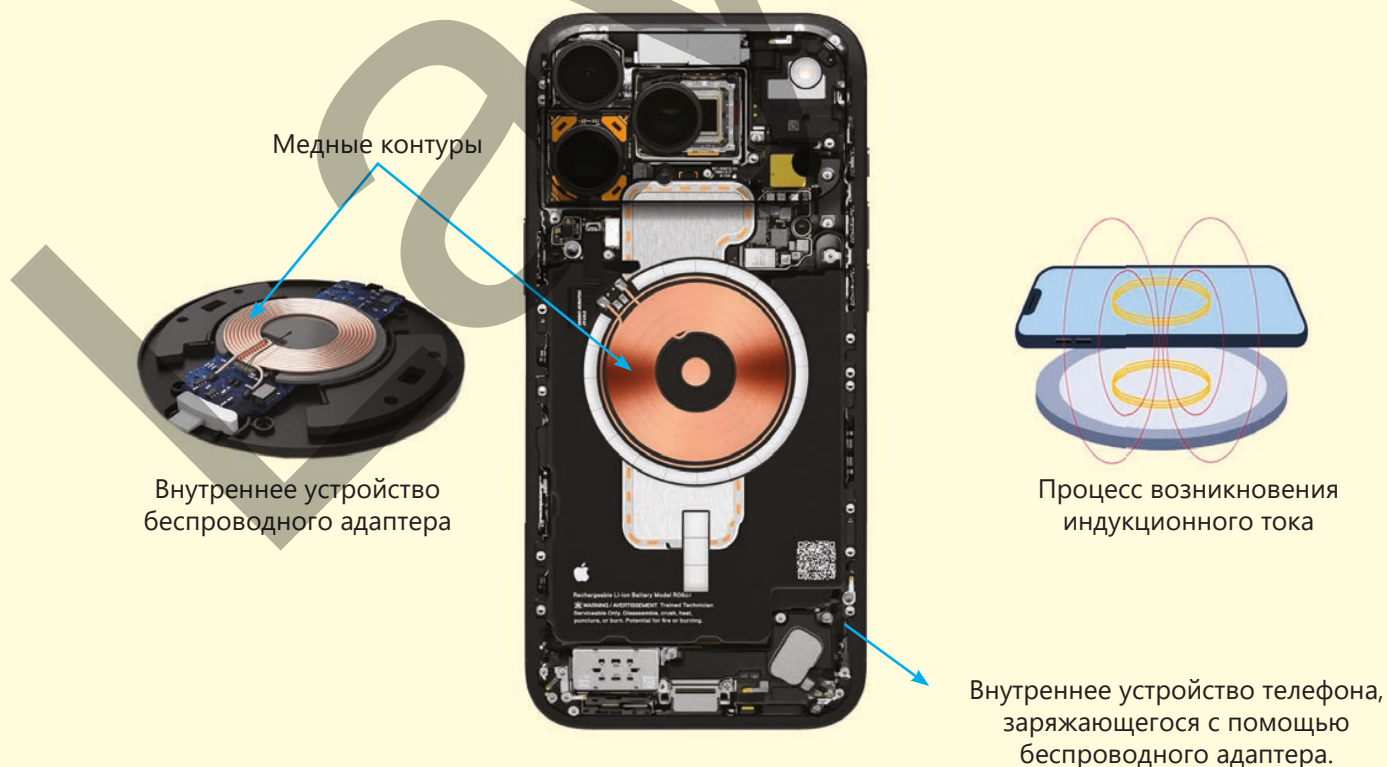
