

Глава I. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 1. Магнитные взаимодействия. Магнитное поле

1. Взаимодействие постоянных магнитов

Вспомним свойства постоянных магнитов, знакомые вам из курса физики основной школы.



- °1¹⁾. На рисунке 1.1 изображены полосовые магниты, подвешенные на нитях. Северный и южный полюсы обозначены только у магнитов, подвешенных справа.

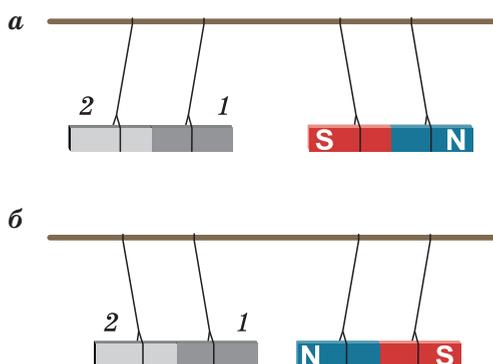


Рис. 1.1

- а) Какой цифрой обозначен северный полюс неокрашенного магнита на рисунке 1.1, а?
б) Какой цифрой обозначен южный полюс неокрашенного магнита на рисунке 1.1, б?
- °2. Как вы знаете, Земля представляет собой огромный магнит. Вблизи какого географического полюса Земли находится её северный магнитный полюс?

1) Значком «°» обозначены задачи, которыми по усмотрению учителя можно в основном ограничиться при изучении физики на базовом уровне. Кроме того, в конце почти каждого параграфа тоже есть задачи базового уровня.

2. Взаимодействие проводников с током

Электрические и магнитные явления долгое время рассматривались независимо друг от друга. Только в начале 19-го века датский учёный Г. Эрстед обнаружил, что проводник с током¹⁾ обладает *магнитными свойствами*: помещённая вблизи него магнитная стрелка *поворачивается*. К этому опыту мы вернёмся в одном из заданий в конце параграфа, а сейчас рассмотрим магнитное взаимодействие прямолинейных проводников с токами, открытое на опыте французским физиком А. Ампером.

Взаимодействие прямолинейных проводников с током

Поставим опыт

На рисунке 1.2 изображены результаты опытов по взаимодействию параллельных прямолинейных проводников, по которым текут токи. В качестве проводников в этом опыте часто используют ленту из фольги, потому что при этом заметнее изгиб проводника, на который действует сила со стороны другого проводника.

- °3. В каком случае проводники *притягиваются* — когда токи в проводниках текут в одном направлении или в противоположных? В каком случае проводники *отталкиваются*?

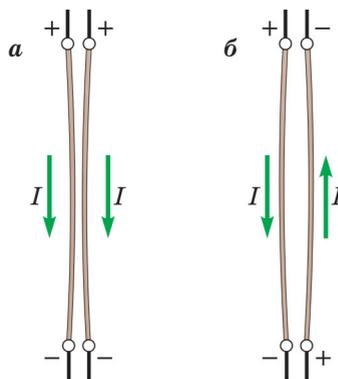


Рис. 1.2

- °4. Можно ли считать, что описанное выше взаимодействие проводников с токами имеет электрическую природу?

Итак, в описанном опыте проявляются *магнитные свойства* проводников с токами.

Единица силы тока

Взаимодействие прямолинейных проводников с токами выбрали для определения *единицы силы тока* в СИ — *ампера* (А).

Сила тока в каждом из двух параллельных бесконечно длинных проводников очень малого поперечного сечения, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга, равна 1 А, если эти проводники взаимодействуют с силами, равными $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины²⁾.

¹⁾ Для краткости мы будем называть так проводник, по которому течёт ток.

²⁾ Эта информация приведена исключительно в справочных целях.

Единица электрического заряда в СИ — кулон (Кл) связана с единицей силы тока ампер (А) соотношением $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$.

Взаимодействие витков и катушек с током

Зная, как взаимодействуют прямолинейные проводники с токами, можно предсказать, как будут взаимодействовать круговые витки с токами.



- °5. В какой паре витков с токами из изображённых на рисунках 1.3, а, б витки притягиваются, а в какой — отталкиваются?

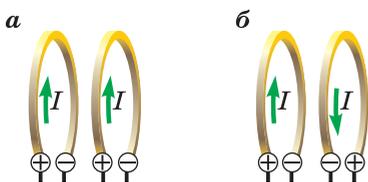


Рис. 1.3

Перейдём от витков с токами к катушкам с токами.



- °6. На каком из рисунков 1.4, а, б изображены катушки, токи в которых направлены одинаково? противоположно?

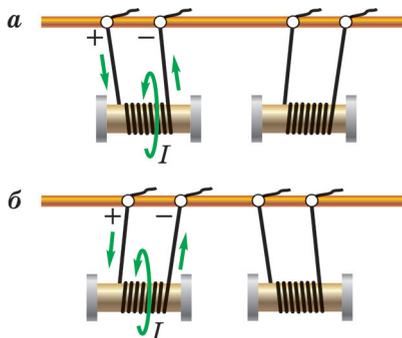


Рис. 1.4

3. Магнитные свойства вещества

Гипотеза Ампера

Сравнивая взаимодействие катушек с токами (см. рис. 1.4) и взаимодействие постоянных магнитов (см. рис. 1.1), легко заметить их сходство. Основываясь на этом наблюдении, Ампер предположил, что

внутри постоянных магнитов циркулируют незатухающие одинаково направленные «молекулярные токи» (рис. 1.5, а).

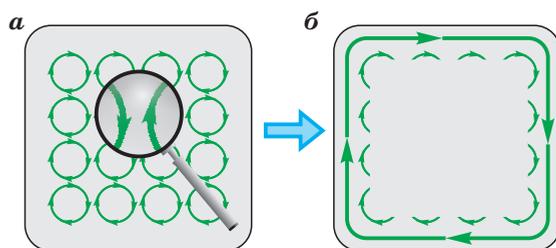


Рис. 1.5

В толще магнита соседние молекулярные токи направлены противоположно. Поэтому они взаимно компенсируют друг друга. Зато вблизи поверхности магнита все молекулярные токи направлены одинаково (рис. 1.5, б), и в результате они как бы образуют ток, текущий по поверхности магнита, подобно току в катушке. Это и объясняло, по мнению Ампера, магнитные свойства вещества.

7. Основываясь на гипотезе Ампера, объясните, почему при разламывании полосового магнита образуются снова два магнита, у каждого из которых есть северный и южный полюсы.



Ферромагнетики

Гипотеза Ампера была очень красивой, однако дальнейшие исследования не подтвердили, что свойства постоянных магнитов обусловлены «молекулярными токами».

Выяснилось, что магнитные свойства постоянных магнитов связаны с тем, что каждый электрон сам по себе является крошечным магнетиком. В веществах, из которых можно изготовить постоянные магниты, при определённых условиях некоторая (сравнительно небольшая) часть электронов-магнетиков ориентируется одинаково. В результате образец вещества начинает проявлять магнитные свойства. Эти вещества называют *ферромагнетиками*. Наиболее распространённые ферромагнетики — железо и его сплавы (сталь и чугун).

Магнитные свойства ферромагнетика исчезают, если нагреть его до температуры, которую назвали *точкой Кюри* в честь французского физика П. Кюри. Например, точка Кюри для железа равна 753 °С.

Парамагнетики и диамагнетики

Магнитными свойствами обладают не только ферромагнетики. Слабо выраженные магнитные свойства проявляют практически все вещества, в том числе все металлы — например, «немагнитные» медь и алюминий.

Одни вещества слабо *притягиваются* к постоянным магнитам — их называют *парамагнетиками* (к их числу относится алюминий), другие же слабо *отталкиваются* от постоянных магнитов — их называют *диамагнетиками* (к их числу относится медь).

Свойства парамагнетиков удалось объяснить, используя соображения, сходные с гипотезой Ампера. Свойства диамагнетиков обусловлены явлением электромагнитной индукции, о котором мы расскажем далее.

4. Магнитное поле

Английский учёный М. Фарадей предположил, что *магнитные взаимодействия*, подобно электрическим, *осуществляются посредством поля*, которое назвали *магнитным полем*.

Как мы уже знаем, магнитными свойствами обладают проводники с токами. Следовательно, *проводник с током является источником магнитного поля*.

Электрический ток представляет собой направленное движение заряженных частиц. Следовательно, *движущаяся заряженная частица является источником магнитного поля*.

Магнитное взаимодействие постоянных магнитов обусловлено магнитными свойствами электронов. Выяснилось, что и другие мельчайшие частицы вещества, которые называют *элементарными* (например, протон и нейтрон, из которых состоят атомные ядра) тоже обладают магнитными свойствами. Следовательно, *источниками магнитного поля могут быть элементарные частицы* (даже находящиеся в покое и даже не имеющие электрического заряда — например, нейтрон, входящий в состав атомных ядер).

Скоро мы узнаем, что *источником магнитного поля является также изменяющееся во времени электрическое поле*.

Вектор магнитной индукции

Магнитное поле проявляет себя тем, что оно действует с некоторой *силой* на проводник с током, на движущуюся заряженную частицу или на полюсы постоянного магнита.

Сила — это векторная величина, поэтому естественно ожидать, что магнитное поле характеризуется также *векторной величиной*. Эту величину называют *магнитной индукцией* и обозначают \vec{B} .

За *направление вектора магнитной индукции* \vec{B} принимают направление, на которое указывает *северный полюс* свободно вращающейся магнитной стрелки (рис. 1.6).



Рис. 1.6

Линии магнитной индукции

Поставим опыт

Если поместить небольшие магнитные стрелки вблизи постоянного магнита, то можно заметить, что они поворачиваются, выстраиваясь при этом вдоль некоторых линий (рис. 1.7).

Эти линии называют *линиями магнитной индукции* или *магнитными линиями*. Описанный опыт показывает, что

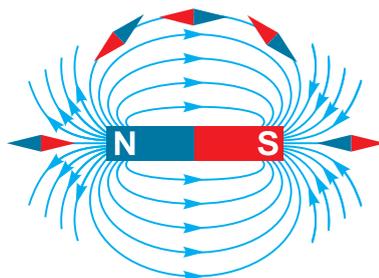


Рис. 1.7

касательная к линии магнитной индукции в данной точке пространства показывает направление вектора магнитной индукции \vec{B} в этой точке.

На рисунках 1.8, *а*, *б* изображены линии магнитной индукции поля, созданного катушкой с током.

