

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра физики и энергоэффективных технологий**

**Н. А. АХРАМЕНКО, И. О. ДЕЛИКАТНАЯ, К. П. ШИЛЯЕВА**

# **МАГНЕТИЗМ**

**Пособие**

**Гомель 2021**

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра физики и энергоэффективных технологий

Н. А. АХРАМЕНКО, И. О. ДЕЛИКАТНАЯ, К. П. ШИЛЯЕВА

# МАГНЕТИЗМ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области транспорта и транспортной деятельности  
для обучающихся по специальностям: 1-37 02 01 «Тяговый состав  
железнодорожного транспорта (по направлениям)», 1-37 02 02  
«Подвижной состав железнодорожного транспорта»,  
1-37 02 03 «Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных,  
путевых, дорожно-строительных машин и оборудования»  
в качестве пособия.*

Гомель 2021

УДК 537.6/.8(075.8)  
ББК 22.334  
А95

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор *А. С. Неверов* (БелГУТ);  
кафедра общей физики ГГУ им. Ф. Скорины (заведующий  
кафедрой – канд. техн. наук, доцент *Е. Б. Шершнев*)

### **Ахраменко, Н. А.**

А95 Магнетизм : пособие / Н. А. Ахраменко, И. О. Деликатная, К. П. Шилляева ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 70 с.  
ISBN 978-985-891-025-8

Приведены общие методические указания, вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы, основная и дополнительная литература, сведения из теории, примеры решения задач, задачи для самостоятельной работы и справочные таблицы по разделу «магнетизм» программы курса физики.

Предназначено для методического обеспечения самостоятельной работы по физике студентов специальностей: 1-37 02 01 «Тяговый состав железнодорожного транспорта (по направлениям)», 1-37 02 02 «Подвижной состав железнодорожного транспорта», 1-37 02 03 «Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных, путевых, дорожно-строительных машин и оборудования».

**УДК 537.6/.8(075.8)**  
**ББК 22.334**

**ISBN 978-985-891-025-8**

© Ахраменко Н. А., Деликатная И. О.,  
Шилляева К. П., 2021.  
© Оформление. БелГУТ, 2021.

## 1 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

Опыт показывает, что в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое магнитным, подобно тому, как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электростатическое поле. Наличие магнитного поля обнаруживается по силовому действию на внесенные в него проводники с током или постоянные магниты. Название «магнитное поле» связывают с ориентацией магнитной стрелки под действием поля, создаваемого током (это явление было впервые обнаружено датским физиком Х. Эрстедом).

Электрическое поле действует как на неподвижные, так и на движущиеся в нем электрические заряды. Важнейшая особенность магнитного поля состоит в том, что оно действует *только на движущиеся* в этом поле электрические заряды. Опыт показывает, что характер воздействия магнитного поля на ток различен в зависимости от формы проводника, по которому течет ток, от расположения проводника и от направления тока. Следовательно, чтобы охарактеризовать магнитное поле надо рассмотреть его действие на определенный ток.

Подобно тому, как при исследовании электростатического поля использовались точечные заряды, при исследовании магнитного поля используется *замкнутый плоский контур с током (рамка с током)*, линейные размеры которого малы по сравнению с расстоянием до токов, образующих магнитное поле. Ориентация контура в пространстве определяется направлением нормали к контуру. Направление нормали определяется *правилом правого винта*: за положительное направление нормали принимается направление поступательного движения винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке.

Так как магнитное поле является *силовым*, то его, по аналогии с электрическим, изображают с помощью линий магнитной индукции. Касательные к линиям в каждой точке совпадают с направлением вектора **V**. Их направление задается правилом правого винта: головка винта, ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении линий магнитной индукции.

Линии магнитной индукции можно «проявить» с помощью железных опилок, намагничивающихся в исследуемом поле и ведущих себя подобно маленьким магнитным стрелкам.

Магнитное поле постоянных токов различной формы изучалось французскими учеными Ж. Био и Ф. Саваром. Результаты этих опытов были обобщены выдающимся французским математиком и физиком П. Лапласом.

Закон Био – Савара – Лапласа: для проводника с током  $I$ , элемент  $dl$  которого создает в некоторой точке индукцию поля  $d\vec{B}$ , записывается в виде

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3} \quad \text{или} \quad dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

где  $d\vec{B}$  – индукция магнитного поля, создаваемого элементом длины  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$ ;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведённый от элемента тока  $d\vec{l}$  до точки, в которой определяется магнитная индукция;  $\alpha$  – угол между векторами  $d\vec{B}$  и  $d\vec{l}$ .

Для магнитного поля, как и для электрического, справедлив принцип суперпозиции.

Принцип суперпозиции (наложения) магнитных полей: индукция результирующего магнитного поля равна векторной сумме индукций складываемых магнитных полей,

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

В случае наложения двух полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Модуль вектора магнитной индукции (для двух полей)

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1 B_2 \cos \alpha},$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$ .

Магнитная индукция  $\vec{B}$  связана с напряженностью магнитного поля  $\vec{H}$  соотношением (в случае однородной, изотропной среды)

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

а в вакууме

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}.$$

Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводником с током,

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r},$$

где  $r$  – расстояние от оси проводника до рассматриваемой точки поля.

Магнитная индукция поля в центре кругового проводника с током

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}.$$

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком прямолинейного проводника (рисунок 1),

$$B = \frac{\mu \mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2).$$

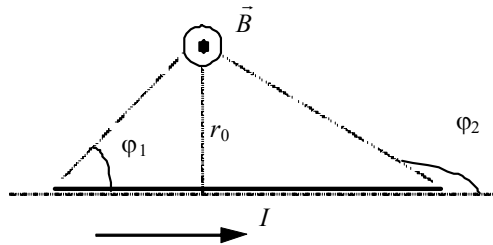


Рисунок 1

Обобщая результаты исследования действия магнитного поля на различные проводники с током, Ампер установил, что сила  $d\vec{F}$ , с которой магнитное поле действует на элемент проводника длины  $d\vec{l}$  с током  $I$ , находящегося в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ ,

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \times \vec{B}] \quad \text{или} \quad dF = IBdl \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $d\vec{l}$ .

Направление вектора  $d\vec{F}$  может быть найдено по общим правилам векторного произведения, откуда следует правило левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор  $\vec{B}$ , а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока в проводнике, то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на ток.

Закон Ампера применяется для определения силы взаимодействия двух проводников с током. Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует по закону Ампера на другой проводник с током.

Сила взаимодействия двух прямолинейных бесконечных параллельных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$

$$dF = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} dl .$$

Два параллельных тока одинакового направления притягиваются друг к другу, если же токи имеют противоположные направления, то между ними действует сила отталкивания.

Каждый проводник с током создает в окружающем пространстве магнитное поле. Электрический же ток представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов. Поэтому можно сказать, что любой движущийся в вакууме или среде заряд создает вокруг себя магнитное поле. В результате обобщения опытных данных был установлен закон, определяющий поле  $\mathbf{B}$  точечного заряда  $Q$ , свободно движущегося с нерелятивистской скоростью  $v$ . Под свободным движением заряда понимается его движение с постоянной скоростью. Магнитное поле точечного заряда  $q$ , свободно движущегося с нерелятивистской скоростью  $v$ ,

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{qv \sin \alpha}{r^2} ,$$

где  $r$  – модуль радиус-вектора, проведённого от заряда к точке наблюдения;  $\alpha$  – угол между вектором скорости и радиус-вектором.

Механический момент, действующий на контур с током, помещённый в однородное магнитное поле,

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}] ,$$

где  $\vec{p}_m$  – магнитный момент контура площадью  $S$  с током  $I$ ;

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} ,$$

$\vec{n}$  – единичный вектор нормали к плоскости контура.

## 2 ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Опыт показывает, что магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные заряды, движущиеся в магнитном поле. Сила, действующая на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ , называется силой Лоренца и выражается формулой

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}] ,$$

где  $\alpha$  – угол между вектором скорости и вектором индукции магнитного поля.

Направление силы Лоренца определяется с помощью правила левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор  $\mathbf{B}$ , а четыре вытянутых пальца направить вдоль вектора скорости  $\mathbf{v}$  (для  $q > 0$  направления  $I$  и  $\mathbf{v}$  совпадают, для  $q < 0$  – противоположны), то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на положительный заряд. На отрицательный заряд сила действует в противоположном направлении. Модуль силы Лоренца

$$F = |q|vB \sin \alpha .$$

Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости движения заряженной частицы, поэтому она изменяет только направление этой скорости, не изменяя ее модуля. Следовательно, сила Лоренца работы не совершает. Иными словами, постоянное магнитное поле не совершает работы над движущейся в нем заряженной частицей и кинетическая энергия этой частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

Если на движущийся электрический заряд помимо магнитного поля с индукцией  $\mathbf{B}$  действует и электрическое поле с напряженностью  $\mathbf{E}$ , то результирующая сила  $\mathbf{F}$ , приложенная к заряду, равна векторной сумме сил – силы, действующей со стороны электрического поля, и силы Лоренца:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}] .$$

Это выражение называется формулой Лоренца. Скорость  $v$  в этой формуле есть скорость заряда относительно магнитного поля.

Если поместить металлическую пластинку с током плотностью  $\mathbf{j}$  в магнитное поле  $\mathbf{B}$ , перпендикулярное  $\mathbf{j}$ , то в результате действия силы Лоренца между краями пластинки возникнет дополнительное поперечное электрическое поле. Когда напряженность  $E_B$  этого поперечного поля достигнет такой величины, что его действие на заряды будет уравновешивать силу Лоренца, то установится стационарное распределение зарядов в поперечном направлении. В этом случае Холловская поперечная разность потенциалов

$$\Delta \varphi = \frac{1}{en} djB ,$$

где  $d$  – ширина пластинки;  $j$  – плотность тока;  $B$  – магнитная индукция;  $n$  – концентрация носителей заряда.

Аналогично циркуляции вектора напряженности электростатического поля вводится циркуляция вектора магнитной индукции. Циркуляцией вектора  $\mathbf{B}$  по заданному замкнутому контуру называется интеграл



$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl.$$

Закон полного тока для магнитного поля в вакууме: циркуляция вектора **B** по произвольному замкнутому контуру равна произведению магнитной постоянной  $\mu_0$  на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k,$$

где  $d\vec{l}$  – вектор элементарной длины контура, направленный вдоль обхода контура;  $B_l$  – составляющая вектора магнитной индукции в направлении касательной к контуру  $L$  произвольной формы;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;

$\sum_{k=1}^n I_k$  – алгебраическая сумма токов, охватываемая контуром.

Для циркуляции векторов **E** и **B** существует принципиальное различие. Циркуляция вектора **E** электростатического поля всегда равна нулю, т. е. электростатическое поле является потенциальным. Циркуляция вектора **B** магнитного поля не равна нулю. Такое поле называется вихревым.

Магнитная индукция поля внутри соленоида (в вакууме), имеющего  $N$  витков и длину  $l$ ,

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}.$$

Магнитная индукция поля внутри тороида (в вакууме) радиуса  $r$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}.$$

Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) через элементарную площадку  $dS$

$$d\Phi_B = \vec{B} d\vec{S} = B_n dS,$$

где  $B_n$  – проекция вектора магнитной индукции на направление нормали к площадке  $dS$ .

В случае однородного поля

$$\Phi_B = B_n S = BS \cos \alpha,$$

где  $B_n$  – проекция вектора магнитной индукции на нормаль;  $\alpha$  – угол между вектором нормали к плоскости контура и вектором магнитной индукции.

Поток вектора **B** может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от знака  $\cos \alpha$  (определяется выбором положительного на-

правления нормали  $\mathbf{n}$ ). Поток вектора  $\mathbf{B}$  связывают с контуром, по которому течет ток. В таком случае положительное направление нормали к контуру можно связать с током правилом правого винта. Таким образом, магнитный поток, создаваемый контуром через поверхность, ограниченную им самим, всегда положителен.

Потокоцепление, т. е. полный магнитный поток, сцепленный со всеми витками  $N$  соленоида или тороида,

$$\Psi = N\Phi,$$

где  $\Phi$  – магнитный поток через один виток.

Для соленоида

$$\Phi = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l} S,$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

На проводник с током в магнитном поле действуют силы, определяемые законом Ампера. Если проводник не закреплен (например, одна из сторон контура изготовлена в виде подвижной перемычки), то под действием силы Ампера он будет в магнитном поле перемещаться. Следовательно, магнитное поле совершает работу по перемещению проводника с током.

Работа по перемещению проводника с током  $I$  в магнитном поле

$$A = I \Delta\Phi,$$

где  $\Delta\Phi$  – магнитный поток, пересеченный движущимся проводником.

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на магнитный поток, пересеченный движущимся проводником. Формула справедлива для произвольного направления вектора  $\mathbf{B}$ .

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле

$$A = I \Delta\Psi,$$

где  $I$  – сила тока в контуре;  $\Delta\Psi$  – изменение потокоцепления контура.

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле равна произведению силы тока в контуре на изменение магнитного потока, сцепленного с контуром.

### 3 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

Связь орбитального магнитного  $\vec{p}_m$  и орбитального  $\vec{L}_e$  механического моментов электрона

$$\vec{p}_m = -g \vec{L}_e,$$

где  $g = e/2m$  – гиромагнитное отношение орбитальных моментов.

Подобно тому, как для количественного описания поляризации диэлектриков вводилась поляризованность, для количественного описания намагничивания магнетиков вводят векторную величину – намагниченность, определяемую магнитным моментом единицы объема магнетика.

Намагниченность

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{p}_m}{V},$$

где  $\vec{P}_m$  – магнитный момент магнетика, равный векторной сумме магнитных моментов отдельных молекул;  $V$  – объем магнетика.

Связь между намагниченностью и напряженностью магнитного поля

$$\vec{J} = \chi \vec{H},$$

где  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества.

Связь между векторами  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{J}$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}),$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью вещества

$$\mu = 1 + \chi.$$

Закон полного тока для магнитного поля в веществе

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I,$$

где  $I$  – алгебраическая сумма сил токов проводимости, охватываемых контуром  $L$ .

Циркуляция вектора  $\mathbf{H}$  по произвольному замкнутому контуру  $L$  равна алгебраической сумме токов проводимости, охватываемых этим контуром.

#### 4 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Обобщая результаты своих многочисленных опытов, Фарадей пришел к выводу, что индукционный ток возникает всегда, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции. Например, при повороте в однородном магнитном поле замкнутого проводящего контура в нем также возникает индукционный ток. В данном случае индукция магнитного поля вблизи проводника остается постоянной, а меняется только поток магнитной индукции сквозь контур.

Опытным путем было также установлено, что значение индукционного тока совершенно не зависит от способа изменения потока магнитной индукции. Оно определяется лишь скоростью его изменения (в опытах Фарадея также доказывается, что отклонение стрелки гальванометра (сила тока) тем больше, чем больше скорость движения магнита, или скорость изменения силы тока, или скорость движения катушек).

Открытие явления электромагнитной индукции имело большое значение, так как была доказана возможность получения электрического тока с помощью магнитного поля. Этим была установлена взаимосвязь между электрическими и магнитными явлениями, что послужило в дальнейшем толчком для разработки теории электромагнитного поля.

Обобщая результаты своих многочисленных опытов, Фарадей пришел к количественному закону электромагнитной индукции. Он показал, что всякий раз, когда происходит изменение сцепленного с контуром потока магнитной индукции, в контуре возникает индукционный ток; возникновение индукционного тока указывает на наличие в цепи электродвижущей силы, называемой электродвижущей силой электромагнитной индукции. Значение индукционного тока, а следовательно, и ЭДС электромагнитной индукции определяются только скоростью изменения магнитного потока.

Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где  $\varepsilon_i$  – ЭДС индукции;  $N$  – число витков контура.

Правило Ленца: индукционный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшему этот индукционный ток.

Из закона Фарадея следует в частности:

1) ЭДС индукции, возникающая в рамке, содержащей  $N$  витков, площадью  $S$  при вращении рамки с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ ,

$$\varepsilon_i = BNS \sin \omega t;$$

2) разность потенциалов  $U$  на концах проводника длиной  $l$ , движущегося со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ ,

$$U = Blv \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции.

Электрический заряд  $q$ , протекающий в контуре,

$$q = \frac{\Delta\Psi}{R},$$

где  $\Delta\Psi$  – изменение потокосцепления;  $R$  – сопротивление контура.

Электрический ток, текущий в замкнутом контуре, создает вокруг себя магнитное поле, индукция которого, по закону Био – Савара – Лапласа, пропорциональна току. Сцепленный с контуром магнитный поток  $\Phi$  поэтому пропорционален току  $I$  в контуре. При изменении силы тока в контуре будет изменяться также и сцепленный с ним магнитный поток; следовательно, в контуре будет индуцироваться ЭДС. Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока называется самоиндукцией.

ЭДС самоиндукции, возникающая в замкнутом контуре при изменении силы тока в нём,

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt},$$

где  $L$  – индуктивность контура.

Потокосцепление контура индуктивностью  $L$  с током  $I$

$$\Psi = LI.$$

Индуктивность контура в общем случае зависит только от геометрической формы контура, его размеров и магнитной проницаемости той среды, в которой он находится. В этом смысле индуктивность контура – аналог электрической емкости уединенного проводника, которая также зависит только от формы проводника, его размеров и диэлектрической проницаемости среды.

Индуктивность соленоида (тороида)

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l},$$

где  $N$  – число витков соленоида;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $l$  – длина соленоида.

При вычислениях индуктивности соленоида с ферромагнитным сердечником по приведенной формуле для определения магнитной проницаемости следует воспользоваться графиком зависимости  $B$  от  $H$  (рисунок 2).