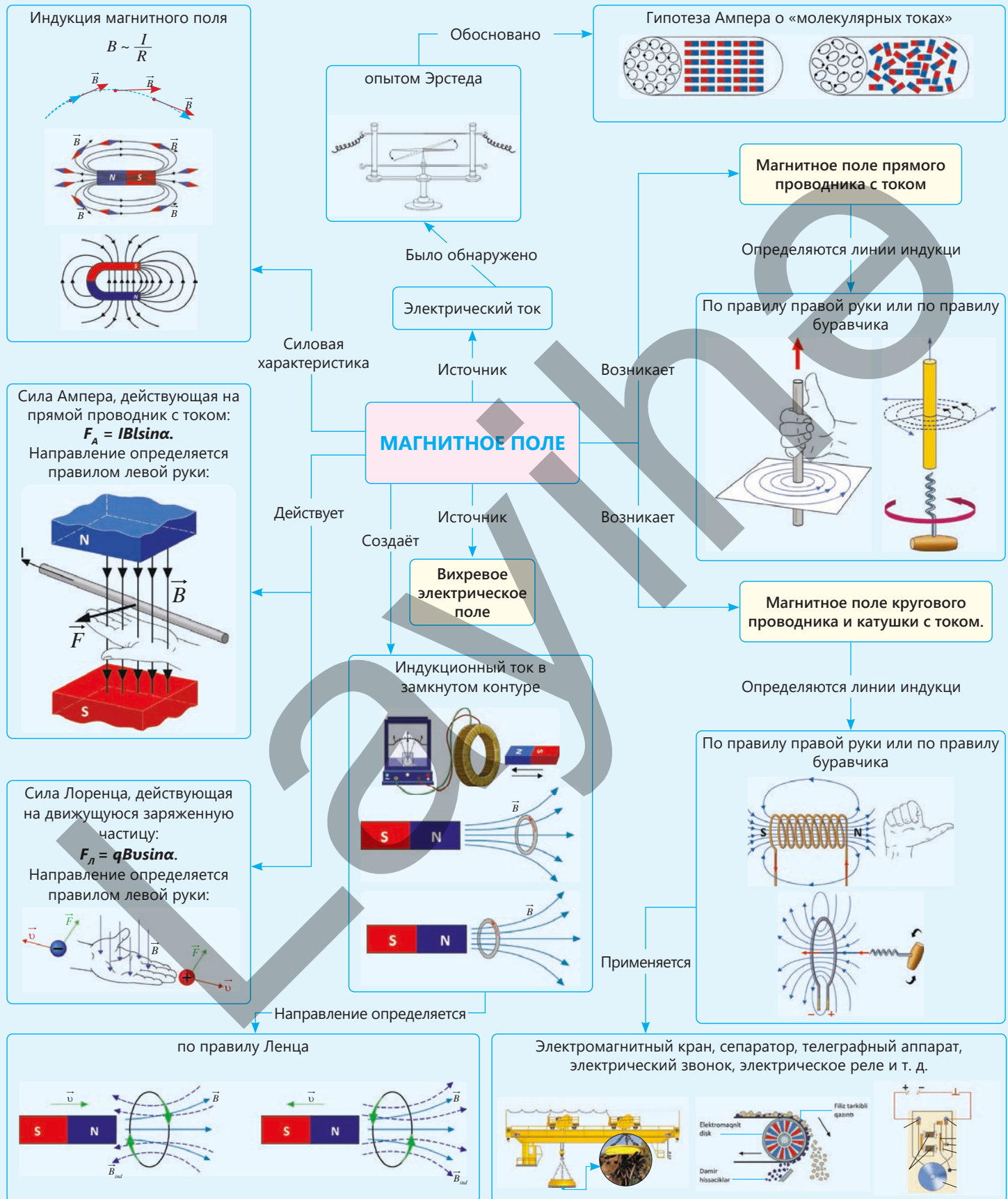