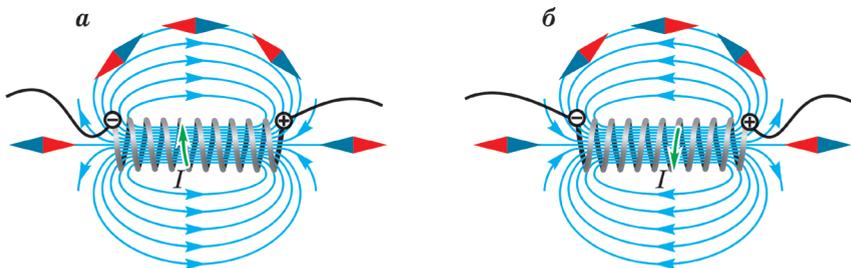


Рис. 1.8

- °8. Сравните магнитные линии поля, созданного катушкой с током, с магнитными линиями поля, созданного полосовым магнитом. Что у них общего и чем они отличаются?

Нетрудно заметить, что магнитные линии поля, созданного катушкой с током, похожи по форме на магнитные линии поля, созданного полосовым магнитом. Отличие состоит в том, что магнитные линии поля, созданного полосовым магнитом, выходят из северного полюса и входят в южный полюс и поэтому *кажутся незамкнутыми*, а магнитные линии поля, созданного катушкой с током, *замкнуты*. На самом же деле магнитные линии поля, созданного полосовым магнитом, тоже *замкнуты*: они замыкаются *внутри* магнита, потому что внутри магнита тоже есть магнитное поле.

Особенность магнитных линий состоит в том, что они, в отличие от линий напряжённости электрического поля, замкнуты *всегда*.



9. Чем отличаются опыты, схематически изображённые на рисунках 1.8, *а* и *б*? Какой вывод можно сделать из этого наблюдения?

5. Правило буравчика

Правило буравчика для витка или катушки с током

Мы видели, что при изменении направления тока в катушке изменяется и направление магнитных линий поля, созданного этим током. В связи с этим возникает вопрос: как связано направление линий магнитной индукции поля, созданного катушкой с током, с направлением тока в катушке?

Ответ на этот вопрос даёт правило, называемое *правилом правого буравчика* или, сокращённо, *правилом буравчика*.

Если вращать буравчик с правой резьбой так, чтобы направление вращения ручки буравчика совпадало с направлением тока в катушке или витке, то направление поступательного движения буравчика покажет направление линий магнитной индукции поля внутри катушки или в центре витка (рис. 1.9, *а*, *б*).

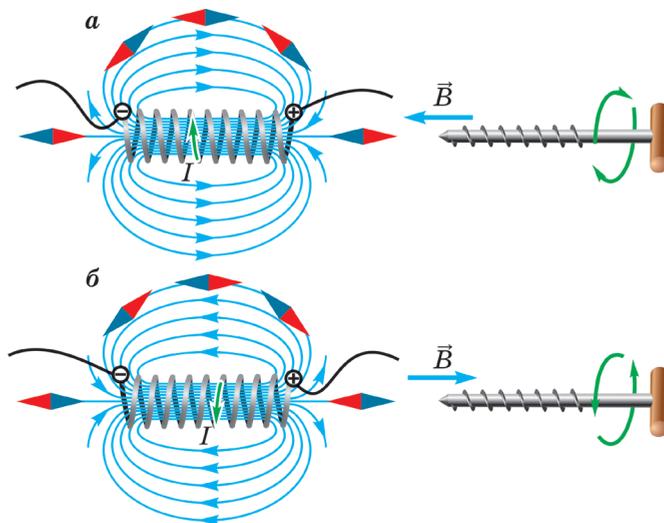


Рис. 1.9



10. Чем отличаются рисунки 1.9, *а* и *б*?

На примере правила буравчика мы видим, что при изучении магнитных явлений «используются» все *три* измерения пространства. Это в некоторой степени затрудняет изучение магнитных явлений, поэтому потренируемся в постановке и решении задач, для решения которых надо применять правило буравчика.

11. На горизонтальном столе лежит проволочный виток. Мы смотрим на него сверху.
- Как направлен вектор магнитной индукции поля в центре витка, если по нему течёт ток: по часовой стрелке? против часовой стрелки?
 - В каком направлении движутся по витку свободные электроны (по часовой стрелке или против неё), если магнитная индукция поля, созданного током в витке, направлена в центре витка вниз? вверх?

Правило буравчика для прямолинейного проводника с током

Изучим теперь магнитное поле, созданное прямолинейным проводником с током.

Поставим опыт

На рисунках 1.10, *a*, *б* изображены магнитные стрелки, расположенные вблизи прямолинейных проводников с токами.

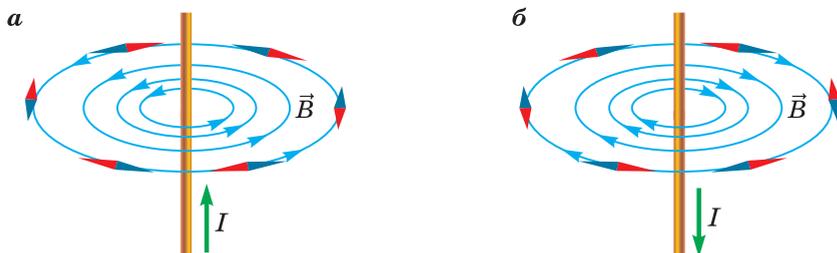


Рис. 1.10

Мы видим, что они располагаются по касательным к окружностям, центры которых находятся на оси проводника. Следовательно, эти окружности представляют собой магнитные линии поля, созданного прямолинейным проводником с током.

12. Чем отличаются опыты, схематически изображённые на рисунках 1.10, *a* и *б*? Какой вывод можно сделать из этого наблюдения?

Направление магнитных линий поля, созданного прямолинейным проводником с током, связано с направлением тока в проводнике правилом, которое называют также *правилом буравчика*.

Если вращать буравчик с правой резьбой так, чтобы направление его поступательного движения совпадало с направлением тока, то направление вращения ручки буравчика покажет направление линий магнитной индукции поля, созданного этим током (рис. 1.11).

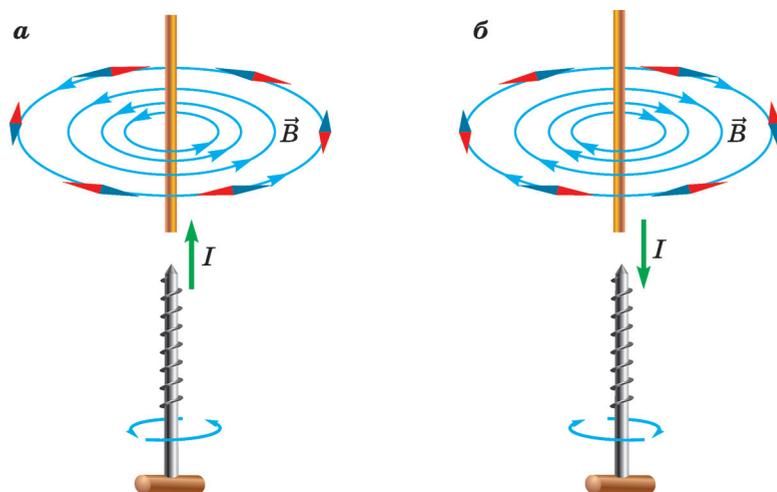


Рис. 1.11



°13. Чем отличаются рисунки 1.11, а и б?

Обозначение направления для векторов и тока

При изучении магнитных явлений надо изображать на чертежах векторы, расположенные не только в плоскости чертежа, но и перпендикулярные этой плоскости, а также проводники с токами, направленными перпендикулярно плоскости чертежа.

Мы будем использовать обозначения¹⁾, показанные на рисунке 1.12. Слева изображены векторы магнитной индукции, ток и сила, направленные «от нас», а справа — направленные «к нам».

Потренируемся в использовании новых обозначений и правила буравчика для изучения магнитного поля, созданного прямолинейным проводником с током.

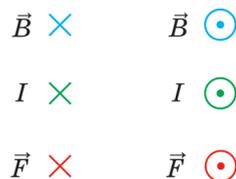


Рис. 1.12

¹⁾ Эти обозначения обусловлены представлением вектора в виде стрелы с хвостовым оперением.

14. На рисунках 1.13, *a*, *б* изображены прямолинейные проводники с токами и отмечены точки *A* и *C*. Перенесите рисунки в тетрадь и укажите на них направление вектора магнитной индукции поля, созданного каждым из токов, в отмеченных точках.

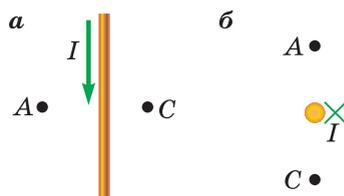


Рис. 1.13

Принцип суперпозиции

Опыт показывает, что

вектор магнитной индукции поля, создаваемого несколькими источниками поля, равен векторной сумме векторов магнитной индукции полей, создаваемых каждым источником поля.

Это утверждение называют *принципом суперпозиции для магнитного поля*.

15. На рисунках 1.14, *a*, *б* изображены две пары параллельных проводников с токами. Силы токов в проводниках одинаковы, точка *A* находится точно посередине между проводниками в одной плоскости с ними. Обозначим *B* модуль магнитной индукции поля, созданного в точке *A* одним из проводников с током.

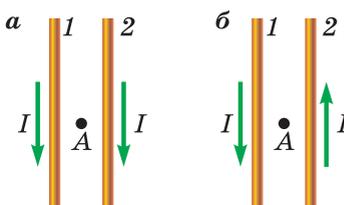


Рис. 1.14

- Перенесите рисунки в тетрадь и укажите на них векторы магнитной индукции поля, созданного в точке *A* каждым из проводников по отдельности.
- Укажите на тех же рисунках векторы магнитной индукции поля, созданного в точке *A* *обоими* проводниками. Запишите, чему равен в обоих случаях модуль вектора магнитной индукции этого поля.

Как «увидеть» линии магнитной индукции

Стальные или железные опилки в магнитном поле намагничиваются, превращаясь в очень маленькие магнитные стрелки, которые выстраиваются вдоль магнитных линий. Благодаря этому невидимые магнитные линии можно сделать «видимыми».

На рисунке 1.15 изображены опилки, насыпанные на бумажный лист, находящийся над полосовым магнитом.