Затем магнитную проницаемость определить по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

При всяком изменении силы тока в проводящем контуре возникает ЭДС самоиндукции, в результате чего в контуре появляются дополнительные то-

ки, называемые экстратоками самоиндукции. Экстратоки самоиндукции, согласно правилу Ленца, всегда направлены так, чтобы препятствовать изменениям тока в цепи, т. е. направлены противоположно току, создаваемому источником. При выключении источника тока экстратоки имеют такое же направление, что и ослабевающий ток. Следовательно, наличие индуктивности в цепи приводит к замедлению исчезновения или установления тока в цепи.

$B$ , Тл

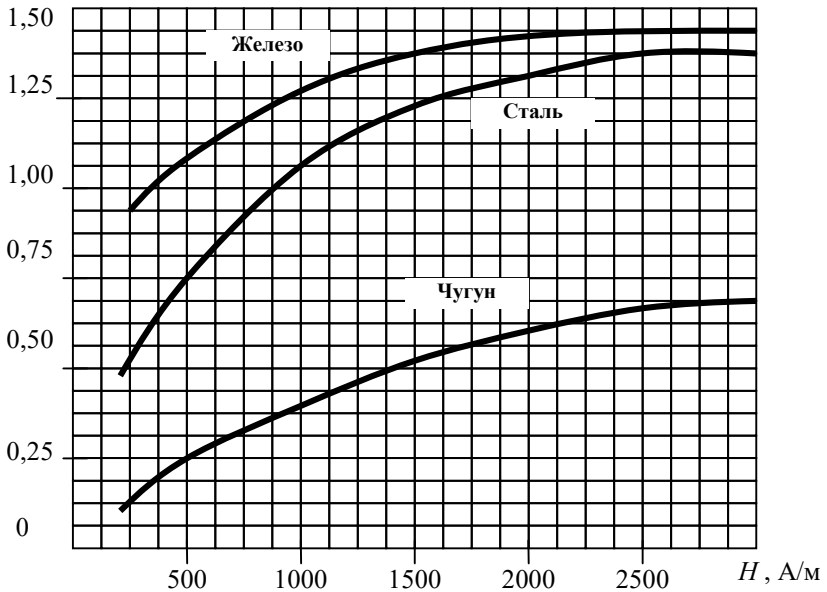


Рисунок 2

Мгновенное значение силы тока в цепи при размыкании и при замыкании цепи

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{R}{L}t\right); \quad I = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right),$$

где  $I_0$  – сила тока в цепи при  $t = 0$ ;  $R$  – активное сопротивление цепи;  $L$  – индуктивность цепи;  $\varepsilon$  – ЭДС источника тока.

Проводник, по которому протекает электрический ток, всегда окружен магнитным полем, причем магнитное поле появляется и исчезает вместе с появлением и исчезновением тока. Магнитное поле, подобно электрическо-

му, является носителем энергии. Естественно предположить, что энергия магнитного поля равна работе, которая затрачивается током на создание этого поля.

Энергия магнитного поля, связанного с контуром индуктивностью  $L$ , по которому течет ток силой  $I$ ,

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Объемная плотность энергии однородного магнитного поля

$$w = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} = \frac{BH}{2}.$$

Выражение для объемной плотности энергии магнитного поля имеет вид, аналогичный формуле для объемной плотности энергии электростатического поля, с той разницей, что электрические величины заменены в нем магнитными. Формула справедлива и для неоднородных полей. Выражение справедливо только для сред, для которых зависимость  $B$  от  $H$  линейная, т. е. оно относится только к пара- и диамагнетикам.

## 5 ОСНОВЫ ТЕОРИИ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Опыт показывает, что сторонние силы, вызывающие ток в контуре, не связаны ни с тепловыми, ни с химическими процессами; их возникновение также нельзя объяснить силами Лоренца, т. к. они на неподвижные заряды не действуют. Максвелл высказал гипотезу, что всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, которое и является причиной возникновения индукционного тока в контуре. Согласно представлениям Максвелла, контур, в котором появляется ЭДС, играет второстепенную роль, являясь своего рода лишь «прибором», обнаруживающим это поле.

Итак, по Максвеллу, изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле  $\mathbf{E}_B$ , циркуляция которого

$$\oint_L \mathbf{E}_B d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

где  $E_{Bl}$  – проекция вектора  $\mathbf{E}_B$  на направление  $d\mathbf{l}$ .

Согласно Максвеллу, если всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, то должно существовать и обратное явление: всякое изменение электрического поля должно вызывать появление в окружающем пространстве вихревого магнит-

ного поля. Для установления количественных соотношений между изменяющимся электрическим полем и вызываемым им магнитным полем Максвелл ввел в рассмотрение так называемый ток смещения. Из всех физических свойств, присущих току проводимости, Максвелл приписал току смещения лишь одно – способность создавать в окружающем пространстве магнитное поле. Таким образом, ток смещения (в вакууме или веществе) создает в окружающем пространстве магнитное поле.

Максвелл ввел понятие полного тока, равного сумме токов проводимости (а также конвекционных токов) и смещения. Плотность полного тока

$$\vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

Введя понятия тока смещения и полного тока, Максвелл по-новому подошел к рассмотрению замкнутости цепей переменного тока. Полный ток в них всегда замкнут, т. е. на концах проводника обрывается лишь ток проводимости, а в диэлектрике (вакууме) между концами проводника имеется ток смещения, который замыкает ток проводимости.

Введение Максвеллом понятия тока смещения привело его к завершению созданной им макроскопической теории электромагнитного поля, позволившей с единой точки зрения не только объяснить электрические и магнитные явления, но и предсказать новые, существование которых было впоследствии подтверждено.

В основе теории Максвелла лежат четыре уравнения.

1 Электрическое поле может быть как потенциальным ( $\mathbf{E}_q$ ), так и вихревым ( $\mathbf{E}_B$ ), поэтому напряженность суммарного поля  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_q + \mathbf{E}_B$ . Так как циркуляция вектора  $\mathbf{E}_q$  равна нулю, то циркуляция вектора напряженности суммарного поля

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Это уравнение показывает, что источниками электрического поля могут быть не только электрические заряды, но и изменяющиеся во времени магнитные поля.

2 Обобщенная теорема о циркуляции вектора  $\mathbf{H}$ :

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

Это уравнение показывает, что магнитные поля могут возбуждаться либо движущимися зарядами (электрическими токами), либо переменными электрическими полями.

3 Теорема Гаусса для поля  $\mathbf{D}$ :

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q.$$



Если заряд распределен внутри замкнутой поверхности непрерывно с объемной плотностью  $\rho$ , то

$$\oint_S D d\vec{S} = \int_V \rho dV.$$

4 Теорема Гаусса для поля  $\mathbf{B}$ :

$$\oint_S B d\vec{S} = 0.$$

Величины, входящие в уравнения Максвелла, не являются независимыми. Между ними существует следующая связь (изотропные несегнетоэлектрические и неферромагнитные среды):

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{j} = \gamma \vec{E},$$

где  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости;  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – соответственно электрическая и магнитная постоянные;  $\gamma$  – удельная проводимость вещества.

Из уравнений Максвелла вытекает, что источниками электрического поля могут быть либо электрические заряды, либо изменяющиеся во времени магнитные поля, а магнитные поля могут возбуждаться либо движущимися электрическими зарядами (электрическими токами), либо переменными электрическими полями. Уравнения Максвелла не симметричны относительно электрического и магнитного полей. Это связано с тем, что в природе существуют электрические заряды, но нет зарядов магнитных.

Система уравнений Максвелла в дифференциальной форме (характеризующих поле в каждой точке пространства):

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{D} = \rho, \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{B} = 0.$$

Если заряды и токи распределены в пространстве непрерывно, то обе формы уравнений Максвелла – интегральная и дифференциальная – эквивалентны. Однако если имеются поверхности разрыва – поверхности, на которых свойства среды или полей меняются скачкообразно, то интегральная форма уравнений является более общей.

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме предполагают, что все величины в пространстве и времени изменяются непрерывно. Чтобы достичь математической эквивалентности обеих форм уравнений Максвелла, дифференциальную форму дополняют *граничными условиями*, которым должно удовлетворять электромагнитное поле на границе раздела двух сред:

$$D_{n1} = D_{n2}, \quad E_{\tau 1} = E_{\tau 2}, \quad B_{n1} = B_{n2}, \quad H_{\tau 1} = H_{\tau 2},$$

(первое и последнее уравнения отвечают случаям, когда на границе раздела нет ни свободных зарядов, ни токов проводимости).

Уравнения Максвелла – наиболее общие уравнения для электрических и магнитных полей в покоящихся средах. Они играют в учении об электромагнетизме такую же роль, как законы Ньютона в механике. Из уравнений Максвелла следует, что переменное магнитное поле всегда связано с порождаемым им электрическим полем, а переменное электрическое поле всегда связано с порождаемым им магнитным. Электрическое и магнитное поля неразрывно связаны друг с другом – они образуют единое электромагнитное поле.

Теория Максвелла, являясь обобщением основных законов электрических и магнитных явлений, не только смогла объяснить уже известные экспериментальные факты, что также является важным ее следствием, но и предсказала новые явления. Одним из важных выводов этой теории явилось существование магнитного поля токов смещения, что позволило Максвеллу предсказать существование электромагнитных волн – переменного электромагнитного поля, распространяющегося в пространстве с конечной скоростью. В дальнейшем было доказано, что скорость распространения свободного электромагнитного поля (не связанного с зарядами и токами) в вакууме равна скорости света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Этот вывод и теоретическое исследование свойств электромагнитных волн привели Максвелла к созданию электромагнитной теории света, согласно которой свет представляет собой также электромагнитные волны. Электромагнитные волны на опыте были получены немецким физиком Г. Герцем, доказавшим, что законы их возбуждения и распространения полностью описываются уравнениями Максвелла. Таким образом, теория Максвелла была экспериментально подтверждена.

## 6 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Пример 1.** По проводнику, изогнутому в виде прямоугольника со сторонами  $a = 20$  см и  $b = 10$  см течет ток силой  $I = 100$  А. Найти магнитную индукцию в точке пересечения диагоналей прямоугольника.

### Р е ш е н и е

Расположим виток с током в плоскости чертежа (рисунок 3).

Согласно принципу суперпозиции магнитных полей

$$\vec{B}_1 = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4, \quad (1)$$

где  $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3, \vec{B}_4$  – магнитные индукции полей, создаваемых токами, протекающими по каждой стороне прямоугольника. В точке  $O$  пересечения диагоналей прямоугольника все векторы магнитной индукции направлены перпендикулярно плоскости витка «к нам». Кроме того, из соображений симметрии следует, что  $B_1 = B_2, B_3 = B_4$ . Это позволяет векторное равенство (1) заменить скалярным:

$$B = 2B_1 + 2B_2. \quad (2)$$

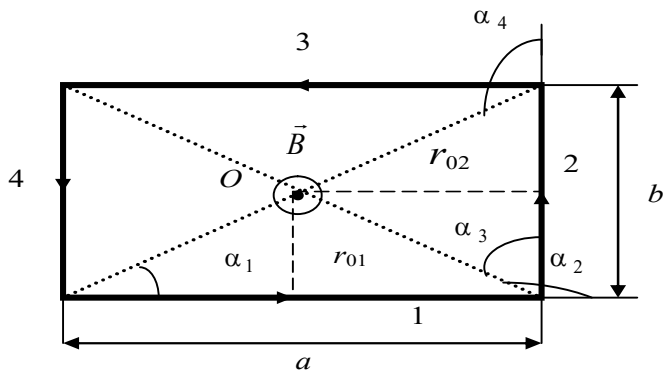


Рисунок 3

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком 1 (см. рисунок 3) прямоугольного проводника с током,

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_{01}} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (3)$$

Учитывая, что  $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$  и  $\cos \alpha_2 = -\cos \alpha_1$  формулу (3) можно переписать в виде

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_{01}} \cos \alpha_1. \quad (4)$$

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком 2 (см. рисунок 3) прямоугольного проводника с током,

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_{02}} (\cos \alpha_3 - \cos \alpha_4). \quad (5)$$

Учитывая, что  $\cos \alpha_4 = -\cos \alpha_3$ , формула (5) приобретает вид

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_{02}} \cos \alpha_3. \quad (6)$$

Заметим, что

$$r_{01} = \frac{b}{2}, r_{02} = \frac{a}{2}, \cos \alpha_1 = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \cos \alpha_2 = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}.$$

Тогда получим:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{\pi} \frac{a}{B\sqrt{a^2 + b^2}}; B_2 = \frac{\mu_0 I}{\pi} \frac{b}{a\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (7)$$

С учетом (7) формула (2) приобретает вид

$$B = \frac{2\mu_0 I}{\pi\sqrt{a^2 + b^2}} \left( \frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right). \quad (8)$$

После подстановки числовых значений найдем величину магнитной индукции в точке  $O$ :

$$B = \frac{2 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 100}{3,14\sqrt{0,2^2 + 0,1^2}} \left( \frac{0,2}{0,1} + \frac{0,1}{0,2} \right) = 8,94 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Ответ:  $B = 8,94 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$

**Пример 2.** Три бесконечно длинных параллельных проводника с токами силой  $I = 5 \text{ А}$  в каждом пересекают перпендикулярную к ним плоскость в точках, являющихся вершинами равностороннего треугольника со стороной  $d = 0,1 \text{ м}$ . Определить магнитную индукцию поля в центре треугольника, если: а) токи в проводниках имеют одинаковое направление; б) направление тока в одном из проводников противоположно направлению токов в двух других (рисунок 4).

Решение

Магнитная индукция в центре  $\Delta ACD$  по принципу суперпозиции равна векторной сумме индукций магнитных полей, создаваемых каждым из токов в этой точке:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3.$$

Векторы  $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3$  перпендикулярны соответственно отрезкам  $AO, CO, DO$ , и их направления определяются по правилу правого винта. Так как силы токов равны, а рассматриваемая точка расположена симметрично относительно проводников, то модули индукций также равны между собой:

$$B_1 = B_2 = B_3 = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r_0} = \mu\mu_0 \frac{\sqrt{3}I}{\pi d}, \quad (1)$$

где расстояние от центра до проводников

$$r_0 = \frac{AC}{2 \cos 30^\circ} = \frac{d}{\sqrt{3}}.$$

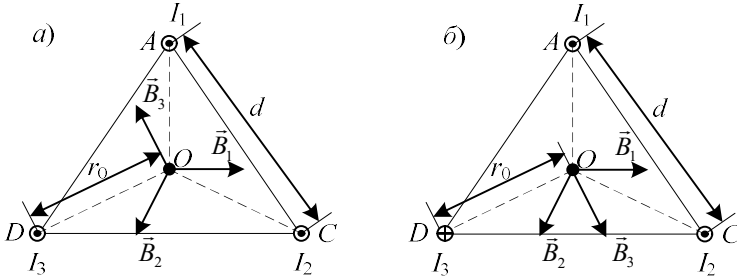


Рисунок 4

Рассмотрим случай *a*. Токи  $I_1, I_2, I_3$  направлены одинаково, значит углы между векторами  $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3$  равны  $120^\circ$ , а магнитная индукция результирующего поля в силу симметрии равна нулю ( $B = 0$ ).

В случае *б* углы между соседними векторами магнитных индукций равны  $60^\circ$ , а значит

$$B = B_3 + (B_1 + B_2) \cos 60^\circ.$$

С учетом (1) это соотношение примет следующий вид:

$$B = \mu\mu_0 \frac{\sqrt{3}I}{2\pi d} (1 + 2 \cos 60^\circ) = \mu\mu_0 \frac{\sqrt{3}I}{\pi d}.$$

Проверим размерность полученной формулы:

$$[B] = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} \frac{\text{А}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2} = \text{Тл}.$$

Проведем расчет, подставив данные из условия (с учетом  $\mu = 1$  для вакуума):

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{1,73 \cdot 5}{\pi \cdot 0,1} = 3,46 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}.$$

Ответ:  $B = 3,46 \cdot 10^{-7}$  Тл.

**Пример 3.** Определить магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого отрезком провода длиной  $l = 100$  см в точке  $A$ , равноудаленной от его концов и

находящейся на расстоянии  $r_0 = 50$  см от его середины. По проводу течет ток силой  $I = 10$  А (рисунок 5).

### Решение

Магнитное поле в точке  $A$  создается отрезком проводника с током. По закону Био – Савара – Лапласа модуль вектора индукции магнитного поля в данной точке, создаваемого элементом проводника  $d\vec{l}$ , вычисляется как

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{r}$  и  $d\vec{l}$ .

В точке  $A$  векторы индукции магнитного поля  $d\vec{B}$  для каждого элемента проводника  $d\vec{l}$  имеют одинаковое направление. Поэтому сложение (в соответствии с принципом суперпозиции) векторов можно заменить на сложение их модулей.

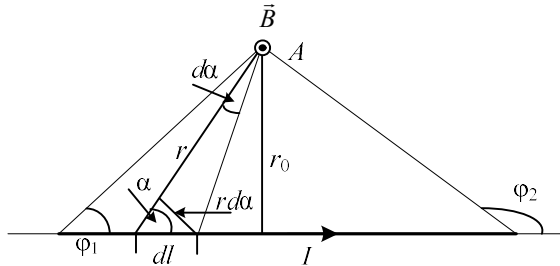


Рисунок 5

Из рисунка следует

$$r = \frac{r_0}{\sin \alpha}, \quad dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha}.$$

Таким образом выражение (1) примет вид

$$dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r_0} \sin \alpha d\alpha. \quad (2)$$

Интегрирование формулы (2) приводит к соотношению для модуля вектора индукции магнитного поля, создаваемого всем проводником:

$$B = \frac{\mu \mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (3)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между векторами, соединяющими концы отрезка провода с точкой  $A$ , и направлением тока в проводе.

Следует отметить, что формула (3) дает правильный результат только в том случае, если углы откладываются от направлений из рассматриваемой точки к концам отрезка и отрезком (или его продолжением) с учетом направления тока, а также, если порядок углов соответствует направлению тока.

В рассматриваемом случае  $\varphi_1 = 45^\circ$  и  $\varphi_2 = 135^\circ$ , соответственно получим  $\cos \varphi_1 = 0,707$ , а  $\cos \varphi_2 = -0,707$ .