Рисунок 4.84

# Обобщение



# Обобщающие задания

1. Г. Эрстед экспериментально обнаружил, что электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. На основании этого факта А. Ампер выдвинул гипотезу «молекулярных токов» магнитного поля.

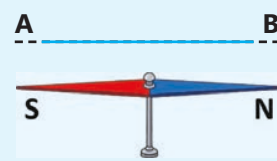


Рисунок 4.85

**Вопрос 1.** В чем заключается физический смысл гипотезы «молекулярных токов»?

**Вопрос 2.** Если электрический ток в прямом проводнике направлен от А к В, то какой полюс магнитной стрелки будет направлен к нам (Рисунок 4.85)?

**Вопрос 3.** На рисунке 4.86 изображено поперечное сечение прямого проводника с током и силовые линии магнитного поля, которое он создает вокруг себя. Как направлен ток в проводнике относительно плоскости рисунка: перпендикулярно к плоскости рисунка от нас или к нам?

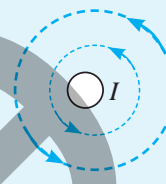


Рисунок 4.86

**Вопрос 4.** Два положительных иона движутся перпендикулярно плоскости рисунка параллельно друг другу. Какой цифрой обозначена сила, с которой магнитное поле левого иона действует на правый ион (Рисунок 4.87)?

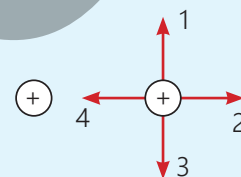


Рисунок 4.87

2. На рисунке 4.88 показано поперечное сечение проводника с током. Ток направлен перпендикулярно плоскости рисунка к наблюдателю.

**Вопрос.** Какой цифрой обозначена стрелка, совпадающая с направлением вектора индукции магнитного поля тока точке N?

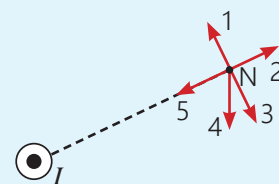


Рисунок 4.88

3. На рисунке 4.89 показан прямой проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле.

**Вопрос 1.** Как направлена сила Ампера?

**Вопрос 2.** Определите силу Ампера, если сила тока в проводнике, помещенном в магнитном поле, равна 3 А, длина проводника равна 1 м, а модуль индукции магнитного поля равен  $B = 0,6$  Тл?

**Вопрос 3.** Как изменится направление и величина силы Ампера, если изменить направление тока в проводнике?

**Вопрос 4.** Как изменится величина силы Ампера, если проводник расположен под углом  $30^\circ$  к вектору магнитной индукции?

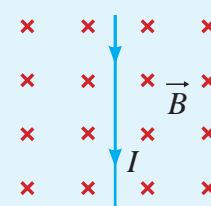


Рисунок 4.89

4. На рисунке 4.90 показана рамка с током, помещенная в магнитное поле. Рамка вращается против часовой стрелки.

**Вопрос 1.** Как будет направлен электрический ток в рамке?

**Вопрос 2.** Может ли пара сил, действующая на рамку, вызвать ее периодическое вращение? Обоснуйте свой ответ.

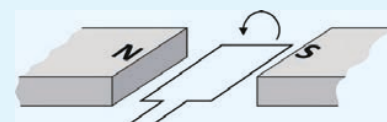


Рисунок 4.90

5. На рисунке 4.91 показаны прямой проводник с током, сила Лоренца, действующая на

положительно заряженную частицу в верхней части плоскости рисунка, и направление вектора скорости, отрицательно заряженной частицы в нижней части. Величина заряда в частицах одинакова и равна  $q = 8 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Вопрос 1.** Как направлена сила Лоренца, действующая на положительный заряд?

**Вопрос 2.** Как направлена сила Лоренца, действующая на отрицательный заряд?

**Вопрос 3.** Определите модуль индукции магнитного поля проводника с током, если сила Лоренца, действующая на положительно заряженную частицу, равна  $1,6 \cdot 10^{-4}$  Н, а скорость частицы равна  $400 \frac{м}{с}$ ?