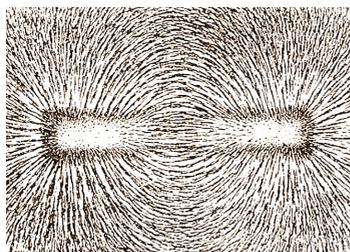


Рис. 1.15



°16. Найдите в тексте этого параграфа рисунок, напоминающий «картину» магнитных линий на рисунке 1.15. Можно ли определить по рисунку 1.15, где находится северный и южный полюс магнита? Если нет, то что надо сделать, чтобы определить, где находятся эти полюсы?

°17. Опишите опыт, в результате которого получилась «картина» магнитных линий, изображённая на рисунке 1.16.



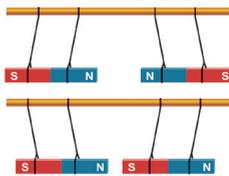
Рис. 1.16



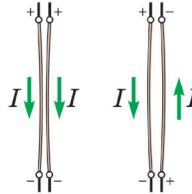
ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Магнитное взаимодействие

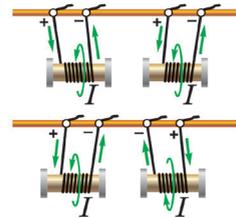
Взаимодействие постоянных магнитов



Взаимодействие проводников с током



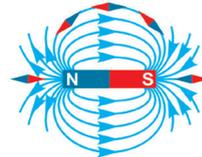
Взаимодействие катушек с током



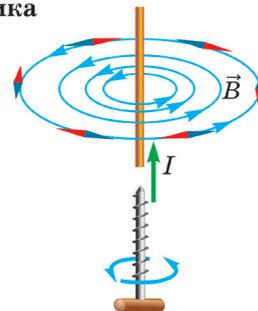
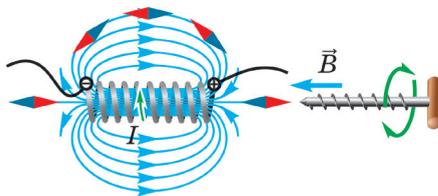
Вектор магнитной индукции



Линии магнитной индукции



Правило буравчика



? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

18. Если полосовой магнит разломить на три части, как показано на рисунке 1.17. Перенесите рисунок в тетрадь и отметьте цветом полюса A и B средней части магнита.

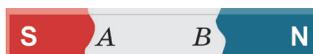


Рис. 1.17

19. На рисунке 1.18 изображён вектор магнитной индукции магнитного поля. Будет ли устойчивым показанное на рисунке положение магнитной стрелки, помещённой в это поле?

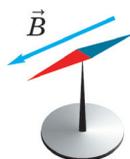


Рис. 1.18

20. Перенесите рисунки 1.19, a , b в тетрадь и обозначьте на них полюсы магнитов.

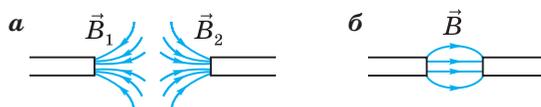


Рис. 1.19

21. На рисунке 1.20 изображены магнитные линии полосового магнита. Перенесите рисунок в тетрадь и обозначьте на нём полюсы магнита. Схематически изобразите устойчивые положения магнитных стрелок в точках A , B , C .

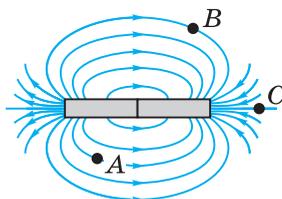


Рис. 1.20

22. В начале 19-го века Г. Эрстед обнаружил магнитное действие проводника с током. На рисунке 1.21, *a* изображена схема этого опыта (магнитная стрелка находится под проводником).

- а) Объясните, почему до включения в проводнике тока проводник надо расположить вдоль географического меридиана.
 б) Перенесите рисунки 1.21, *б* и *в* в тетрадь и обозначьте полюсы магнитных стрелок.

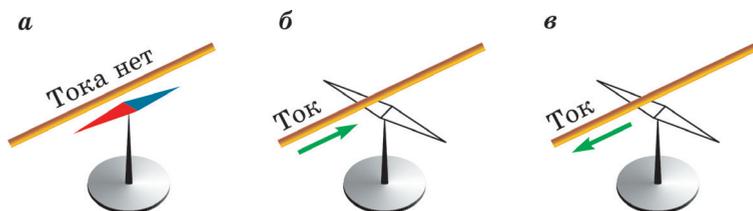


Рис. 1.21

23. Определите направление линий магнитной индукции в каждом из случаев, изображённых на рисунках 1.22, *a—ж*.

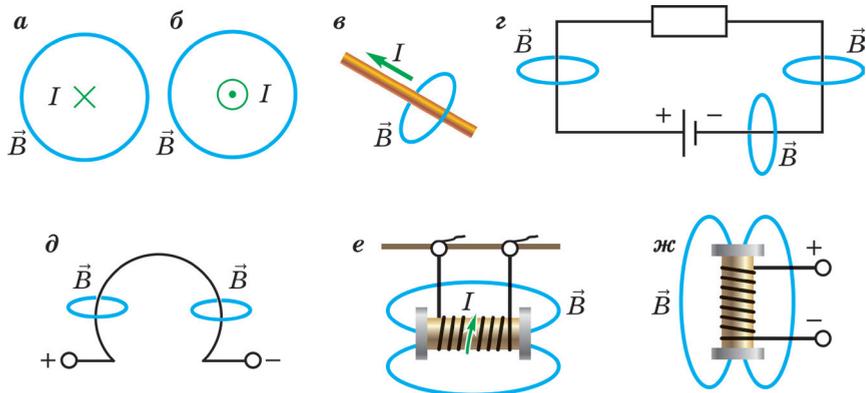


Рис. 1.22

Повышенный уровень

24. На рисунке 1.23 изображены два параллельных проводника с токами I_1 и I_2 . Точка *A* находится точно посередине между проводниками, в одной плоскости с ними.

- а) Как направлен вектор магнитной индукции поля, созданного в точке *A* обоими проводниками, если $I_1 > I_2$?



Рис. 1.23

б) Как направлен вектор магнитной индукции поля, созданного в точке A *обоими* проводниками, если $I_1 < I_2$?

25. На рисунке 1.24 изображён проводник с током. Как направлен вектор магнитной индукции в точках C и D , если потенциал точки A выше потенциала точки B ?

26. На рисунке 1.25 изображены две подвешенные катушки с токами. Оси катушек расположены на одной прямой. Определите северный полюс расположенной слева катушки.

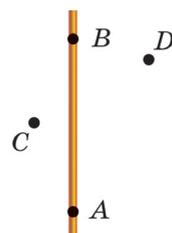


Рис. 1.24

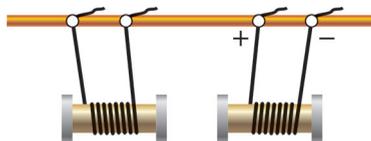


Рис. 1.25

27. На рисунках 1.26, $a—г$ изображены пары параллельных проводников с токами и указаны направления токов в них. Силы токов в проводниках одинаковы. Точка A находится на равном расстоянии от проводников. Перенесите рисунки в тетрадь и укажите направление вектора магнитной индукции поля, созданного в точке A обоими проводниками.

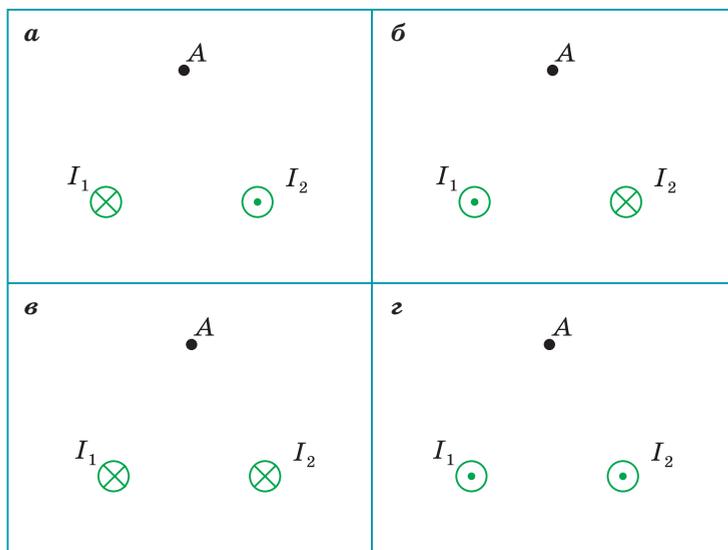
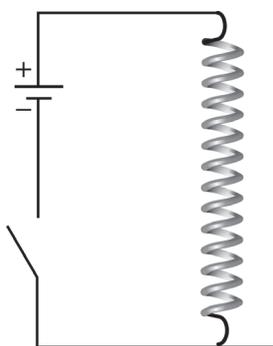


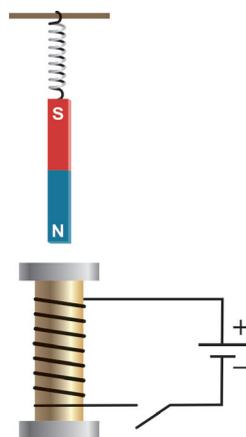
Рис. 1.26

Высокий уровень

28. Верхний конец пружины соединён с полюсом источника тока, как показано на рисунке 1.27, а нижний конец пружины касается металлической пластины, соединённой через ключ с другим полюсом источника тока. Опишите явления, которые будут наблюдаться после замыкания ключа.

**Рис. 1.27**

29. Над неподвижно закреплённой проволочной катушкой вдоль её оси на пружине подвешен полосовой магнит (рис. 1.28). Опишите явления, которые будут происходить с полосовым магнитом сразу после замыкания ключа.

**Рис. 1.28**

§ 2. Закон Ампера

1. Модуль вектора магнитной индукции

Силу, действующую со стороны магнитного поля на проводник с током, называют *силой Ампера*.

Силу Ампера можно считать мерой «интенсивности» магнитного поля в той точке пространства, где находится данный проводник: чем сильнее поле, тем больше сила, действующая на этот проводник.

В этом параграфе нас будет интересовать проводник с током не как источник магнитного поля, а как средство для изучения магнитного поля, созданного *другими* источниками, — подобно тому, как мы использовали ранее пробный электрический заряд для изучения электрического поля, созданного другими зарядами.

Опыт показывает, что модуль силы Ампера достигает своего максимального значения $F_{\text{макс}}$, когда этот проводник *перпендикулярен* вектору магнитной индукции в данной точке (при заданной силе тока и длине проводника).