Подставим в формулу численные значения и, с учетом  $\mu = 1$  для вакуума, произведем расчет:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{4\pi \cdot 0,5} (0,707 + 0,707) = 2,82 \cdot 10^{-6} \text{ Тл.}$$

Ответ:  $B = 2,82 \cdot 10^{-6}$  Тл.

**Пример 4.** Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом. По проводу течет ток  $I = 100$  А. Какова магнитная индукция  $B$  в точке  $A$ , если  $r = 1$  м (рисунок 6)?

Решение

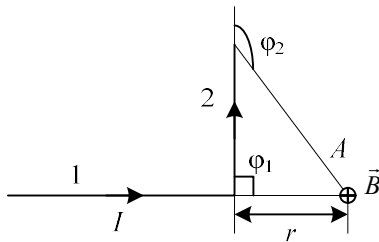


Рисунок 6

Магнитное поле в точке  $A$  создается проводником с током, изогнутым под прямым углом. Закон Био – Савара – Лапласа позволяет рассчитать магнитную индукцию от проводника с током простой (формы) геометрии. В нашем случае поле от всего проводника следует рассматривать как суперпозицию полей, созданных двумя отрезками 1 и 2, бесконечными с одной стороны и ограниченными с другой стороны изломом:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Модуль вектора  $d\vec{B}$  от элемента  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$  вычисляется по формуле

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{r}$  и  $d\vec{l}$ .

Для отрезка проводника в результате интегрирования этой формулы получим:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между векторами, соединяющими концы отрезка провода с точкой  $A$ , и направлением тока в проводнике.

В точке  $A$  магнитная индукция поля, создаваемого отрезком 1,  $B_1 = 0$ , т. к. для каждого элемента  $d\vec{l}$  этого отрезка по формуле (1)  $dB = 0$ .

Магнитную индукцию поля  $B_2$  в точке  $A$ , создаваемого отрезком 2, определяем по формуле (2). В этом случае  $\varphi_1 = 90^\circ$  и  $\varphi_2 = 180^\circ$ , соответственно  $\cos \varphi_1 = 0$ , а  $\cos \varphi_2 = -1$ .

Таким образом,

$$B = B_2 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r}.$$

Проверим размерность полученной формулы:

$$[B] = \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Вб} \cdot \text{А}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2} = \text{Тл}.$$

Подставим в формулу численные значения и, с учетом  $\mu = 1$  для вакуума, произведем расчет:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 100}{4\pi \cdot 1} = 10^{-5} \text{ Тл}.$$

Ответ:  $B = 10^{-5}$  Тл.

**Пример 5.** В одной плоскости с бесконечным прямолинейным проводом с током  $I = 6$  А расположена прямоугольная рамка со сторонами  $a = 40$  см и  $b = 30$  см так, что длинные стороны рамки параллельны проводу. Сила тока в рамке  $I_1 = 1$  А. Определить силы, действующие на каждую из сторон рамки, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии  $d = 10$  см, а ток в ней сонаправлен току  $I$  (рисунок 7).

### Р е ш е н и е

Ток  $I$  в бесконечно длинном проводнике создает вокруг магнитное поле, величина которого характеризуется магнитной индукцией

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r}, \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние от рассматриваемой точки поля до проводника с током.



На стороны рамки с током  $I_1$ , находящейся в магнитном поле проводника с током  $I$ , действуют силы Ампера  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{F}_4$ , направленные, согласно правилу «левой руки», как показано на рисунке 7.

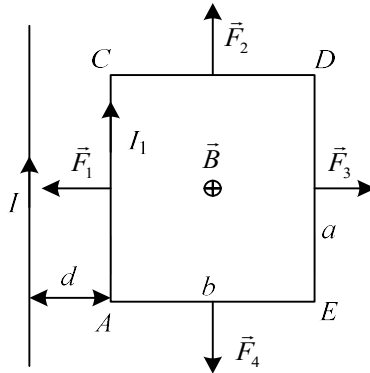


Рисунок 7

Величина силы Ампера, действующей на элемент  $d\vec{l}$  проводника с током, определяется формулой

$$d\vec{F} = I_1 [d\vec{l} \times \vec{B}],$$

где  $\vec{B}$  – магнитная индукция поля в данной точке. В данном случае угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{B}$  равен  $\pi/2$ , поэтому формулу для модуля силы, действующей на элемент рамки длиной  $dl$ , можно записать в виде

$$dF = IBdl.$$

Так как индукция магнитного поля в точках на стороне рамки длиной  $a$ , расположенных на одном расстоянии  $d$  от проводника с током  $I$ , одинакова, то сила  $F_1$ , действующая на ближнюю сторону рамки AC,

$$F_1 = \int_0^a I_1 B dl = I_1 B \int_0^a dl = I_1 Ba.$$

С учетом формулы (1), а также того, что магнитная проницаемость воздуха  $\mu = 1$  и в данном случае  $r = d$ , получим:

$$F_1 = \frac{\mu_0 I_1 I}{2\pi d} a.$$

Для стороны рамки DE  $r = d + b$ , поэтому

$$F_3 = \frac{\mu_0 I_1 I}{2\pi(b+d)} a.$$

Сила  $F_2$ , действующая на сторону  $CD$  рамки, является результирующей бесконечно малых сил, действующих на элементы  $dl$  этой стороны, расположенные на различных расстояниях от проводника с током  $I$ . В данном случае  $r$  – переменная ( $dr = dl$ ), она изменяется от  $d$  до  $d + b$ . Так как все векторы  $d\vec{F}$  направлены одинаково, то принцип суперпозиции сводится к интегрированию модулей сил:

$$F_2 = \int_d^{d+b} I_1 B dl = I_1 \int_d^{d+b} B dr = I_1 \int_d^{d+b} \frac{\mu_0 I dr}{2\pi r} = \frac{\mu_0 I_1 I}{2\pi} \ln \frac{d+b}{d}.$$

Сила  $F_4$ , действующая на сторону  $AE$  рамки, по величине равна силе  $F_2$  но направлена в противоположную сторону, т. к. каждому элементу  $d\vec{l}$  стороны  $AE$  соответствует аналогичный элемент стороны  $CD$ , находящийся в тех же самых условиях, но направленный противоположно.

Все конечные формулы имеют один и тот же структурный вид. Проверим единицы в одной из них:

$$[F] = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \frac{\text{А} \cdot \text{А}}{\text{м}} \cdot \text{м} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} \frac{\text{А}^2}{\text{м}} = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \text{А} \cdot \text{м} = \text{Н}.$$

Подставим в формулы численные значения и произведем расчет:

$$F_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 0,4}{2\pi \cdot 0,1} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н};$$

$$F_2 = F_4 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6}{2\pi} \ln \frac{0,1+0,3}{0,1} = 1,66 \cdot 10^{-6} \text{ Н};$$

$$F_3 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 0,4}{2\pi \cdot (0,1+0,3)} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н}.$$

Ответ:  $F_1 = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н}; F_2 = F_4 = 1,66 \cdot 10^{-6} \text{ Н}; F_3 = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н}.$

**Пример 6.** На проволочный виток радиусом  $r = 10$  см, помещенный между полюсами магнита, действует максимальный механический момент  $M_{\max} = 6,5$  мкН·м. Сила тока в витке  $I = 2$  А. Пренебрегая действием магнитного поля Земли, определить магнитную индукцию поля между полюсами магнита.

#### Решение

Индукцию магнитного поля можно определить из выражения механического момента, действующего на виток стоком,

$$M = p_m B \sin \alpha.$$

Если учесть, что максимальное значение механический момент принимает при  $\alpha = \pi/2$  ( $\sin \pi/2 = 1$ ), а также что  $p_m = IS$ , то формула примет вид

$$M_{\max} = IBS.$$

Отсюда, учитывая, что площадь витка  $S = \pi r^2$ , находим

$$B = \frac{M_{\max}}{I\pi r^2}.$$

Проверим размерность полученной величины:

$$[B] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{А}} = \frac{\text{Н}}{\text{м} \cdot \text{А}} = \text{Тл}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$B = \frac{6,5 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 0,1^2 \cdot 2} = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}.$$

Ответ:  $B = 104 \text{ мкТл}$ .

**Пример 7.** Квадратная рамка со стороной  $a = 10 \text{ см}$ , по которой течет ток  $I = 100 \text{ А}$ , свободно установилась в однородном магнитном поле индукцией  $B = 1 \text{ Тл}$ . Определить работу, совершаемую внешними силами при повороте рамки относительно оси, проходящей через середину ее противоположных сторон, на угол  $\varphi = 90^\circ$ . При повороте рамки сила тока в ней поддерживалась постоянной.

#### Решение

На контур с током в магнитном поле действует механический момент, равный по модулю

$$M = p_m B \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $p_m$  – модуль магнитного момента рамки;  $\varphi$  – угол между положительной нормалью к поверхности контура и вектором индукции магнитного поля.

По условию задачи в начальном положении рамка свободно установилась в магнитном поле. При этом момент силы равен нулю, а значит  $\varphi = 0$ , т. е. нормаль к поверхности контура и вектор магнитной индукции совпадают по направлению.

Если внешние силы выведут рамку из положения равновесия, то возникший момент сил, определяемый формулой (1), будет стремиться возвратить ее в исходное положение. Против этого момента и будет совершаться работа внешними силами. Так как момент сил переменный (зависит от угла поворота), то для подсчета работы применим формулу работы в дифференциальной форме:

$$dA = Md\varphi.$$

Подставив выражение (1) в формулу для определения работы и учитывая, что магнитный момент  $p_m = IS$ , где  $S = a^2$  – площадь контура, получим:

$$dA = Iba^2 \sin \varphi d\varphi.$$

Взяв интеграл от этого выражения, найдем работу при повороте рамки на конечный угол:

$$A = IBa^2 \int_0^{\pi/2} \sin \varphi d\varphi = IBa^2 (-\cos \varphi) \Big|_0^{\pi/2} = IBa^2.$$

Убедимся, что правая часть этого равенства дает единицу работы:

$$[A] = \text{А} \cdot \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{А} \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \text{м}^2 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$A = 100 \cdot 1 \cdot 0,1^2 = 1 \text{ Дж}.$$

Ответ:  $A = 1$  Дж.

**Пример 8.** Чему равна механическая мощность, развиваемая при перемещении прямолинейного проводника длиной  $l = 20$  см со скоростью  $v = 5$  м/с перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $B = 0,1$  Тл? Величина тока в проводнике  $I = 50$  А.

#### Решение

Со стороны магнитного поля на проводник с током действует сила Ампера, величина которой определяется формулой

$$d\vec{F} = I_1 [d\vec{l} \times \vec{B}],$$

где  $dl$  – длина элемента проводника;  $B$  – индукция магнитного поля в данной точке.

Поскольку в данном случае магнитное поле однородно ( $B = \text{const}$ ), а угол между проводником и вектором магнитной индукции равен  $\pi/2$ , то модуль силы Ампера, действующей на весь проводник длиной  $l$ , можно определить по формуле

$$dF = IBl.$$

Работа, которую совершает сила Ампера по перемещению проводника с током в магнитном поле на расстояние  $ds$  вдоль направления действия силы

$$dA = Fds.$$

Тогда механическая мощность, развиваемая при перемещении прямолинейного проводника, будет определяться формулой

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{Fds}{dt} = Fv = IBlv.$$

Проверим размерность полученной величины:

$$[P] = \text{А} \cdot \text{Тл} \cdot \text{м} \frac{\text{м}}{\text{с}} = \text{А} \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$P = 50 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 5 = 5 \text{ Вт.}$$

Ответ:  $P = 5 \text{ Вт.}$

**Пример 9.** Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $U = 10^5 \text{ В}$  и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое и магнитное поля. Напряженность электрического поля  $E = 20 \text{ кВ/м}$ , индукция магнитного поля  $B = 0,1 \text{ Тл}$ . Найти отношение заряда частицы к ее массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории.

#### Р е ш е н и е

Заряженная частица, прошедшая ускоряющую разность потенциалов, приобретает кинетическую энергию, равную, при условии отсутствия начальной скорости, работе ускоряющего электрического поля:

$$\frac{mv^2}{2} = qU,$$

где  $v$  – скорость частицы после ускорения. Отсюда следует

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

С этой скоростью заряженная частица влетает в скрещенные под прямым углом электрическое и магнитное поля. Со стороны магнитного поля на нее действует сила Лоренца, направление которой определяется правилом «левой руки» (для положительного заряда), величина которой для движения под прямым углом к магнитному полю

$$F_{\text{Л}} = qvB.$$

Со стороны электрического поля на заряженную частицу действует электрическая сила, равная по модулю

$$F_{\text{эл}} = qE.$$

Поскольку электрическое и магнитные поля направлены перпендикулярно друг другу, то электрическая сила направлена или по силе Лоренца, или противоположно ей. Так как в условии задачи сказано, что частица летит по прямой, значит верно второе, и сила Лоренца компенсируется электрической силой (векторная сумма этих сил равна нулю).

То есть  $F_{\text{Л}} = F_{\text{эл}}$ , или  $qvB = qE$ . Откуда  $vB = E$ . Подставим в эту формулу выражение для скорости:

$$E = B\sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

Из этого выражения следует конечная формула

$$\frac{q}{m} = \frac{1}{2U} \left( \frac{E}{B} \right)^2.$$

Результат решения задачи не зависит от знака заряда частицы. При его изменении на противоположный изменятся на противоположные направления обеих сил (Лоренца и электрической), что не изменит основного уравнения, лежащего в основе решения задачи (равенство модулей сил).

Проверим размерность полученной величины:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{q}{m} \right] &= \frac{1}{B} \left( \frac{B}{m} \frac{1}{\text{Тл}} \right)^2 = B \left( \frac{1}{m} \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{Н}} \right)^2 = \frac{\text{Дж} \cdot \text{А}^2}{\text{Кл}} \left( \frac{\text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}} \right)^2 = \\ &= \frac{\text{Кл}^2}{\text{с}^2} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл} \cdot \text{с}^2} \frac{\text{с}^4}{\text{кг}^2 \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Подставим численные значения и произведем расчет:

$$\frac{q}{m} = \frac{1}{2 \cdot 105} \left( \frac{20 \cdot 10^3}{0,1} \right)^2 = 1,9 \cdot 10^8 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$$

Ответ:  $\frac{q}{m} = 1,9 \cdot 10^8 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}.$

**Пример 10.** Электрон, пройдя ускоряющее напряжение  $U = 900$  В, влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 1$  мТл под углом  $\alpha = 60^\circ$  к линиям индукции. Найти: 1) радиус витка; 2) шаг спирали (рисунок 8).

### Решение

На заряженную частицу, влетевшую в магнитное поле, действует сила Лоренца, перпендикулярная векторам магнитной индукции и скорости частицы.

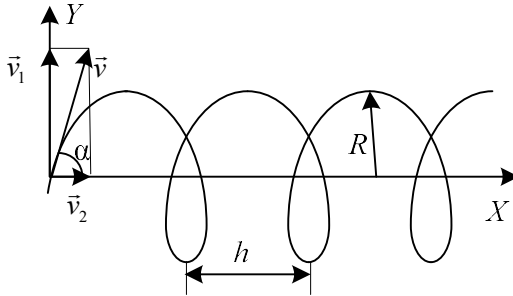


Рисунок 8

Модуль этой силы для электрона

$$F = evB \sin \alpha,$$

где  $e$  – элементарный заряд;  $v$  – скорость электрона.

Движение электрона удобно представить как наложение двух движений: движения со скоростью  $v_1 = v \sin \alpha$  перпендикулярного вектору  $\vec{B}$ , и движения со скоростью  $v_2 = v \cos \alpha$  параллельного этому вектору.

Для первого движения под действием силы Лоренца модуль скорости не изменяется, останется постоянным и значение силы Лоренца. Постоянная сила, перпендикулярная скорости, вызывает движение по окружности. Значит, электрон будет двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, со скоростью, равной  $v_1$ .

В результате одновременного участия в двух движениях по окружности и по прямой электрон будет двигаться по винтовой линии с осью, параллельной силовым линиям поля. Определить траекторию движения электрона в данном случае – значит найти радиус  $R$  и шаг  $h$  винтовой линии.

Для определения радиуса окружности, по которой движется электрон, учтем, что центростремительное ускорение частице сообщает сила Лоренца. На основании 2-го закона Ньютона

$$F = ev_1 B = \frac{mv_1^2}{R}.$$

Из этой формулы найдем радиус винтовой линии:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{eB}.$$

Входящую в это выражение скорость выразим через конечную (после ускорения в электрическом поле) кинетическую энергию электрона  $W_k$ , которая равна работе ускоряющего электрического поля

$$v = \sqrt{\frac{2W_k}{m}} = \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Тогда окончательное выражение для радиуса винтовой линии приобретает вид

$$R = \frac{\sin \alpha}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}}.$$

Время одного оборота (период обращения по окружности) определим как отношение ее длины к скорости первого движения:

$$T = \frac{2\pi R}{v_1}.$$

Шаг винтовой линии равен пути, пройденному электроном вдоль поля (второе движение) со скоростью  $v_2$  за время одного оборота:

$$h = v_2 T = v_2 \frac{2\pi R}{v_1} = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha.$$

Проверим единицы измерения в формуле для радиуса винтовой линии:

$$[R] = \frac{1}{\text{Тл}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{В}}{\text{Кл}}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{Н}} \sqrt{\frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{с}}{\text{кг}} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}} = \text{м}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$R = \frac{0,866}{10^{-3}} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 900}{1,6 \cdot 10^{-19}}} = 8,77 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad h = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,577 = 0,318 \text{ м}.$$

Ответ:  $R = 8,8 \text{ см}; h = 32 \text{ см}.$

**Пример 11.** Определить концентрацию электронов проводимости при эффекте Холла для натриевого проводника при плотности тока  $j = 150 \text{ А/см}^2$  и магнитной индукции  $B = 2 \text{ Тл}$ , если напряженность поперечного электрического поля  $E = 0,75 \text{ мВ/м}$ . Плотность натрия  $\rho = 0,97 \text{ г/см}^3$ .

