

Глава 6. МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 56. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Неподвижные электрические заряды создают вокруг себя электрическое поле. Движущиеся заряды создают, кроме того, магнитное поле.

1⁰. **Магнитное поле создается проводниками с токами, движущимися электрически заряженными частицами и телами, а также намагниченными телами и переменным электрическим полем.**

Магнитное поле, характеристики которого не изменяются с течением времени, называют *стационарным*. В противном случае магнитное поле называют *переменным* (*нестационарным*).

Возникновение стационарного магнитного поля вблизи проводника с током впервые обнаружил в 1820 г. датский ученый **Ханс Кристиан Эрстед**. Его опыт, обнаруживший **взаимосвязь электричества и магнетизма**, имел большое значение для развития учения об электромагнитных явлениях.

Эрстед наблюдал следующее. Если магнитную стрелку, которая может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, поместить под прямолинейным проводником с постоянным током, то она поворачивается, как показано на *рис. 173*, стремясь расположиться перпендикулярно к проводнику. Стрелка тем точнее совпадает с этим направлением, чем больше сила тока и чем ближе она к проводнику. При изменении направления тока стрелка отклоняется в противоположную сторону, *рис. 174*.

2⁰. В дальнейшем было установлено, что **магнитное поле существует вокруг любого проводника с током, т. е. вокруг движущихся электрических зарядов. Электрический ток и магнитное поле неотделимы друг от друга.**

Магнитное поле обнаруживается по своему действию на движущиеся частицы и тела, обладающие электрическим зарядом.

На намагниченные тела магнитное поле действует независимо от того, движутся они или неподвижны.

3⁰. Таким образом, вокруг неподвижных электрических зарядов существует только электрическое поле, вокруг движущихся зарядов, т. е. электрического тока, существует *и электрическое, и магнитное поле*. Магнитное поле появляется вокруг проводника, когда в последнем возникает ток, поэтому **ток следует рассматривать как источник магнитного поля**. В этом смысле надо понимать выражения «магнитное поле тока» или «магнитное поле, созданное током»

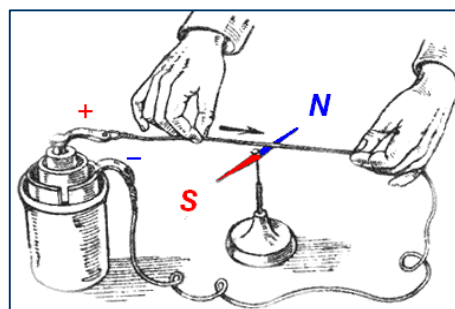


Рис. 173. Опыт Эрстеда: магнитная стрелка стремится повернуться перпендикулярно направлению тока.

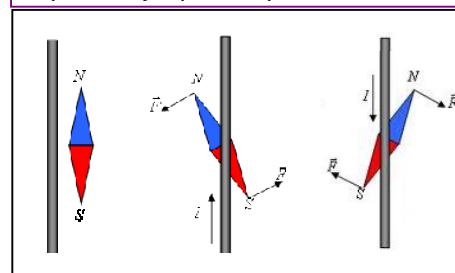


Рис. 174. При изменении направления тока стрелка отклоняется в противоположную сторону.



Вопросы

1. Какие явления наблюдаются в цепи, в которой существует электрический ток?
2. Какие магнитные явления вам известны?
3. В чем состоит опыт Эрстеда и в чём его значение для развития электродинамики?
4. Какая связь существует между электрическим током и магнитным полем?

§ 57. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО ТОКА. МАГНИТНЫЕ ЛИНИИ

1⁰. Вам известно, что существование магнитного поля вокруг проводника с электрическим током можно обнаружить, используя магнитную стрелку.

Другой способ – использование мелких железных опилок. В магнитном поле опилки намагничиваются и становятся магнитными стрелочками. Каждая стрелочка устанавливается вдоль направления действия магнитного поля. Таким образом, магнитное поле (как и электростатическое) можно сделать «видимым».

На рис. 175 изображена картина магнитного поля прямого проводника с током.

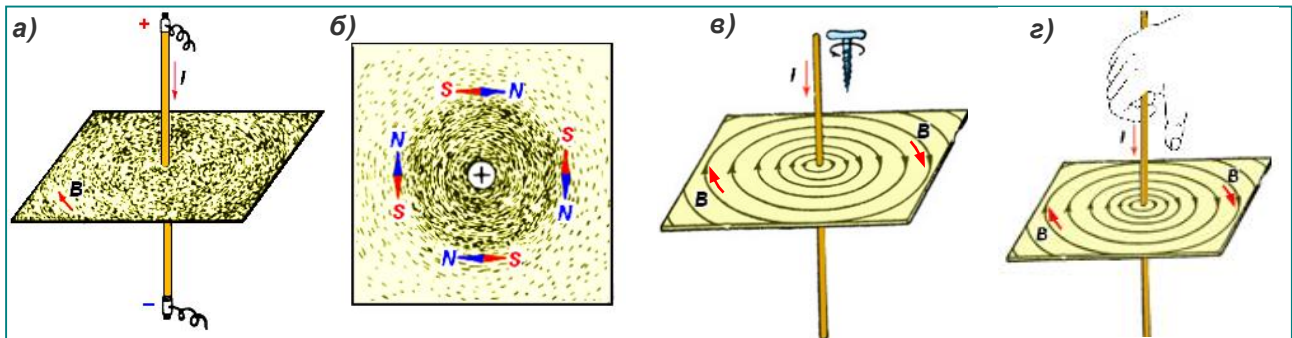


Рис. 175. Магнитное поле прямого проводника с током. Железные опилки располагаются по концентрическим окружностям (а), как и магнитные стрелки (б). Они указывают направление линий магнитного поля B . Для определения относительных направлений тока I и магнитного поля B удобно использовать «правило буравчика» (в) или «правило правой руки» (г).

Для получения такой картины прямой проводник пропускают сквозь лист картона. На картон насыпают тонкий слой железных опилок, включают ток, и опилки слегка встряхивают. Под действием магнитного поля тока железные опилки намагничиваются и располагаются вокруг проводника по концентрическим окружностям, центры которых лежат на проводнике с током.

На рис. 175, б), показано расположение магнитных стрелок вокруг проводника с током, который расположен перпендикулярно плоскости чертежа, ток в нем направлен от нас, что условно обозначено кружком с крестиком.

Таким образом, цепочки, которые образуют в магнитном поле железные опилки, показывают форму магнитных линий поля.

Линии, вдоль которых в магнитном поле располагаются оси маленьких магнитных стрелок (или железных опилок), называют **магнитными силовыми линиями** или. **Направление, которое указывает северный полюс магнитной стрелки в каждой точке поля, принимается за направление линии магнитной индукции.**

Из опытов можно заключить, что направление линий магнитной индукции связано с направлением тока в проводнике, создающим магнитное поле.

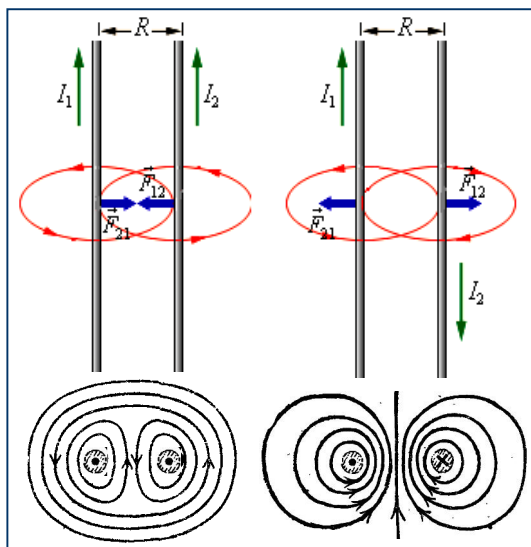


Рис. 176. Магнитные поля параллельных токов, сонаправленных и противоположных. Внизу показан вид результирующих полей.

2⁰. В § 37, п. 3⁰ вы узнали, что между двумя параллельными проводниками с токами одного направления действует сила притяжения, а с токами разных направлений – сила отталкивания, рис. 176.

Чтобы понять, почему это происходит полезно вспомнить свойства магнитных силовых линий, подмеченные ещё Фарадеем.

Во-первых, **магнитные силовые линии стремятся сократить свою длину** (как растянутые резиновые нити); во-вторых, **магнитные силовые линии одного направления отталкиваются друг от друга, а силовые линии, противоположно направленные, притягиваются и взаимно уничтожают друг друга.**

В верхней части рис. 176 условно показаны

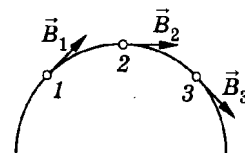
(красным цветом) магнитные линии каждого из токов (это, как мы установили, – окружности). На самом деле магнитные линии токов *складываются* (результаты сложения показаны внизу чёрным цветом).

Видно, что между направленными в одну сторону токами магнитные линии направлены навстречу друг другу. Они *взаимно уничтожают друг друга и провода притягиваются* (левая часть *рис. 176*).

Наоборот, между токами направленными противоположно магнитные линии направлены в одну сторону. Плотность их здесь увеличена. Поэтому линии поля отталкивают друг друга, пытаясь раздвинуть провода в стороны.

3⁰. Магнитное поле характеризуется вектором \vec{B} , который называют **вектором магнитной индукции**. Он направлен по касательной к магнитным линиям по направлению **северного полюса** магнитных стрелочек.

Вектор магнитной индукции \vec{B} является основной характеристикой магнитного поля.



Напомним, что основной характеристикой электростатического поля является вектор \vec{E} . Потом вы узнаете, эти вектора не только в физическом, но и в математическом смысле отличаются друг от друга.

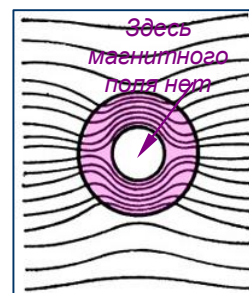
4⁰. Важной особенностью линий магнитной индукции является то, что они не имеют ни начала, ни конца. Они всегда замкнуты. Вспомним, что с электростатическим полем дело обстоит иначе: его силовые линии начинались на положительных, а заканчивались на отрицательных зарядах.

Линии индукции магнитного поля тока представляют собой замкнутые кривые, охватывающие проводник. Такие поля называются **вихревыми**.

Магнитное поле – вихревое поле. Так как магнитное поле существует во всех точках пространства, окружающего проводник с током, то через любую точку можно провести магнитную линию.

Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля. Оно обусловлено тем, что источников – *отдельных «магнитных зарядов» в природе не существует*. Например, магнитная стрелка всегда имеет и северный и южный полюса.

5⁰. Магнитные силовые линии проходят через железо гораздо легче, чем через воздух и другие вещества. Если поместить железный пустотелый шар в магнитное поле, то магнитные силовые линии пройдут через оболочку этого шара, но не попадут в его внутреннюю полость, см. *рис. справа*. Сравните это с «клеткой Фарадея», *рис. 45*.



Данным свойством магнитных силовых линий пользуются в радиотехнике для защиты элементов схемы от влияния со стороны внешних магнитных полей. Такая защита называется **антимагнитным экранированием**.

6⁰. С помощью линий магнитной индукции удобно изображать магнитные поля графически. Их направление соответствует направлению вектора магнитной индукции \vec{B} , а плотность (густота) – модулю этого вектора.



Вопросы

1. Почему для изучения магнитного поля используют железные опилки?
2. Как располагаются железные опилки в магнитном поле прямого тока?
3. Что называют линией магнитной индукции?
4. Какова форма линий магнитной индукции одиночного прямого проводника с током? Двух параллельных проводников с токами одинакового и противоположного направлений?
5. Почему магнитное поле называют вихревым полем? Чем оно отличается от электростатического поля?

§ 58. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОНТУРА И КАТУШКИ С ТОКОМ. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

1⁰. Рассмотрим магнитное поле **кольцевого контура с током**. Линии такого поля вблизи провода должны быть круговыми, и их направление даётся правилом правой руки. Если сложить вклады в поле от всех небольших участков кольцевого контура, получим картину, показанную на, *рис. 177, а*. Одна из линий этого поля направлена по оси кольца. Она уходит в окружающее пространство и возвращается с другой стороны, замыкаясь «через бесконечность». Это поле в сечении горизонтальной плоскостью показано на следующем *рис. 177, б*. Нетрудно понять, что на оси кольцевого контура (в направлении центральной нормали к плоскости контура) интенсивность поля будет максимальной.

Сравните картину такого поля с картиной электростатического поля очень близко расположенных двух разноименных зарядов – диполя, *рис. 15, 17*.

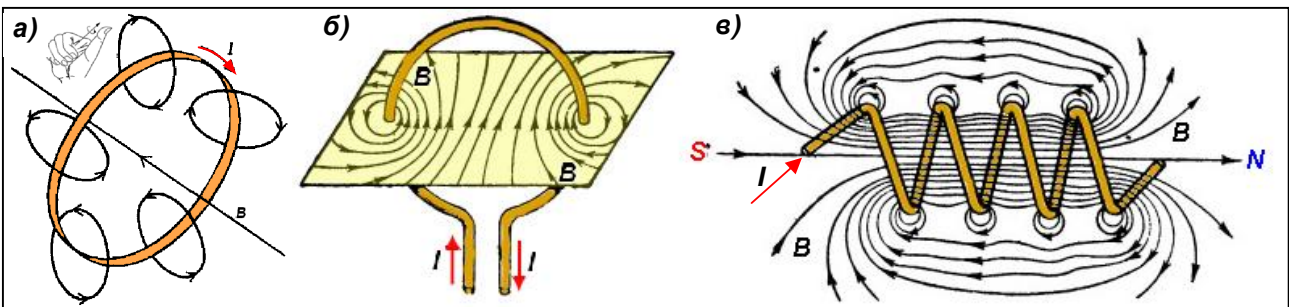


Рис. 177. Применяя правило правой руки к небольшим участкам круглого контура с током, можно представить картину магнитных линий (а). Магнитное поле кольцевой рамки с током в горизонтальной плоскости (б). Картина магнитных линий соленоида из нескольких витков проволоки (в).

2⁰. **Магнитное поле соленоида**. Соленоид (от греческого слова «*солениоиде*» — *трубообразный*) это катушка, состоящая из большого числа витков проволоки, которые образуют винтовую линию. На *рис. 177, в* показана схема соленоида из нескольких витков провода и картина его линий магнитной индукции. Если протяжённость соленоида вдоль оси значительно больше его диаметра, картина линий магнитного поля будет наиболее простой. Внутри соленоида линии поля параллельны друг другу. Это значит, что **внутри соленоида поле однородно**. Отклонения от однородности наблюдаются лишь у концов соленоида (вспомните поле плоского конденсатора, *рис. 19*). Вблизи внешней поверхности соленоида плотность магнитных линий мала. Следовательно, магнитное поле здесь практически отсутствует, *рис. 178*. Чётко выражена ориентация северного и южного полюсов. Расположение полюсов соленоида в зависимости от направления тока можно определить с помощью правила буравчика или правой руки, *рис. 179*.

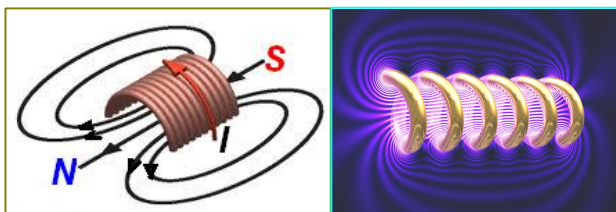


Рис. 178. Магнитное поле соленоида имеет чётко выраженную полярность. Внутри соленоида поле почти однородно: линии индукции параллельны.