При этом значение $F_{\text{макс}}$ прямо пропорционально длине проводника l и силе тока I :

$$F_{\text{макс}} \sim Il.$$

Отсюда следует, что *отношение* $\frac{F_{\text{макс}}}{Il}$ не зависит ни от длины проводника, ни от силы тока в нём. Следовательно, оно является характеристикой *самого магнитного поля* в том месте, где находится данный проводник.

Модуль магнитной индукции равен отношению силы, действующей на проводник с током, расположенный *перпендикулярно* вектору магнитной индукции, к произведению силы тока в проводнике на длину проводника:

$$B = \frac{F_{\text{макс}}}{Il}.$$



А. Ампер
(1775—1836)

Единицу магнитной индукции в СИ назвали *тесла* (Тл) в честь сербского учёного и изобретателя Н. Теслы.



- 1. Докажите, что $1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}$.
- 2. Найдите в Интернете информацию о самом сильном магнитном поле, полученном учёными в настоящее время. Чему равен модуль магнитной индукции этого поля?

2. Закон Ампера

Ампер установил на опыте, что

если проводник длиной l , сила тока в котором равна I , расположен под углом α к направлению вектора магнитной индукции (рис. 2.1), то модуль действующей на него силы выражается формулой

$$F_A = BIl \sin \alpha.$$

Это утверждение называют *законом Ампера*.

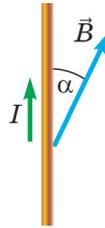


Рис. 2.1



- 3. При каком условии действующая на проводник с током в магнитном поле сила Ампера равна нулю?
- 4. Сколько величин входит в формулу закона Ампера? Используя эту формулу, поставьте и решите по одной задаче на нахождение каждой из этих величин при условии, что численные значения всех остальных величин заданы.

3. Правило левой руки

Направление силы Ампера в случае, когда проводник с током перпендикулярен вектору магнитной индукции

Направление действующей на проводник силы Ампера \vec{F}_A зависит от направления тока I и направления вектора магнитной

индукции \vec{B} . Рассмотрим сначала случай, когда проводник с током перпендикулярен вектору магнитной индукции. В таком случае, как показывает опыт, направление силы Ампера можно найти, используя следующее правило, которое называют *правилом левой руки*.

Если левую руку расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец покажет направление силы Ампера, действующей на проводник (рис. 2.2).

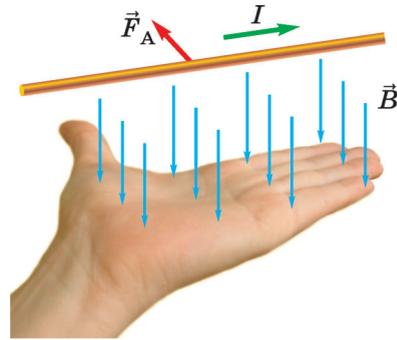


Рис. 2.2

Итак, чтобы найти направление силы Ампера, тоже приходится использовать все *три* измерения пространства, потому что согласно правилу левой руки *направление тока, направление вектора магнитной индукции и направление силы Ампера взаимно перпендикулярны друг другу*.

° 5. Перенесите рисунки 2.3, а, б, в в тетрадь и добавьте недостающие обозначения физических величин.

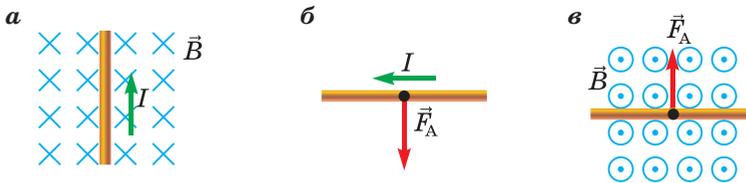


Рис. 2.3

Рассмотрим, как связаны силы, действующие между параллельными проводниками с током, правило буравчика для прямолинейного проводника с током и правило левой руки.

6. Докажем, что из правила буравчика для прямолинейного проводника с током и правила левой руки следует, что параллельные проводники с током *притягиваются*, если токи в них направлены *одинаково* (рис. 2.4). Рассмотрим,

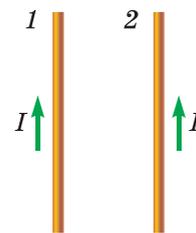


Рис. 2.4

например, силу, действующую на проводник 2, со стороны магнитного поля, созданного током в проводнике 1.

- а) Перенесите рисунок 2.4 в тетрадь и изобразите на нём направление вектора магнитной индукции поля \vec{B}_1 , созданного током в проводнике 1 в том месте пространства, где находится проводник 2.
 - б) Изобразите на том же рисунке направление силы, действующей на проводник 2 со стороны магнитного поля, созданного током в проводнике 1.
 - в) Определите направление силы, действующей на проводник 1 со стороны магнитного поля, созданного током в проводнике 2.
 - г) Сделайте вывод: соответствуют ли найденные вами направления сил опыту Ампера по взаимодействию параллельных проводников с токами.
7. Докажите, что из правила буравчика для прямолинейного проводника с током и правила левой руки следует, что параллельные проводники с током *отталкиваются*, если токи в них направлены *противоположно* (рис. 2.5).

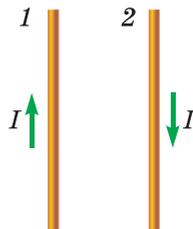


Рис. 2.5

Рассмотрим ключевую ситуацию, встречающуюся во многих задачах о силе Ампера.

8. Металлический стержень подвешен на нерастяжимых проводах и находится в однородном магнитном поле (рис. 2.6). Когда в стержне включили ток, направление которого показано на рисунке, *провода отклонились от вертикали*.

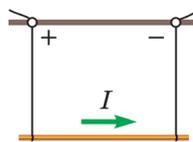


Рис. 2.6

- а) В какой плоскости отклонились провода — в плоскости рисунка или перпендикулярно плоскости рисунка?
 - б) Мог ли вектор магнитной индукции быть направлен горизонтально?
 - в) В какую сторону отклонились провода, если вектор магнитной индукции направлен вверх?
9. Металлический стержень длиной l и массой m подвешен на нерастяжимых проводах и находится в однородном магнитном поле с индукцией \vec{B} (на рисунках 2.7, а, б стержень изображён в двух различных проекциях). В стержне включают ток. Сила тока равна I .
- а) Перенесите рисунок 2.7, б в тетрадь и изобразите на нём все силы, действующие на стержень, когда он находится в равновесии. Обозначьте угол отклонения проводов от вертикали α ,



- а силу натяжения *обоих* проводов обозначьте \vec{T} .
- б) Запишите соотношение, которое связывает угол α , массу стержня m и действующую на стержень силу Ампера \vec{F}_A .
- в) Запишите соотношение, которое связывает угол α , массу стержня m , силу тока I в стержне и модуль магнитной индукции B .

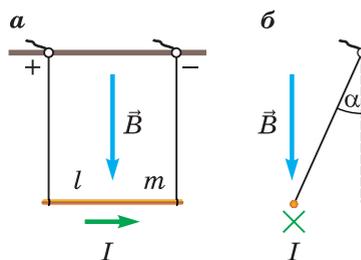


Рис. 2.7

В полученное соотношение входят пять величин: B , I , l , m , α (не считая g). Следовательно, оно позволяет поставить и решить пять задач на нахождение каждой из этих величин, если известны все остальные.

Похожая задача

10. Поставьте и решите три задачи на нахождение различных величин, входящих в формулу, полученную в результате решения предыдущей задачи.



***Направление силы Ампера в общем случае**

Направление силы Ампера в общем случае также можно найти с помощью правила левой руки. Для этого вектор магнитной индукции \vec{B} надо представить в виде векторной суммы вектора $\vec{B}_{||}$, направленного вдоль проводника, и вектора \vec{B}_{\perp} , направленного перпендикулярно проводнику (рис. 2.8).

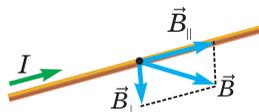


Рис. 2.8

После этого можно использовать правило левой руки, расположив её так, чтобы в раскрытую ладонь входил вектор \vec{B}_{\perp} (рис. 2.9).

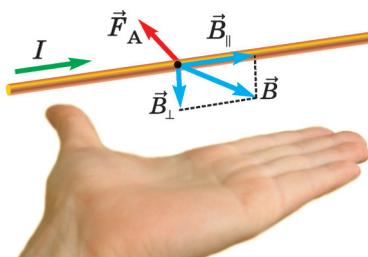


Рис. 2.9

Напомним: если угол между проводником и вектором магнитной индукции равен нулю, то сила Ампера равна нулю. Если же сила Ампера не равна нулю, то она *перпендикулярна как проводнику, так и вектору магнитной индукции*.



11. На рисунке 2.10 изображён проводник с током в магнитном поле. Магнитные линии лежат в плоскости рисунка.

- Перенесите рисунок в тетрадь и представьте вектор магнитной индукции \vec{B} в виде векторной суммы вектора \vec{B}_{\parallel} , направленного вдоль проводника, и вектора \vec{B}_{\perp} , направленного перпендикулярно проводнику.
- Изобразите направление действующей на проводник силы Ампера.

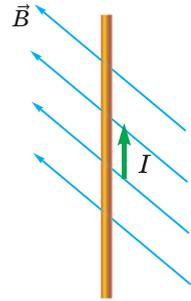


Рис. 2.10

4. Рамка с током в магнитном поле



Поставим опыт

Возьмём прямоугольную рамку с током, которая может свободно вращаться вокруг оси OO_1 , расположим её так, чтобы плоскость рамки была параллельна вектору магнитной индукции поля, и включим ток в рамке (рис. 2.11).

Мы увидим, что рамка *повернётся* и займёт положение, при котором её плоскость *перпендикулярна* вектору магнитной индукции внешнего поля \vec{B} . Устойчивое положение равновесия рамки с током в однородном магнитном поле показано на рисунке 2.12.

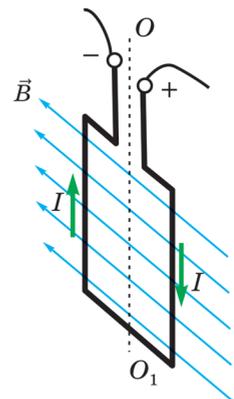


Рис. 2.11



°12. Рамка с током находится во внешнем магнитном поле в положении устойчивого равновесия (см. рис. 2.12). Совпадает ли внутри рамки направление вектора магнитной индукции поля, созданного током в рамке, с направлением магнитной индукции внешнего поля?