**6. Внутри контура электрической цепи, состоящей из источника тока и реостата (рис. 4.92), находится замкнутый проводящий контур А. Ползунок реостата находится в среднем положении.**

**Вопрос 1.** Возникнет ли индукционный ток в контуре после перемещения ползунка реостата?

**Вопрос 2.** На что влияют скорость и направление движения ползунка?

**7. На рисунке 4.93, а, показан плоский магнит и замкнутый контур, равномерно движущиеся с одинаковой скоростью в одном направлении**

**Вопрос 1.** Возникнет ли индукционный ток в контуре?

**Вопрос 2.** Если замкнутый контур движется в магнитном поле постоянного магнита так, как показано на рис. 4.93, б, возникнет ли индукционный ток? Обоснуйте свой ответ.

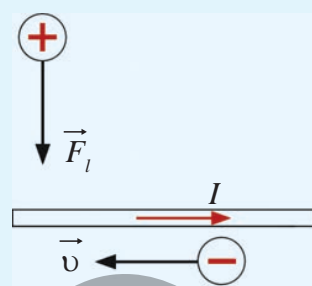


Рисунок 4.91

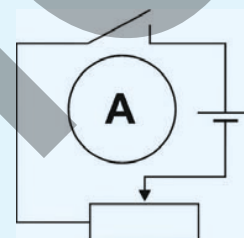


Рисунок 4.92

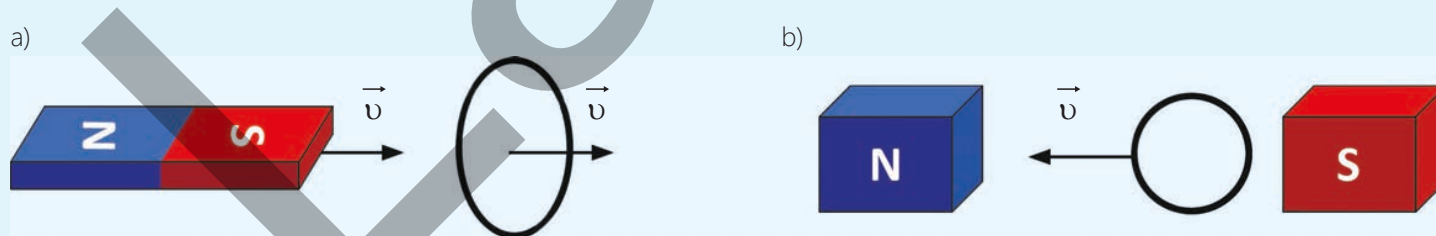


Рисунок 4.93

**Акцепторная примесь** ("acceptor" — латинское слово, означающее «принимаю») — это примесь, число валентных электронов которой меньше, чем число валентных электронов атома полупроводника.

**Полупроводник с акцепторной примесью** — проводимость осуществляется преимущественно за счет дырок.

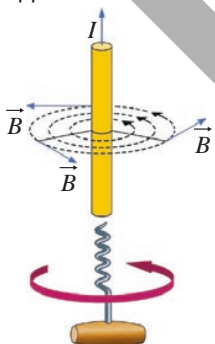
**Правило левой руки для силы Ампера** — левую руку следует расположить в магнитном поле так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь перпендикулярно, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока. При этом большой палец, открытый под углом  $90^\circ$ , указывает направление силы Ампера, действующей на проводник с током.

**Модуль силы Ампера** — если проводник с током помещен в однородное магнитное поле, то модуль действующей на него силы Ампера равен произведению силы тока, модуля магнитной индукции, длины проводника и синуса угла между направлением тока и вектором магнитной индукции:

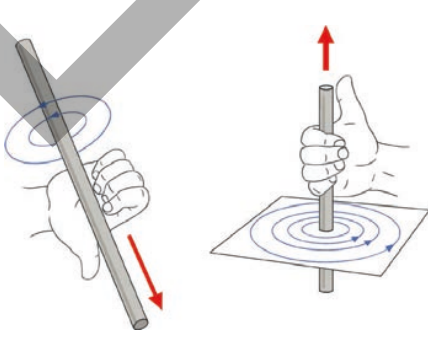
$$F_A = IBlsina.$$

**Вихревое поле** — поле, линии магнитной индукции которого всегда замкнуты, они не имеют ни начала, ни конца.

**Правило буравчика для прямого проводника с током** — если поступательное движение воображаемого буравчика происходит в направлении тока в проводнике, то направление вращения его рукоятки будет указывать на направление вектора индукции магнитного поля, создаваемой этим током:



Правило буравчика



Правило правой руки

**Правило правой руки для прямого проводника с током** — если воображаемый прямой проводник с током обхватить правой рукой так, чтобы большой палец указывал направление тока, то направление остальных четырех пальцев, согнутых вокруг проводника, будет указывать направление линий магнитного поля.