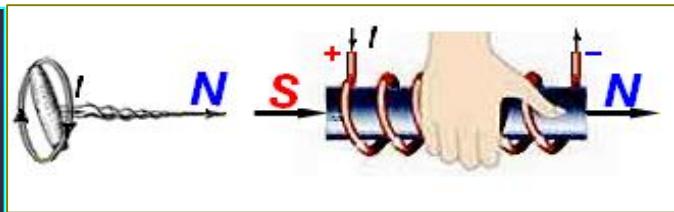


Рис. 179. Расположение полюсов соленоида в зависимости от направления тока определяется с помощью правила буравчика или правой руки.

3⁰. Катушки с большим числом витков проволоки (соленоиды) представляют наибольший практический интерес.

На *рис. 180* изображена такая катушка, включённая в электрическую цепь с источником тока, реостатом и выключателем. Когда в катушке есть ток, железные гвоздики притягиваются к ее концам. При отключении тока они отпадают: катушка

теряет магнитные свойства. Меняя силу тока с помощью реостата, можно менять силу притяжения гвоздиков.

Если подобную катушку с током подвесить на тонких и гибких проводниках, она установится так же, как магнитная стрелка компаса. Один конец её будет обращен к северу, другой — к югу, *рис. 181*. Значит, катушка с током, как и магнитная стрелка, имеет два полюса — северный и южный.

Исследования, выполненные на установке, собранной по *рис. 180*, показывают, что чем больше число витков катушки и сила проходящего через неё тока, тем сильнее её магнитное поле.

Железный сердечник всегда усиливает магнитные свойства катушки, *рис. 182*.

4⁰. Катушка, содержащая внутри себя железный сердечник, называется электромагнитом.

Электромагниты широко применяют в технике. Они удобны тем, что, изменяя силу тока, их магнитное действие можно изменять (усиливать или ослаблять) в широких пределах. Они быстро размагничиваются при выключении тока. В зависимости от назначения их можно изготавливать самых различных размеров.

Над созданием электромагнитов много и успешно работал американский физик Дж. Генри (1797–1878). Он первый применил проволоку, покрытую изоляцией, для обмоток электромагнитов и сконструировал прообраз электромагнитного телеграфа. Используя электромагнит, американский художник и изобретатель Морзе публично продемонстрировал практически пригодную телеграфную систему, которую позднее назвали телеграфным аппаратом Морзе.

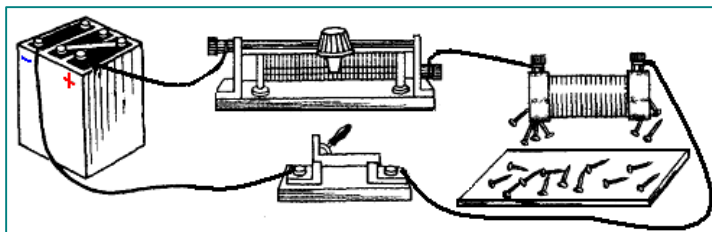


Рис. 180. Когда в катушке идёт ток, железные гвоздики притягиваются к её концам. Катушка превращается в магнит. При отключении тока гвоздики отпадают.

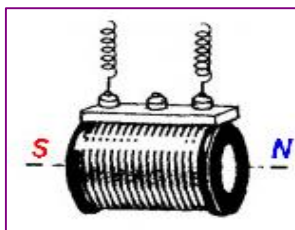


Рис. 181. Если подвесить соленоид так, чтобы он мог поворачиваться, он ориентируется в поле Земли, подобно магнитной стрелке.

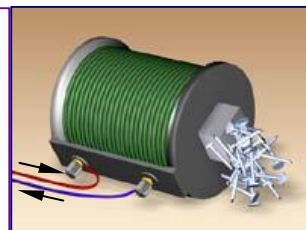


Рис. 182. Чем больше число витков и сила тока, тем сильнее магнитное поле катушки. Железный сердечник усиливает её магнитные свойства.

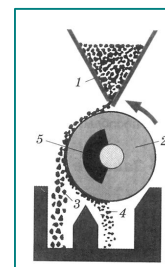


Рис. 183. Электромагниты и их применение. а) один из первых электромагнитов Дж. Генри. б) телеграфный аппарат Морзе, работа которого была бы невозможна без электромагнитов. в) современный промышленный электромагнит. г) подъёмный кран с электромагнитом.

Электромагниты, обладающие большой подъёмной силой, используют на заводах для переноски изделий из стали или чугуна, а также стальных и чугунных стружек, слитков, *рис. 183*.

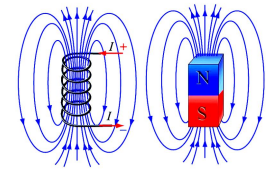
На рисунке справа показан в разрезе магнитный сепаратор для зерна. В зерно подмешивают очень мелкие железные опилки. Эти опилки не прилипают к гладким зернам полезных злаков, но прилипают к зернам сорняков. Зерна 1 высыпаются из бункера на вращающийся барабан 2. Внутри барабана находится сильный электромагнит 5. Притягивая железные частицы 4, он извлекает зерна сорняков из потока зерна 3 и таким путем очищает зерно от сорняков и случайно попавших железных предметов.

Применяются электромагниты в обычном телефонном звонке, *рис. 67*. Специальные электромагниты используются в скоростных поездах на «магнитной подушке». С помощью электромагнитов удаляют железные опилки из глаза.





Вопросы



1. Как выглядят линии магнитной индукции кольцевого тока?
2. Что такое соленоид?
3. Каковы особенности магнитного поля длинного соленоида?
4. В каком направлении устанавливается катушка с током, подвешенная на длинных тонких проводниках? Какое сходство имеется у нее с магнитной стрелкой?
5. Какими способами можно усилить магнитное действие катушки с током?
6. Что называют электромагнитом?
7. Для каких целей используют электромагниты?
8. Как устроен магнитный сепаратор для зерна?



Упражнение

1. Нужно изготовить электромагнит, подъемную силу которого можно регулировать, не изменяя конструкции. Как это сделать?
2. Что надо сделать, чтобы изменить магнитные полюсы катушки с током на противоположные?
3. Как изготовить сильный электромагнит, если поставлено условие не увеличивать силу тока в электромагните?
4. Используемые в подъемном кране электромагниты обладают громадной мощностью. Электромагниты, при помощи которых удаляют из глаз случайно попавшие железные опилки, очень слабы. Какими способами достигают такое различие при изготовлении магнитов?

§ 59. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

1⁰. Если вставить в катушку с током стержень из закаленной стали, то в отличие от железного стержня он не размагничивается после выключения тока, а длительное время сохраняет намагниченность, *рис. 184*.

Тела, длительное время сохраняющие намагниченность, называются постоянными магнитами или просто магнитами.

2⁰. **Гипотеза Ампера.** Французский физик Ампер объяснял намагниченность

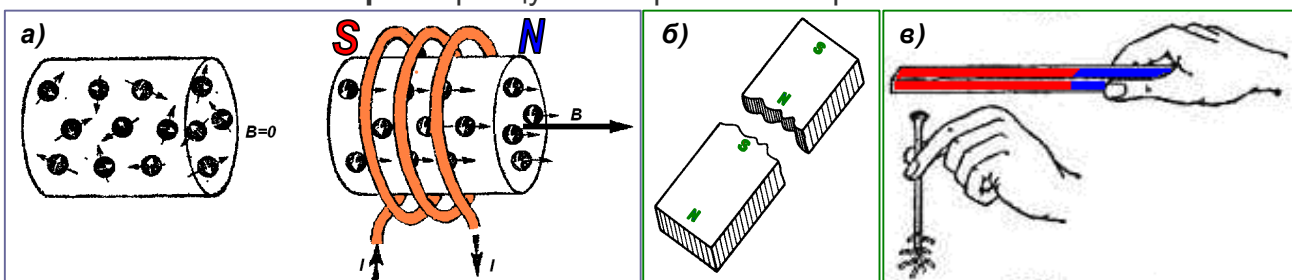


Рис. 184. При намагничивании токи, циркулирующие внутри молекул вещества, из хаотического состояния переходят в упорядоченное состояние (а). Из одного сломанного магнита получается два новых: каждый из них имеет два полюса (б). Железный гвоздь, поднесенный к магниту, сам намагничивается и притягивает к себе железные опилки (в).

железа и стали существованием электрических токов, которые циркулируют внутри каждой молекулы этих веществ. Во времена Ампера о строении атома еще ничего не знали, поэтому природа молекулярных токов оставалась неизвестной. Теперь мы знаем, что в каждом атоме имеются отрицательно заряженные частицы — электроны. При движении электронов возникает магнитное поле, которое и вызывает намагниченность железа и стали.

Если плоскости, в которых циркулируют эти токи, расположены беспорядочно по отношению друг к другу из-за теплового движения молекул (рис. 185, а), то их действия взаимно компенсируются, и никаких магнитных свойств тело не обнаруживает. В намагниченном состоянии элементарные токи в теле ориентированы так, что их действия складываются (рис. 185, б).

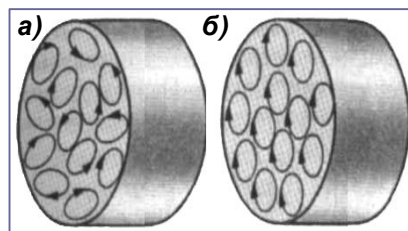


Рис. 185. Схема токов Ампера в не намагниченном (а) и в намагниченном (б) веществе.

Гипотеза Ампера объясняет, почему магнитная стрелка и рамка (контур) с током в магнитном поле ведут себя одинаково. Стрелку можно рассматривать как совокупность маленьких контуров с током, ориентированных одинаково.

3⁰. Наиболее сильные магнитные поля создают вещества, называемые **ферромагнетиками**. Магнитные поля создаются ферромагнетиками не только вследствие обращения электронов вокруг ядер, но и вследствие их собственного вращения. Собственный вращательный момент (момент импульса) электрона называется **спином**. Электроны всегда как бы вращаются вокруг своей оси и, обладая зарядом, создают магнитное поле наряду с полем, появляющимся за счет их орбитального движения вокруг ядер. В ферромагнетиках существуют области с параллельными ориентациями спинов, называемые **доменами**; размеры доменов порядка $10^{-4} \div 10^{-5}$ м. Их можно наблюдать в микроскоп, рис. 186.

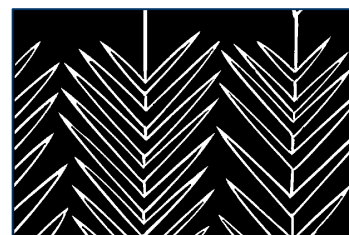


Рис. 186. Микрофотография доменов отполированной поверхности ферромагнетика.

При отсутствии внешнего магнитного поля домены в монокристалле располагаются так, что их магнитные поля замыкают друг друга и суммарное внешнее магнитное поле оказывается равным нулю. На рис. 187 схематически изображены эти домены. Стрелками показаны направления векторов намагниченности внутри доменов.

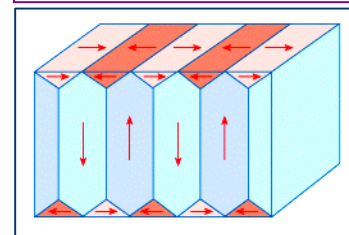


Рис. 187. Доменная структура с замыканием магнитных потоков.

Если ферромагнетик не намагничен, то ориентация доменов такова, что суммарное магнитное поле, создаваемое доменами, равно нулю. При включении внешнего магнитного поля домены ориентируются вдоль линий магнитной индукции этого поля, и индукция магнитного поля в ферромагнетиках увеличивается, становясь в тысячи и в сотни тысяч раз больше

Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в данной среде B больше или меньше индукции магнитного поля в вакууме B_0 , называется магнитной проницаемостью $\mu = B/B_0$. У ферромагнетиков — $\mu \gg 1$. У стали, железа $\mu \approx 8 \cdot 10^3$. У сплава железа с никелем — пермаллоя $\mu \approx 10^5$.

индукции внешнего поля.

4⁰. **Температура Кюри**. При температурах, больших некоторой определенной для данного ферромагнетика, его магнитные свойства исчезают. Эту температуру называют *температурой Кюри* по имени открывшего данное явление французского физика. Если достаточно сильно нагреть намагниченный гвоздь, то он потеряет способность притягивать к себе железные предметы. Температура Кюри для железа 753 °С, для никеля 365 °С, а для кобальта 1000 °С. Существуют ферромагнитные сплавы, у которых температура Кюри меньше 100 °С.

Первые детальное исследования магнитных свойств ферромагнетиков были выполнены выдающимся русским физиком А. Г. Столетовым (1839—1896).

Ферромагнетик — вещество способное обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля при температуре ниже точки Кюри. Это объясняется тем, что домены не возвращаются в прежнее положение и их ориентация частично сохраняется.

Благодаря этому существуют постоянные магниты.

5⁰. Хотя ферромагнетиков в природе не так уж много, именно их магнитные свойства получили наибольшее практическое применение. Такие вещества в природе встречаются в виде естественных магнитов. К ним относится железная руда (так называемый магнитный железняк) (рис. 188, а, б). Богатые залежи магнитного железняка имеются на Урале, на Украине, в Карелии, Курской области и во многих других местах.

Железо, сталь, никель, кобальт и некоторые другие сплавы в присутствии магнитного железняка приобретают магнитные свойства.

Магнитный железняк позволил людям впервые ознакомиться с магнитными свойствами тел.

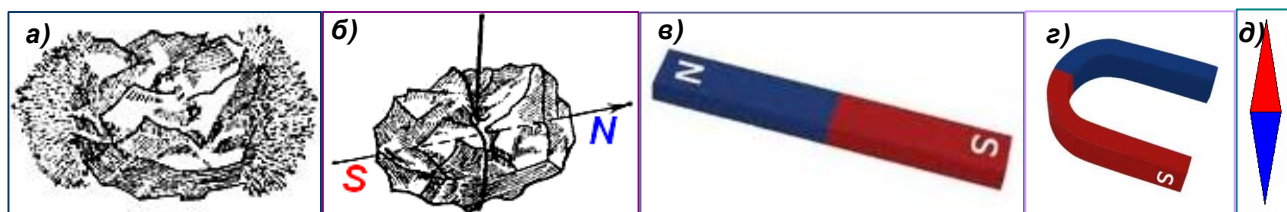


Рис. 188. Природный магнит это железная руда Fe_2O_3 – магнитный железняк. Он притягивает стальные предметы, железные опилки (а), ориентируется подобно магнитной стрелки (б). Наиболее часто встречающиеся изготовленные магниты: в) полосовой (стержневой) магнит; г) подковообразный магнит; д) магнитная стрелка.

6⁰. На рис. 188 изображены знакомые вам магниты: стержневой (полосовой), дугообразный и магнитная стрелка.

Места магнита, где обнаруживаются наиболее сильные магнитные действия, называют **полюсами магнита**. У всякого магнита, как и у известной нам магнитной стрелки, обязательно есть **два полюса**: **северный (N)** и **южный (S)**.