Выясним теперь: *почему* рамка с током поворачивается в магнитном поле, чтобы занять указанное выше положение устойчивого равновесия?

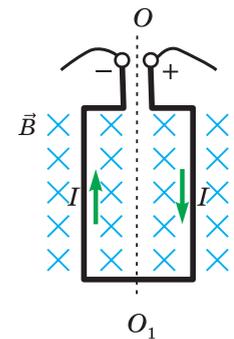


Рис. 2.12



°13. Пусть в начальном положении плоскость рамки с током *параллельна* вектору магнитной индукции внешнего поля \vec{B} (см. рис. 2.11).

- а) Перенесите рисунок 2.11 в тетрадь и изобразите на нём силы Ампера, действующие на *вертикальные* стороны рамки с током.
- б) Как будет двигаться рамка с током под действием этих сил? Изобразите на рисунке схематически направление движения рамки.

Итак, мы видим, что силы Ампера, действующие на противоположные вертикальные стороны рамки с током, направлены *противоположно*, и поэтому они будут *поворачивать* рамку вокруг оси OO_1 .

- в) Как будут действовать силы Ампера на все стороны рамки, когда вектор магнитной индукции поля $\vec{B}_{\text{рам}}$, созданного током рамки внутри рамки, будет направлен *так же*, как вектор магнитной индукции внешнего поля \vec{B} ? Сделайте пояснительный рисунок, на котором изобразите силы Ампера, действующие на все стороны рамки.

Электроизмерительные приборы

Мы видели, что силы Ампера, действующие на рамку с током, стремятся *повернуть* её в положение устойчивого равновесия. Чем больше сила тока в рамке, тем больше момент этих сил относительно оси вращения, то есть тем больше их «вращающее действие». Поэтому рамку с током можно использовать как основной элемент электроизмерительного прибора (например, амперметра).

- °14. На рисунке 2.13 схематически изображён электроизмерительный прибор. При отсутствии тока в рамке она под действием пружины принимает положение, при котором стрелка прибора указывает на нулевое деление шкалы. Объясните принцип действия прибора.



Рис. 2.13



Электродвигатель

Поворот рамки с током в магнитном поле лежит также в основе действия электродвигателя. Простейшая модель электродвигателя постоянного тока изображена на рисунке 2.14, *а*.

Чтобы подводящие к рамке провода не запутывались при вращении рамки, а также для того, чтобы изменять направление тока в рамке через каждые пол-оборота, ток к рамке подводят с помощью *коллектора*. Он состоит из двух соединённых с рамкой металлических полуколец, ток к которым подводят, используя скользящие контакты («щётки»).



°15. Для чего необходимо изменять направление тока в рамке через каждые пол-оборота?

В реальных электродвигателях используют не одну, а много рамок — это позволяет значительно увеличить мощность электродвигателя (рис. 2.14, б). Вращающуюся часть электродвигателя, содержащую рамки, называют *ротором*. Неподвижную же часть, содержащую магниты, называют *статором*. В мощных электродвигателях используются не постоянные магниты, а электромагниты. Коллектор электродвигателя состоит из стольких пар пластинок, сколько рамок содержится в роторе двигателя.

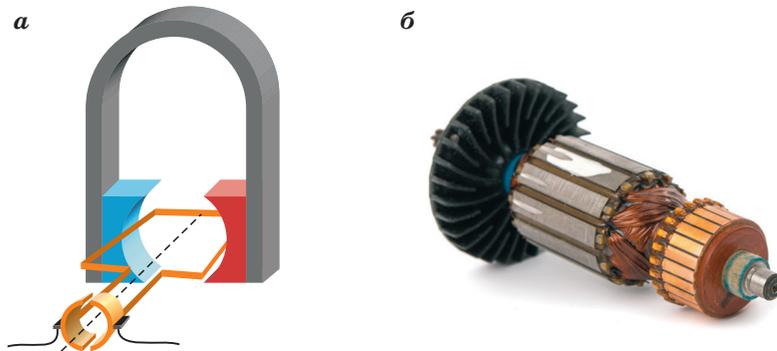


Рис. 2.14



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Правило левой руки

Закон Ампера

$$F_A = BIl \sin \alpha$$

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

16. Проводник с током длиной 0,5 м помещён в магнитное поле с индукцией 0,1 Тл. Сила тока в проводнике равна 2 А. Чему равна действующая на проводник сила Ампера, если угол между проводником и вектором магнитной индукции равен:
- 0° ;
 - 30° ?
17. Проводник длиной $l = 25$ см расположен под углом $\alpha = 60^\circ$ к направлению вектора магнитной индукции. Сила тока в проводнике $I = 0,3$ А. Сила Ампера, действующая на проводник, равна $F_A = 0,2$ Н. Поставьте по этой ситуации две задачи и найдите ответы на них.
18. На прямолинейный проводник длиной 50 см действует сила Ампера, равная 0,25 Н. Модуль магнитной индукции равен 2 Тл, сила тока в проводнике 0,5 А. Чему равен угол между проводником и вектором магнитной индукции?
19. На проводник длиной 0,5 м, расположенный под углом 30° к вектору магнитной индукции, действует сила Ампера, равная 0,1 Н. Индукция магнитного поля 0,1 Тл. Чему равна сила тока в проводнике?
20. Проводник с током помещён в магнитное поле под углом 30° к вектору магнитной индукции. Изменится ли (и если изменится, то как) сила Ампера, действующая на проводник с током, если его расположить под углом 60° к вектору магнитной индукции?
21. Перенесите рисунки 2.15, а—з в тетрадь и добавьте недостающие обозначения физических величин. Если необозначенная величина равна нулю, отметьте это на рисунке.

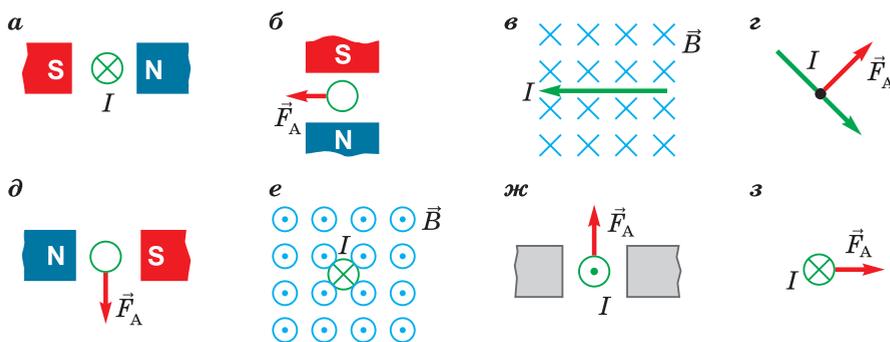


Рис. 2.15

22. На рисунке 2.16 изображена рамка с током, помещённая в однородное магнитное поле. Перенесите рисунок в тетрадь и укажите на нём в одном и том же масштабе силы Ампера, действующие на каждую сторону рамки.

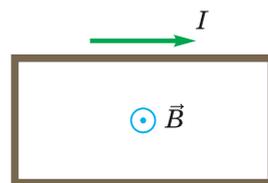


Рис. 2.16

Повышенный уровень

23. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции расположен прямолинейный проводник, сила тока в котором 0,2 А. Затем силу тока в проводнике увеличили до 0,4 А, а проводник повернули так, чтобы сила, действующая на него со стороны магнитного поля, не изменилась. Чему стал равен угол между проводником и вектором магнитной индукции после поворота проводника?
24. Прямолинейный проводник с током расположен под углом 60° к магнитным линиям однородного поля с индукцией 80 мТл. Проводник равномерно перемещают на 2 м противоположно направлению действующей на него силы Ампера, совершив работу 0,32 Дж. Сила тока 5 А. Чему равна длина проводника?
25. С какой максимальной силой магнитное поле с индукцией 10 мТл может действовать на прямолинейный стальной проводник с площадью поперечного сечения 2 мм^2 , если к проводнику приложено напряжение 6 В?
26. Металлический стержень массой 0,2 кг удерживают в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл на гладких горизонтальных рельсах, находящихся на расстоянии 20 см друг от друга. Какой путь пройдёт стержень по рельсам за 0,5 с после того, как его отпустят, если сила тока в стержне равна 10 А, а линии магнитной индукции расположены вертикально?
27. Стержень длиной 20 см и массой 100 г лежит на столе. Коэффициент трения между столом и стержнем равен 0,4. В стержне включают ток, сила тока равна 8 А. При каком значении магнитной индукции стержень начнёт скользить по столу, если линии магнитной индукции направлены вертикально? Имеет ли значение направление вектора магнитной индукции вертикально вверх или вертикально вниз?
28. Горизонтальный стержень длиной 0,5 м подвешен на тонких проводах одинаковой длины в однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл. Магнитные линии направлены вертикально. Сила тока в проводнике 2 А. Чему равна масса стержня, если он находится в покое, когда провода отклонены от вертикали на угол 45° ?

29. Жёсткая проволочная квадратная рамка массой 50 г со стороной 5 см лежит на столе и находится в магнитном поле с индукцией 2 Тл. Линии магнитной индукции направлены вдоль одной из сторон рамки. При какой силе тока в рамке одна из её сторон будет подниматься?

Высокий уровень

30. По лежащему на столе замкнутому проволочному контуру, имеющему форму прямоугольного треугольника с катетами 3 см и 4 см, пропускают ток, сила тока равна 2 А. Чему равна сила Ампера, действующая на каждую сторону контура, если он находится в магнитном поле с индукцией 0,4 Тл, причём линии магнитной индукции направлены вертикально? Чему равна равнодействующая этих трёх сил? Сделайте в тетради пояснительный чертёж.
31. Длинный кусок гибкого провода, подключённый к электрической цепи в точках A и B , лежит на гладком столе, находящемся в однородном магнитном поле (рис. 2.17). Опишите, как изменится форма провода после замыкания ключа. Обоснуйте свой ответ.

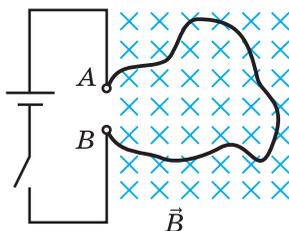


Рис. 2.17

32. Рамка с током может свободно вращаться вокруг оси OO_1 . В начальный момент рамку удерживают вблизи полосового магнита в положении, показанном на рисунке 2.18. Как будет двигаться рамка, если её отпустить? Учтите сопротивление воздуха.