**Правило правой руки для катушки с током** — если мысленно обхватить катушку правой рукой так, чтобы четыре согнутых пальца указывали направление тока в её витках, то отогнутый большой палец укажет направление линий магнитного поля внутри катушки.

**Правило буравчика для кругового тока** — если рукоятка буравчика вращается в направлении воображаемого кругового тока, то направление его поступательного движения будет указывать направление индукции магнитного поля внутри кругового тока.

**Дырочная проводимость** — электрическая проводимость, вызванная движением дырок в полупроводнике.

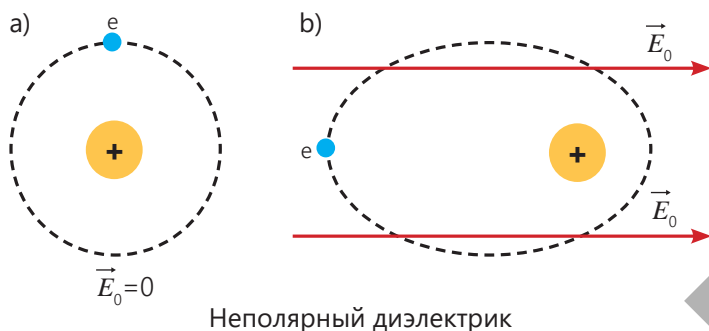
**Диэлектрики** — вещества, не содержащие свободных носителей заряда.

Диэлектрики бывают двух типов: полярные и неполярные:

- **Полярный диэлектрик** — это диэлектрик, молекулы которого поляризованы, то есть «центры» положительных и отрицательных зарядов в молекуле вещества не совпадают. Молекулы полярных диэлектриков ведут себя как диполи благодаря своим электрическим свойствам.
- **Диполь** — система, состоящая из двух зарядов одинаковой величины и противоположных знаков, расположенных на определенном расстоянии друг от друга.

**Неполярный диэлектрик** — диэлектрик, в котором электронные орбиты обычно симметричны, т.е. центры положительных и отрицательных зарядов совпадают (а). При введении такого диэлектрика во внешнее электрическое поле эта симметрия нарушается: в результате небольшого

смещения электронов к положительному полюсу, создающему поле, центры положительных и отрицательных зарядов внутри атома слегка разнесены, и атом «ведет себя» как диполь. Таким образом, неполярный диэлектрик также частично поляризуется во внешнем поле, и внутреннее поле, создаваемое этими диполями, ослабляет внешнее поле (b).



Неполярный диэлектрик

**Донорная примесь** – если число валентных электронов добавляемого атома примеси больше числа валентных электронов атома полупроводника, он называется донорной примесью («донор» – латинское слово, означающее «даю»).

**Донорные полупроводники** – полупроводники, в которых проводимость осуществляется преимущественно за счет электронов. Донорные полупроводники также называют n-типовыми полупроводниками.

**Мощность электрического тока** – равна произведению силы тока и напряжения:

$$P = IU.$$

**Электродвигатель** – это устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую. Принцип его работы основан на явлении вращения рамки с током, помещенной в магнитное поле, под действием силы Ампера.

**Электромагнит** – это катушка с железным сердечником внутри. Когда через витки катушки проходит ток, создается магнитное поле, и железный сердечник приобретает магнитные свойства; когда ток прерывается, магнитное поле исчезает, и сердечник размагничивается.