До настоящего времени в природе не удавалось обнаружить или создать искусственно какой-нибудь магнит с одним полюсом.

Даже сломанный магнит сохраняет полярность для каждой из своих частей, рис. 184, б. Теоретически это объясняется ориентацией упомянутых молекулярных токов. Однако практически хорошие постоянные магниты обычно очень твёрдые и хрупкие. Если распилить или разломать такой магнит, то, скорее всего, не избежать сотрясений и нагрева, которые разрушат внутреннюю упорядоченность токов Ампера и магнитные свойства данного образца.

Магнит – эта «палка о двух концах».

7⁰. Представление о магнитном поле магнитов (как и токов) можно получить, положив лист бумаги на магнит и посыпав его железными опилками, рис. 189.

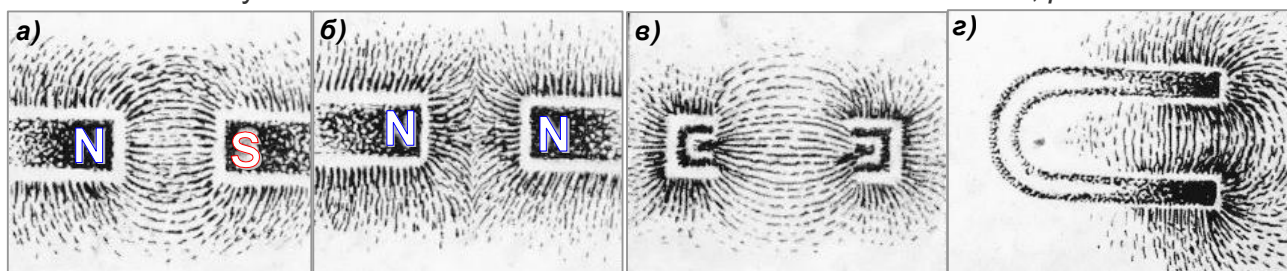


Рис. 189. Картина линий магнитных полей двух магнитов, обращённых друг к другу разноимёнными (а) и одноимёнными (б) полюсами. Поле стержневого магнита (в). Поле дугообразного магнита (г).

Стержневой магнит индуцирует магнитное поле, сходное с электростатическим полем диполя электрических зарядов (сравните рис. 15 и 190). Но имеется существенное отличие: линии поля электрических зарядов всегда выходят из

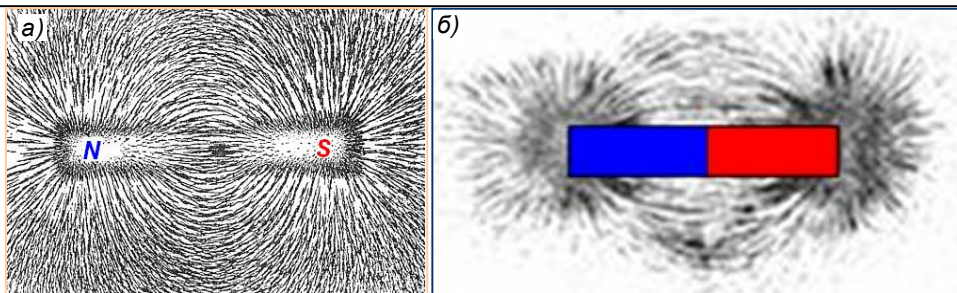


Рис. 190. Картина силовых линий магнитного поля, создаваемого одним магнитом в форме стержня. Опилки на листе бумаги (а) и под тонким стеклом (б).

зарядов положительных и входят в отрицательные заряды. Полюсы же магнита не находятся в каких-либо точках, а образуют достаточно большие области. Линии магнитной индукции всегда являются замкнутыми кривыми, проходящими сквозь эти области – полюсы.

8⁰. На основании опытов можно сделать следующее заключение о взаимодействии магнитов: **разноименные магнитные полюсы притягиваются, одноименные отталкиваются**, рис. 191. Это правило относится и к соленоидам, и к электромагнитам.

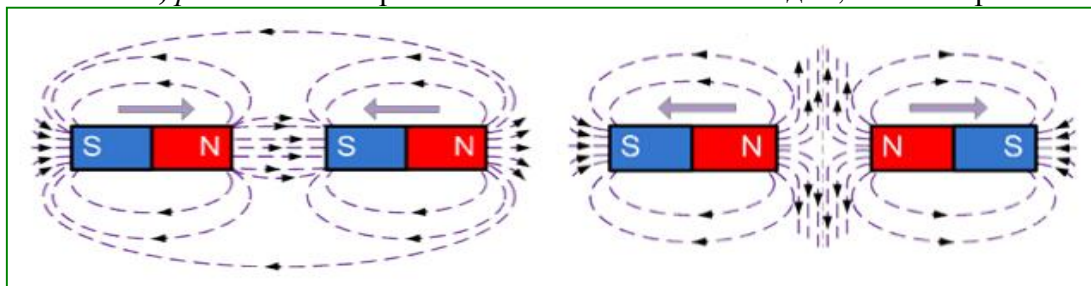


Рис. 191. Магнитные линии выходят из северного полюса и входят в южный полюс. Магнитные линии никогда не пересекаются. Они всегда замкнуты. Одноимённые полюсы магнитов притягиваются, а разноимённые – отталкиваются. Не существует «однополюсных» магнитов.

Взаимодействие магнитов объясняется тем, что вокруг любого магнита имеется магнитное поле. Магнитное поле одного магнита действует на другой магнит, а магнитное поле второго магнита действует на первый (третий закон Ньютона).



Вопросы

1. Какие тела называют постоянными магнитами?
2. Как Ампер объяснял намагничивание железа?
3. Как можно теперь объяснить молекулярные токи Ампера?
4. Что называют магнитными полюсами магнита?
5. Какие из известных вам веществ притягиваются магнитом?
6. Как взаимодействуют между собой полюсы магнитов?
7. Как с помощью магнитной стрелки можно определить полюсы у намагниченного стального стержня?

§ 60. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

1⁰. С глубокой древности известно, что магнитная стрелка, свободно вращающаяся вокруг вертикальной оси, устанавливается в данном месте Земли в направлении «север – юг» (если вблизи нее нет магнитов, проводников с током, железных предметов). Этот факт доказывает, вокруг Земли существует магнитное поле, и магнитная стрелка устанавливается вдоль его магнитных линий. На этом и основано применение компаса (рис. 192).

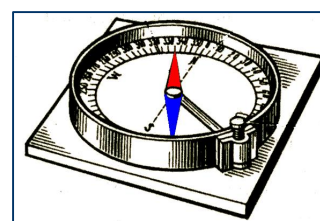


Рис. 192. Походный компас

2⁰. Однако показания компаса являются неточными.

Наблюдения показывают, что при приближении к Северному географическому полюсу Земли магнитные линии поля Земли всё под большим углом наклоняются к горизонту и около 86° северной широты и 147° восточной долготы становятся вертикальными, входя в Землю (рис. 193).

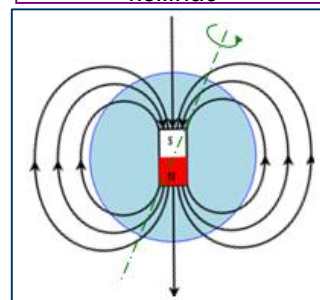


Рис. 193. Земля как магнитный диполь

Здесь находится **Южный магнитный полюс Земли**. Он не совпадает с северным географическим полюсом

Магнитная ось Земли повернута относительно её оси вращения на 11,5°, рис. 193-194.

Северный магнитный полюс Земли находится у Южного географического полюса, на $64,5^\circ$ южной широты и 137° восточной долготы, где магнитные линии поля Земли выходят из Земли.

В южном полушарии удалённость магнитного и географического полюсов в настоящее время значительно больше, чем в северном.

Так как магнитные и географические полюсы не совпадают, направление магнитной стрелки не совпадает с направлением географического меридиана. Магнитная стрелка показывает направление **магнитного меридиана**, рис. 194.



Рис. 194. Расположение магнитных и географических полюсов Земли.

Вертикальная плоскость, в которой располагается продольная ось магнитной стрелки, называется плоскостью магнитного меридиана данной точки земной поверхности.

Угол δ между географическим и магнитным меридианами называется магнитным склонением.

Магнитное склонение называют западным или восточным в зависимости от отклонения северного полюса магнитной стрелки, рис. 195.

Ещё Христофор Колумб открыл, что магнитное склонение не остается постоянным, а претерпевает изменения с изменением географических координат. Открытие Колумба послужило толчком к новому изучению магнитного поля Земли: сведения о нём были нужны мореплавателям.

3⁰. Применяя для исследования магнитного поля Земли стрелку, способную поворачиваться вокруг горизонтальной оси, можно заметить, что положение стрелки составляет угол β с горизонтальной плоскостью.

Угол β между осью стрелки и горизонтальной плоскостью называется магнитным наклоением.

Этот угол в средних широтах близок к 70° , если стрелка расположена в плоскости магнитного меридиана. На магнитных полюсах этот угол равен 90° , а на магнитном экваторе 0° . Прибор для измерения магнитного наклоения называется инклинометр (от лат. *inclino* - наклоняю), рис. 196.

4⁰. Точки с одинаковым склонением на карте Земли соединяются в линии, называемые **изогонами**, а линии, соединяющие точки с одинаковым наклоением, называются **изоклинами**. Такими картами пользуются штурманы морских и воздушных судов.

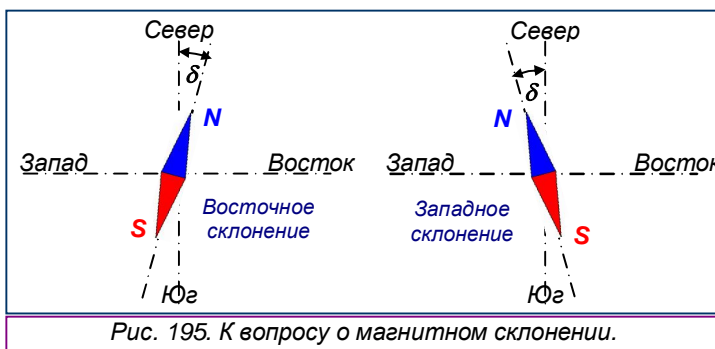


Рис. 195. К вопросу о магнитном склонении.

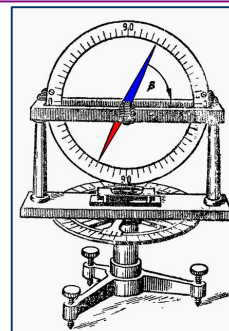


Рис. 196. Прибор для измерения магнитного наклоения.

На земном шаре встречаются области, в которых напряжённость магнитного поля меняется очень резко. Такие области называют областями магнитной аномалии (лат. слово, означает «отклонение, ненормальность»).

Одна из самых больших магнитных аномалий — Курская магнитная аномалия. Причиной таких аномалий являются огромные залежи железной руды на сравнительно небольшой глубине.

5⁰. Вопрос о происхождении магнитного поля Земли окончательно не решен. Установлено только, что наличием магнитного поля Земля обязана своему ядру. Земное ядро состоит из твердой внутренней и жидкой наружной частей. Вращение Земли создает в жидком ядре постоянные течения. Движение электрических зарядов приводит к появлению вокруг них магнитного поля, *рис. 197, а*.

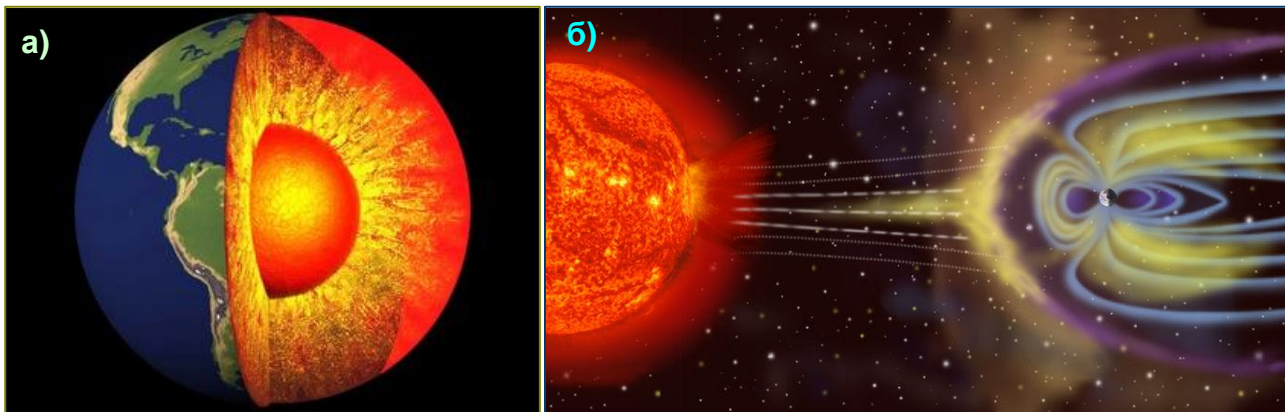


Рис. 197. Окончательного ответа на вопрос о происхождении магнитного поля Земли нет, но установлено, что решающую роль в его создании играет конвективное перемешивание вещества в жидком внешнем слое ядра планеты. Оно создаёт кольцевые электрические токи, индуцирующие магнитное поле Земли (а). Большую роль играет также влияние Солнца, порождающего периодические магнитные бури в околоземном пространстве (б).

Иногда внезапно возникают так называемые магнитные бури, кратковременные изменения магнитного поля Земли, которые сильно влияют на стрелку компаса. Наблюдения показывают, что появление магнитных бурь связано с солнечной активностью.

В период усиления солнечной активности с поверхности Солнца в мировое пространство выбрасываются потоки заряженных частиц, электронов и протонов. Магнитное поле, образуемое этими движущимися частицами, изменяет магнитное поле Земли и вызывает магнитную бурю, *рис. 197, б*.

Большое внимание изучению магнитного поля Земли уделяют при полетах искусственных спутников и космических кораблей.

6⁰. Установлено, что земное магнитное поле надежно защищает поверхность Земли от космического излучения, действие которого на живые организмы разрушительно. В состав космического излучения, кроме электронов, протонов, входят и другие частицы, движущиеся в пространстве с огромными скоростями.

Полеты межпланетных космических станций и космических кораблей на Луну и вокруг Луны позволили установить отсутствие у нее магнитного поля. Исследования, проведенные космическими кораблями, не обнаружили магнитного поля у планеты Венера, у планеты Марс имеется слабое магнитное поле.



Вопросы

1. Чем объяснить, что магнитная стрелка устанавливается в данном месте Земли в определенном направлении?
2. Где находятся магнитные полюсы Земли?
3. Как показать, что Южный магнитный полюс Земли находится на севере, а Северный магнитный полюс — на юге?

4. Чем объясняют появление магнитных бурь?
5. Что такое области магнитной аномалии?
6. Где находится область, в которой наблюдается большая магнитная аномалия?

§61. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ

1⁰. Поместим прямолинейный проводник с током между полюсами магнита, *рис. 198*. Мы заметим, что при прохождении через проводник, находящийся между полюсами магнита, тока, на него действует сила, стремящаяся вытолкнуть его из магнита. Если уберём магнит, действие силы прекратится.

Значит, сила F действует на проводник с током со стороны магнитного поля так же, как действует сила со стороны магнитного поля на магнитную стрелку. Изменяя направление тока или направление силовых линий магнитного поля, мы замечаем, что меняется и направление движения проводника, а значит, и направление действующей на проводник силы.