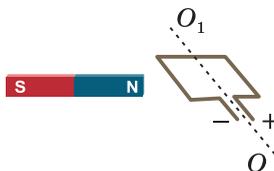


Рис. 2.18

33. На *двух* одинаковых лёгких пружинах жёсткостью k подвешен прямой горизонтальный проводник длиной l , с площадью поперечного сечения S , сила тока в котором равна I (рис. 2.19). Когда включают магнитное поле с индукцией \vec{B} , направленной вертикально вниз, пружины отклоняются от вертикали, причём в положении равновесия удлинение каждой пружины равно x .

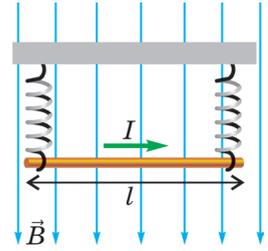


Рис. 2.19

- Чему равна плотность материала ρ , из которого изготовлен проводник?
- Какой угол с вертикалью составляют пружины после отклонения?

*§ 3. Примеры применения закона Ампера

1. Стержень на горизонтальных направляющих

В этом параграфе мы рассмотрим ситуации, на которых основано большинство задач о силе Ампера. Их рассмотрение поможет вам также вспомнить основные закономерности механики.



- На горизонтальных параллельных металлических направляющих, расстояние между которыми равно l , покоится металлический стержень массой m (рис. 3.1). Вся система находится в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции \vec{B} которого направлен вертикально вверх. Коэффициент трения между стержнем и направляющими равен μ . В начальный момент в стержне включают ток, сила тока равна I .

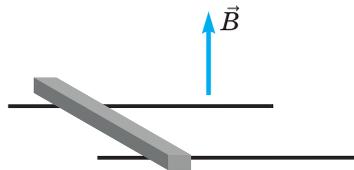


Рис. 3.1

- Чему будет равно ускорение стержня?
- Как должен быть направлен ток в стержне (от нас или к нам), чтобы стержень начал двигаться вправо?

- в) Чему будет равна скорость стержня, когда он пройдёт путь, равный L ?

Похожая задача

2. На горизонтальных параллельных металлических направляющих, расстояние между которыми равно l , покоится металлический стержень массой m (рис. 3.2). Вся система находится в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого направлен вертикально вверх. Коэффициент трения между стержнем и направляющими равен μ . В начальный момент в стержне включают ток, сила тока равна I . На расстоянии d от стержня лежит деревянный брусок такой же массы. В некоторый момент времени стержень упруго сталкивается с бруском.

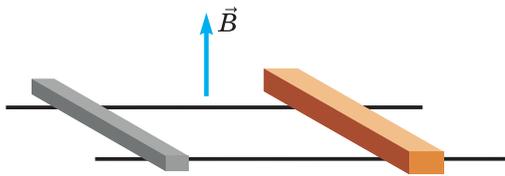


Рис. 3.2

- а) Через какой промежуток времени t стержень столкнётся с бруском?
 б) Чему будет равна скорость бруска сразу после того, как с ним столкнётся стержень?

2. Стержень на наклонных направляющих

3. По наклонным гладким металлическим направляющим, расстояние между которыми $l = 40$ см, может скользить металлический стержень массой $m = 60$ г (рис. 3.3, вид сбоку). Угол наклона направляющих $\alpha = 30^\circ$. В начальный момент стержень покоится; в стержне включают ток, сила тока $I = 2$ А. Вся система находится в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции \vec{B} которого направлен вертикально вниз. Модуль магнитной индукции $B = 0,5$ Тл.

- а) Запишите второй закон Ньютона для стержня в проекциях на показанные на рисунке оси координат.

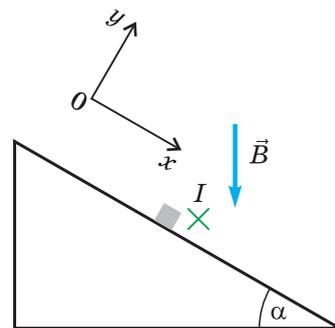


Рис. 3.3

- б) В каком направлении начнёт двигаться стержень: вверх или вниз по наклонной плоскости?
 в) Какой путь проделает стержень за 0,5 с?

Похожая задача



4. По наклонным металлическим рельсам, находящимся в магнитном поле, скользит *вниз* с *постоянной* скоростью металлический стержень, по которому течёт ток (рис. 3.4). Модуль магнитной индукции B , вектор магнитной индукции направлен вертикально вверх, масса стержня m , расстояние между рельсами l , угол наклона рельсов $\alpha = 30^\circ$, коэффициент трения между стержнем и рельсами $\mu = 0,5$.

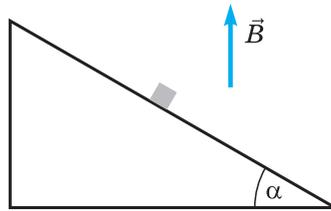


Рис. 3.4

- а) Как направлен ток в стержне: к нам или от нас?
 б) Выразите силу тока I в стержне через заданные в условии величины.

3. Полный оборот стержня, подвешенного на проводах



5. На рисунке 3.5 изображён металлический стержень, подвешенный на лёгких проводах в магнитном поле. Расстояние между проводами l , длина каждого провода L , масса стержня m , модуль магнитной индукции B . В некоторый момент по стержню пропускают кратковременный ток, в результате чего стержень приобретает горизонтальную скорость и совершает полный оборот по окружности.

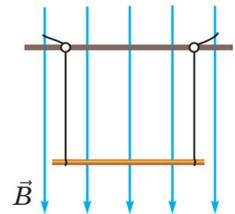


Рис. 3.5

- а) Запишите выражение для скорости стержня v_1 сразу после выключения тока через заданные в условии величины и заряд q , прошедший по стержню.

- б) Запишите выражение для минимально возможной скорости стержня $v_{\text{мин верх}}$ в верхней точке окружности.
- в) Запишите выражение для минимально возможной начальной скорости стержня $v_{\text{мин нач}}$ в нижней точке окружности.
- г) Запишите выражение для минимального заряда $q_{\text{мин}}$, который должен пройти по стержню, чтобы он мог совершить полный оборот по окружности.

Похожая задача

6. Металлический стержень массой m подвешен на двух проводящих нитях, длиной L каждая, в однородном магнитном поле, модуль индукции которого равен B . Расстояние между нитями равно l . Вектор магнитной индукции направлен вертикально вверх. Провода через ключ соединены с конденсатором, ёмкость которого равна C . Соппротивлением воздуха можно пренебречь. Примите, что во время разрядки конденсатора сила тока постоянна, а смещением стержня за это время можно пренебречь. После замыкания ключа стержень стал совершать колебания, поднимаясь на максимальную высоту h .
- а) Чему равна скорость стержня v_1 сразу после разрядки конденсатора?
 - б) Чему равно начальное напряжение U между пластинами конденсатора?



4. Гибкий проводник с током вблизи полосового магнита

7. Рядом с вертикально расположенным сильным полосовым магнитом свободно свисает гибкий провод (рис. 3.6). В некоторый момент в проводе включают ток. Направление тока показано на рисунке.

- а) Перенесите рисунок в тетрадь и изобразите на нём магнитные линии поля магнита.
- б) Обозначьте на своём рисунке направления сил Ампера, действующих на участки провода вблизи точек A и C .
- в) Изобразите схематически, какую форму примет провод.
- г) Как будет взаимодействовать провод с магнитом после того, как изменит свою форму?

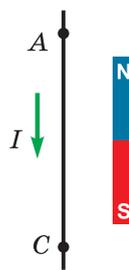


Рис. 3.6



Похожая задача

8. Стержень 1 закреплён в вертикальном положении, а стержень 2 в начальный момент расположен горизонтально и может



свободно перемещаться и поворачиваться (рис. 3.7). Пунктиром на рисунке изображён общий перпендикуляр к стержням 1 и 2. В некоторый момент в стержнях включают токи. Направления токов показаны на рисунке.

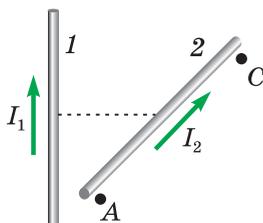


Рис. 3.7

- Перенесите рисунок в тетрадь и укажите на нём, как направлены силы Ампера, действующие на участки стержня 2 вблизи точек A и C.
- Изобразите положение стержня 2, которое он примет под действием этих сил.
- Как будут взаимодействовать стержни после изменения положения стержня 2?

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Повышенный уровень

- Два гладких металлических рельса, расположенные на расстоянии 20 см друг от друга, лежат на горизонтальной поверхности (рис. 3.8). Вектор магнитной индукции направлен вертикально вверх, модуль магнитной индукции равен 2 Тл. По рельсам может скользить металлический стержень массой 400 г, который в начальный момент покоится. Через 2 с после включения тока в стержне скорость стержня стала равной 2 м/с. Чему равна сила тока?

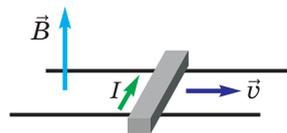


Рис. 3.8

- На наклонной плоскости с углом наклона 30° лежат гладкие металлические направляющие, на которых находится горизонтальный проводящий стержень массой 100 г (рис. 3.9). Расстояние между направляющими 50 см, магнитная индукция однородного магнитного поля равна 0,4 Тл, вектор магнитной индукции направлен

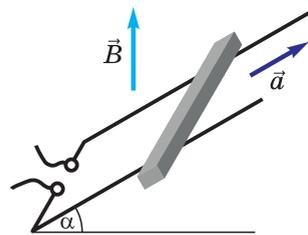


Рис. 3.9

вертикально вверх. Когда сила тока в стержне равна 8 А, стержень движется с ускорением, направленным вверх по наклонной плоскости. Каково направление тока в стержне? Чему равно ускорение стержня?

11. На наклонной плоскости с углом наклона 30° лежат металлические рельсы, по которым движется горизонтальный проводящий стержень массой 40 г (рис. 3.10). Расстояние между рельсами 50 см, сила тока в стержне 15 А, коэффициент трения между стержнем и рельсами 0,15. Чему равен модуль магнитной индукции однородного магнитного поля, если стержень движется равномерно вверх по наклонной плоскости? Вектор магнитной индукции направлен вертикально вниз.