#### Р е ш е н и е

Для холловской разности потенциалов справедлива формула

$$\Delta\varphi = \frac{1}{en} \frac{IB}{d},$$

где  $e$  – заряд электрона;  $I$  – сила тока;  $B$  – магнитная индукция;  $d$  – толщина пластинки.

Выразим концентрацию:

$$n = \frac{IB}{\Delta\varphi ed}.$$

Для однородных стационарных полей

$$E = \frac{\Delta\varphi}{a},$$

где  $a$  – ширина пластинки. С учетом того, что плотность тока

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{ad},$$

получим

$$n = \frac{jB}{eE}.$$

Проверим размерность полученной величины:



$$[n] = \frac{A \cdot \text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{Кл} \cdot \text{В}} = \frac{A}{\text{м} \cdot \text{Кл}} \frac{H}{A \cdot \text{м}} \frac{\text{Кл}}{D_{\text{ж}}} = \frac{H}{\text{м}^2 \cdot H \cdot \text{м}} = \text{м}^{-3}.$$

Подставим численные значения и произведем расчет:

$$n = \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot 2}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 7,5 \cdot 10^{-4}} = 2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Ответ:  $n = 2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

**Пример 12.** Пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $\vec{B}$ , определить индукцию  $B$  и напряженность  $H$  магнитного поля на оси тороида без сердечника, по обмотке которого протекает ток силой  $I = 1$  А. Внешний диаметр тороида  $D_1 = 60$  см, внутренний –  $D_2 = 40$  см, а обмотка содержит 1000 витков.

### Решение

Так же как и в предыдущем примере, применим закон полного тока для магнитного поля в вакууме. Циркуляция вектора магнитной индукции

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k.$$

Контур  $L$ , по которому происходит циркуляция вектора  $\vec{B}$ , представляет собой окружность радиуса  $r = D/2$ , где  $D$  – средний диаметр.

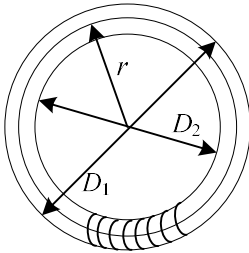


Рисунок 9

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}, \quad r = \frac{D_1 + D_2}{4}.$$

Контур охватывает  $N$  токов (по числу витков в катушке), значит

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 NI. \quad (1)$$

Произведем интегрирование левой части выражения (1). Рассматриваемый контур совпадает с силовой линией магнитного поля, поэтому и в силу симметрии  $B_l = B = \text{const}$  в точках контура. Длина контура  $L = 2\pi r$ . Выражение (1) примет вид

$$B 2\pi r = \mu_0 NI.$$

Магнитная индукция (с учетом формулы для радиуса)

$$B = \frac{2\mu_0 NI}{\pi(D_1 + D_2)}.$$

Для вакуума (поскольку в условии задачи ничего не сказано про среду) индукция магнитного поля и его напряженность связаны выражением  $B = \mu_0 H$ , откуда следует

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{2NI}{\pi(D_1 + D_2)}.$$

Проверим размерности полученных величин:

$$[H] = \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad [B] = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} \frac{\text{А}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2} = \text{Тл}.$$

Подставим в формулы численные значения и произведем расчет:

$$H = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 1}{3,14(0,6 + 0,4)} = 637 \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad B = \mu_0 H = 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 637 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}.$$

Ответ:  $B = 8 \cdot 10^{-4}$  Тл;  $H = 637$  А/м.

**Пример 13.** Железный сердечник находится в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 2,5$  кА/м. Определить индукцию  $B$  магнитного поля в сердечнике и магнитную проницаемость  $\mu$  железа.

Решение

Для ферромагнетиков магнитная проницаемость  $\mu$  не является постоянной величиной. Она зависит от величины напряженности магнитного поля  $H$ .

Для изотропного и однородного магнетика индукция магнитного поля  $B$  связана с его напряженностью формулой  $B = \mu \mu_0 H$ , откуда следует

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

Величину индукции магнитного поля  $B$  найдем из графика (см. рисунок 2). Для железа при  $H = 2,5$  кА/м,  $B = 1,29$  Тл. Проверим единицу полученной величины:

$$[\mu] = \text{Тл} \frac{\text{м}}{\text{Гн}} \frac{\text{м}}{\text{А}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{А}} \frac{\text{А}}{\text{Вб}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{Тл} \cdot \text{м}^2} = 1.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$\mu = \frac{1,45}{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 \cdot 10^3} = 460.$$

Ответ:  $B = 1,45$  Тл;  $\mu = 460$ .

**Пример 14.** Плоский контур площадью  $S = 25$  см<sup>2</sup> находится в магнитном поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. Определить магнитный поток, пронизывающий контур, если его плоскость составляет угол  $\varphi = 60^\circ$  с линиями индукции.

### Р е ш е н и е

Магнитный поток через плоский контур площадью  $S$  в общем случае равен

$$\Phi_B = \int_S B_n dS.$$

Для однородного поля

$$\Phi_B = B_n S = BS \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между вектором нормали к плоскости контура и вектором магнитной индукции. Согласно условию  $\alpha = 90^\circ - \varphi$ , поэтому  $\cos \alpha = \sin \varphi$ . Получаем

$$\Phi_B = BS \sin \varphi.$$

Размерность магнитного потока очевидна.

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$\Phi_B = 0,01 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,866 = 2,17 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

Ответ:  $\Phi_B = 0,22 \text{ мкВб.}$

**Пример 15.** По тонкому проводу в виде кольца радиусом  $r = 20 \text{ см}$  течет ток  $I = 100 \text{ А}$ . Перпендикулярно плоскости кольца возбуждено однородное магнитное поле с магнитной индукцией  $B = 20 \text{ мТл}$ . Определить работу внешних сил, которую надо совершить, чтобы повернуть кольцо на угол  $\varphi = 90^\circ$  вокруг оси, совпадающей с одним из диаметров кольца.

### Р е ш е н и е

На контур с током в виде кольца в магнитном поле с индукцией  $B$  действует момент силы (рисунок 10)

$$M = P_m B \sin \varphi, \tag{1}$$

где  $P_m = IS = I\pi r^2$  – магнитный момент;  $\varphi$  – угол между векторами  $\vec{P}_m$  и  $\vec{B}$ .

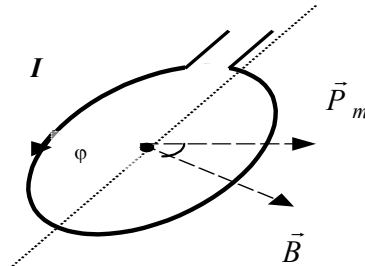


Рисунок 10

В начальном положении угол  $\varphi = 0$ , следовательно  $M = 0$ . Отличный от нуля момент силы возникает в том случае, когда внешние силы выведут контур из положения равновесия. Против этого момента и будет совершаться работа внешних сил:

$$dA = M d\varphi. \quad (2)$$

Работа при повороте на конечный угол  $\varphi$

$$A = \int_0^{\varphi} P_m B \sin \varphi d\varphi = P_m B (1 - \cos \varphi). \quad (3)$$

В рассматриваемом случае ( $\varphi = \pi/2$ ) работа внешних сил определяется выражением:

$$A = I \pi r^2 B. \quad (4)$$

Задачу можно решить и другим способом. Работа внешних сил по перемещению контура с током в магнитном поле

$$A = -I \Delta \Phi = I(\Phi_1 - \Phi_2), \quad (5)$$

где  $\Phi_1 = BS = B\pi r^2$  – магнитный поток, пронизывающий контур в начальный момент времени;  $\Phi_2 = 0$  – магнитный поток, пронизывающий контур после поворота.

Следовательно,  $A = I\pi r^2 B$ , что совпадает с формулой (4). Произведем вычисления:

$$A = 100 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2 \cdot 0,02 = 0,251 \text{ Дж.}$$

Ответ:  $A = 0,251$  Дж.

**Пример 16.** В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл, равномерно вращается вокруг вертикальной оси горизонтальный стержень длиной  $l = 1$  м. Ось вращения проходит через конец стержня параллельно линиям магнитной индукции. Определить угловую скорость, при которой на концах стержня возникает разность потенциалов  $U = 0,1$  В.

#### Решение

Так как вращающийся проводник представляет собой незамкнутый отрезок электрической цепи и условия вращения не изменяются, то в проводнике

отсутствует электрический ток. Тогда из закона Ома для неоднородного участка цепи следует, что разность потенциалов на концах проводника по модулю равна возникающей в нем ЭДС индукции

$$U = |\mathcal{E}_i|.$$

Величина электромагнитной индукции, согласно закону Фарадея, определена формулой

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Так как вращение равномерное, то формулу можно преобразовать следующим образом:

$$U = \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t},$$

где  $\Delta\Phi_B$  – магнитный поток, пересеченный стержнем при его вращении за время  $\Delta t$ .

Удобнее всего в качестве интервала времени  $\Delta t$  взять один период вращения  $T$ , тогда пересеченный поток будет равен потоку через поверхность круга радиусом  $l$ :

$$T = \frac{2\pi}{\omega}; \quad \Delta\Phi_B = B\pi l^2.$$

В результате преобразований формула для разности потенциалов примет вид

$$U = B\pi l^2 \frac{\omega}{2\pi} = \frac{Bl^2\omega}{2}.$$

Отсюда получим конечную формулу для угловой скорости

$$\omega = \frac{2U}{Bl^2}.$$

Проверим единицу полученной величины:

$$[\omega] = \frac{\text{В}}{\text{Тл} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \frac{\text{А} \cdot \text{м}}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}} \frac{\text{А}}{\text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{1}{\text{с}} = \left( \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right),$$

т. к. радиан – величина, по сути, безразмерная.

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$\omega = \frac{2 \cdot 0,1}{0,1 \cdot 1^2} = 2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Ответ:  $\omega = 2$  рад/с.

**Пример 17.** Соленоид без сердечника с однослойной обмоткой из проволоки диаметром  $d = 0,4$  мм имеет длину  $l = 0,5$  м и площадь поперечного

сечения  $S = 6 \text{ см}^2$ . За какое время при напряжении  $U = 10 \text{ В}$  и силе тока  $I = 1,5 \text{ А}$  в обмотке выделится количество теплоты, равное энергии поля внутри соленоида? Поле считать однородным.

### Решение

При прохождении тока в обмотке за время  $t$  выделится теплота, равная по закону Джоуля – Ленца

$$Q = UIt. \quad (1)$$

Энергия поля внутри соленоида

$$W = wV = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} V = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} IS, \quad (2)$$

где  $w$  – объемная плотность энергии магнитного поля;  $V$  – объем пространства внутри соленоида (пространства, занимаемого магнитным полем);  $\mu$  – магнитная проницаемость среды ( $\mu = 1$ , т. к. соленоид без сердечника);  $H$  – напряженность магнитного поля.

Так как  $l \gg \sqrt{S}$ , то соленоид можно считать достаточно длинным. Поэтому можно применить следующую формулу:

$$H = \frac{NI}{l}, \quad (3)$$

где  $N$  – общее число витков в соленоиде.

Подставим (2) в (3) и, согласно условию, приравняем полученное соотношение к (1). В результате получим

$$UIt = \frac{\mu\mu_0}{2} \left( \frac{NI}{l} \right)^2 IS,$$

откуда следует выражение для искомого времени:

$$t = \mu\mu_0 N^2 IS / (2UI). \quad (4)$$

Число витков в условии не задано, поэтому для завершения решения необходимо воспользоваться дополнительным допущением о том, что витки вплотную прилегают друг к другу. В этом случае  $N = l/d$ . Подставив это выражение в (4), получим

$$t = \frac{\mu\mu_0 IIS}{2Ud^2}.$$

Проверим размерность полученной величины:

$$[t] = \frac{\text{Гн} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{м}^2}{\text{м} \cdot \text{В} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Вб} \cdot \text{Кл}}{\text{А} \cdot \text{Дж}} \cdot \text{А} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}} \cdot \text{А} \cdot \text{с} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{Н}} \cdot \text{А} \cdot \text{с} = \text{с}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$t = \frac{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10 \cdot (4 \cdot 10^{-4})^2} = 1,77 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Ответ:  $t = 1,8 \text{ мс.}$

**Пример 18.** Две горизонтально расположенные на расстоянии  $l = 20 \text{ см}$  друг от друга медные шины присоединены к источнику тока с ЭДС  $\varepsilon = 0,8 \text{ В}$  и помещены в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 1 \text{ Тл}$ , направленное вертикально. По шинам под действием сил поля скользит прямолинейный проводник со скоростью  $v = 2 \text{ м/с}$ . Сопротивление проводника  $R = 0,2 \text{ Ом}$ . Определить ЭДС индукции и силу тока в цепи. Сопротивлением шин и внутренним сопротивлением источника пренебречь.

### Решение

На концах проводника при его движении в магнитном поле возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = Blv = 1 \cdot 0,2 \cdot 2 = 0,4 \text{ В.}$$

При указанном на рисунке 11, а направлении магнитного поля ЭДС индукции будет направлена противоположно ЭДС источника. Эквивалентная электрическая схема приведена на рисунке 11, б.

Силу тока определим из второго правила Кирхгофа (направление обхода контура совпадает с указанным направлением силы тока):

$$IR = \varepsilon - \varepsilon_i; \quad I = \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{R} = \frac{\varepsilon - Blv}{R}.$$

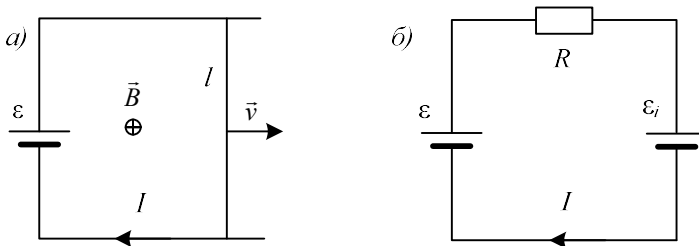


Рисунок 11

Если  $\varepsilon < Blv$ , то направление электрического тока сменится на противоположное, а величина его силы будет определяться модулем этого выражения. Если направление магнитного поля противоположно указанному на рисунке, то изменится направление ЭДС индукции и конечное выражение для силы тока примет вид

$$I = \frac{\varepsilon + Blv}{R}.$$

Проведем вычисления:

$$I_1 = \frac{0,8 - 1 \cdot 0,2 \cdot 2}{0,2} = 2 \text{ А}; \quad I_2 = \frac{0,8 + 1 \cdot 0,2 \cdot 2}{0,2} = 6 \text{ А}.$$

Следовательно, сила тока при движении проводника в магнитном поле отличается от ее значения при покое, когда она равна  $I = \varepsilon/R = 4 \text{ А}$ .

Ответ:  $\varepsilon_i = 0,4 \text{ В}$ ;  $I_1 = 2 \text{ А}$  или  $I_2 = 6 \text{ А}$ .

**Пример 19.** Замкнутый тороид с железным сердечником имеет  $N = 400$  витков из тонкой проволоки, намотанных в один слой. Средний диаметр тороида  $d = 25 \text{ см}$ . Определить напряженность и индукцию магнитного поля внутри тороида, магнитную проницаемость железа, а также намагниченность при значениях силы тока в обмотке тороида  $I_1 = 0,5 \text{ А}$  и  $I_2 = 5 \text{ А}$ .

### Решение

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру  $L$  (закон полного тока для магнитного поля в веществе):

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^N I_k.$$

Выберем в качестве контура  $L$  окружность, проходящую по средней линии тороида (с диаметром, равным  $d$ ). Применяя этот закон, получим

$$H\pi d = IN.$$

Здесь учтено, что контур совпадает с силовой линией магнитного поля, величина напряженности во всех точках контура одинакова в силу симметрии, длина контура равна  $\pi d$ , а каждый ток  $I$  пересекает поверхность контура  $N$  раз в одном и том же направлении (рисунок 12).

Тогда напряженность магнитного поля внутри тороида

$$H = \frac{IN}{\pi d}.$$

После расчета получим два значения напряженности  $H_1 = 255 \text{ А/м}$ ,  $H_2 = 2550 \text{ А/м}$ . Далее, используя график зависимости магнитной индукции  $B$  поля в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля  $H$ , определим индукции магнитного поля для железа:  $B_1 = 1 \text{ Тл}$ ,  $B_2 = 1,45 \text{ Тл}$ .

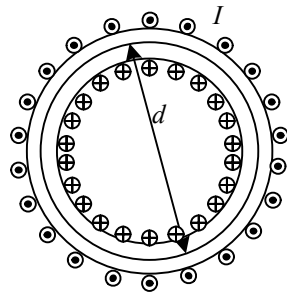


Рисунок 12



Для однородного и изотропного магнетика магнитная проницаемость находится по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

После расчетов получим:  $\mu_1 \approx 3100$ ,  $\mu_2 \approx 450$ .

Для расчета значений намагниченности используем ее определяющую формулу, которая в этом случае дает выражение для модуля

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H.$$

Результаты расчетов:  $J_1 \approx 8 \cdot 10^5$  А/м,  $J_2 \approx 1,1 \cdot 10^6$  А/м.

Из полученных данных видно, что силе тока  $I$  пропорциональна только напряженность магнитного поля внутри ферромагнетика, тогда как индукция  $B$ , магнитная проницаемость  $\mu$  и намагниченность  $J$  являются нелинейными функциями  $H$ , а следовательно, и нелинейными функциями силы тока.

Ответ:  $H_1 = 255$  А/м,  $H_2 = 2550$  А/м,  $B_1 = 1$  Тл,  $B_2 = 1,45$  Тл,  $\mu_1 \approx 3100$ ,  $\mu_2 \approx 450$ ,  $J_1 \approx 8 \cdot 10^5$  А/м,  $J_2 \approx 1,1 \cdot 10^6$  А/м.