**Явление электромагнитной индукции** – явление возникновения электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении пронизывающего его магнитного поля. Возникший при этом ток называется индукционным.

**Электронная проводимость** – электрическая проводимость, обусловленная движением свободных электронов в полупроводнике.

**Элементарные токи** – токи, возникающие в результате движения электронов в атоме по орбитам.

**Схема распределителя напряжения (или делителя)** – простая схема, позволяющая получить меньшее напряжение из большего. Эта схема использует эффект распределения напряжения между двумя резисторами, соединенными последовательно, для передачи постоянной части напряжения на входе источника ( $U_{Вход}$ ) на выход цепи ( $U_{Выход}$ ):

$$U_{Выход} = \frac{U_{Вход}}{R_1 + R_2} \cdot R_2.$$

Простейшая схема распределителя напряжения состоит из источника напряжения на входе и двух резисторов.

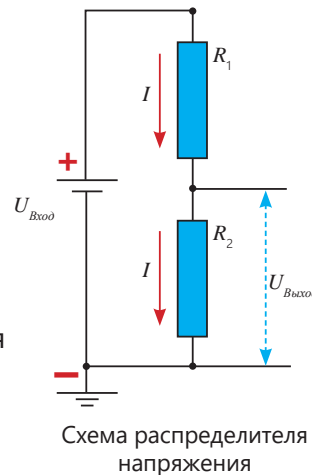


Схема распределителя напряжения

**Ионизация** – внешние воздействия, ионизирующие нейтральные атомы и молекулы газа, называются ионизаторами.

**Проводники** – вещества, проводящие электрический заряд, называются проводниками.

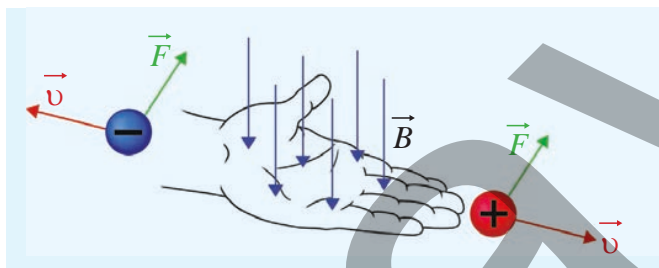
**Компас** – устройство, ориентирующееся по магнитному полю Земли и указывающее направление север-юг.

**Газовый разряд** – это упорядоченное движение электронов, положительных и отрицательных ионов в газе под действием электрического поля. Существует два вида газовых разрядов:

самостоятельный и несамостоятельный газовый разряд. Самостоятельный газовый разряд — это явление, при котором газ проводит электрический ток без внешнего воздействия. Несамостоятельный газовый разряд — это газовый разряд, возникающий под воздействием ионизатора.

**Правило Ленца** – индукционный ток направлен таким образом, что создаваемое им магнитное поле противодействует любому изменению внешнего магнитного поля, создающего этот ток.

**Правило левой руки для силы Лоренца** – левую руку следует держать в магнитном поле так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь перпендикулярно, а четыре вытянутых пальца были направлены в направлении движения положительного заряда (противоположно движению отрицательного заряда). В это время большой палец, открытый под углом  $90^\circ$ , будет указывать направление силы Лоренца, действующей на заряд.



Правило левой руки

**Модуль силы Лоренца** равен  $F_L = q_0 B v \sin \alpha$ . Здесь  $v$  – скорость заряженной частицы, движущейся в магнитном поле, а  $\alpha$  – угол между вектором индукции магнитного поля  $B$  и вектором скорости  $v$  заряженной частицы.

**Силовые линии магнитного поля** – это воображаемые линии, указывающие направление магнитного поля.

**Магнитное поле** – это вид материи, создаваемый движущимися электрическими зарядами.

**Индукция магнитного поля** – силовая характеристика магнитного поля, обычно называется индукцией магнитного поля (или

сокращенно «магнитной индукцией»).