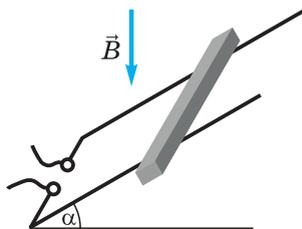


Рис. 3.10

12. В однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл на двух лёгких проводящих нитях, длиной 1 м каждая, подвешен металлический стержень длиной 0,2 м и массой 30 г (рис. 3.11). Вектор магнитной индукции направлен вертикально вниз. По стержню пропускают кратковременный ток, время протекания тока равно 0,1 с, сила тока 15 А. На какой максимальный угол от вертикали отклонятся нити? Отклонением нитей от вертикали за время протекания тока можно пренебречь.

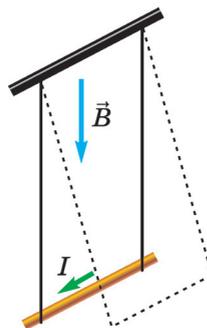


Рис. 3.11

Высокий уровень

13. Металлический стержень лежит на горизонтальных металлических направляющих, находящихся в однородном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого перпендикулярен стержню и составляет угол α с вертикалью (рис. 3.12). Когда в стержне включают ток, он

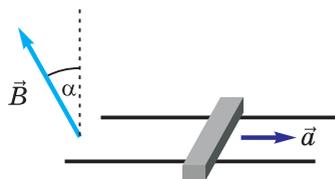


Рис. 3.12

начинает двигаться вправо с ускорением. Как направлен ток в стержне и чему равно его ускорение, если модуль магнитной индукции равен B , сила тока в стержне равна I , коэффициент трения между стержнем и направляющими равен μ , а расстояние между ними равно l ?

14. В однородном магнитном поле, модуль магнитной индукции которого равен B , на гладком столе лежит металлический стержень длиной l и массой m (рис. 3.13). Стержень соединён одинаковыми лёгкими проводящими пружинами, жёсткостью k каждая, с укрепленной на столе планкой. После того как пружины соединили с конденсатором, заряд которого был равен Q , стержень стал совершать колебания.

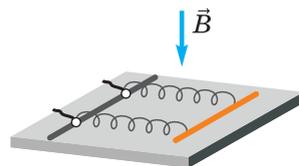


Рис. 3.13

- а) Чему равно наибольшее значение кинетической энергии стержня при колебаниях?
 б) Какова амплитуда колебаний?
15. По наклонным металлическим рельсам с углом наклона α движется равномерно вверх горизонтальный проводящий стержень, по которому течёт ток (рис. 3.14). Расстояние между направляющими l , модуль магнитной индукции B , коэффициент трения между стержнем и рельсами μ .

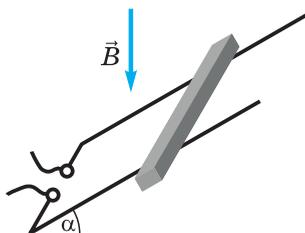


Рис. 3.14

- а) Чему равна сила тока в стержне?
 б) Как надо направить ток в стержне, чтобы он двигался с постоянной скоростью по рельсам *вниз*, если $\operatorname{tg}\alpha < \mu$? Чему равна при этом сила тока?
16. На двух проводящих нитях длиной L каждая, соединённых с конденсатором ёмкостью C , подвешен металлический стержень длиной l и массой m (рис. 3.15). Напряжение на конденсаторе равно U . Вектор магнитной индукции однородного магнитного поля направлен вертикально вниз, модуль магнитной индукции равен B . После замыкания ключа стержень стал совершать колебания.

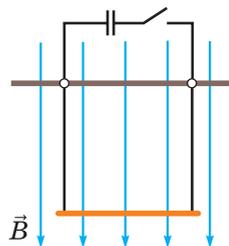


Рис. 3.15

- а) Чему равна максимальная скорость стержня при колебаниях?
б) Чему равна сила натяжения каждой нити при прохождении стержнем положения равновесия?

§ 4. Сила Лоренца

1. Модуль силы Лоренца

Действие силы Ампера на проводник с током в магнитном поле обусловлено действием магнитного поля на движущиеся свободные заряды в проводнике.

Силу, действующую на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле, называют *силой Лоренца* в честь голландского физика Х. Лоренца. Мы будем обозначать её \vec{F}_L .

Используя формулу для силы Ампера, можно показать, что

модуль силы Лоренца, действующей на частицу с зарядом q , движущуюся со скоростью, равной по модулю v , выражается формулой

$$F_L = Bqv\sin\alpha,$$

где B — модуль магнитной индукции, α — угол между направлением скорости частицы и вектором магнитной индукции.

*Вывод формулы для силы Лоренца

Напомним, что модуль силы Ампера, действующей на проводник с током в магнитном поле, выражается формулой

$$F_A = BIl\sin\alpha,$$

где B — модуль магнитной индукции, I — сила тока в проводнике, l — длина проводника, α — угол между проводником и вектором магнитной индукции.

Сила Ампера — это результат действия силы Лоренца на носители заряда. Обозначим q заряд одного из них, а N — их число в данном проводнике. Тогда

$$F_A = NF_L.$$

Из двух последних формул получаем:

$$F_{\text{Л}} = \frac{BIl\sin\alpha}{N}.$$

Из определения силы тока следует, что

$$I = \frac{Q}{t},$$

где Q — заряд, который проходит через поперечное сечение проводника за промежуток времени t .

Обозначим v модуль средней скорости *направленного* движения свободных зарядов и возьмём в качестве t промежуток времени, за который *все* содержащиеся в данном проводнике свободные заряды проходят через его поперечное сечение. Тогда

$$t = \frac{l}{v},$$

$$Q = Nq.$$



1. Используя написанные выше выражения для $F_{\text{Л}}$, I , t и Q , покажите, что $F_{\text{Л}} = Bqv\sin\alpha$.
2. В каком случае сила Лоренца, действующая на *движущуюся* заряженную частицу в *магнитном поле*, равна нулю?

Интересно сравнить силу Лоренца, действующую на заряженную частицу в магнитном поле Земли, с силой тяжести, действующей на ту же частицу.



3. Магнитная индукция магнитного поля Земли в средних широтах составляет примерно $5 \cdot 10^{-5}$ Тл. Чему равно отношение силы Лоренца к силе тяжести для электрона, движущегося перпендикулярно вектору магнитной индукции со скоростью 10 км/с?

2. Направление силы Лоренца

Направление силы Лоренца в случае, когда скорость частицы перпендикулярна вектору магнитной индукции

Поскольку за направление тока выбрали направление движения *положительно* заряженных частиц, направление силы Лоренца для *положительно* заряженных частиц можно определить, немного видоизменив правило левой руки. Рассмотрим сначала случай, когда скорость частицы *перпендикулярна* вектору магнитной индукции.

Если левую руку расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление скорости *положительно* заряженной частицы, то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец покажет направление силы, действующей на эту частицу (рис. 4.1).

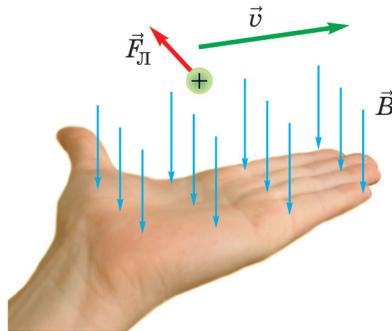


Рис. 4.1

Чтобы найти направление силы Лоренца, действующей на *отрицательно* заряженную частицу (например, электрон), можно найти сначала направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, движущуюся в том же направлении, а потом изменить направление силы на *противоположное*.

° 4. Перенесите рисунки 4.2, а—в в тетрадь и добавьте недостающие обозначения.

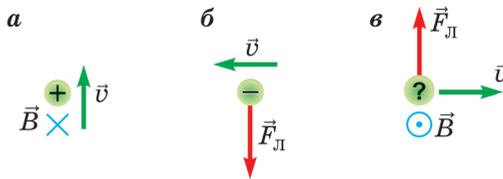


Рис. 4.2

*Направление силы Лоренца в общем случае

Если скорость частицы \vec{v} не перпендикулярна вектору магнитной индукции \vec{B} , для определения направления силы Лоренца поступаем аналогично тому, как мы находили направление силы Ампера:

— представляем \vec{B} в виде суммы вектора \vec{B}_{\parallel} , параллельного скорости частицы, и вектора \vec{B}_{\perp} , перпендикулярного скорости частицы;

— используем правило левой руки, расположив её так, чтобы в раскрытую ладонь входил вектор \vec{B}_\perp (рис. 4.3).

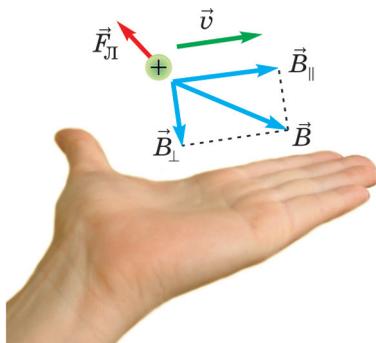


Рис. 4.3

Обратите внимание: сила Лоренца (если она не равна нулю) перпендикулярна как скорости частицы, так и вектору магнитной индукции.



5. На рисунке 4.4 изображена движущаяся заряженная частица в магнитном поле. Магнитные линии лежат в плоскости рисунка.

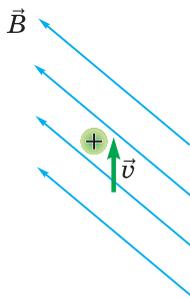


Рис. 4.4

- Перенесите рисунок в тетрадь и представьте вектор магнитной индукции \vec{B} в виде векторной суммы вектора \vec{B}_\parallel , параллельного скорости частицы, и вектора \vec{B}_\perp , перпендикулярного ей.
- Изобразите направление действующей на частицу силы Лоренца.

3. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

Сила Лоренца перпендикулярна скорости заряженной частицы, поэтому если скорость частицы \vec{v} перпендикулярна вектору магнитной индукции \vec{B} , то в однородном магнитном поле частица будет равномерно двигаться по окружности: центростремительное ускорение ей будет сообщать сила Лоренца (рис. 4.5).

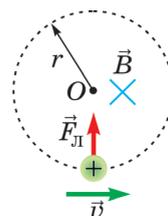


Рис. 4.5

- ° 6. Докажите, что радиус окружности, по которой будет двигаться частица массой m с зарядом q , можно найти по формуле

$$r = \frac{mv}{qB}.$$

- ° 7. Докажите, что период обращения частицы при её движении по окружности в магнитном поле выражается формулой

$$T = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Обратите внимание: период обращения частицы в магнитном поле не зависит от скорости частицы!