**Пример 20.** Обмотка тороида, имеющая стальной сердечник с воздушным зазором шириной  $l_0 = 3$  мм, содержит  $N = 1000$  витков на метр длины. Средний диаметр тороида  $d = 30$  см (рисунок 13). При какой силе тока  $I$  в обмотке тороида индукция магнитного поля в зазоре равна  $B_0 = 1$  Тл?

### Решение

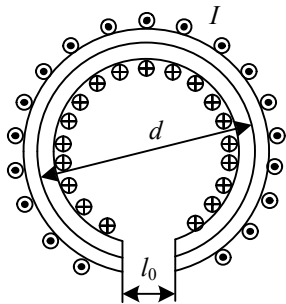


Рисунок 13

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру  $L$  (закон полного тока для магнитного поля в веществе):

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_L H_l dl = \sum_{k=1}^N I_k.$$

Выберем в качестве контура  $L$  окружность, проходящую по средней линии тороида. В этом случае контур совпадает с силовой линией магнитного поля, поэтому касательная проекция  $H_l$  совпадает с модулем  $H$ . Так как ширина зазора мала по сравнению с длиной контура, то в его точках величина напряженности одинакова в каждом из веществ ( $H$  в ферромагнетике и  $H_0$  в воздухе). Исходя из всего вышесказанного, закон полного тока можно записать в виде

$$H(\pi d - l_0) + H_0 l_0 = IN = I \pi d n, \quad (1)$$

где  $(\pi d - l_0)$  – длина части средней линии тороида, проходящей через ферромагнетик.

Относительная магнитная проницаемость воздуха близка к единице, поэтому напряженность магнитного поля в зазоре

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0}. \quad (2)$$

Так как зазор узкий, будем считать радиальную составляющую вектора магнитной индукции и в зазоре, и в сердечнике равной нулю. В силу этого вектор индукции  $\vec{B}$  в зазоре направлен по нормали к границе сталь – воздух. Из граничного условия для нормальных составляющих индукции магнитного поля в этом случае следует, что и в сердечнике индукция по модулю также равна  $B_0$ . По графику зависимости магнитной индукции  $B$  поля в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля  $H$  определяем напряженность магнитного поля в сердечнике  $H = 700$  А/м. Из (1), с учетом (2) и с учетом  $(\pi d - l_0) \approx \pi l$  находим

$$I = \frac{H}{n} + \frac{B_0 l_0}{\mu_0 \pi d n}.$$

Проверим единицу измерения второго слагаемого:

$$[I] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 \frac{\text{м}}{\text{Гн}} \frac{\text{м}}{\text{м}} = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 \frac{\text{А}}{\text{Вб}} = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 \frac{\text{А}}{\text{Тл} \cdot \text{м}^2} = \text{А}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$I = \frac{700}{1000} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 0,3 \cdot 1000} = 3,2 \text{ А}.$$

Ответ:  $I = 3,2$  А.

**Пример 21.** На круглый деревянный цилиндр намотан один слой медной проволоки, масса которой  $m = 50$  г. Длина цилиндра равна  $l_0 = 60$  см и много больше его диаметра. Сопротивление обмотки  $R = 30$  Ом. Определить энергию магнитного поля катушки, если она подключена к источнику тока с ЭДС  $\varepsilon = 62$  В и внутренним сопротивлением  $r = 1$  Ом.

Р е ш е н и е

Энергия магнитного поля катушки

$$W = \frac{LI^2}{2},$$

где  $L$  – ее индуктивность.

Так как длина соленоида много большего диаметра, то катушку можно рассматривать как идеальный соленоид. В этом случае индуктивность

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l_0} \pi a^2, \quad N = \frac{l}{2\pi a},$$

где  $N$  – число витков,  $a$  – радиус витка;  $l$  – длина провода, т. е. суммарная длина  $N$  витков, длина каждого  $2\pi a$ .

Запишем выражения для массы и сопротивления проволоки:

$$m = \rho V = \rho l S_0, \quad R = \frac{\rho_{\text{эл}} l}{S_0},$$

где  $V$  – объем проволоки;  $\rho$  – плотность меди;  $\rho_{\text{эл}}$  – удельное сопротивление меди;  $S_0$  – площадь поперечного сечения провода. Исключая из этих соотношений  $S_0$ , получим длину провода и число витков

$$l = \sqrt{\frac{mR}{\rho\rho_{\text{эл}}}}, \quad N = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{mR}{\rho\rho_{\text{эл}}}}.$$

Следовательно,

$$L = \frac{\mu\mu_0 \pi}{l_0} \frac{mR}{4\pi^2 \rho\rho_{\text{эл}}} = \mu\mu_0 \frac{mR}{4\pi\rho\rho_{\text{эл}} l_0}.$$

Выразим силу тока в цепи по закону Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

и подставим это соотношение, а также формулу для индуктивности в формулу энергии. В результате получим:

$$W = \frac{LI^2}{2} = \mu\mu_0 \frac{mR}{8\pi\rho\rho_{\text{эл}} l_0} \left( \frac{\varepsilon}{R + r} \right)^2.$$

Проверим размерность полученной величины:

$$[I] = \frac{\text{Гн} \cdot \text{кг} \cdot \text{Ом} \cdot \text{м}^3}{\text{м} \cdot \text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{кг}} \left( \frac{\text{В}}{\text{Ом}} \right)^2 = \text{Гн} \cdot \text{А}^2 = \text{Дж}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$I = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 30}{8\pi \cdot 8,93 \cdot 10^3 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,6} \left( \frac{62}{30+1} \right)^2 = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Ответ:  $W = 3,3 \text{ мДж}$ .

## 7 ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1 По плоскому контуру, представляющему собой равносторонний треугольник со стороной 10 см, течет ток силой 1 А. Найти магнитную индукцию в точке пересечения высот.

2 Найти величину тока в бесконечно длинном проводнике, который имеет квадратный изгиб со стороной квадрата 40 см, если индукция магнитного поля в точке  $A$ , расположенной в центре квадрата, равна 65 мкТл.

3 Два бесконечно длинных прямых провода скрещены под прямым углом. По проводам текут токи  $I_1 = 80$  А и  $I_2 = 60$  А. Расстояние  $d$  между проводами равно 10 см. Определить магнитную индукцию  $B$  в точке, одинаково удаленной от обоих проводников на расстояние 5 см.

4 По двум параллельным бесконечно длинным проводникам, находящимся на расстоянии  $d = 10$  см друг от друга, текут токи противоположного направления силой  $I = 30$  А. Определить индукцию магнитного поля в точке, расположенной посередине между проводниками. Чему равна индукция магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии  $r_1 = 15$  см от одного и  $r_2 = 5$  см от другого проводника и расположенной в плоскости, проходящей через оба проводника.

5 Ток равный 3 А циркулирует в контуре, имеющем форму квадрата со стороной 5 см. Найти индукцию магнитного поля в точке, лежащей в плоскости квадрата, равноудаленной на расстояние 10 см от противоположных вершин квадрата.

6 Ток равный 7 А циркулирует в контуре, имеющем форму прямоугольника со сторонами 5 и 10 см. Найти индукцию магнитного поля в центре прямоугольника.

7 Ток равный 10 А циркулирует в контуре, имеющем форму прямоугольника со сторонами 3 и 4 см. Найти индукцию магнитного поля в точке, лежащей в плоскости прямоугольника, равноудаленной на расстояние 5 см от противоположных вершин прямоугольника.

8 По проводнику в форме окружности радиусом 10 см течет ток 10 А. Найти индукцию магнитного поля в центре окружности.

9 Найти силу тока в бесконечно длинном проводнике, если модуль индукции магнитного поля в точке, расположенной на расстоянии 10 см от проводника равен 63 мкТл.

10 Прямой бесконечный проводник имеет круговую петлю радиусом 50 см. Определить ток в проводнике, если известно, что в центре петли индукция магнитного поля равна 23,5 мкТл.

11 По бесконечно длинному прямому проводнику, изогнутому под прямым углом, течет ток 10 А. Определить индукцию магнитного поля в точке, расположенной на биссектрисе тупого угла на расстоянии 10 см от изгиба.

12 Определить индукцию магнитного поля в центре проволочной квадратной рамки со стороной  $l = 15$  см, если по рамке течет ток силой  $I = 5$  А.

13 Чему равна сила тока, проходящего по периметру правильного шестиугольника со стороной 20 см, если в его центре напряженность магнитного поля равна 10 А/м?

14 Определить индукцию магнитного поля на оси тонкого проволочного кольца радиусом  $R = 5$  см, по которому течет ток  $I = 10$  А, в точке, расположенной на расстоянии  $d = 10$  см от центра кольца.

15 По двум параллельным бесконечно длинным проводникам, находящимся на расстоянии  $d = 20$  см друг от друга, текут токи одинакового направления  $I_1 = 40$  А и  $I_2 = 80$  А. Определить индукцию магнитного поля в точке, расположенной посередине между проводниками. Чему равна индукция магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии  $r_1 = 12$  см от первого и  $r_2 = 16$  см от второго проводников?

16 Круговой виток радиусом  $R = 15$  см расположен относительно бесконечно длинного прямого проводника так, что перпендикуляр, восстановленный на провод из центра витка, является нормалью к плоскости витка. Сила тока в проводе  $I_1 = 1$  А, сила тока в витке  $I_2 = 5$  А. Расстояние от центра витка до провода  $d = 20$  см. Определить магнитную индукцию в центре витка.

17 Определить индукцию магнитного поля на оси тонкого проволочного кольца радиусом  $R = 20$  см в точке, расположенной на расстоянии  $d = 20$  см от центра кольца, если по кольцу течет ток 10 А.

18 По тонкому проволочному кольцу течет ток. Не изменяя силы тока в проводнике, ему придали форму квадрата. Во сколько раз изменилась магнитная индукция в центре контура?

19 Бесконечно длинный тонкий проводник с током  $I = 50$  А имеет изгиб в виде полуокружности радиусом  $R = 10$  см. Определить магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током в центре окружности.

20 Бесконечно длинный тонкий проводник с током  $I = 70$  А имеет плоскую петлю радиусом  $R = 30$  см. Определить магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током в центре петли.

21 По плоскому контуру в виде правильного семиугольника течет ток силой  $I = 10$  А. Определить индукцию магнитного поля в центре семиугольника.

22 Из куска изолированной проволоки сделан виток радиусом  $R$  и подключен к источнику постоянного тока. Как изменится индукция магнитного поля в центре круга, если из того же куска проволоки сделать два прилегающих друг к другу витка радиусом  $R/2$ ?

23 Определить магнитную индукцию в центре двух витков с одинаковым током  $I = 25$  А радиусами  $R_1 = 5$  см и  $R_2 = 10$  см. Витки расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Центры витков совпадают.

24 По круговому контуру, который охватывает площадь  $S = 1 \text{ м}^2$ , течет ток  $I = 15 \text{ А}$ . Какова магнитная индукция поля, создаваемого этим током в точке, находящейся на оси контура на расстоянии  $r = 10 \text{ м}$  от центра круга?

25 По двум прямым бесконечно длинным проводникам проходят токи в одном направлении  $I_1 = 30 \text{ А}$  и  $I_2 = 60 \text{ А}$ . Расстояние между ними равно  $10 \text{ см}$ . Определить положение точек, в которых магнитная индукция поля равна нулю.

26 Вдоль стенки цилиндрической трубы идет постоянный ток силы  $I$ . Какова напряженность магнитного поля  $H$  внутри и вне трубки?

27 По однородному прямолинейному цилиндрическому проводнику радиусом  $R$  идет ток  $I$ . Найти напряженность магнитного поля  $H$  внутри и вне проводника на расстоянии  $r$  от оси.

28 Какова напряженность магнитного поля  $H$  в центре равностороннего треугольника из однородной проволоки, если источник ЭДС подключен к двум вершинам треугольника? Поле подводящих проводов не учитывать.

29 Два круговых тока одинакового радиуса  $R$  отстоят друг от друга на расстоянии их диаметра. Токи одинаково направлены и одинаковой силы. Построить график зависимости напряженности поля  $H$  вдоль прямой, проходящей через их центры.

30 Катушка длиной  $l = 20 \text{ см}$  содержит  $N = 200$  витков. По обмотке катушки течет ток  $I = 5 \text{ А}$ . Диаметр катушки  $d = 20 \text{ см}$ . Определить магнитную индукцию в центре катушки.

31 Два прямых параллельных бесконечно длинных проводника, по которым в одном направлении проходят токи по  $I = 6 \text{ А}$  каждый, расположены на расстоянии  $a = 100 \text{ мм}$  друг от друга. Найти индукцию магнитного поля в точке, отстоящей от проводов на расстояниях  $r_1 = 50 \text{ мм}$  и  $r_2 = 120 \text{ мм}$ .

32 По тонкому проводящему кольцу радиусом  $R = 100 \text{ мм}$  проходит ток  $I = 8 \text{ А}$ . Найти магнитную индукцию  $B$  поля в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние  $r = 200 \text{ мм}$ .

33 Найти силу тока  $I$ , проходящего по тонкому кольцу радиусом  $R = 5 \text{ см}$ , если магнитная индукция в центре кольца  $B = 6,3 \cdot 10^{-9} \text{ Тл}$ .

34 Определить магнитный момент кругового витка, если известно, что на его оси на расстоянии  $4 \text{ см}$  от центра магнитная индукция  $B = 125 \text{ мкТл}$ . Радиус витка  $3 \text{ см}$ .

35 Соленоид длиной  $10 \text{ см}$  и диаметром  $4 \text{ см}$  содержит  $20$  витков на каждом сантиметре длины. Определить магнитный момент соленоида, если ток в нем  $2 \text{ А}$ .

36 По двум параллельным проводам длиной  $l = 3 \text{ м}$  каждый текут одинаковые токи силой  $I = 500 \text{ А}$ . Расстояние между проводами  $d = 10 \text{ см}$ . Определить силу  $F$  взаимодействия проводников.

37 Прямоугольная рамка со сторонами  $a$  и  $b$  вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг стороны  $a$  в однородном переменном магнитном

поле, изменяющемся синусоидально с угловой скоростью  $\omega_1$ , перпендикулярном к оси вращения рамки. Определить величину индуцированной ЭДС.

38 На железный сердечник, имеющий форму тора квадратного сечения (сторона  $a = 4$  см) с диаметром  $D = 40$  см, намотана равномерно в один слой проволока. Число витков  $N = 600$ . По проволоке пускают ток  $I = 2$  А. Магнитная проницаемость железа  $\mu = 400$ . Найти поток индукции через сечение сердечника.

39 Если железный тор квадратного сечения (сторона  $a = 6$  см) разрезать в одном месте так, чтобы образовался воздушный зазор толщиной  $d = 2$  мм, то чему будет равен поток индукции  $\Phi$ , если пренебречь рассеиванием силовых линий?

40 Почему два параллельных проводника, по которым идут токи в одном направлении, притягиваются, а два параллельных катодных пучка отталкиваются?

41 Однослойная достаточно длинная катушка с железным сердечником разделена на две секции. Измерения индуктивностей секций дали следующие результаты: в первой секции  $L_1 = 0,03$  Гн, во второй секции  $L_2 = 0,09$  Гн. Определить: 1) чему равна индуктивность  $L$  всей катушки? 2) сколько витков  $N$  в катушке, если в первой секции 100 витков?

42 Чему равна механическая мощность, развиваемая при перемещении прямолинейного проводника длиной 20 см со скоростью 5 м/с перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией 0,1 Тл? Величина тока в проводнике 50 А.

43 Внутри тонкого воздушного соленоида вставлена маленькая плоская катушечка с числом витков  $n = 40$  и площадью витка  $S = 10$  см<sup>2</sup>, по обмотке которой течет ток  $I = 1$  А. Длина соленоида 40 см, а число витков  $N = 10000$ . Определить магнитный поток, который посылает поле катушечки через обмотку соленоида.

44 Батарея аккумуляторов с ЭДС 120 В и внутренним сопротивлением 5 Ом соединена с потребителем двумя медными параллельными проводами, расположенными на расстоянии 5 см друг от друга. Провода укреплены на изоляторах, расстояние между которыми 50 см. Определить силу, действующую на изоляторы при коротком замыкании на зажимах потребителя, если длина проводов 20 м, а сечение проводов 3 мм<sup>2</sup>.

45 Какой вращающий момент испытывает рамка с током 10 А при помещении ее в однородное магнитное поле с индукцией 0,5 Тл, если рамка содержит 50 витков площадью 20 см<sup>2</sup>, а ее нормаль образует угол 30° с направлением поля?

46 В поле бесконечно длинного прямолинейного проводника, по которому течет ток  $I_1 = 20$  А, находится квадратная рамка со стороной  $l = 10$  см, по которой течет ток  $I_2 = 1$  А. Проводник и рамка расположены в одной плоскости так, что две стороны рамки параллельны проводнику, расстояние

от проводника до ближайшей стороны рамки  $d = 5$  см. Определить силу, действующую на рамку.

47 Замкнутый круговой контур радиусом  $R = 2$  см, по которому течет ток  $I = 0,15$  А, помещен в однородное магнитное поле индукцией  $B = 0,5$  Тл так, что нормаль к контуру образует с направлением поля угол  $\alpha = 30^\circ$ . Найти момент сил, действующий на контур.

48 По тонкому стержню длиной 50 см равномерно распределен заряд 300 нКл. Стержень приведен во вращение с постоянной угловой скоростью 10 рад/с относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через один из его концов. Определить магнитный момент, обусловленный вращением заряженного кольца.

49 По тонкому горизонтально расположенному проводу проходит ток 7 А. Под ним находится второй, параллельный ему алюминиевый провод, по которому пропускают ток 2 А. Расстояние между проводами 4 см. Какова должна быть площадь поперечного сечения второго провода, чтобы он находился в состоянии равновесия незакрепленным? Какое это будет равновесие?