Направление действующей на проводник с током силы в магнитном поле можно определить, пользуясь **правилом левой руки**. Руку располагают так, чтобы силовые линии поля входили в ладонь, а четыре пальца были направлены по току; тогда отставленный на 90° большой палец расположится вдоль направления действующей на проводник силы, *рис. 199*.

Сила, с которой электромагнитное поле действует на проводник с током, называется силой Ампера.

2⁰. Практически более важное значение имеет вращение прямоугольной рамки с током в однородном магнитном поле. На *рис. 200* такая рамка стремится повернуться в магнитном поле так, чтобы собственный вектор магнитной индукции расположился в направлении силовых линий внешнего поля B . Направление тока в рамке показано маленькими стрелками, а направление её собственного вектора магнитной индукции B_p – цветной (полярной) стрелкой.

3⁰. Понять, какие силы действуют на рамку, можно, используя знакомое вам **правило левой руки** или **правило буравчика**. На горизонтальные части рамки, которые расположены вдоль силовых линий внешнего поля B , силы не действуют. На вертикальные же части, которые при вращении рамки пересекают линии внешнего поля B , действуют равные противоположно направленные силы F_1 и F_2 . Это, очевидно, и есть силы Ампера. Они образуют пару сил и стремятся повернуть рамку, *рис. 200*.

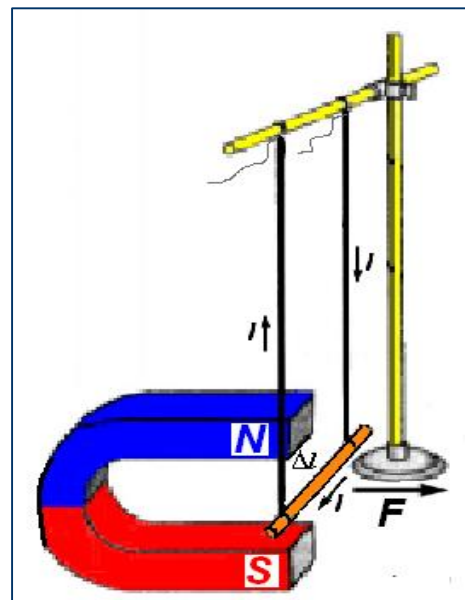


Рис. 198. Опыт, показывающий, что магнитное поле действует на проводник с током I с некоторой силой F .

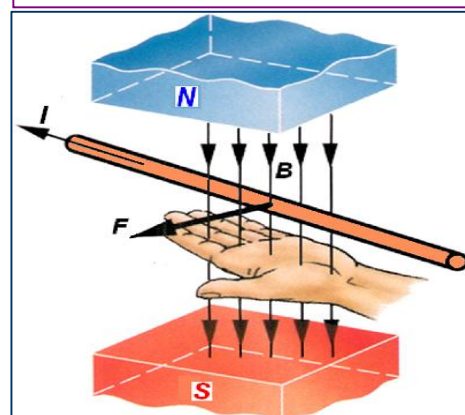


Рис. 199. Правило левой руки для определения действия магнитного поля на проводник с током.

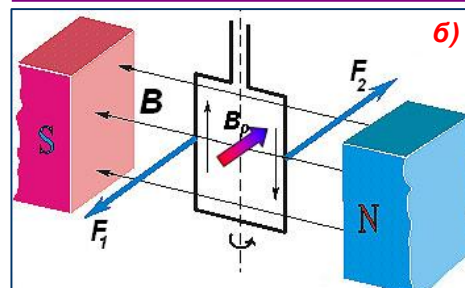


Рис. 200. На рамку действует максимальный момент сил; $B \perp B_p$.

На этом принципе основана работа электромагнитных приборов, *рис. 68.*

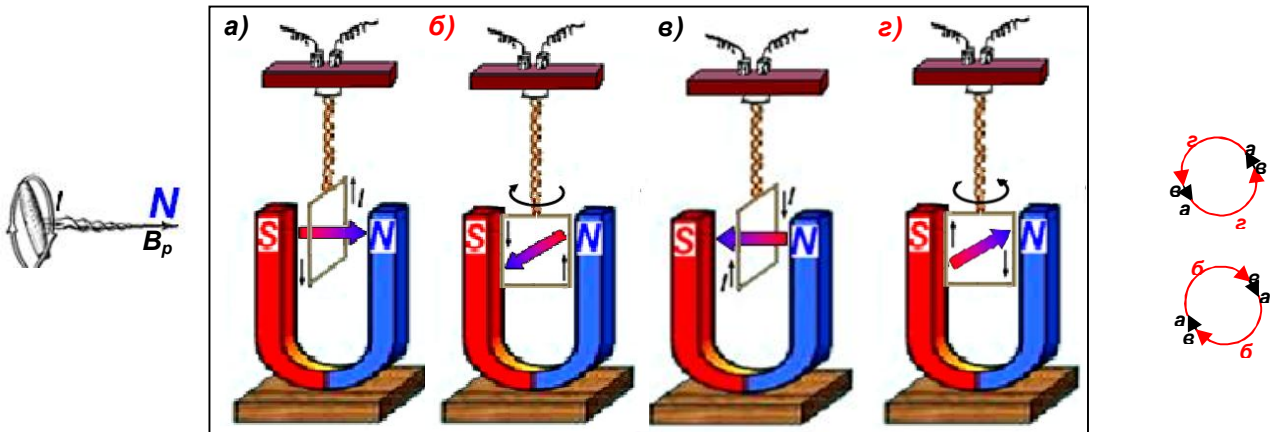


Рис. 201. Различные положения рамки с током в магнитном поле: а) равновесное неустойчивое (\mathbf{B} и \mathbf{B}_p противоположны); б) неравновесное; в) равновесное устойчивое (\mathbf{B} и \mathbf{B}_p направлены одинаково); г) неравновесное.

4⁰. На *рис. 201* показаны различные положения рамки с током в магнитном поле (положение *г*) на *рис. 201* соответствует *рис. 200*). Нетрудно понять, что переключая своевременно направление тока в рамке, можно заставить её непрерывно вращаться и совершать полезную работу. Именно так и работает простейший электродвигатель.

5⁰. **Простейший электродвигатель.** Простейший электродвигатель постоянного тока, кроме рамки с током (ротора) и постоянного магнита (статора), содержит коллекторно-щёточный узел, переключающий направление тока в рамке после каждого её полуоборота, *рис. 202.*

Концы рамки выведены на контактные пластины коллектора, по которым при вращении рамки скользят щётки, *рис. 202, 203.*

На *рис. 202* плоскость рамки совпадает с линиями магнитной индукции статора \mathbf{B} . Это положение рамки неравновесное и соответствует случаю *г*) *рис. 201.* в этом положении (как и в положении *б*) при противоположном направлении вращения) на рамку действует максимальный момент сил Ампера \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 .

Рамка обтекается током, находясь в магнитном поле статора \mathbf{B} между полюсов \mathbf{N} и \mathbf{S} . Её магнитное поле \mathbf{B}_p взаимодействует с магнитным полем \mathbf{B} статора (в рассматриваемом положении $\mathbf{B}_p \perp \mathbf{B}$). Она поворачивается, пока её северный полюс не расположится против южного полюса статора, *рис. 201, в.* Это устойчивая мёртвая точка ($\mathbf{B}_p \uparrow \uparrow \mathbf{B}$). Но в этот момент происходит переключение направления тока в рамке коллекторно-щёточным узлом, и мёртвая точка оказывается неустойчивой в положении *рис. 201, а* ($\mathbf{B}_p \uparrow \downarrow \mathbf{B}$). Далее на элементы рамки, параллельные её оси опять будут действовать силы Ампера, нарастающие до положения *г*) на *рис. 201.*

Далее всё повторяется.

Описанные стадии взаимодействия схематически представлены *первой* круговой диаграммой на *рис. 201*, справа. Противоположному направлению вращения рамки соответствует *вторая* диаграмма

На *рис. 204* показаны последовательные положения рамки и контактов коллектор при вращении против часовой стрелки. Справа пунктиром показаны положения

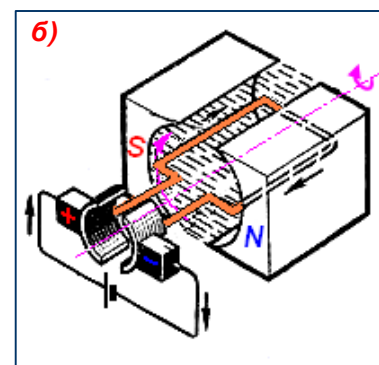


Рис. 202. На рамку действует максимальный момент сил. При этом $\mathbf{B} \perp \mathbf{B}_p$

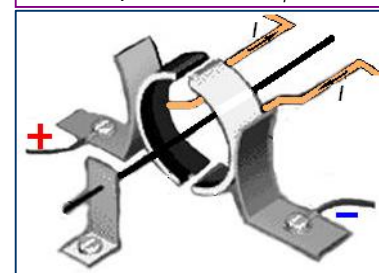


Рис. 203. Коллекторно-щёточный узел простейшего двигателя (схема).

рамки и действующие силы вблизи мёртвых точек $e \rightarrow a$. В устойчивом положении (e) силы F_1 и F_2 пытаются растянуть, а в неустойчивом (a) – сжать рамку.

6⁰. У современного двигателя постоянного тока ротор имеет обмотку в виде множества рамок, уложенных в пазы цилиндрического якоря, а статор представляет собой электромагнит с чётным числом полюсов. На *рис. 205* показан двухполюсный электромотор в разрезе.

Принцип его работы следующий. Если по проводам верхней части якоря пропустить ток движущийся «от нас» (отмечено крестиком), а в нижней части — «на нас» (отмечено точкой), то согласно правилу левой руки верхние проводники будут выталкиваться из магнитного поля статора влево, а проводники нижней половины якоря по тому же принципу будут выталкиваться вправо. Поскольку медный провод уложен в пазах якоря, то, вся сила воздействия будет передаваться и на него, и он будет проворачиваться.

Коллекторно-щёточный узел (коллектор имеет на каждую рамку ротора по две контактные пластинки), осуществляя последовательное переключение направления тока в рамках якоря, поддерживает его постоянное вращение (как и в рассмотренном случае одной рамки).

Таким образом, обмотка якоря передаёт вращающий момент на вал электромотора, а тот в свою очередь приводит в движение рабочие механизмы любого оборудования.

Двигатели постоянного тока нашли особенно широкое применение на транспорте (электровозы, трамваи, троллейбусы), в электроинструментах (электродрель, электропила, электрорубанок).

На сегодняшний день двигатели постоянного тока мало используются на производстве. Из недостатков этого типа электрических машин можно отметить быстрый износ щёточно-коллекторного узла. Преимущества – хорошие характеристики запуска, лёгкая регулировка частоты и направления вращения, простота устройства и управления.

Есть специальные безыскровые электродвигатели, которые применяют в насосах для выкачивания нефти из скважин.

В промышленности применяют двигатели, работающие на переменном токе (их вы будете изучать в дальнейшем).

9⁰. Электрические двигатели обладают рядом преимуществ. При одинаковой мощности они имеют меньшие размеры, чем тепловые двигатели. При работе они не выделяют газов, дыма и пара, а значит, не загрязняют воздух. Им не нужен запас топлива и воды. Электродвигатели можно установить в удобном месте: на станке,

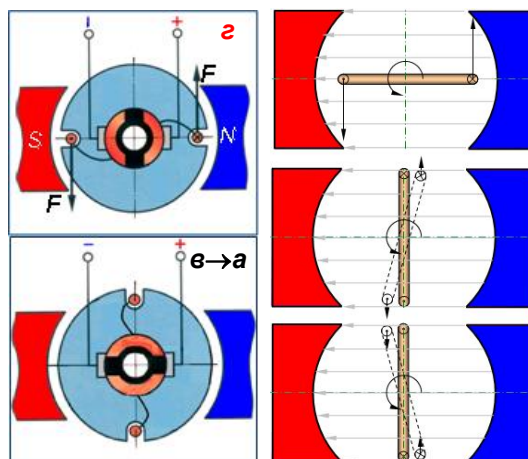


Рис. 204. Вращение ротора против часовой стрелки (e-a-e). e – рабочий ход; e-a – переключение направления тока рамки.

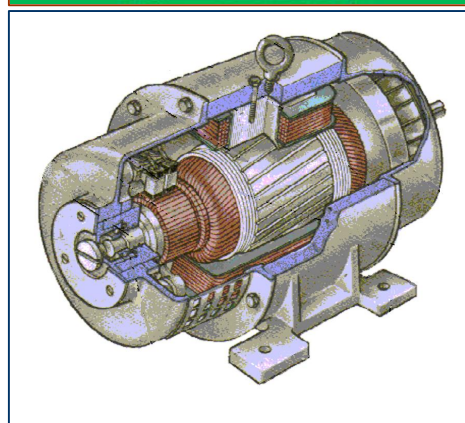
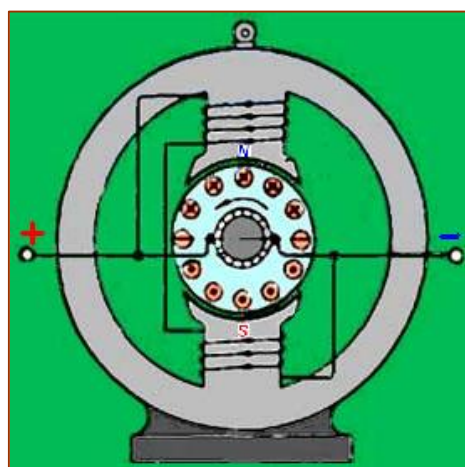


Рис. 205. Двигатели постоянного тока в разрезе и с вырезом.

под полом трамвая, на тележке электровоза. Можно изготовить электрический двигатель любой мощности: от нескольких ватт (в электробритвах), до сотен и тысяч киловатт (на экскаваторах, прокатных станах, кораблях).

Коэффициент полезного действия мощных электрических двигателей достигает 98%. Такого высокого КПД не имеет никакой другой двигатель.

9°. Один из первых в мире электрических двигателей, пригодных для практического применения, был изобретен русским ученым Борисом Семеновичем Якоби в 1834 г., рис. 206.

13 сентября 1838 года гуляющие на набережной Невы были крайне удивлены необычной шлюпкой. В ней сидело 12 человек. Только немногие знали, что идут испытания первого в мире электрохода — судна, приводимого в движение электричеством. Электродвигатель питался током батареи, состоящей из 320 гальванических элементов. Этот двигатель, совершая вращательное движение, не имел возвратно-поступательных деталей, которые до сих пор применялись в тепловых двигателях.

Во время испытания шлюпки на ее борту находились русские академики — физик Э. Х. Ленц, математик М. В. Остроградский, знаменитый мореплаватель вице-адмирал И. Ф. Крузенштерн. Здесь же присутствовал и профессор Б. С. Якоби — создатель первого электрического двигателя для практической работы, виновник торжества.