8. Протон и электрон движутся с одинаковыми по модулю скоростями по окружности в однородном магнитном поле. Вектор магнитной индукции направлен вертикально вверх.

- В какой плоскости движутся частицы — горизонтальной или вертикальной?
- В каком направлении — по часовой стрелке или против неё (если смотреть сверху) движется по окружности протон? электрон?
- Какая частица движется по окружности меньшего радиуса? Чему равно отношение радиусов окружностей, по которым движутся частицы?
- Период обращения какой частицы больше? Во сколько раз?

*4. «Фильтр скоростей»

Могут ли силы, действующие на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного и электрического полей, взаимно уравновесить друг друга? Могут: это используется в приборе, который называется «фильтр скоростей».



9. Заряженная частица влетает в прибор через отверстие 1 и вылетает через отверстие 2 (рис. 4.6). При этом внутри прибора она движется *прямолинейно и равномерно*. Внутри прибора существуют однородные электрическое и магнитное поля. Линии напряжённости электрического поля и магнитные линии показаны на рисунке.

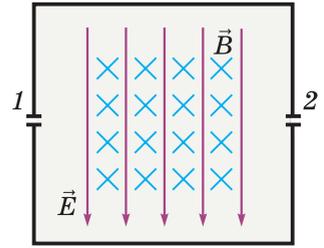


Рис. 4.6

- Перенесите рисунок в тетрадь и укажите на нём силы, действующие со стороны электрического и магнитного полей на влетевшую через отверстие 1 положительно заряженную частицу.
- Выразите скорость частицы v через модуль напряжённости электрического поля E и модуль магнитной индукции B .
- Почему данный прибор называется фильтром скоростей? Используя фильтр скоростей, можно измерить массу заряженной частицы.



10. Заряженная частица с зарядом q , пролетев через «фильтр скоростей», в котором модуль магнитной индукции равен B_1 , влетает в однородное магнитное поле с модулем индукции B_2 . Модуль напряжённости электрического поля в фильтре скоростей равен E , радиус окружности, по которой движется частица в однородном магнитном поле, равен r .

- Чему равна скорость частицы?
- Чему равна масса частицы?



ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Направление силы Лоренца

Сила Лоренца

$$F_{\text{л}} = Bqv \sin \alpha$$

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

- Заряженная пылинка влетает в однородное магнитное поле со скоростью 10 м/с, направленной перпендикулярно линиям магнитной индукции. Чему равен заряд пылинки, если на неё действует сила $8 \cdot 10^{-7}$ Н, а модуль магнитной индукции 4 мТл?
- На протон, влетевший в однородное магнитное поле со скоростью $3 \cdot 10^6$ м/с, направленной перпендикулярно линиям магнитной индукции, со стороны магнитного поля действует сила $3 \cdot 10^{-14}$ Н. Чему равен модуль магнитной индукции? Какова форма траектории, по которой движется протон?
- Заряженная частица движется в однородном магнитном поле с постоянной по модулю и направлению скоростью. Изобразите на чертеже направления скорости частицы и вектора магнитной индукции данного поля.
- Перенесите рисунки 4.7, *a—e* в тетрадь и добавьте недостающие обозначения физических величин или знак заряда.

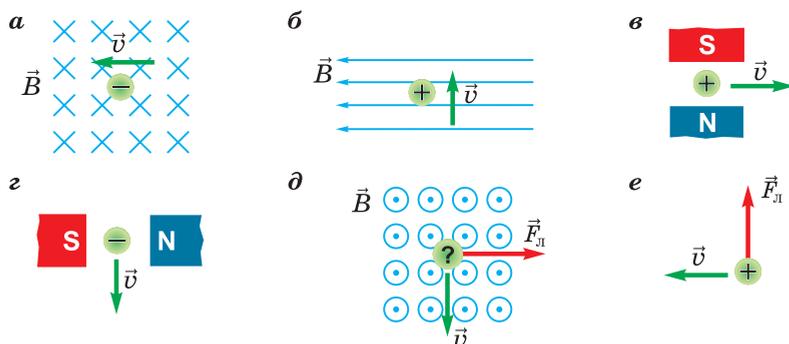


Рис. 4.7

- Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией 2 Тл со скоростью 10^7 м/с, направленной перпендикулярно линиям магнитной индукции.
 - С какой силой магнитное поле действует на электрон?
 - Чему равен модуль ускорения электрона?
 - Будет ли изменяться модуль скорости электрона при его движении в магнитном поле?
- В однородном магнитном поле по окружности радиусом 5 см движется протон. Чему равна скорость протона, если индукция магнитного поля 60 мТл?

Повышенный уровень

17. На α -частицу в магнитном поле действует в 12 раз бóльшая сила Лоренца, чем на протон. Скорость какой частицы больше и во сколько раз, если скорости частиц направлены одинаково? Масса α -частицы в 4 раза больше массы протона, а её заряд в 2 раза больше заряда протона.
18. На электрон, влетевший в однородное магнитное поле с индукцией 6 мТл со скоростью $5 \cdot 10^6$ м/с, со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, равная $4,16 \cdot 10^{-15}$ Н. Какой угол составляет вектор скорости электрона с вектором магнитной индукции?
19. Заряженная частица влетает со скоростью 800 м/с в однородные электрическое и магнитное поля под углом 30° к вектору магнитной индукции. Чему равно отношение силы, действующей на частицу со стороны электрического поля, к силе Лоренца, если напряжённость электрического поля 4 кВ/м, а магнитная индукция 0,5 Тл?
20. В однородном магнитном поле с индукцией 20 мТл по окружности радиусом 5 мм движется электрон. Чему равны:
- период обращения электрона;
 - кинетическая энергия электрона;
 - сила Лоренца, действующая на электрон со стороны магнитного поля;
 - ускорение электрона?
21. Две заряженные частицы влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Кинетические энергии частиц одинаковы, отношение радиусов траекторий $\frac{r_2}{r_1} = 0,5$, отношение зарядов частиц $\frac{q_1}{q_2} = 2$. Чему равны отношения масс частиц и отношение модулей их импульсов?
22. В однородное магнитное поле влетает электрон со скоростью, направленной перпендикулярно вектору магнитной индукции. За какой наименьший промежуток времени скорость электрона изменит направление на противоположное, если модуль магнитной индукции равен 0,25 мТл?
23. Электрон, пройдя ускоряющую разность потенциалов 4 кВ, влетает в однородное магнитное поле с индукцией 40 мТл перпендикулярно линиям магнитной индукции. Чему равен радиус окружности, по которой будет двигаться электрон?
24. Вектор магнитной индукции однородного магнитного поля перпендикулярен вектору напряжённости электрического поля.

В некоторый момент времени скорость электрона направлена вдоль линий напряжённости электрического поля и равна $1,9 \cdot 10^6$ м/с. Чему равен модуль суммарной силы, действующей в этот момент на электрон, если модуль магнитной индукции равен 2 Тл, а напряжённость электрического поля равна $5 \cdot 10^6$ В/м?

Высокий уровень

25. В полосе шириной 10 см создано однородное магнитное поле с индукцией 0,51 Тл (рис. 4.8). В эту полосу перпендикулярно ей и вектору магнитной индукции влетает протон, прошедший ускоряющую разность потенциалов 500 кВ. На какой угол повернётся вектор скорости протона при движении внутри полосы?

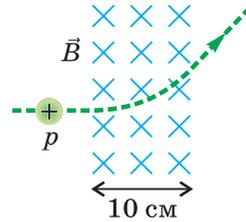


Рис. 4.8

26. Два иона массами m_1 и m_2 с одинаковыми положительными зарядами q движутся между заряженными металлическими пластинами вдоль одной прямой (рис. 4.9). Расстояние между пластинами d , разность потенциалов между ними U . Вылетев в точке C из пространства между пластинами, ионы совершают пол-оборота и попадают в точки A_1 и A_2 . Вся система находится в магнитном поле с индукцией \vec{B} . Чему равно расстояние между точками A_1 и A_2 ?

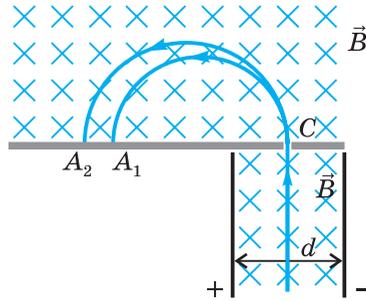


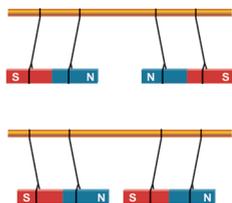
Рис. 4.9

27. Пучок протонов влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Протоны движутся по дуге окружности радиусом 0,1 м и поглощаются металлической пластиной. Какое количество теплоты выделяется при этом за 1 с, если индукция магнитного поля равна 0,2 Тл, а сила тока в пучке 0,2 мА?

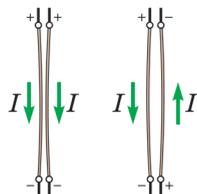
ГЛАВНОЕ В ГЛАВЕ I

Магнитное взаимодействие

Взаимодействие постоянных магнитов



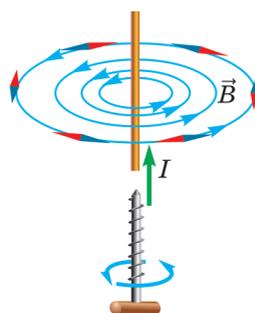
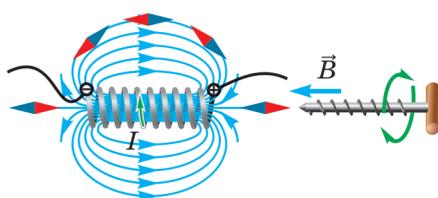
Взаимодействие проводников с током



Вектор магнитной индукции



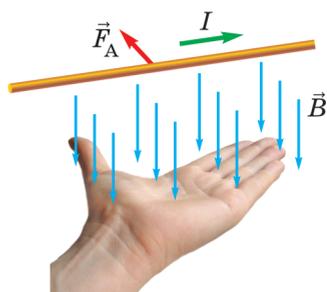
Правило буравчика



Закон Ампера

$$F_A = BIl \sin \alpha$$

Правило левой руки



Сила Лоренца

$$F_L = Bqv \sin \alpha$$