50 Замкнутый круговой контур радиусом  $R = 1,8$  см, по которому течет ток  $I = 1,2$  А, помещен в однородное магнитное поле так, что нормаль к контуру образует с направлением поля угол  $\alpha = 60^\circ$ . При этом на контур действует механический момент  $M = 4,33 \cdot 10^{-3}$  Н·м. Найти индукцию магнитного поля.

51 По круговому контуру радиусом  $R = 2,2$  см течет ток. Контур помещен в магнитное поле индукцией  $B = 2,2$  Тл, при этом нормаль к нему образует с направлением поля угол  $\alpha = 45^\circ$ , а на контур действует момент сил  $M = 7,07 \cdot 10^{-3}$  Н·м. Найти силу тока в контуре.

52 Из проволоки изготовлен контур в виде квадрата. На контур, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,125$  мТл, действует вращающий момент сил  $M = 4,33 \cdot 10^{-6}$  Н·м. При этом по контуру проходит ток  $I = 0,25$  А, а нормаль к его плоскости составляет  $\alpha = 60^\circ$  с направлением магнитного поля. Определить длину проволоки.

53 Из проволоки длиной 16 см изготовлен контур в виде квадрата. При помещении контура в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 5,5$  мТл на него действует вращающий момент сил  $M = 1,9 \cdot 10^{-6}$  Н·м. При этом нормаль к его плоскости составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с направлением магнитного поля. Определить силу тока в контуре.

54 Два прямолинейных длинных проводника находятся на расстоянии  $r_1 = 5$  см друг от друга. По проводникам текут в одном направлении токи  $I_1 = 0,6$  А и  $I_2 = 0,4$  А. Чтобы раздвинуть проводники до расстояния  $r_2$ , на единицу длины проводника была совершена работа  $A = 3,33 \cdot 10^{-8}$  Дж. До какого расстояния были раздвинуты проводники?



55 Чтобы раздвинуть два прямолинейных длинных проводника от расстояния  $r_1$  до расстояния  $r_2 = 3r_1$ , на единицу длины проводника была совершена работа  $A = 8,8 \cdot 10^{-8}$  Дж. При этом по проводникам в одном направлении текут токи. Сила тока в первом проводнике  $I_1 = 0,2$  А. Какова сила тока  $I_2$  во втором проводнике?

56 Два прямолинейных длинных проводника находятся на расстоянии  $r_1$  друг от друга. По проводникам текут в одном направлении токи  $I_1 = 0,6$  А и  $I_2 = 0,2$  А. Какую работу на единицу длины проводника необходимо совершить, чтобы раздвинуть их на расстояние  $r_2 = 5r_1$ ?

57 В однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл помещена квадратная рамка площадью  $S = 25$  см<sup>2</sup>. Нормаль к плоскости рамки составляет с направлением магнитного поля угол  $\alpha = 60^\circ$ . Определить вращающий момент, действующий на рамку, если по ней течет ток  $I = 1$  А.

58 В однородном магнитном поле с индукцией  $0,5$  Тл находится прямоугольная рамка длиной  $8$  см и шириной  $5$  см, содержащая  $100$  витков проволоки. Ток в рамке  $I = 1$  А, а плоскость рамки параллельна линиям магнитной индукции. Определить: 1) магнитный момент рамки; 2) вращающий момент, действующий на рамку.

59 В однородном магнитном поле с индукцией  $0,2$  Тл находится прямой проводник длиной  $15$  см, по которому течет ток  $5$  А. На проводник действует сила  $0,13$  Н. Определить угол между направлением тока и вектором магнитной индукции.

60 Два прямолинейных длинных параллельных проводника находятся на расстоянии  $R$  друг от друга. По проводникам текут в одном направлении токи одинаковой силы. Чтобы раздвинуть проводники до расстояния  $2R$ , на каждый сантиметр длины проводника была совершена работа  $A = 138$  нДж. Определить силу тока в проводниках.

61 Контур из провода, изогнутого в форме квадрата со стороной  $l = 0,5$  м, расположен в одной плоскости с бесконечным прямолинейным проводом с током  $I = 5$  А так, что две его стороны параллельны проводу. Сила тока в контуре  $I_1 = 1$  А. Определить силу, действующую на контур, если ближайшая к проводу сторона контура находится на расстоянии  $b = 10$  см.

62 Прямоугольная рамка сторонами  $a = 40$  см и  $b = 30$  см расположена в одной плоскости с бесконечным прямолинейным проводом с током  $I = 6$  А так, что длинные стороны рамки параллельны проводу. Сила тока в рамке  $I_1 = 1$  А. Определить силы, действующие на каждую из сторон рамки, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии  $c = 10$  см, а ток в ней сонаправлен току  $I$ .

63 По тонкому проволочному полукольцу радиусом  $50$  см течет ток  $1$  А. Перпендикулярно плоскости полукольца возбуждено однородное магнитное поле с индукцией  $0,01$  Тл. Найти силу, растягивающую полукольцо. Дейст-

вие на полукольцо магнитного поля подводющих проводов и взаимодействие отдельных элементов полукольца не учитывать.

64 По двум параллельным проводам длиной  $l = 1$  м каждый текут одинаковые токи. Расстояние между проводами  $d = 1$  см. Токи взаимодействуют с силой  $F = 1$  мН. Найти силу тока  $I$  в проводах.

65 По трем параллельным проводам, находящимся на одинаковом расстоянии  $l = 10$  см друг от друга, текут одинаковые токи  $I = 100$  А. В двух проводах направления токов совпадают. Вычислить силу  $F$ , действующую на отрезок длиной  $l = 1$  м каждого провода.

66 По витку радиусом  $r = 5$  см течет ток  $I = 10$  А. Определить магнитный момент  $P_m$  кругового тока.

67 Очень короткая катушка содержит  $N = 1000$  витков тонкого провода. Катушка имеет квадратное сечение со стороной длиной  $a = 10$  см. Найти магнитный момент  $P_m$  катушки при силе тока в ней  $I = 1$  А.

68 Короткая катушка содержит  $N = 2000$  витков провода. Катушка имеет квадратное сечение со стороной длиной  $a = 15$  см. Найти силу тока в ней, если значение магнитного момента катушки  $P_m = 0,6$  А·м<sup>2</sup>.

69 Магнитный момент  $P_m$  витка равен  $0,2$  А·м<sup>2</sup>. Определить силу тока в витке, если его диаметр  $d = 10$  см.

70 Напряженность магнитного поля в центре кругового витка с током  $H = 200$  А/м. Магнитный момент витка  $P_m = 1$  А·м<sup>2</sup>. Вычислить радиус  $R$  витка и силу тока  $I$  в нем.

71 Проволочный виток радиусом  $R = 5$  см находится в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 2$  кА/м. Плоскость витка образует с направлением поля угол  $\alpha = 60^\circ$ . По витку течет ток  $I = 4$  А. Найти механический момент  $M$ , действующий на виток.

72 Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $0,1$  Тл. Определить угловую скорость вращения электрона.

73 Электрон, обладая скоростью  $10$  Мм/с, влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Индукция магнитного поля равна  $0,1$  мТл. Определить нормальное и тангенциальное ускорения электрона.

74 Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 500$  В, движется параллельно прямолинейному длинному проводнику на расстоянии  $r = 1$  см от него. Определить силу, действующую на электрон, если через проводник пропустить ток  $I = 10$  А.

75 Протон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 500$  В, влетел в однородное магнитное поле с магнитной индукцией  $B = 2$  мТл перпендикулярно линиям магнитной индукции. Найти радиус окружности, по которой будет двигаться протон.

76 Электрон влетел в однородное магнитное поле с магнитной индукцией  $B = 2$  мТл перпендикулярно линиям магнитной индукции и движется по окружности радиусом  $R = 15$  см. Определить магнитный момент  $P_m$  эквивалентного кругового тока.

77 Электрон, обладая скоростью  $v = 1$  Мм/с, влетел в однородное магнитное поле, напряженность которого  $H = 1,5$  кА/м, под углом  $\alpha = 60^\circ$  к линиям магнитной индукции и начинает двигаться по спирали. Определить шаг спирали и радиус витка спирали.

78 Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,2$  мТл по винтовой линии, радиус которой  $R = 3$  см, а шаг  $h = 9$  см. Определить скорость электрона.

79 Определить, при какой скорости пучок заряженных частиц, двигаясь перпендикулярно скрещенным под прямым углом однородным электрическому ( $E = 100$  кВ/м) и магнитному ( $B = 50$  мТл) полям, не отклоняется.

80 Циклотрон предназначен для ускорения протона до энергии 5 МэВ. Каков должен быть наименьший радиус дуантов циклотрона, если индукция магнитного поля равна 1 Тл?

81 Покоящийся в начальный момент электрон ускоряется однородным электрическим полем. Через  $t = 0,01$  с он влетает в магнитное поле с индукцией  $B = 10$  мкТл, направленное перпендикулярно электрическому. Во сколько раз нормальное ускорение электрона в этот момент больше его тангенциального ускорения?

82 Какое численное значение должна иметь постоянная Холла для натрия, если считать, что на каждый его атом приходится один свободный электрон. Плотность натрия  $970$  кг/м<sup>3</sup>.

83 Электрон влетает в однородное магнитное поле, магнитная индукция которого  $10^{-3}$  Тл, со скоростью  $5000$  км/с. Направление скорости составляет угол  $60^\circ$  с направлением магнитного поля. Определить траекторию движения электрона в магнитном поле.

84 Заряженная частица влетела перпендикулярно линиям магнитной индукции в однородное магнитное поле, созданное в среде. В результате взаимодействия с веществом частица, находясь в магнитном поле, потеряла половину своей первоначальной энергии. Во сколько раз будут отличаться радиусы кривизны начала и конца пути?

85 Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов  $200$  В, попал в вакууме в однородное магнитное поле и движется по окружности радиусом  $9$  см. Определить модуль магнитной индукции магнитного поля, если скорость электрона перпендикулярна линиям магнитной индукции.

86 Электрон, движущийся в вакууме со скоростью  $10^6$  м/с, попадает в однородное магнитное поле с магнитной индукцией  $2,2$  мТл под углом  $30^\circ$  к магнитным силовым линиям. Определить радиус и шаг винтовой линии, по которой будет двигаться электрон.

87 Два иона, имеющие одинаковый заряд, но различные массы, влетели в однородное магнитное поле. Первый ион начал двигаться по окружности радиусом 7 см, а второй – по окружности радиусом 3,5 см. Найти отношение масс ионов, если они прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов.

88 В однородном магнитном поле с магнитной индукцией 150 мкТл движется электрон по винтовой линии со скоростью  $v = 300$  км/с. Определить шаг винтовой линии, если радиус равен 5 см.

89 Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $10^5$  В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое и магнитное поля. Напряженность электрического поля 20 кВ/м. Магнитная индукция 0,1 Тл. Найти отношение заряда частицы к ее массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории.

90 Плоский конденсатор, между пластинами которого создано электрическое поле, напряженность которого 200 В/м, помещен в магнитное поле так, что силовые линии полей взаимно перпендикулярны. Какова должна быть индукция магнитного поля  $B$ , чтобы электрон с начальной кинетической энергией 5 МэВ, влетевший в пространство между пластинами конденсатора перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, не изменил направления скорости?

91 Положительно заряженная частица влетает в одинаково направленные перпендикулярно ее скорости однородное магнитное и электрическое поля. Определить под каким углом к полям будет направлено ее ускорение в этот момент, если скорость частицы  $10^3$  м/с, магнитная индукция магнитного поля  $60 \cdot 10^{-2}$  Тл, напряженность электрического поля 45 В/м.

92 Найти скорость  $\alpha$ -частицы, которая при движении в пространстве, где имеются взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля, не испытывает никакого отклонения. Магнитная индукция магнитного поля 0,7 мТл, напряженность электрического поля 12 кВ/м. Направление скорости  $\alpha$ -частицы перпендикулярно векторам  $\vec{B}$  и  $\vec{E}$ .

93 Полагая, что в алюминии имеется по  $z = 2$  свободных электрона на каждый атом, определить разность потенциалов, возникающую вдоль ширины ленты при помещении ее в однородное магнитное поле с индукцией 0,6 Тл так, что плоскость ленты и магнитное поле перпендикулярны. Ширина ленты  $b = 10$  см, плотность тока в ленте  $j = 5$  МА/м<sup>2</sup>.

94 Найти скорость  $\alpha$ -частицы, которая при движении в пространстве, где имеются взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля, не испытывает никакого отклонения. Напряженность магнитного поля 5 кА/м, напряженность электрического поля 6,28 кВ/м. Скорость  $\alpha$ -частицы перпендикулярна линиям напряженности того и другого полей.

95 Ион, несущий один элементарный заряд, движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 15$  мТл по окружности радиусом  $R = 10$  см. Определить импульс  $p$  иона.

96 Электрон движется по окружности радиусом  $R = 1$  см в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,02$  Тл. Определить кинетическую энергию электрона (в джоулях и электрон-вольтах).

97 Кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы равна 500 МэВ. Частица движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом  $R = 80$  см. Определить магнитную индукцию  $B$  поля. Учесть зависимость массы частицы от ее скорости.

98 Протон, ускоренный разностью потенциалов  $U$ , влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,03$  Тл, перпендикулярное направлению его движения. Радиус кривизны траектории частицы  $r = 12$  см. Найти значение ускоряющей разности потенциалов  $U$  и ускорение протона в магнитном поле.

99 Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 720$  В, влетает в однородное магнитное поле индукцией  $B = 0,9$  мТл, перпендикулярное направлению его движения. Определить радиус кривизны траектории частицы и период его обращения в магнитном поле.

100  $\alpha$ -частица, ускоренная разностью потенциалов  $U = 900$  В, влетает в однородное магнитное поле, перпендикулярное направлению его движения. Радиус кривизны траектории частицы  $r = 12$  см. Определить индукцию магнитного поля и значение момента импульса частицы в нем.

101 Протон влетает в однородное магнитное поле индукцией  $B = 0,03$  Тл под углом  $\alpha = 45^\circ$  к направлению поля и движется по винтовой линии, радиус которой  $r = 2,12$  см. Какова кинетическая энергия частицы?

102 Электрон влетает в однородное магнитное поле под углом  $\alpha = 60^\circ$  к направлению поля и движется по винтовой линии. Кинетическая энергия частицы при этом  $W = 3,5 \cdot 10^{-15}$  Дж. Найти радиус винтовой линии, если индукция  $B = 5$  мТл

103 Тонкая медная лента толщиной 0,2 мм помещена в однородное магнитное поле с индукцией 0,3 Тл так, что плоскость ленты перпендикулярна силовым линиям магнитного поля. В ленте течёт ток 15 А. Определить холловскую разность потенциалов, возникающую вдоль ширины ленты, считая, что в меди имеется по одному свободному электрону на каждый атом.

104 В однородное магнитное поле с магнитной индукцией 0,6 Тл помещена тонкая медная пластина, в которой течет ток 12 А. Вектор магнитной индукции магнитного поля перпендикулярен плоскости пластины. Толщина пластины 0,02 мм. Определить концентрацию свободных электронов в меди, если возникающая вдоль ширины ленты холловская разность потенциалов 2 мкВ.

105 При эффекте Холла в натриевом проводнике напряженность поперечного электрического поля оказалась  $4 \text{ мкВ/см}$  при плотности тока  $100 \text{ А/см}^2$  и магнитной индукции поля  $2 \text{ Тл}$ . Найти концентрацию электронов проводимости и ее отношение к концентрации атомов в данном проводнике.

106 Найти подвижность электронов проводимости в медном проводнике, если в магнитном поле, магнитная индукция которого  $300 \text{ мТл}$ , напряженность поперечного поля, обусловленного эффектом Холла, у данного проводника оказалась в  $3,1 \cdot 10^3$  раз меньше напряженности продольного электрического поля.

107 Вычислить циркуляцию вектора индукции вдоль контура, охватывающего токи  $I_1 = 10 \text{ А}$ ,  $I_2 = 15 \text{ А}$ , текущие в одном направлении, и ток  $I_3 = 20 \text{ А}$ , текущий в противоположном направлении.

108 Диаметр тороида без сердечника по средней линии  $D = 30 \text{ см}$ . В сечении тороид имеет круг радиусом  $r = 5 \text{ см}$ . По обмотке тороида, содержащей  $N = 2000$  витков, течет ток  $I = 5 \text{ А}$ . Пользуясь законом полного тока, определить максимальное и минимальное значения магнитной индукции  $B$  в тороиде.

109 Железный сердечник находится в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 1 \text{ кА/м}$ . Определить индукцию  $B$  магнитного поля в сердечнике и магнитную проницаемость  $\mu$  железа.

110 На железное кольцо намотано в один слой  $N = 500$  витков провода. Средний диаметр кольца  $d = 25 \text{ см}$ . Определить индукцию  $B$  магнитного поля в железе и магнитную проницаемость  $\mu$  железа, если сила тока  $I$  в обмотке: 1)  $0,5 \text{ А}$ ; 2)  $2,5 \text{ А}$ .

111 На стальное кольцо намотано в один слой  $N = 700$  витков провода. Средний диаметр кольца  $d = 30 \text{ см}$ . Определить индукцию  $B$  магнитного поля в стали и магнитную проницаемость  $\mu$  стали, если сила тока  $I$  в обмотке: 1)  $0,1 \text{ А}$ ; 2)  $2 \text{ А}$ .

112 Напряженность магнитного поля в меди равна  $1 \text{ МА/м}$ . Определить намагниченность  $J$  меди и магнитную индукцию.

113 Стальной брусок внесли в магнитное поле напряженностью  $10^3 \text{ А/м}$ . Определить намагниченность  $J$  стали.

114 Напряженность магнитного поля в платине  $H = 5 \text{ А/м}$ . Определить индукцию магнитного поля, создаваемого молекулярными токами.