Индукция магнитного поля ( $B$ ) – это физическая величина, характеризующая силу и направление магнитного поля. В системе СИ её единицей измерения является тесла (Тл).

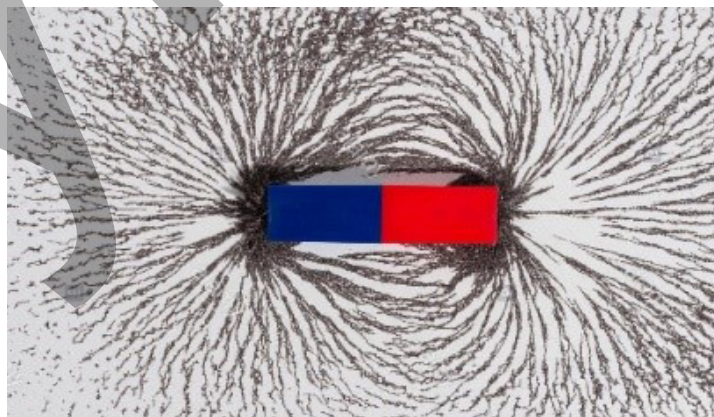
**Модуль индукции магнитного поля** равен отношению модуля силы Ампера ( $F_{\text{макс}}$ ) к произведению силы тока ( $I$ ) в проводе и его длины:

$$B = \frac{F_{\text{макс}}}{Il}$$

**Магнитосфера** – магнитное поле Земли называется магнитосферой.

**Магнитная буря** – сильное и временное изменение магнитного поля Земли, вызванное взаимодействием потоков заряженных частиц, обладающих большой энергией, с магнитосферой Земли в результате взрывов на Солнце.

**Магнитный спектр** – видимое представление структуры магнитного поля с помощью железных опилок или аналогичных методов.



Магнитный спектр

**Сопротивление проводника** – зависит от материала проводник (удельного сопротивления  $\rho$ ), длины ( $l$ ) и площади поперечного сечения ( $S$ ):

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

Здесь  $R$  – сопротивление проводника,  $l$  – длина проводника,  $S$  – площадь поперечного сечения проводника, а  $\rho$  – удельное сопротивление проводника. Удельное сопротивление – это физическая величина, зависящая от материала, из которого изготовлен проводник.

**Удельное сопротивление** – это физическая величина, численно равная сопротивлению проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>. Единица измерения удельного сопротивления в СИ – омметр (1 Ом · м):

$$[\rho] = \frac{[R] \cdot [S]}{[l]} = \frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Поскольку площадь поперечного сечения проводника мала, она часто выражается в мм<sup>2</sup>. Поэтому единицей измерения удельного сопротивления является также  $[\rho] = 1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

**Зависимость сопротивления проводника от температуры** – в небольшом диапазоне температур сопротивление металлических проводников линейно зависит от температуры, и эта зависимость выражается формулой:

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

Здесь  $R_0$  – сопротивление проводника при температуре 0°C,  
 $R$  – сопротивление проводника при определенной температуре  $t$ ,  
 $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления. Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при его нагревании на 1°C:  $\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 t}$ .

**Плазма** – частично или полностью ионизированное состояние газа.

**Резистор** – элемент электрической цепи, обладающий электрическим сопротивлением (англ.: resistor).

**Ротор** (лат. «рото» – вращаю) – вращающаяся часть двигателя, расположенная внутри статора. Ротор состоит из электромагнита в виде рамки с цилиндрическим сердечником. Иногда его называют якорем.

**Катушка** – устройство, полученное путем многократной намотки изолированного проводника на цилиндрический (картонный или пластиковый) каркас.