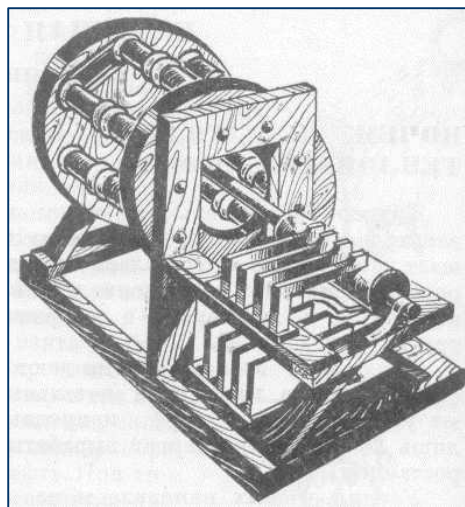
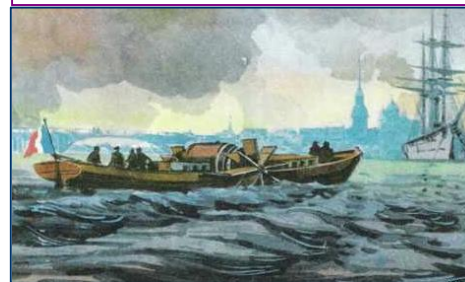
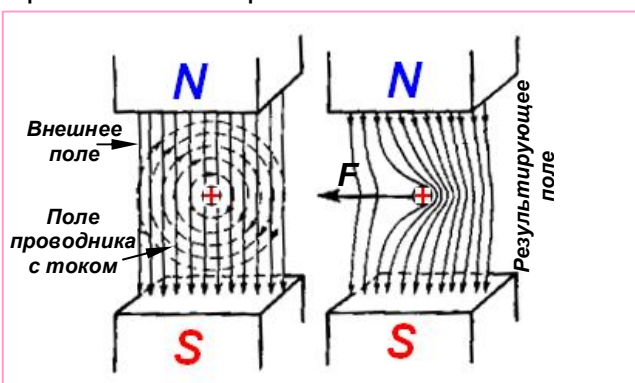


Рис. 206. Двигатель Якоби, основанный на притяжении и отталкивании электромагнитов.



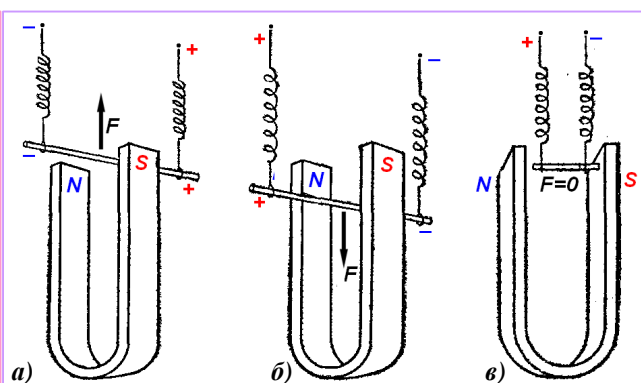
Вопросы

1. Как на опыте обнаружить наличие силы, действующей на проводник с током?
2. Какое явление используют в устройстве и работе электромагнитных приборов и электродвигателей?
3. Как работает простейший двигатель постоянного тока? При помощи какого устройства в рамке меняют направление тока через каждые пол-оборота?
4. Каковы преимущества электрических двигателей по сравнению с тепловыми? Где применяют электрические двигатели?
5. Кто и когда изобрел первый электрический двигатель, пригодный для практического применения?



Слева: магнитные поля: внешнего (постоянного магнита) и проводника с током (ток направлен от нас перпендикулярно плоскости чертежа).

Справа: в соответствии с правилом левой руки, проводник с током выталкивается магнитными силовыми линиями



При перемене направления тока изменяется направление силы F : проводник с током, который выталкивался из магнитного поля (а), начинает втягиваться в него (б). Если направление тока параллельно линиям магнитного поля, то оно не действует на проводник с током (в)

6. Какое отношение имеют изображения на этих рисунках к электрическому двигателю? Объясните причины сгущения и разрежения магнитных линий поля.

ПРИЛОЖЕНИЕ №1

ВЫЧИСЛЕНИЕ СИЛЫ АМПЕРА

1⁰. В 1620 г. Ампер установил, что на отрезок проводника с током силы I и длиной Δl , помещенного в однородное магнитное поле с индукцией \mathbf{B} , действует сила $\Delta \mathbf{F}$, модуль которой равен

$$\Delta F = I \Delta l B \sin \alpha = I \Delta l B_{\perp}, \quad [46]$$

где α — угол между вектором \mathbf{B} и проводником с током, *рис. 207*. Модуль силы ΔF зависит от составляющей вектора \mathbf{B} , перпендикулярной проводнику: $B_{\perp} = B \sin \alpha$.

Из закона Ампера следует, что сила Ампера будет равна нулю, если угол между линией магнитной индукции поля и током будет равен нулю. То есть проводник будет располагаться вдоль такой линии. И сила Ампера будет иметь максимально возможное значение для этой системы, если угол будут составлять 90 градусов. То есть ток будет перпендикулярен линии магнитной индукции.

2⁰. Вектор $\Delta \mathbf{F}$ перпендикулярен к проводнику с током и к вектору \mathbf{B} . Направление силы $\Delta \mathbf{F}$ определяется по **правилу левой руки**, *рис. 208*:

если ладонь левой руки расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая B_{\perp} вектора индукции входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали бы направление тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы, действующей со стороны поля на проводник с током.

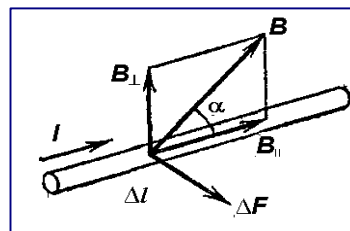


Рис. 207. Сила, действующая на проводник с током в однородном магнитном поле.

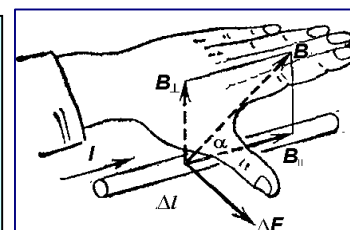


Рис. 208. Правило левой руки, определяющее направление силы Ампера.

3⁰. В отличие от кулоновских сил, которые являются центральными, **сила Ампера** не является центральной. Она **направлена перпендикулярно к линиям магнитной индукции**.

4⁰. Закон Ампера может быть использован для определения модуля вектора магнитной индукции.

Модуль вектора индукции в данной точке однородного магнитного поля равен наибольшей силе, действующей на проводник единичной длины, по которому протекает ток в единицу силы тока:

$$B = \frac{\Delta F_{\max}}{I \cdot \Delta l} \quad [47]$$

Значение $\Delta F = \Delta F_{\max}$ достигается при условии, что проводник расположен перпендикулярно к линиям индукции.

Упражнение

На *рис. 209* показана схема весов для экспериментального определения величины индукции однородного магнитного поля.

Расскажите, как пользуясь этими весами, определить величину вектора магнитной индукции поля данного постоянного магнита. Нарисуйте полную схему установки для такого исследования.

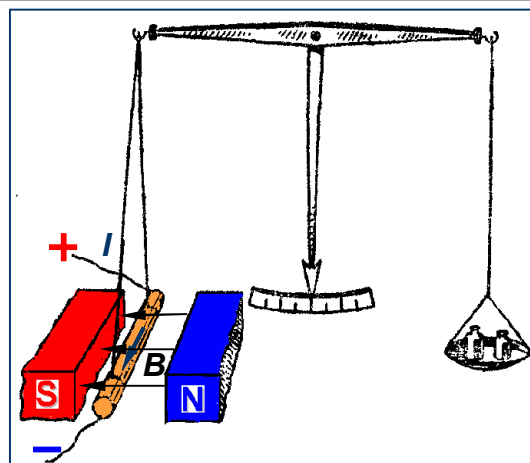


Рис 209. Схема экспериментальной установки для определения индукции.

ПРИЛОЖЕНИЕ №2

ВЫЧИСЛЕНИЕ МОМЕНТА СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА РАМКУ С ТОКОМ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ ЕЁ ПОВОРОТА

1⁰. Пользуясь законом Ампера и правилом левой руки, нетрудно определить силы, действующие на стороны прямоугольной рамки с током, находящейся в однородном магнитном поле, *рис. 210*.

На этом рисунке *слева* плоскость рамки совпадает с направлением вектора индукции внешнего магнитного поля. При этом горизонтальные стороны рамки параллельны магнитным линиям внешнего поля. А вертикальные стороны рамки перпендикулярны им. Поэтому силы Ампера действуют только на вертикальные стороны рамки и достигают максимального значения:

$$\Delta F_{\text{макс}} = I \Delta l B, [46]^*$$

где I – сила тока, Δl – высота рамки, B – модуль индукции внешнего поля. Расстояние между линиями действия этих сил равно ширине рамки d .

Собственное магнитное поле рамки характеризуется вектором (перпендикулярным

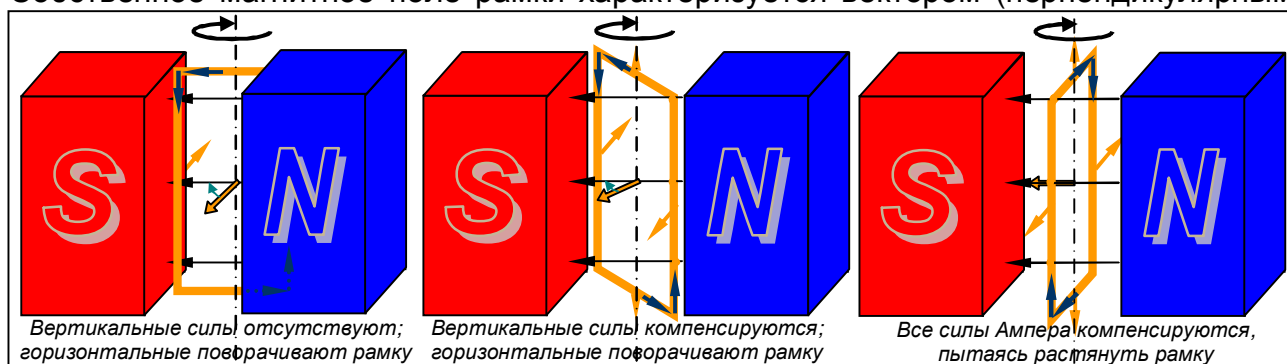


Рис. 210. Силы Ампера (оранжевые стрелки), действующие на рамку с током в однородном магнитном поле, в зависимости от угла её поворота относительно направления магнитного поля.

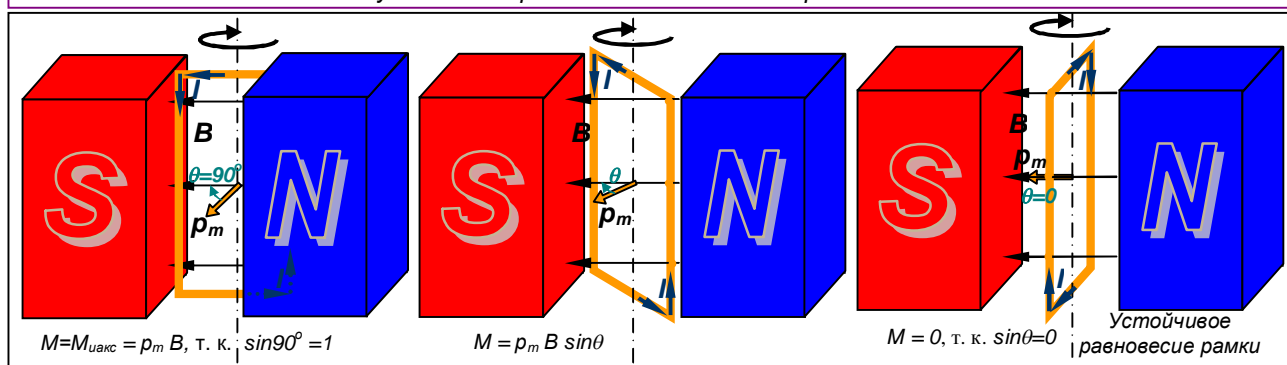


Рис. 211. Момент сил Ампера, действующий на рамку в однородном магнитном поле, в зависимости от угла поворота плоскости рамки (магнитного момента p_m) относительно направления магнитного поля B .

её плоскости), который составляет угол 90° с внешним магнитным полем B .

На *рис. 210* в *середине* рамка занимает промежуточное положение, а действующие на её вертикальные стороны силы равны тем же значениям:

$$\Delta F_{\text{макс}} = I \Delta l B. [46]^*$$

Однако кратчайшее расстояние между прямыми, по которым действуют эти силы (плечо сил), уменьшилось до величины $d \cdot \sin \theta$ ($\theta < 90^\circ$), где θ угол между нормалью к плоскости рамки n_0 и вектором B .

Горизонтальные стороны рамки уже не совпадают с вектором B . Поэтому на них действуют равные противоположно направленные, взаимно компенсирующиеся силы. Они, очевидно, не оказывают влияние на её вращение.

, На *рис. 210* справа рамка занимает устойчивое положение. Все силы Ампера взаимно компенсируются и стремятся лишь растянуть рамку, не влияя на её вращение. Плоскость рамки перпендикулярна вектору \mathbf{B} , а угол $\theta=0$.

Таким образом, зная вектор индукции магнитного поля, размеры рамки и силу проходящего через неё тока, можно при любых углах её поворота вычислить действующие на неё силы Ампера. Они составляют, очевидно, пару сил. Величина момента этой пары сил будет равна произведению

$$M = I \Delta l B d \sin \theta = I S B \sin \theta, \quad [48]$$

где $S = \Delta l d$ – площадь рамки, обтекаемая током I .

2°. На *рис. 210* показана та же рамка, но для характеристики её магнитного поля используется вектор \mathbf{p}_m , который называется **магнитным моментом рамки** с током:

$$\mathbf{p}_m = I S \mathbf{n}_o. \quad [49]$$

Здесь \mathbf{n}_o – единичный вектор нормали (орт нормали) рамки, направленный по *правилу буравчика*, который следует вращать по направлению циркуляции тока I , *рис. 179*.

Этой величиной обычно удобно пользоваться при расчётах.

Например, формула [48] для величины момента сил, вращающих рамку, записывается в виде:

$$M = p_m B \sin \theta, \quad [50]$$

где p_m – модуль магнитного момента рамки.

3°. Формулы [48] и [50] используются для расчёта момента сил, вращающего рамку в однородном магнитном поле. Если сила тока не изменяется, но в мёртвых точках переключается направление тока в рамке (так обычно работает простейший моторчик с коллектором), то момент сил на оси рамки будет изменяться так, как это показано на *рис. 212*. попробуйте это доказать самостоятельно.