115 По круговому контуру радиусом  $r = 40 \text{ см}$ , погруженному в жидкий кислород, течет ток  $I = 1 \text{ А}$ . Определить намагниченность в центре этого контура.

116 По обмотке соленоида индуктивностью  $L = 3 \text{ мГн}$ , находящегося в диамагнитной среде, течет ток  $I = 0,4 \text{ А}$ . Соленоид имеет длину  $l = 45 \text{ см}$ , площадь поперечного сечения  $S = 10 \text{ см}^2$  и число витков  $N = 1000$ . Определить магнитную индукцию и намагниченность внутри соленоида.

117 Соленоид индуктивностью  $L = 1,5$  мГн имеет длину  $l = 30$  см, площадь поперечного сечения  $S = 15$  см<sup>2</sup> и число витков  $N = 500$ . По нему протекает ток  $I = 1$  А. Определить магнитную индукцию и намагниченность внутри соленоида, если он находится в диамагнитной среде.

118 Индукция магнитного поля в железном стержне  $B = 1,2$  Тл. Определить для него намагниченность железа (см. рисунок 2, с. 13).

119 На железный сердечник длиной  $0,5$  м намотано в один слой  $400$  витков провода. Определить магнитную проницаемость железа при силе тока в проводе  $1$  А.

120 Обмотка тороида с железным сердечником имеет  $N = 150$  витков. Средний радиус тороида  $r = 3$  см. Через обмотку течет ток  $I = 1$  А. Определить для этих условий: 1) индукцию магнитного поля внутри тороида; 2) намагниченность сердечника; 3) магнитную проницаемость сердечника.

121 В соленоид длиной  $0,1$  м, имеющий  $300$  витков, введен стальной сердечник. По обмотке соленоида протекает ток  $2$  А. Определить для этих условий магнитную проницаемость и намагниченность стали.

122 По круговому контуру радиусом  $r = 40$  см, погруженному в жидкий азот, течет ток  $I = 2$  А. Определить намагниченность в центре витка.

123 Соленоид длиной  $0,5$  м содержит  $1000$  витков, намотанных на картонный каркас. Определить индукцию магнитного поля внутри соленоида, если сопротивление его обмотки  $120$  Ом, а напряжение на его концах  $60$  В.

124 В соленоиде длиной  $l = 0,4$  м и диаметром  $D = 5$  см создается магнитное поле напряженностью  $1,5$  кА/м. Определить напряжение  $U$  на концах обмотки, если для нее используется алюминиевая проволока диаметром  $d = 1$  мм.

125 В железном сердечнике соленоида индукция  $B = 1,3$  Тл. Железный сердечник заменили стальным. Во сколько раз следует изменить силу тока в обмотке соленоида, чтобы индукция поля в сердечнике осталась неизменной?

126 Стальной сердечник тороида, длина  $l$  которого по средней линии равна  $1$  м, имеет воздушный зазор длиной  $l_0 = 4$  мм. Обмотка содержит  $8$  витков на каждый сантиметр длины. При какой силе тока индукция в зазоре будет равна  $1$  Тл?

127 Вычислить намагниченность марганца в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 100$  кА/м.

128 Определить магнитную индукцию  $B$  поля, намагниченность  $J$  и магнитную проницаемость  $\mu$  железа при напряженности магнитного поля в нем  $H = 1400$  А/м (см. рисунок 2, с. 13).

129 Определить магнитную индукцию  $B$  поля, намагниченность  $J$  и магнитную проницаемость  $\mu$  стали при напряженности магнитного поля в нем  $H = 1700$  А/м.

130 Определить магнитную индукцию  $B$  поля, намагниченность  $J$  и магнитную проницаемость  $\mu$  железа при напряженности магнитного поля в нем  $H = 2000$  А/м.

131 В железном сердечнике соленоида индукция  $B = 1,5$  Тл. Железный сердечник заменили стальным. Во сколько раз следует изменить силу тока в обмотке соленоида, чтобы индукция поля в сердечнике осталась неизменной?

132 Найти магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый соленоидом сечением  $S = 10$  см<sup>2</sup>, если он имеет  $n = 10$  витков на каждый сантиметр его длины при силе тока  $I = 20$  А. Сердечник немагнитный.

133 Плоский контур площадью  $S = 25$  см<sup>2</sup> находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,04$  Тл. Определить магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур, если его плоскость составляет угол  $\beta = 30^\circ$  с линиями индукции.

134 Соленоид сечением  $S = 16$  см<sup>2</sup> и длиной  $l = 1$  м содержит  $N = 2000$  витков, намотанных на картонный каркас. Вычислить потокоцепление  $\Psi$  при силе тока в обмотке  $I = 5$  А.

135 Плоская квадратная рамка со стороной  $a = 20$  см лежит в одной плоскости с бесконечным длинным прямым проводом, по которому течет ток  $I = 100$  А. Рамка расположена так, что ближайшая к проводу сторона параллельна ей и находится на расстоянии  $l = 10$  см от провода. Определить магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку.

136 В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл находится прямой провод длиной  $l = 8$  см, расположенный перпендикулярно линиям индукции. По проводу течет ток  $I = 2$  А. Под действием сил поля провод переместился на расстояние  $s = 5$  см. Найти работу  $A$  сил поля.

137 Соленоид со стальным сердечником имеет 10 витков на каждый сантиметр длины. По обмотке соленоида течет ток силой 2 А. Вычислить магнитный поток в сердечнике, если площадь его поперечного сечения 4 см<sup>2</sup>.

138 На железное кольцо равномерно намотано в один слой 600 витков тонкого провода. Средний диаметр кольца 30 см, площадь его кругового сечения 6 см<sup>2</sup>. При какой силе тока в обмотке магнитный поток через сечение кольца будет равен 840 мкВб?

139 Площадь сечения железного кольца равна 6 см<sup>2</sup>. Магнитный поток через сечение кольца равен 840 мкВб. Определить магнитную проницаемость железа в этих условиях.

140 Круговой контур радиусом  $R = 2$  см помещен в однородное магнитное поле, индукция которого  $B = 50$  мТл. Плоскость контура перпендикулярна силовым линиям. По контуру протекает постоянный ток  $I = 2$  А. Какую работу  $A$  надо совершить, чтобы повернуть контур на  $\varphi = 90^\circ$  вокруг оси, совпадающей с диаметром контура?



141 Определить магнитный поток через площадь поперечного сечения катушки без сердечника, имеющей на каждом сантиметре длины 8 витков. Радиус катушки равен 2 см, сила тока в ней 2 А.

142 Внутри соленоида с числом витков  $N = 200$  с сердечником ( $\mu = 200$ ) напряженность магнитного поля  $H = 10$  кА/м. Площадь поперечного сечения сердечника  $S = 10$  см<sup>2</sup>. Определить индукцию магнитного поля внутри соленоида и потокосцепление.

143 В однородное магнитное поле напряженностью 100 кА/м помещена квадратная рамка со стороной 10 см. Плоскость рамки составляет с направлением магнитного поля угол 60°. Определить магнитный поток, пронизывающий рамку.

144 В одной плоскости с бесконечным прямолинейным проводом с током 20 А расположена квадратная рамка со стороной 10 см, причем две стороны рамки параллельны проводу, а расстояние от провода до ближайшей стороны рамки равно 5 см. Определить магнитный поток, пронизывающий рамку.

145 Прямой провод длиной 20 см с током 5 А расположен перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля индукцией 0,1 Тл. Определить работу сил поля, под действием которых проводник переместился на 2 см.

146 Соленоид длиной 2 м и сечением 15 см<sup>2</sup> содержит 2000 витков. Вычислить потокосцепление при токе в обмотке 10 А.

147 В одной плоскости с длинным проводом, по которому течет ток 50 А, расположена прямоугольная рамка так, что две ее большие стороны длиной 70 см параллельны проводу, а расстояние от провода до ближайшей из сторон равно ее ширине. Найти магнитный поток, пронизывающий рамку.

148 Виток, по которому течет ток силой 10 А, свободно установился в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,016 Тл. Диаметр витка равен 12 см. Определить работу, которую надо совершить, чтобы повернуть виток на угол  $\pi/2$  относительно оси, совпадающей с диаметром. То же, если угол равен  $2\pi$ .

149 По проводу, согнутому в виде квадрата со стороной длиной 10 см, течет ток 20 А, величина которого поддерживается неизменной. Плоскость квадрата составляет угол 25° с магнитными силовыми линиями. Магнитная индукция однородного магнитного поля равна 0,2 Тл. Вычислить работу, которую необходимо совершить для того, чтобы удалить провод за пределы магнитного поля.

150 Квадратная рамка со стороной 10 см, сделанная из проводника, площадь поперечного сечения которого 2 мм<sup>2</sup>, присоединена к источнику постоянного напряжения 5 В и помещена в однородное магнитное поле с магнитной индукцией 0,3 Тл. Определить максимальный момент сил, дейст-

вующих на рамку со стороны магнитного поля, если удельное сопротивление проводника  $2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

151 Квадратный контур со стороной 30 см, в котором течет ток 5 А, находится в магнитном поле с магнитной индукцией 0,8 Тл под углом  $20^\circ$  к магнитным силовым линиям. Какую работу нужно совершить, чтобы при неизменном токе в контуре изменить его форму на окружность.

152 Плоский контур, площадь которого  $300 \text{ см}^2$ , находится в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,01 Тл. Плоскость контура перпендикулярна магнитным силовым линиям. В контуре поддерживается неизменный ток 12 А. Определить работу внешних сил по перемещению контура с током в область пространства, в которой магнитное поле отсутствует.

153 По кольцу, сделанному из тонкого гибкого провода радиусом 10 см, течет ток силой 150 А. Перпендикулярно плоскости кольца возбуждено магнитное поле с магнитной индукцией 0,2 Тл, по направлению совпадающей с индукцией собственного магнитного поля кольца. Определить работу внешних сил, которые, действуя на провод, деформировали его и придали ему форму квадрата. Ток при этом поддерживается постоянный. Работой против упругих сил пренебречь.

154 В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции расположен плоский контур площадью  $200 \text{ см}^2$ . Поддерживая в контуре постоянный ток 50 А, его переместили из поля в область пространства, где поле отсутствует. Определить магнитную индукцию.

155 Квадратный проводящий контур со стороной 20 см и током 10 А свободно подвешен в однородном магнитном поле с магнитной индукцией 0,2 Тл. Определить работу, которую необходимо совершить, чтобы повернуть контур на  $180^\circ$  вокруг оси, перпендикулярной направлению магнитного поля.

156 Круговой проводящий контур радиусом  $r = 5$  см и током  $I = 1$  А находится в магнитном поле, причем плоскость контура перпендикулярна направлению поля. Напряженность поля  $H = 10$  кА/м. Определить работу, которую необходимо совершить, чтобы повернуть контур на  $90^\circ$  вокруг оси, совпадающей с диаметром контура.

157 В однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $B = 1$  Тл находится плоская катушка из 100 витков радиусом  $r = 10$  см. По катушке течет ток  $I = 10$  А. Плоскость катушки составляет с направлением поля угол  $\alpha = 30^\circ$ . Определить: 1) вращающий момент, действующий на катушку; 2) работу для удаления этой катушки из магнитного поля.

158 Определить работу, совершаемую при перемещении проводника длиной 0,2 м, по которому течет ток 5 А, в перпендикулярном магнитном поле напряженностью 80 кА/м, если перемещение проводника 0,5 м.

159 Прямой провод длиной  $l = 8$  см помещен перпендикулярно линиям в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. По проводу течет ток

$I = 2$  А. Под действием сил со стороны поля провод переместился на расстояние  $a = 5$  см. Найти работу  $A$  сил поля.

160 Плоский контур площадью  $S = 300$  см<sup>2</sup> находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. Плоскость контура перпендикулярна к силовым линиям. По контуру протекает постоянный ток  $I = 10$  А. Какую работу  $A$  должны совершить внешние силы по перемещению контура в область пространства, в которой магнитное поле отсутствует?

161 По проводу, согнутому в виде квадрата со стороной  $a = 10$  см, течет постоянный ток  $I = 20$  А. Плоскость квадрата составляет угол  $\alpha = 20^\circ$  с силовыми линиями однородного магнитного поля с индукцией  $B = 0,1$  Тл. Какую работу  $A$  необходимо совершить для того, чтобы удалить провод за пределы поля?

162 По кольцу радиусом  $R = 10$  см, сделанному из тонкого гибкого провода, течет постоянный ток  $I = 100$  А. Перпендикулярно плоскости кольца возбуждено магнитное поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл. Определить работу внешних сил, которые, действуя на провод, деформировали его и придали ему форму правильного шестиугольника. Работой против упругих сил пренебречь.

163 Определить разность потенциалов, возникающую на концах вертикальной автомобильной антенны длиной 1,2 м при движении автомобиля с востока на запад в магнитном поле Земли со скоростью 20 м/с. Горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля Земли равна 16 А/м.

164 Алюминиевый диск радиусом 40 см вращается вокруг вертикальной оси с частотой 40 с<sup>-1</sup>. Какова разность потенциалов между центром и краем диска, если вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли равна 40 А/м?

165 Железнодорожные рельсы изолированы друг от друга и от земли и соединены через милливольтметр. Каково показание прибора, если по рельсам проходит поезд со скоростью 20 м/с? Вертикальную составляющую магнитного поля Земли принять 40 А/м, а расстояние между рельсами – 1,54 м.

166 Чему равна индукция однородного магнитного поля, если при вращении в нем прямолинейного проводника длиной 0,2 м вокруг одного из его концов с угловой скоростью 50 рад/с на концах проводника возникает разность потенциалов 0,2 В?

167 Через катушку радиусом  $R = 2$  см, содержащую  $N = 500$  витков, проходит постоянный ток  $I = 5$  А. Определить индуктивность катушки, если напряженность магнитного поля в ее центре  $H = 10$  кА/м.

168 На железный сердечник сечением  $S = 5$  см<sup>2</sup> и длиной  $l = 30$  см намотан соленоид, содержащий  $N = 500$  витков медной проволоки сечением  $S_0 = 1$  мм<sup>2</sup>. Чему равна индуктивность соленоида при подключении его к аккумулятору с ЭДС  $\varepsilon = 1,26$  В? Внутренним сопротивлением аккумулятора и сопротивлением подводящих проводов пренебречь.

169 На стальной сердечник сечением  $S = 4 \text{ см}^2$  намотан соленоид, содержащий  $N = 1000$  витков, по которым проходит ток силой  $I = 0,5 \text{ А}$ . Определить индуктивность соленоида при этих условиях, если напряженность магнитного поля внутри соленоида  $H = 2 \text{ кА/м}$ .

170 В однородном магнитном поле, индукция которого  $B = 50 \text{ мТл}$ , помещена катушка из  $N = 200$  витков провода, причем ее ось составляет с направлением поля угол  $\alpha = 60^\circ$ . Сопротивление катушки  $R = 40 \text{ Ом}$ , площадь ее поперечного сечения  $S = 12 \text{ см}^2$ . Какой заряд пройдет по катушке при исчезновении магнитного поля?

171 Имеется катушка индуктивностью  $0,2 \text{ Гн}$  и сопротивлением  $1,64 \text{ Ом}$ . Найти, во сколько раз уменьшится ток в катушке через  $50 \text{ мс}$  после того, как источник постоянной ЭДС будет выключен, а катушка замкнута накоротко.

172 Магнитное поле увеличивается пропорционально времени по закону  $B = kt$ , где  $k = 10 \text{ Тл/с}$ . Какое количество теплоты выделится в рамке, имеющей форму квадрата со стороной  $a = 1 \text{ м}$  за время  $\tau = 2 \text{ с}$ ? Плоскость рамки расположена перпендикулярно направлению поля. Рамка сделана из провода, поперечное сечение которого  $S = 1 \text{ мм}^2$ , а удельное сопротивление материала  $\rho = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Самоиндукцией пренебречь.

173 Соленоид диаметром  $d = 4 \text{ см}$ , имеющий  $N = 500$  витков, помещен в магнитное поле, индукция которого изменяется со скоростью  $1 \text{ мТл/с}$ . Ось соленоида составляет с вектором магнитной индукции угол  $\alpha = 60^\circ$ . Определить ЭДС индукции, возникающей в соленоиде.

174 По длинному идеально проводящему соленоиду длиной  $l_0$ , отключенному от источника напряжения, течет постоянный ток  $I_0$ . Как будет меняться ток  $I$  в соленоиде при его растяжениях и сжатиях?

175 В магнитное поле, изменяющееся по закону  $B = B_0 \cos \omega t$  ( $B_0 = 0,1 \text{ Тл}$ ,  $\omega = 4 \text{ с}^{-1}$ ), помещена квадратная рамка со стороной  $a = 50 \text{ см}$ , причем нормаль к рамке образует с направлением поля угол  $\alpha = 45^\circ$ . Определить значение ЭДС индукции, возникающей в рамке в момент времени  $t = 5 \text{ с}$ .

176 Кольцо из алюминиевого провода помещено в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Диаметр кольца  $D = 30 \text{ см}$ , диаметр провода  $d = 2 \text{ мм}$ . Определить скорость изменения магнитного поля, если в кольце возникает ток  $I = 1 \text{ А}$ .

177 Плоскость проволочного витка площадью  $S = 100 \text{ см}^2$  и сопротивлением  $R = 5 \text{ Ом}$  находится в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 10 \text{ кА/м}$ . При повороте витка в магнитном поле отсчет гальванометра, замкнутого на виток, составляет  $q = 12,6 \text{ мКл}$ . Определить угол поворота витка.

178 В катушке длиной  $l = 30 \text{ см}$ , диаметром  $d = 5 \text{ см}$  и числом витков  $N = 1500$  равномерно увеличивается ток на  $0,2 \text{ А}$  за одну секунду. На катуш-

ку надето кольцо из медной проволоки сечением  $S_0 = 3 \text{ мм}^2$ . Определить силу тока в кольце.