**Свободные электроны** – электроны, которые покидают атомы и способны свободно перемещаться.

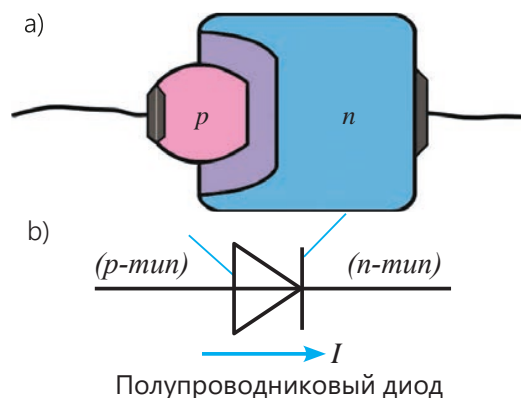
**Статор** (от латинского «sto» – стою) – неподвижная часть электродвигателя, состоящая из неподвижного магнита или катушки с железным сердечником (электромагнита), прикрепленной к корпусу. Статор иногда называют индуктором. В статоре создается сильное магнитное поле.

**Молния** – кратковременная вспышка света в виде ломаной линии, возникающая при электрическом разряде между основанием облака и землей, между двумя облаками или внутри облака.

**Пояса Ван Аллена** – это радиационные зоны, расположенные в магнитосфере Земли, где накапливаются заряженные частицы, обладающие большой энергией.

**Полупроводник** – вещество, количество свободных носителей заряда, которого зависит от внешних воздействий (температура, освещение, добавление примеси в его состав и т. д.).

**Полупроводниковый диод** – устройство, состоящее из *p-n-перехода*, образованного путем объединения *p*-типа и *n*-типа кристаллов, и двух контактов для подключения к электрической цепи.



## BURAXILIŞ MƏLUMATI

Ümumi təhsil müəssisələrinin 9-cu sinifləri üçün  
fizika fənni üzrə dərslik (2-ci hissə)

Tərtibçi heyət:

Müəlliflər Rasim Abdurazaqov  
Dünyamalı Məmmədov  
Əli Ağacanlı  
Zamir Dadaşov

Dil redaktorları Əsgər Quliyev, Aida Quliyeva  
Bədii redaktor Taleh Məlikov  
Texniki redaktor Zeynal İsayev  
Dizaynerlər Taleh Məlikov, Eldəniz Xocayev  
Rəssam Fərid Quliyev  
Korrektor Aqşin Məsimov

Rəyçi

Sevda Əsgərli – 96 №-li tam orta məktəbin fizika müəllimi, əməkdar müəllim

© Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi

Müəlliflik hüquqları qorunur. Xüsusi icazə olmadan bu nəşri və yaxud onun hər hansı bir hissəsini yenidən çap etdirmək, surətini çıxarmaq, elektron informasiya vasitələri ilə yaymaq qanuna ziddir.

ISBN 978-9952-550-10-8

Hesab-nəşriyyat həcmi: 12,8. Fiziki çap vərəqi: 14. Səhifə sayı: 112.  
Kəsimdən sonra: 220 × 275. Kağız formatı: 57 × 90<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Şrift və ölçüsü: Corbel 12pt.  
Ofset çapı. Sifariş\_\_\_\_. Tiraj: . Pulsuz. Bakı – 2026

**Pilot siniflərdə istifadə üçün nəzərdə tutulur.**

Əlyazmanın yığıma verildiyi və çapa imzalandığı tarix:

Çap məhsulunu hazırlayan:  
Azərbaycan Respublikasının Təhsil İnstitutu (Bakı ş., A.Cəlilov küç., 86).

# Pulsuz



## Əziz məktəbli !

Bu dərslik sizə Azərbaycan dövləti tərəfindən bir dərs ilində istifadə üçün verilir. O, dərs ili müddətində nəzərdə tutulmuş bilikləri qazanmaq üçün sizə etibarlı dost və yardımçı olacaq.

İnanırıq ki, siz də bu dərsliyə məhəbbətlə yanaşacaq, onu zədələnmələrdən qoruyacaq, təmiz və səliqəli saxlayacaqsınız ki, növbəti dərs ilində digər məktəbli yoldaşınız ondan sizin kimi rahat istifadə edə bilsin. Sizə təhsildə uğurlar arzulayırıq!