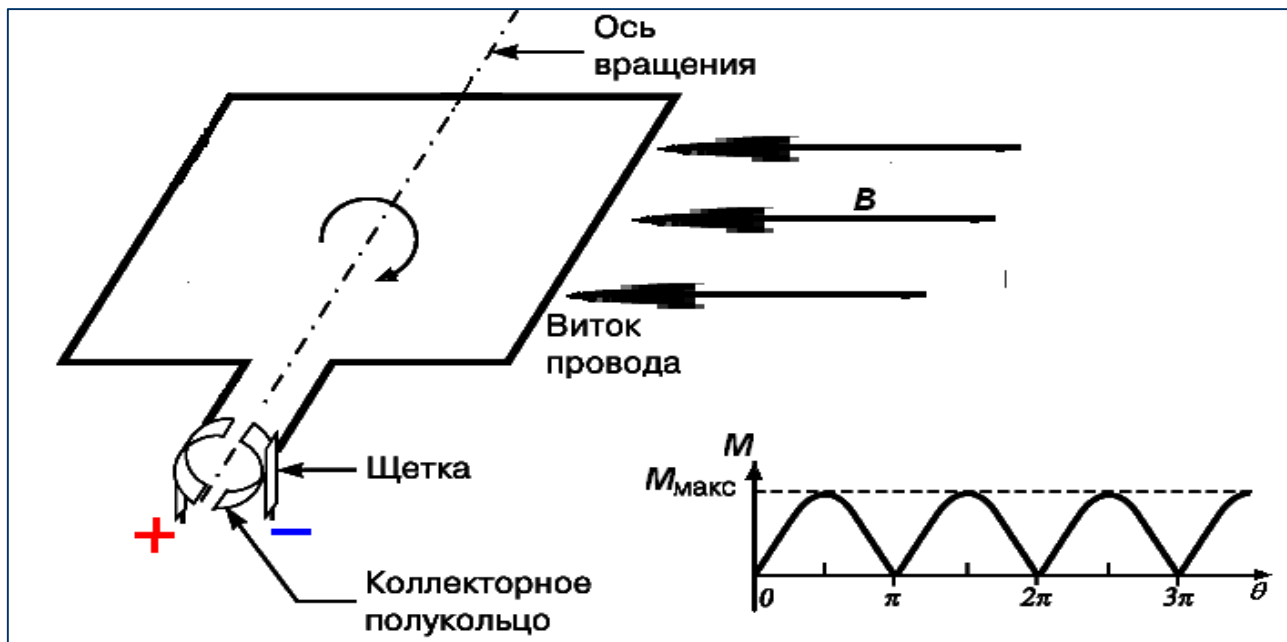


Рис. 212. Изменение движущего момента на оси простейшего электродвигателя.

Вопросы

1. Какому значению θ соответствует положение рамки на *рис. 212*?
2. Что нужно сделать, чтобы уменьшить неравномерность изменения момента сил на валу электродвигателя?

ПРИЛОЖЕНИЕ №3

ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЙСЯ ЗАРЯД. СИЛА ЛОРЕНЦА

1⁰. Электрический ток — это упорядоченно движущиеся заряженные частицы. Поэтому действие магнитного поля на проводник с током есть результат действия поля на движущиеся заряженные частицы внутри проводника. Найдем силу, действующую на одну частицу.

Силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля, называют **силой Лоренца** в честь великого голландского физика Х. Лоренца (1853 — 1928) — основателя электронной теории строения материи.

Силу Лоренца можно найти, используя закон Ампера

$$\Delta F = I \Delta l B \sin \alpha = I \Delta l B_{\perp}, \quad [46]$$

который определяет величину силы, действующей со стороны (однородного) магнитного поля B на все заряды, движущиеся в объеме проводника длиной Δl . Обозначим общее число заряженных частиц буквой N . Тогда сила (Лоренца), действующая на один заряд в этом проводнике

$$F_{\text{л}} = \Delta F / N = I \Delta l B \sin \alpha / N. \quad [51^*]$$

Обозначим величину каждого заряда буквой q , а (среднюю) скорость их движения буквой v . Тогда сила тока (по определению)

$$I = Nq / \Delta t = Nqv / \Delta l.$$

Здесь: Δt — время прохождения зарядами участка провода Δl , Nq — суммарная величина заряда, причём $v = \Delta l / \Delta t$. Подставляя полученное выражение для силы тока в формулу [51*], получим искомое выражение для величины (модуля) силы Лоренца:

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha = qvB_{\perp} \quad [51]$$

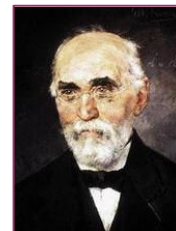
Здесь α — угол между вектором скорости заряженных частиц v и вектором магнитной индукции B внешнего поля; B_{\perp} — составляющая магнитной индукции, перпендикулярная скорости заряда, *рис. 213*.

2⁰. Сила Лоренца перпендикулярна векторам B и v , *рис. 214*. Ее направление определяется с помощью того же правила левой руки, что и направление силы Ампера: если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции B_{\perp} , перпендикулярная скорости v заряда, входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на 90° большой палец укажет направление действующей на заряд силы Лоренца $F_{\text{л}}$, *рис. 215*.

3⁰. Так как сила Лоренца перпендикулярна скорости частицы, она не совершает работы. Это означает, что сила Лоренца не меняет кинетическую энергию частицы и, следовательно, модуль ее скорости. Под действием силы Лоренца меняется лишь направление скорости частицы.

4⁰. **Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле.**

Рассмотрим движение частицы с зарядом q (будем пока считать, что $q > 0$) в однородном магнитном поле B , направленном перпендикулярно к начальной скорости частицы v , *рис. 216*.



Хендрик
Лоренц
(1853-1928)

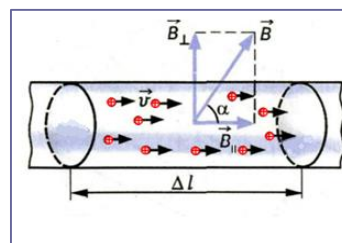


Рис. 213. К выводу формулы для силы Лоренца

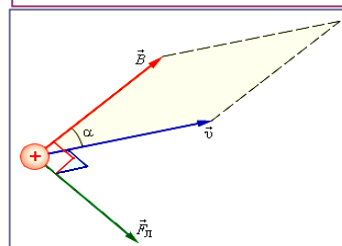


Рис. 214. Сила Лоренца ⊥ векторам B и v .

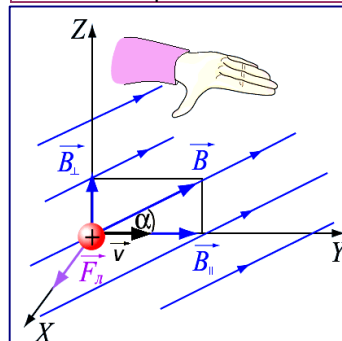


Рис. 215. Правило левой руки для силы Лоренца.

Сила Лоренца зависит от модулей векторов скорости частицы и индукции магнитного поля. Так как магнитное поле не меняет модуль скорости движущейся частицы, то остается неизменным и модуль силы Лоренца. Эта сила перпендикулярна скорости и, следовательно, определяет центростремительное ускорение частицы. Неизменность по модулю центростремительного ускорения частицы, движущейся с постоянной по модулю скоростью, означает, что частица равномерно движется по окружности радиусом r . Определим этот радиус.

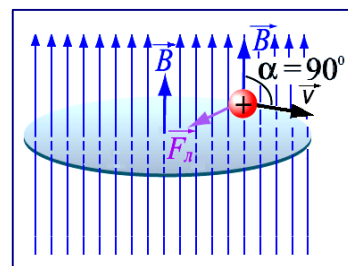


Рис. 216. Заряженная частица в магнитном поле.

Для этого воспользуемся тем, что центробежная сила уравнивается силой Лоренца:

$$mv^2/r = qvB.$$

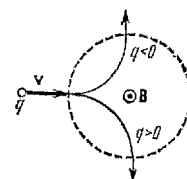
Отсюда:

$$r = mv/qB \quad [52]$$

Время, за которое частица делает полный оборот (период обращения), равно:

$$T = 2\pi r/qv \quad [53]$$

С изменением знака заряда направление силы Лоренца изменяется на противоположное и вращение происходит в противоположную сторону (если не изменить направления вектора индукции на противоположное).



6°. Вспомним, что электрическое поле действует на заряд q с силой

$$F_{эл} = qE.$$

Следовательно, если есть и электрическое поле, и магнитное поле, то суммарная сила F , действующая на заряд, равна:

$$F = F_{эл} + F_{л}. \quad [54]$$

Эта сила называется **обобщенной силой Лоренца**. Её направление зависит от того, в каком направлении действуют обе силы.

7°. *Действие магнитного и электрического полей на движущийся заряд широко используют в современной технике.*

В кинескопах телевизоров летящие к экрану электроны (электронные лучи) отклоняются силой Лоренца определённым образом с помощью магнитного поля, создавая изображение на экране, рис. 217.

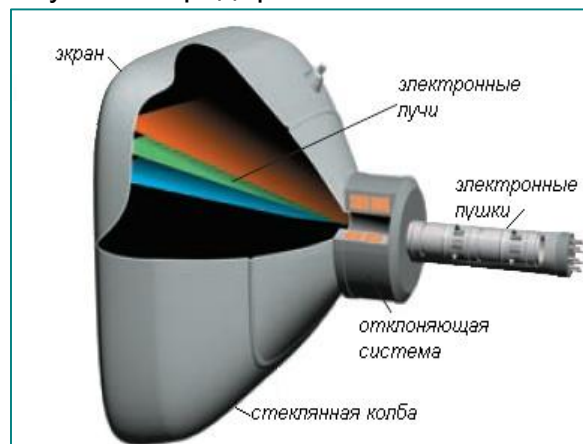


Рис. 217. Изображение на экране телевизора возникает благодаря отклоняющей системе.

8°. Период обращения заряженной частицы T не зависит от радиуса окружности и от скорости. Это положено в основу работы ускорителя заряженных частиц — **циклотрона** — установки для получения частиц с большими энергиями.

Циклотрон состоит из двух полых полуцилиндров (дуантов), находящихся в однородном магнитном поле B , рис. 218. Между дуантами создается переменное электрическое поле. Согласно формуле [52] при увеличении скорости v частицы радиус r окружности (траектории), по которой

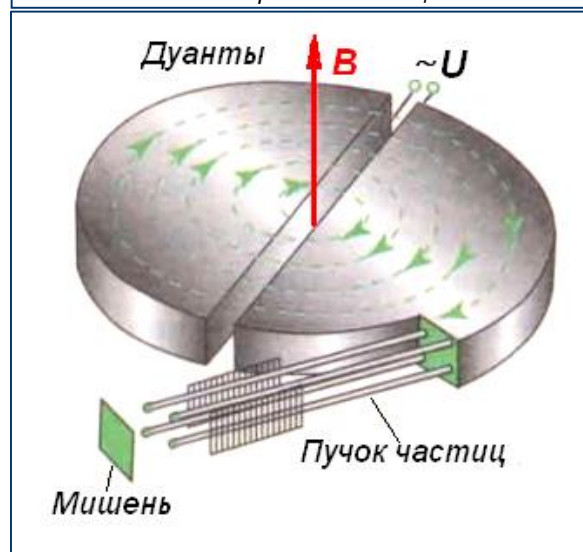


Рис. 218. Ускоритель заряженных частиц – циклотрон (схема).

движется частица, увеличивается. Период обращения частицы не зависит от скорости (см. формулу [53]), и, следовательно, через полпериода, вследствие изменения направления электрического поля, частица снова оказывается в ускоряющем ее поле и т. д. На последнем витке частица вылетает из циклотрона, попадая в мишень.

9°. На действии магнитного и электрического полей основано устройство приборов, позволяющих разделять заряженные частицы по их удельным зарядам, т. е. по отношению заряда частицы к ее массе q/m . По полученным результатам можно точно определять массы заряженных частиц – ионов или ядер различных атомов. Такие приборы получили название **масс-спектрометров**.

Масс-спектрометры используются для разделения **изотопов**, то есть ядер атомов с одинаковым зарядом, но разными массами (например, ^{20}Ne и ^{22}Ne). Простейший масс-спектрометр показан на *рис. 219*. Ионы, вылетающие из источника S , проходят через несколько небольших отверстий, формирующих узкий пучок и попадают в селектор скоростей, где движутся в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях \mathbf{B} и \mathbf{E} . Электрическое поле создается между пластинами плоского конденсатора, а магнитное – в зазоре между полюсами электромагнита. Начальная скорость частиц направлена перпендикулярно векторам \mathbf{B} и \mathbf{E} .

На частицу, движущуюся в скрещенных электрическом и магнитном полях, действуют электрическая сила $q\mathbf{E}$ и магнитная сила Лоренца $q\mathbf{v}\mathbf{B}$. При условии $E = vB$ эти силы точно уравниваются друг друга. Если это условие выполняется, частица будет двигаться равномерно и прямолинейно и, пролетев через конденсатор, пройдет через отверстие в экране. При заданных значениях электрического и магнитного полей селектор выделит частицы, движущиеся со скоростью $v = E/B$.

Далее частицы с одним и тем же значением скорости попадают в камеру масс-спектрометра, в которой создано однородное магнитное поле \mathbf{B} . Частицы движутся в камере в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, под действием силы Лоренца. Траектории частиц представляют собой полуокружности радиусов $r = mv/qB$. Измеряя радиусы траекторий при известных значениях v и \mathbf{B} , можно определить отношение q/m . В случае изотопов ($q_1 = q_2$) масс-спектрометр позволяет разделить частицы с разными массами.

Современные масс-спектрометры позволяют измерять массы заряженных частиц с точностью выше 10^{-4} .

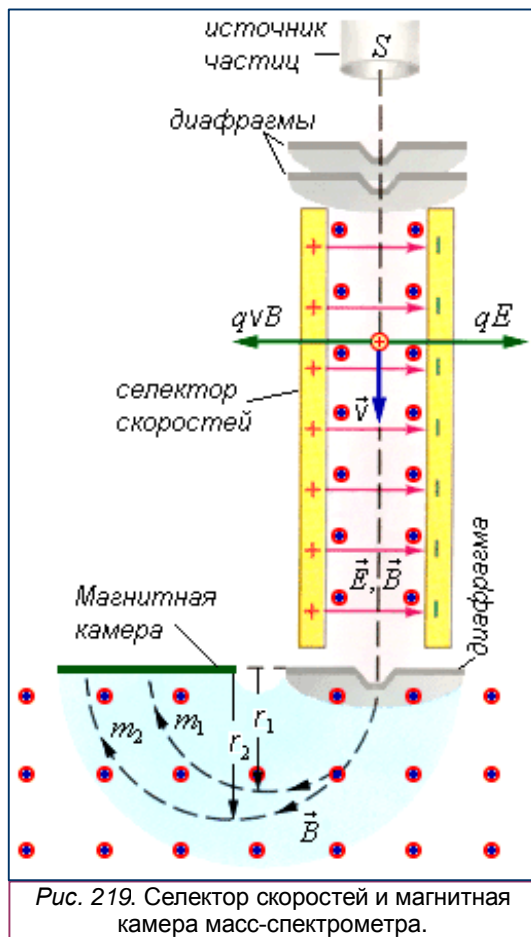


Рис. 219. Селектор скоростей и магнитная камера масс-спектрометра.

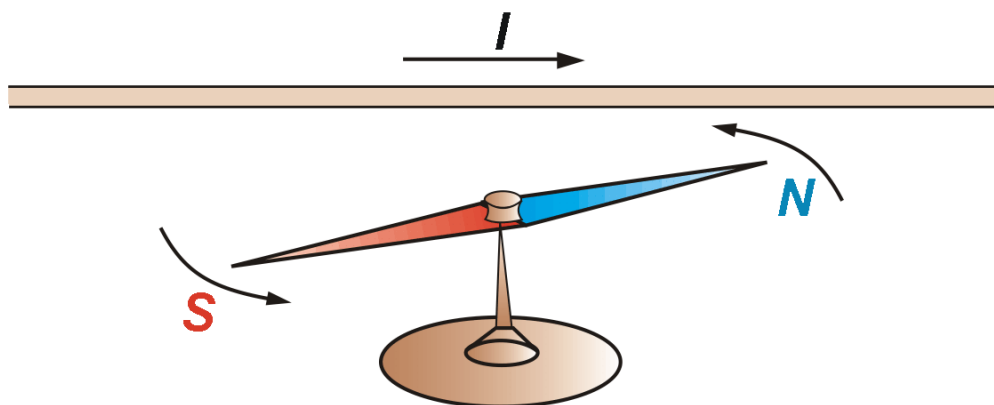


Вопросы

1. Чему равен модуль силы Лоренца?
2. Как движется заряженная частица в однородном магнитном поле, если начальная скорость частицы перпендикулярна линиям магнитной индукции?
3. Как определить направление силы Лоренца?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ (1)

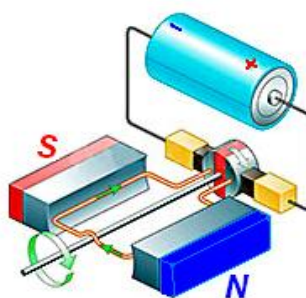
КРОССВОРДЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ



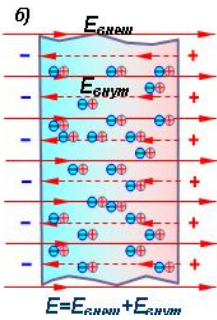
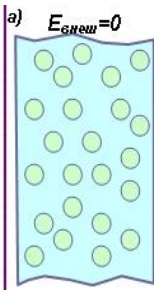
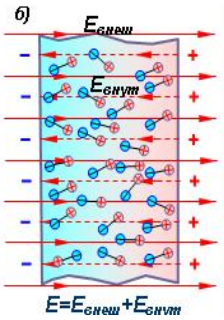
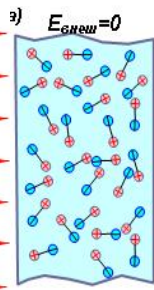
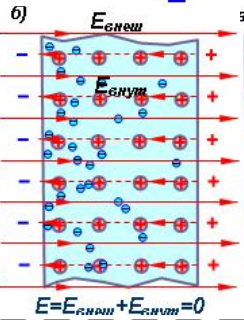
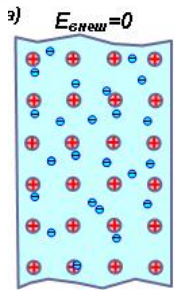
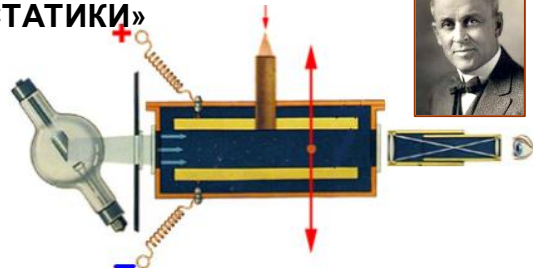
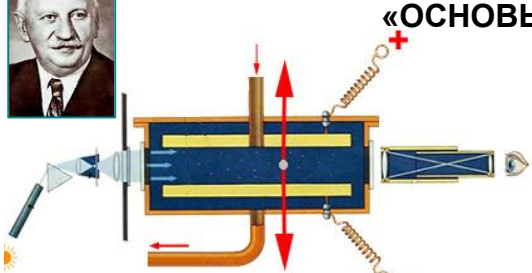
Знайка: «Вот это отклонение магнитной стрелки при включении тока впервые показало физикам, что магнетизм и электричество тесно связаны друг с другом. Вскоре после этого появились электромагниты, электродвигатели, а затем и электрогенераторы. Это изменило всю нашу цивилизацию!».



Незнайка: «Надо же подумать – такая мелочь и столько натворила!»



№4 Кроссворд для повторения главы 4 «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ»



1 4

2 5 $F = qE$

3 $E = k \frac{Q}{r^2}$

6 7 9 $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 12

8 $C = \frac{1}{\sum \frac{1}{C_i}}$ 11

10 3 $U = \varphi_1 - \varphi_2$ $E = -\frac{\Delta \varphi}{\Delta d} = \frac{U}{\Delta d}$ 20

11 $\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S}$ 12/14

13 18

14 15 10 16 @

17 @

$A = qU$ $qU = -(W_{n2} - W_{n1})$

0_1e 1_1p 1_0n

По горизонтали:

1. Эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием деформации.
2. Английский физик, открывший в 1897 году электрон.
3. Раздел учения об электричестве, посвященный изучению покоящихся электрически заряженных тел.
4. Тело, содержащее достаточное количество свободных электрических зарядов, способных перемещаться под действием электрического поля.
5. Дистиллированная вода – это ... диэлектрик.
6. Силовая характеристика электрического поля.
7. Великий русский ученый, разработавший теории образования атмосферного электричества.
8. Учёный, установивший закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов.
9. Один из способов электризации тел.
10. Основная характеристика конденсатора.
11. Элементарная заряженная частица.
12. Прибор для обнаружения и оценки разности потенциалов.
13. Дольная единица электроёмкости.
14. Элементарная заряженная частица, входящая в состав ядра атома.
15. Энергетическая характеристика электростатического поля.
16. Линия, в каждой точке которой касательная совпадает с вектором напряженности поля.
17. Частица, обеспечивающая электропроводность металлов.

По вертикали:

1. Единица электроёмкости в СИ.
2. Физик, предложивший планетарную модель атома.
3. Устройство, предохраняющее сооружения от повреждения атмосферными разрядами.
4. Диэлектрики, длительно сохраняющие наэлектризованное состояние.
5. Область пространства, в которой действуют силы.
6. Устройство, из двух или более проводящих обкладок, разделенных диэлектриком.
7. Форма изменения энергии электрического поля.
8. Нейтральная частица ядра атома.
9. Внесистемная единица энергии.
10. Электрически заряженная частица, образующая из нейтрального атома или молекулы путем отдачи или присоединения электронов.
11. Частицы, входящие в состав ядра атома.
12. Вещество, практически не проводящее электрический ток.
13. Водород это ... диэлектрик
14. Прибор для обнаружения наэлектризованного тел.
15. Город в Голландии, где впервые был продемонстрирован конденсатор.
16. Дольная единица электроёмкости.
17. Устройство, не допускающее электрический контакт.
18. Американский физик, измеривший заряд электрона.
19. Русский физик, измеривший заряд электрона.
20. «Центр» атома.

ОТКУДА БЕРЁТСЯ МОЛНИЯ?

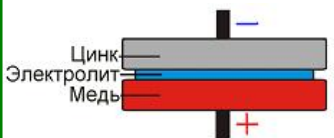
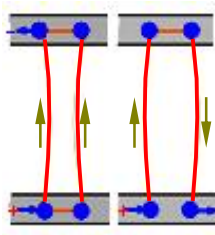
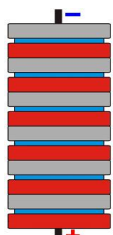
Происхождение молнии таково. Облака, проносимые ветром с большой скоростью над Землёй, электризуются. Вокруг них создаётся сильное электрическое поле. На ближайших к ним телах индуцируются заряды противоположного знака. Это соседние облака, самолёт или поверхность Земли с находящимися на ней высокими объектами.

Если два облака с зарядами противоположного знака сближаются, между ними происходит электрический разряд – молния, сопровождаемая громом.

То же самое может происходить между грозовым облаком и другими заряженными объектами в небе или на Земле.



№5 Кроссворд для повторения главы 5 «ПОСТОЯННЫЙ ТОК» (ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ)

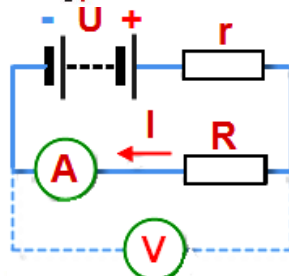


$$U = U_1 = U_2.$$

$$I = I_1 + I_2.$$

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

$$I_1 / I_2 = R_2 / R_1.$$



$$I = U / R$$

$$U = I R$$

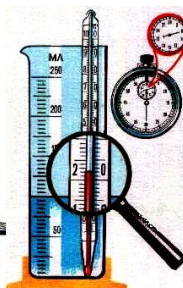
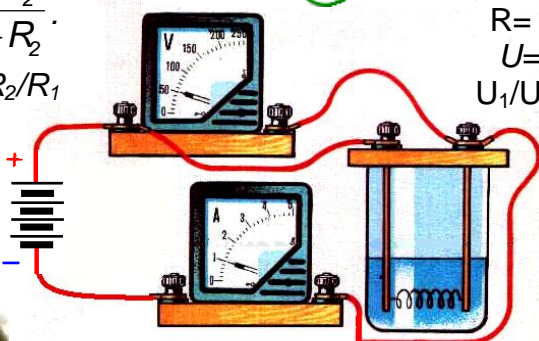
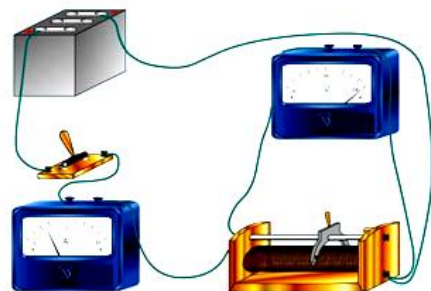
$$R = U / I$$

$$I = I_1 = I_2.$$

$$R = R_1 + R_2.$$

$$U = U_1 + U_2.$$

$$U_1 / U_2 = R_1 / R_2.$$



A crossword puzzle grid with numbered squares. The grid is filled with green cells. Numbers 1 through 23 are placed in the starting squares of the words. The puzzle is surrounded by various physics-related illustrations:

- A coil of wire with a current arrow.
- A molecular model showing spheres representing atoms.
- A battery with a light bulb connected to it.
- A diagram of a resistor with current I and voltage U .
- A diagram of a rectangular loop with current I and magnetic field B .
- A diagram of a wire with a rabbit sitting on it.
- A diagram of a Daniell cell with Zn and Cu electrodes.
- A diagram of a string of colorful lights.
- A diagram of a person on a ladder.

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R} = I U t$$

$$l = \frac{RS}{\rho}$$

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

По горизонтали:

1. Физик, открывший закон связи между силой тока в цепи, напряжением и сопротивлением.
2. Прибор для измерения напряжения.
3. Основная характеристика источника (сокращение).
4. Тело, содержащее свободные электрические заряды.
5. Единица работы тока, применяемая на практике.
6. Процесс распространение электрической энергии
7. Прибор для измерения сопротивления.
8. Упорядоченное движение зарядов
9. Поверхность соприкосновения проводящих электрический ток материалов.
10. Соединение проводников, при котором все входящие в него проводники одним своим концом присоединяются к одной точке цепи **A**, а вторым концом к другой точке **B**.
11. Хорошие проводники электричества.
12. основоположник советский радиоастрономии, исследовавший инерционность электрона.
13. Измеритель мощности тока.
14. Часть электрической цепи.
15. Русский физик, показавший, что количество теплоты, выделяемое током в проводнике, пропорционально квадрату силы тока.
16. Объединение нескольких элементов.
17. Заряженная частица.
18. Основная электрическая характеристика проводника.
19. Единица напряжения.
20. Действие электрического тока, при котором вода разлагается на водород и кислород.
21. В цепи случается короткое...
22. Важнейшая характеристика тока.
23. Свободное место в электронной оболочке атома полупроводника.

По вертикали

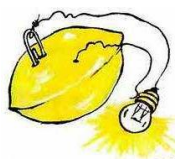
1. Переменный резистор с ползунком.
2. Итальянский анатом и физиолог, основоположник электрофизиологии.
3. Итальянский физик, химик и физиолог, один из основоположников учения об электричестве.
4. Очень хороший проводник.
5. Устройство для хранения энергии.
6. Идеальный изолятор.
7. Основной элемент электрической цепи.
8. Единица мощности тока.
9. Совокупность устройств, предназначенных для протекания электрического тока
10. Чувствительный прибор для измерения малых напряжений.
11. Одна из форм преобразования энергии тока в нагревательных приборах.
12. Действие электрического тока, проявляющееся в утюге.
13. Единица силы тока.
14. Геометрический размер проводника, увеличение которого увеличивает сопротивление.
15. Геометрический размер проводника, увеличение которого уменьшает сопротивление.
16. Английский физик, изучавший, в частности, тепловое действие тока.
17. Действие электрического тока, воздействующее на соседние токи и намагниченные тела.
18. Элементарный заряд, обеспечивающий ток в металлах.
19. Явление, сопровождающее наличие электрического тока.

БАТАРЕЙКА СВОИМИ РУКАМИ

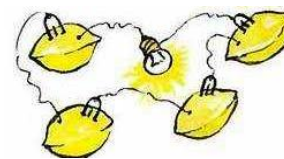
Батарейку из лимона сделать очень просто.

Понадобится: лимон; медная проволока 2 кусочка по 10 см; диаметр – 0,2 – 0,5 мм; канцелярская скрепка; маленькая лампочка.

Последовательность действий:



1. Зачистить концы каждой проволоочки на 2-3 см.
2. Оголенный конец одной проволоки прикрутите к скрепке.
3. В лимоне сделать надрез по ширине скрепки и прокол иглой на расстоянии 2-3 см от этого надреза.



В надрез вставить скрепку, в прокол – вторую проволочку.

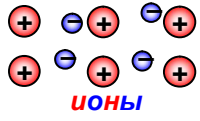
4. Приложите проволоки к контактам лампочки – она загорится! ЭДС лимона составляет около 1 вольт. Если одного лимона не хватает, можно последовательно соединить несколько, как это показано на рисунках.

№6 Кроссворд для повторения главы 5 «ПОСТОЯННЫЙ ТОК» (В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ)

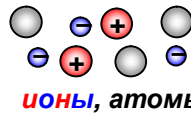


СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ

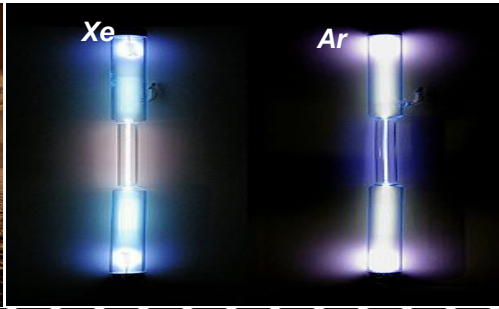
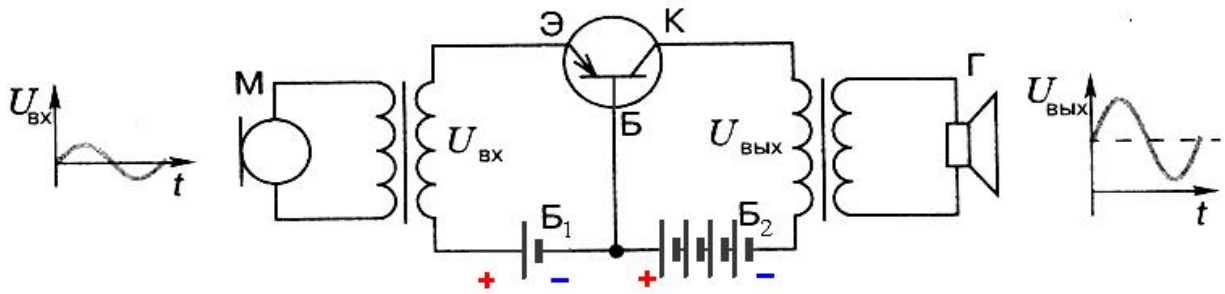
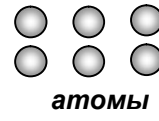
металлов



полупроводников



диэлектриков



A crossword puzzle grid with 18 numbered clues. The grid is filled with green cells. The clues are:

- 1. (Horizontal, 4 cells)
- 2. (Horizontal, 2 cells)
- 3. (Vertical, 3 cells)
- 4. (Horizontal, 4 cells)
- 5. (Vertical, 3 cells)
- 6. (Horizontal, 3 cells)
- 7. (Vertical, 3 cells)
- 8. (Horizontal, 3 cells)
- 9. (Horizontal, 3 cells)
- 10. (Horizontal, 3 cells)
- 11. (Horizontal, 3 cells)
- 12. (Horizontal, 3 cells)
- 13. (Horizontal, 3 cells)
- 14. (Horizontal, 3 cells)
- 15. (Horizontal, 3 cells)
- 16. (Horizontal, 3 cells)
- 17. (Horizontal, 3 cells)
- 18. (Horizontal, 3 cells)

По горизонтали:

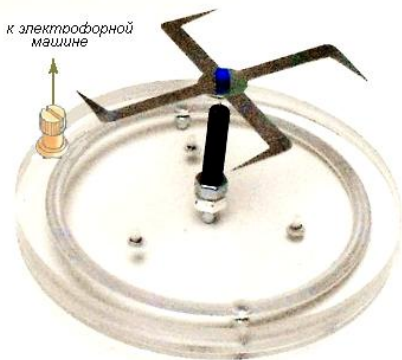
1. Газовый разряд, не нуждающийся для своего поддержания во внешнем ионизаторе.
2. Раствор или расплав вещества, содержащий ионы и проводящий электрический ток.
3. Проводимость полупроводников при наличии примесей.
4. Высоковольтный разряд в газе.
5. Частично или полностью ионизованный газ,
6. Отрицательный электрод.
7. Нестационарный разряд в газе.
8. Отрицательный ион в электролите
9. Самостоятельный разряд при высокой температуре катода.
10. Распад нейтральных молекул растворенного вещества на ионы под действием растворителя.
11. Устройство защиты от молнии.
12. Газовый разряд в разряженном газе.
13. Русский учёный, разработавший метод изготовления копий изделий с помощью электролитического осаждения металла.
14. Быстро нарастающая ионизация.
15. Препятствие ионизации.
16. Полупроводниковый триод.
17. Прибор, использующий перемещение луча на экране для исследования.
18. Проводимость чистых проводников

По вертикали:

1. Объединение ионов разных знаков при встрече в нейтральные молекулы.
2. Положительный электрод.
3. Двухэлектродный прибор.
4. Управляющий электрод триода.
5. Положительный ион в электролите.
6. Область р-типа р-п-р транзистора с меньшей концентрацией дырок
7. Явления на электродах находящиеся в жидкости при прохождении электрического тока.
8. Часто используемый полупроводник.
9. Явление стабилизации тока при увеличении напряжения.
10. Распад молекул на заряженные частицы.
11. Очень резкое увеличение тока.
12. Средний электрод транзистора.
13. Примесь полупроводника с большим количеством валентных электронов.
14. Область р-типа р-п-р транзистора с большей концентрацией дырок.
15. Протекание тока, связанное с увеличением проводимости среды.
16. Советский физик, изучавший полупроводники.
17. Вакуумный прибор с тремя электродами.
18. Примесь полупроводника с меньшим количеством

КОЛЕСО ФРАНКЛИНА

Это прибор, см. рисунок, состоящий из лёгкой, обычно крестообразной металлической



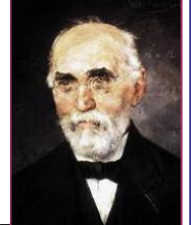
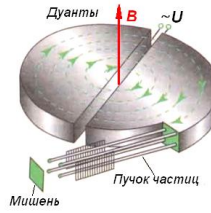
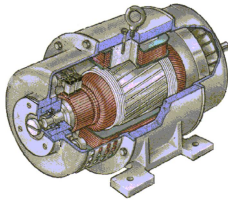
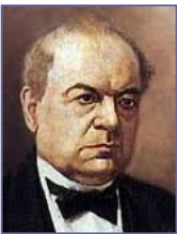
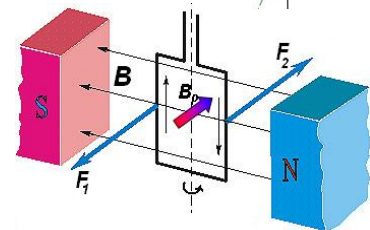
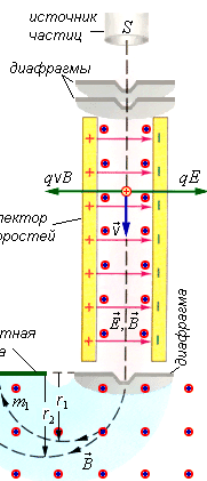
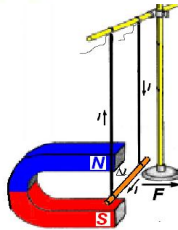
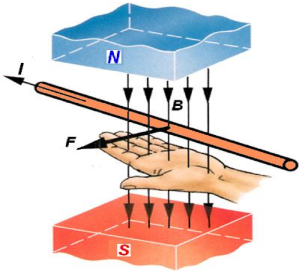
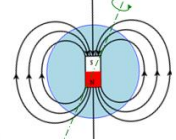
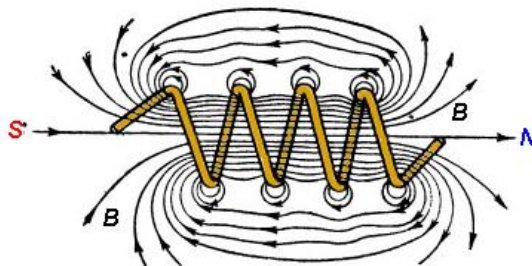
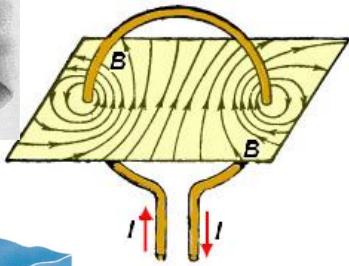
вертушки, имеющей острые окончания, направленные по касательным в сторону, противоположную вращению. Вертушка свободно вращается на заострении металлической оси, соединённой с клеммой на основании из диэлектрика. При подключении клеммы к одному из полюсов электрофорной машины, вертушка начинает быстро вращаться, издавая шелестящий шум коронного разряда (рис. 137-138).

Принцип действия прибора состоит в следующем.

При подключении электрофорной машины к колесу Франклина (через клемму, соединённую с осью вертушки) у каждого острья колеса создается весьма сильное электрическое поле (см. рис. 43). На нейтральные молекулы воздуха, находящиеся вблизи острья, действуют электрические силы, которые вызывают расщепление молекул

на ионы. Разноименно заряженные ионы относительно заряда острья притягиваются и нейтрализуются. Одноименно заряженные ионы, взаимодействуя с зарядами на острьях, приходят в движение, одновременно начинают двигаться и острья, т. е. колесо, которое приобретает вращательное движение.

№7. Кроссворд для повторения главы 6 «МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ»



$$T = 2\pi r / qvB$$

$$r = mv / qvB$$

$$F_n = T = 2\pi r / qvB$$

$$\Delta F = I \Delta l B \sin \alpha = I \Delta l B_{\perp}$$

$$p_m = ISn_0$$

$$M = ISB \sin \theta$$

A crossword puzzle grid with 18 numbered starting points. The grid is composed of green squares. The numbers are: 1 (top center), 2 (top right), 3 (left), 4 (middle), 5 (right), 6 (left), 7 (left), 8 (middle), 9 (middle), 10 (left), 11 (middle), 12 (middle), 13 (left), 14 (middle), 15 (left), 16 (left), 17 (middle), 18 (bottom left), 19 (bottom right). The puzzle is surrounded by various physics diagrams related to magnetism, including magnetic fields, forces on currents, torque on loops, and particle motion.

По горизонтали:

1. Магнитные аномалии у Северного и Южного полюса Земли.
2. Магнит планетарных размеров.
3. Единица магнитной индукции в СИ.
4. Угол между географическим и магнитным меридианами – это магнитное...
5. Ускоритель заряженных частиц.
6. Физик, именем которого названа сила, действующая на заряд в магнитном поле.
7. Датский учёный, обнаруживший взаимосвязь электрического тока и магнетизма.
8. Угол между осью стрелки и горизонтальной плоскостью это магнитное....
9. Магнитный ... – это природный магнит.
10. Часть узла, переключающего направление тока при вращении якоря электромотора.
11. Соленоид с железным сердечником.
12. Катушка с большим числом витков проволоки.
13. Американский художник и изобретатель телеграфа.
14. Вектор, характеризующий магнитные свойства рамки с током.
15. Вещества, способные намагничиваться.
16. Температура, выше которой ферромагнетики теряют свои магнитные свойства.
17. Электронно-лучевая трубка с магнитной отклоняющей системой в телевизоре.
18. Прибор, указывающий на магнитные полюса Земли.
19. Американский физик, усовершенствовавший электромагниты.

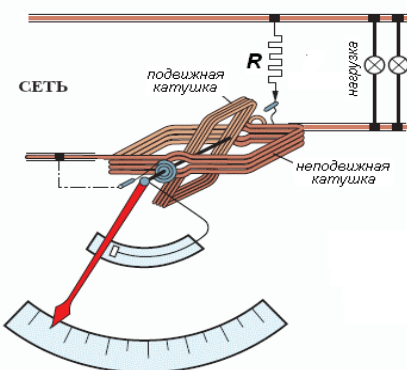
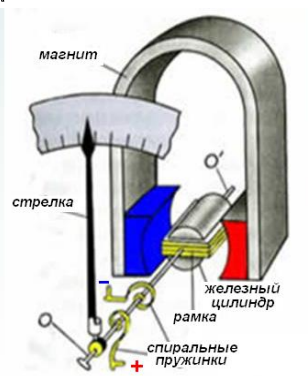
По вертикали:

1. Прибор для измерения магнитного наклона.
2. Векторная величина, характеризующая магнитное поле.
3. Область физических явлений, связанных с проявлениями магнитного поля.
4. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле.
5. q/m – название физической величины.
6. Вращающаяся часть электромотора.
7. Вещество-ферромагнетик.
8. Выдающийся русский учёный, изучавший магнитные свойства веществ.
9. Контакты, скользящие по коллектору электромотора.
10. Вещество, создающее наиболее сильное магнитное поле.
11. Области с параллельной ориентацией спинов.
12. Внутримолекулярные токи, определяющие магнитные свойства вещества.
13. Автор одного из первых электродвигателей, пригодных для практического использования

УСТРОЙСТВО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРА

Магнитоэлектрическим называется прибор, принцип действия которого основан на действии магнита на проводник с током.

Измерительный прибор **магнитоэлектрической** системы содержит лёгкую алюминиевую рамку проволокой на двух полуосях O и O' . Она может легко поворачиваться вместе со стрелкой. Ось удерживается спиральными пружинами. Они возвращают рамку к положению равновесия в отсутствие тока. Их сила пропорциональна углу отклонения стрелки от равновесия. Рамка помещена между полюсами постоянного магнита с наконечниками. Внутри рамки находится цилиндр из железа. Это обеспечивает радиальное направление линий магнитной индукции в области рамки. В результате при любом положении рамки силы магнитного поля, действующие на неё, максимальны и при неизменной силе тока постоянны.



УСТРОЙСТВО И ВКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ВАТТМЕТРА

Электродинамическим называется прибор, действие которого основано на взаимодействии двух проводников при протекании по ним тока.

Ваттметры имеют две электрические цепи.

Во-первых, цепь **тока** состоит из неподвижной катушки, включённой в цепь последовательно с нагрузкой;

Во-вторых, цепь **напряжения** состоит из подвижной катушки, включённой через большое добавочное сопротивление R параллельно нагрузке.



РЕШЕНИЕ КРОССВОРДОВ

Кроссворд №4

По горизонтали:

1. Пьезоэффект. 2. Томсон. 3. Электростатика. 4. Проводник. 5. Полярный. 6. Напряжённость. 7. Ломоносов. 8. Кулон. 9. Индукция. 10. Ёмкость. 11. Электрон. 12. Электромметр. 13. Пикофарад. 14. Протон. 15. Потенциал. 16. Силовая линия. 17. Свободный электрон.

По вертикали:

1. Фарад. 2. Резерфорд. 3. Молниеотвод. 4. Электреты. 5. Поле. 6. Конденсатор. 7. Работа. 8. Нейтрон. 9. Электрон-вольт. 10. Ион. 11. Нуклон. 12. Диэлектрик. 13. Неполярный. 14. Электроскоп. 15. Лейден. 16. Микрофарад. 17. Изолятор. 18. Милликен. 19. Иоффе. 20. Ядро.

Кроссворд №5

По горизонтали:

1. Ом. 2. вольтметр. 3. ЭДС. 4. проводник. 5. ватт-час. 6. передача. 7. омметр. 8. ток. 9. контакт. 10. параллельное. 11. металлы. 12. Папалекси. 13. ваттметр. 14. потребитель. 15. Ленц. 16. батарея. 17. ион. 18. сопротивление. 19. вольт. 20. химическое. 21. замыкание. 22. сила. 23. дырка.

По вертикали:

1. реостат. 2. Гальвани. 3. Вольта. 4. медь. 5. аккумулятор. 6. вакуум. 7. источник. 8. ватт. 9. цепь. 10. гальванометр. 11. тепло. 12. тепловое. 13. ампер. 14. длина. 15. сечение. 16. Джоуль. 17. магнитное. 18. электрон. 19. действие.

Кроссворд №6

По горизонтали:

1. самостоятельный разряд. 2. электролит. 3. примесная. 4. коронный. 5. плазма. 6. катод. 7. искровой. 8. анион. 9. дуговой. 10. диссоциация. 11. громоотвод. 12. тлеющий. 13. Якоби. 14. лавина. 15. энергия связи. 16. транзистор. 17. осциллограф. 18. собственная.

По вертикали:

1. рекомбинация. 2. анод. 3. диод. 4. сетка. 5. катион. 6. катод. 7. электролиз. 8. кремний. 9. насыщение. 10. ионизация. 11. пробой. 12. база. 13. донорная. 14. эмиттер. 15. разряд. 16. Иоффе. 17. триод. 18. акцепторная.

Кроссворд №7

По горизонтали:

1. магнитные полюсы. 2. Земля. 3. тесла. 4. склонение. 5. циклотрон. 6. Лоренц. 7. Эрстед. 8. наклонение. 9. железняк. 10. коллектор. 11. электромагнит. 12. соленоид. 13. Морзе. 14. магнитный момент. 15. магнетики. 16. точка Кюри. 17. кинескоп. 18. компас. 19. Генри.

По вертикали:

1. инклинатор. 2. вектор магнитной индукции. 3. магнетизм. 4. сила Ампера. 5. удельный заряд. 6. якорь. 7. железо. 8. Столетов. 9. щётки. 10. ферромагнетик. 11. домены. 12. токи Ампера. 13. Якоби.