179 Катушка диаметром  $d = 5 \text{ см}$ , содержащая один слой плотно прилегающих друг к другу  $N = 500$  витков алюминиевого провода сечением  $S_0 = 3 \text{ мм}^2$ , помещена в магнитное поле, индукция которого изменяется со скоростью  $1 \text{ мТл/с}$ . Ось катушки параллельна линиям индукции. Определить тепловую мощность, выделяющуюся в катушке, если ее замкнуть накоротко.

180 В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,02 \text{ Тл}$  равномерно вращается вокруг вертикальной оси стержень длиной  $0,5 \text{ м}$ . Ось вращения проходит через конец стержня параллельно линиям индукции. Определить частоту вращения стержня, при которой на концах стержня возникает разность потенциалов  $0,1 \text{ В}$ .

181 Магнитная индукция поля между полюсами двухполюсного генератора равна  $1 \text{ Тл}$ . Ротор имеет  $140$  витков, площадь каждого из которых  $500 \text{ см}^2$ . Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям индукции. Определить частоту вращения якоря, если максимальное значение ЭДС индукции равно  $220 \text{ В}$ .

182 Катушку индуктивностью  $L = 0,6 \text{ Гн}$  подключают к источнику тока. Определить сопротивление  $R$  катушки, если через  $t = 3 \text{ мс}$  после включения сила тока через нее достигает  $80 \%$  предельного значения.

183 Соленоид длиной  $0,8 \text{ м}$  имеет однослойную обмотку из алюминиевого провода массой  $400 \text{ г}$ . Определить время релаксации для этого соленоида.

184 Две катушки намотаны на один общий сердечник. Определить их взаимную индуктивность, если при скорости изменения силы тока в первой катушке  $dI_1/dt = 3 \text{ А/с}$  во второй катушке индуцируется ЭДС  $\varepsilon_{i2} = 0,3 \text{ В}$ .

185 Трансформатор, повышающий напряжение со  $100 \text{ В}$  до  $3300 \text{ В}$ , имеет замкнутый сердечник в виде кольца. Через кольцо пропущен провод, концы которого присоединены к вольтметру. Вольтметр показывает ток  $0,5 \text{ В}$ . Сколько витков имеют обмотки трансформатора?

186 К источнику тока с внутренним сопротивлением  $r = 2 \text{ Ом}$  подключают катушку индуктивностью  $L = 0,5 \text{ Гн}$  и сопротивлением  $R = 8 \text{ Ом}$ . Найти время  $t$ , в течение которого ток в катушке, нарастая, достигает значения, отличающегося от максимального на  $1 \%$ .

187 Тонкий медный провод массой  $1 \text{ г}$  согнут в виде квадрата, и его концы замкнуты. Квадрат помещен перпендикулярно силовым линиям в однородное магнитное поле с индукцией  $0,1 \text{ Тл}$ . Определить заряд, который протечет по проводнику, если квадрат, потянув за противоположные вершины, вытянуть в линию.

188 На расстоянии  $a = 1 \text{ м}$  от длинного прямого провода с током  $I = 1 \text{ кА}$  находится кольцо радиусом  $r = 1 \text{ см}$ . Кольцо расположено так, что пронизывающий его магнитный поток максимален. Определить количество

электричества  $q$ , которое протечет по кольцу, когда ток в проводе будет выключен. Сопротивление кольца  $R = 10$  Ом. В пределах кольца поле считать однородным.

189 Соленоид содержит  $N = 1000$  витков. Площадь сечения сердечника  $S = 10$  см<sup>2</sup>. По обмотке течет ток, создающий поле с индукцией  $B = 1,5$  Тл. Найти среднюю ЭДС индукции, возникающей в соленоиде, если ток уменьшится до нуля за время  $t = 0,5$  мс.

190 Определить энергию магнитного поля соленоида, содержащего  $N = 500$  витков, намотанных на картонный каркас радиусом  $R = 2$  см и длиной  $l = 0,5$  м, если по нему идет ток  $I = 5$  А.

191 На длинный железный сердечник радиусом  $R = 1$  см намотана однослойная катушка, содержащая  $n = 10$  витков на каждом сантиметре длины. Обмотка выполнена из медного провода сечением  $S = 1$  мм<sup>2</sup>. Через сколько времени в обмотке соленоида выделится количество теплоты, равное энергии магнитного поля в сердечнике, если она подключена к источнику постоянного тока? Относительную магнитную проницаемость сердечника принять  $\mu = 400$ .

192 По обмотке электромагнита, сопротивление которой  $R = 10$  Ом и индуктивность  $L = 2$  Гн, течет постоянный электрический ток  $I = 2$  А. Чему равна энергия магнитного поля электромагнита через  $t = 0,1$  с после отключения источника?

193 Во сколько раз изменится плотность энергии магнитного поля соленоида при внесении в него стального сердечника, если величина тока не изменяется? Плотность энергии поля в отсутствие сердечника  $w = 0,5$  Дж/м<sup>3</sup>. Воспользоваться графиком  $B = f(H)$ .

194 Сила тока в обмотке соленоида, содержащего  $N = 1500$  витков, равна  $I = 5$  А. Магнитный поток через поперечное сечение соленоида  $\Phi = 200$  мкВб. Определить энергию магнитного поля в соленоиде.

195 Обмотка электромагнита, сопротивление которой  $R = 15$  Ом и индуктивность  $L = 0,3$  Гн, находится под постоянным напряжением. За какое время в обмотке соленоида выделится количество теплоты, равное энергии магнитного поля в сердечнике?

196 Соленоид без сердечника с однослойной обмоткой из проволоки диаметром  $d = 0,5$  мм имеет длину  $l = 0,4$  м и поперечное сечение  $S = 50$  см<sup>2</sup>. Какой ток течет по обмотке при напряжении  $U = 10$  В, если за время  $t = 0,5$  мс в обмотке соленоида выделится количество теплоты, равное энергии магнитного поля внутри соленоида? Поле считать однородным.

197 Индуктивность соленоида при длине 1 м и площади поперечного сечения 20 см<sup>2</sup> равна 0,4 мГн. При какой силе тока в соленоиде объемная плотность энергии магнитного поля внутри соленоида будет равна 0,1 Дж/м<sup>3</sup>?

198 Тороид с немагнитным сердечником содержит 20 витков на 1 см длины. Определить объемную плотность энергии магнитного поля внутри тороида, если по его обмотке протекает ток 3 А.

199 Обмотка тороида с немагнитным сердечником содержит 10 витков на 1 см длины. При какой силе тока в обмотке объемная плотность энергии станет равной  $w = 1 \text{ Дж/м}^3$ ?

200 Какой должна быть напряженность  $E$  однородного электрического поля, чтобы оно обладало той же объемной плотностью энергии, что и магнитное поле индукцией  $B = 0,5 \text{ Тл}$ ?

201 Тороид с железным сердечником длиной  $l = 20 \text{ см}$  имеет воздушный зазор  $b = 0,1 \text{ см}$ . По обмотке, содержащей  $N = 500$  витков, течет ток  $I = 3 \text{ А}$ . Определить объемную плотность энергии магнитного поля в сердечнике и воздушном зазоре, если при этих условиях магнитная проницаемость сердечника  $\mu = 580$ . Рассеянием магнитного потока пренебречь.

202 Рамка площадью  $300 \text{ см}^2$  равномерно вращается с частотой  $12 \text{ с}^{-1}$  относительно оси, лежащей в плоскости рамки и перпендикулярной линиям индукции однородного магнитного поля с магнитной индукцией  $0,2 \text{ Тл}$ . Каково среднее значение ЭДС индукции за время, в течение которого магнитный поток, пронизывающий рамку, изменится от нуля до максимального значения?

203 Определить разность потенциалов на концах оси железнодорожного вагона, имеющей длину  $1,4 \text{ м}$ , если на горизонтальном участке пути скорость поезда  $55 \text{ км/ч}$ , а вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли  $2 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$ .

204 Магнитный поток через катушку, состоящую из 75 витков, равен 48 Вб. За сколько времени должен исчезнуть этот поток, чтобы в катушке возникла средняя ЭДС индукции  $0,75 \text{ В}$ ?

205 Проволочный виток радиусом 7 см, имеющий сопротивление  $0,03 \text{ Ом}$ , находится в однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $0,02 \text{ Тл}$ . Плоскость рамки составляет угол  $30^\circ$  с линиями индукции магнитного поля. Какое количество электричества протечет по витку, если магнитное поле исчезнет?

206 В проволочное кольцо, присоединенное к баллистическому гальванометру, вставили прямой магнит. По цепи протекло количество электричества  $10 \text{ мкКл}$ . Определить магнитный поток, пересеченный кольцом, если сопротивление цепи гальванометра равно  $30 \text{ Ом}$ .

207 В длинной катушке радиусом 3 см, содержащей 500 витков, величина тока равна 5 А. Определить индуктивность катушки, если магнитная индукция магнитного поля внутри катушки  $12,5 \text{ мТл}$ .

208 На длинный стальной сердечник сечением  $4 \text{ см}^2$  намотан соленоид, содержащий 1000 витков, по которым проходит ток  $0,5 \text{ А}$ . Определить ин-

дуктивность соленоида при этих условиях, если напряженность магнитного поля внутри соленоида  $2 \text{ кА/м}$ . Воспользоваться графиком  $B = f(H)$ .

209 Диаметр немагнитного каркаса соленоида  $0,5 \text{ м}$ . Соленоид содержит  $3000$  витков. При подключении соленоида к аккумулятору с ЭДС  $12 \text{ В}$  через  $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  сила тока в цепи достигает значения  $2 \text{ А}$ . Определить длину соленоида, если его сопротивление  $4 \text{ Ом}$ , а сопротивлением аккумулятора и подводящих проводников можно пренебречь.

210 Определить энергию магнитного поля соленоида, содержащего  $4000$  витков, которые намотаны на картонный каркас радиусом  $3 \text{ см}$  и длиной  $0,5 \text{ м}$ , если сила тока в нем  $5 \text{ А}$ .

211 Радиус длинного парамагнитного сердечника соленоида  $1 \text{ см}$ . Соленоид содержит  $15$  витков на  $1 \text{ см}$  длины. Обмотка выполнена из медного провода сечением  $1 \text{ см}^2$ . Через какое время в обмотке соленоида выделится количество теплоты, равное энергии магнитного поля в сердечнике, если она подключена к источнику постоянного напряжения?

212 Тороид с сердечником из чистого железа имеет обмотку, содержащую  $700$  витков, по которой идет ток  $2 \text{ А}$ . Сечение тороида  $12 \text{ см}^2$ , средний радиус  $35 \text{ см}$ . Определить магнитную энергию, запасенную в сердечнике. Воспользоваться графиком  $B = f(H)$ .

213 По соленоиду течет ток  $4 \text{ А}$ . Длина соленоида  $3 \text{ м}$ , число витков  $500$ , площадь поперечного сечения  $54 \text{ см}^2$ . В соленоид вставлен железный сердечник. Найти энергию магнитного поля соленоида.

214 Обмотка тороида с немагнитным сердечником имеет  $251$  виток. Средний диаметр тороида равен  $9 \text{ см}$ , диаметр витков равен  $1 \text{ см}$ . На тороид намотана вторичная обмотка, имеющая  $100$  витков. При замыкании первичной обмотки в ней в течение  $1 \text{ мс}$  устанавливается ток  $3 \text{ А}$ . Найти среднюю ЭДС индукции, возникающей во вторичной обмотке.

215 Определить энергию  $W$  магнитного поля соленоида, содержащего  $N = 500$  витков, которые равномерно намотаны на картонный каркас радиусом  $R = 20 \text{ мм}$  и длиной  $l = 50 \text{ см}$ , если по нему проходит ток  $I = 5 \text{ А}$ .

216 Соленоид содержит  $N = 1000$  витков. Сила тока в обмотке  $I = 1 \text{ А}$ . Магнитный поток через поперечное сечение соленоида  $\Phi = 0,1 \text{ мВб}$ . Вычислить энергию  $W$  магнитного поля соленоида.

217 Однослойная обмотка длинного соленоида содержит  $N = 2500$  плотно прилегающих друг к другу витков проволоки диаметром  $d = 0,85 \text{ мм}$ , намотанной на цилиндрический каркас диаметром  $D = 6,5 \text{ см}$ . Когда по обмотке проходит ток  $I = 0,7 \text{ А}$ , относительная магнитная проницаемость материала сердечника становится равной  $\mu = 600$ . Определить индуктивность соленоида и объемную плотность энергии магнитного поля.

218 По обмотке тороида течет ток  $I = 0,6 \text{ А}$ . Витки провода диаметром  $d = 0,4 \text{ мм}$  плотно прилегают друг к другу. Найти энергию  $W$  магнитного



поля в стальном сердечнике тороида, если площадь его сечения  $S = 4 \text{ см}^2$ , диаметр средней линии  $D = 30 \text{ см}$ .

219 Найти объемную плотность энергии магнитного поля в железе, если индукция магнитного поля  $B = 1,2 \text{ Тл}$ .

220 При индукции поля  $B = 1 \text{ Тл}$  плотность энергии магнитного поля в железе  $w = 200 \text{ Дж/м}^3$ . Определить магнитную проницаемость  $\mu$  железа в этих условиях.

221 Определить объемную плотность энергии магнитного поля в стали, если индукция магнитного поля  $B = 1 \text{ Тл}$ .

222 Индукция магнитного поля тороида со стальным сердечником возросла с  $B_1 = 0,5 \text{ Тл}$  до  $B_2 = 1 \text{ Тл}$ . Во сколько раз изменилась объемная плотность энергии  $w$  магнитного поля?

223 Вычислить объемную плотность энергии  $w$  магнитного поля в железном сердечнике тороида, если напряженность намагничивающего поля  $H = 1,2 \text{ кА/м}$ .

224 Напряженность магнитного поля тороида со стальным сердечником возросла от  $H_1 = 200 \text{ А/м}$  до  $H_2 = 800 \text{ А/м}$ . Во сколько раз изменилась объемная плотность энергии  $w$  магнитного поля?

225 Найти объемную плотность энергии  $w$  магнитного поля в железном сердечнике соленоида, если напряженность намагничивающего поля  $H = 1,6 \text{ кА/м}$ .

226 Обмотка тороида с немагнитным сердечником имеет 10 витков на каждый сантиметр длины. Определить плотность энергии магнитного поля, если по обмотке течет ток 16 А.

227 Соленоид содержит 2000 витков. Сила тока в его обмотке равна 2 А, а магнитный поток через поперечное сечение соленоида равен  $10^{-4} \text{ Вб}$ . Вычислить энергию магнитного поля соленоида.

228 Конденсатор емкостью  $C = 2 \text{ мкФ}$  разряжается через сопротивление  $R = 1000 \text{ Ом}$ . Через какое время  $t$  от начала разрядки напряжение на пластинах конденсатора уменьшится вдвое?

229 Имеются два одинаковых трансформатора, преобразующих напряжение с 220 В на 12 В. Можно ли соединить их так, чтобы получить 6 В?

230 Имеются два одинаковых трансформатора, преобразующих напряжение с 220 В на 12 В. Можно ли соединить их так, чтобы получить 24 В?

## Список рекомендуемой литературы

### *Основная*

- 1 *Савельев, И. В.* Курс общей физики Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учеб. пособие / И. В. Савельев – 2-е изд. перераб. – М. : Наука, 1988. – 464 с.
- 2 *Детлаф, А. А.* Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высш. шк., 1989. – 608 с.
- 3 *Трофимова, Т. И.* Курс физики / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 1990. – 478 с.
- 4 *Трофимова, Т. И.* Сборник задач по курсу физики : учеб. пособие / Т. И. Трофимова. – М. : Высш. шк., 1991. – 303 с.
- 5 *Чертов, А. Г.* Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьёв. – М. : Высш. шк., 1988. – 526 с.

### *Дополнительная*

- 6 *Сивухин, Д. В.* Общий курс физики. В 5 т. Т. III. Электричество / Д. В. Сивухин. – 4-е изд. стер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, изд-во МФТИ, 2009. – 656 с.
- 7 *Волькенштейн, В. С.* Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1985. – 381 с.
- 8 *Савельев, И. В.* Сборник вопросов и задач по общей физике : учеб. пособие / И. В. Савельев. – 2-е изд. перераб. – М. : Наука, 1988. – 288 с.
- 9 *Яворский Б. М.* Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 3-е изд., испр. – М. : Наука, 1990. – 624 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
(справочное)

**СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ**

**1 Основные физические постоянные** (округленные значения)

Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8$ м/с
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м <sup>2</sup> ·кг <sup>-2</sup>
Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81$ м/с <sup>2</sup>
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31$ Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Объём 1 моля газа при нормальных условиях	$V_\mu = 22,4 \cdot 10^{-3}$ м <sup>3</sup> /моль
Элементарный электрический заряд	$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-31}$ кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Магнетон Бора	$\mu_B = 0,29 \cdot 10^{-23}$ А·м <sup>2</sup>
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

**2 Магнитные восприимчивости пара- и диамагнетиков**

Парамагнетики	$\chi, 10^{-6}$	Диамагнетики	$\chi, 10^{-6}$
Азот	0,013	Висмут	-176
Алюминий	23	Вода	-9
Воздух	0,38	Водород	-0,063
Вольфрам	176	Каменная соль	-12,6
Кислород	1,9	Кварц	-15,1
Марганец	121	Медь	-10,3
Платина	360	Стекло	-12,3

### 3 Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

Приставка			Приставка		
Обозначение	Наименование	Множитель	Обозначение	Наименование	Множитель
Э	экса	$10^{18}$	д	деци	$10^{-1}$
П	пэта	$10^{15}$	с	санتي	$10^{-2}$
Т	тера	$10^{12}$	м	милли	$10^{-3}$
Г	гига	$10^9$	мк	микро	$10^{-6}$
М	мега	$10^6$	н	нано	$10^{-9}$
к	кило	$10^3$	п	пико	$10^{-12}$
г	гекта	$10^2$	ф	фемто	$10^{-15}$
а	дека	$10^1$	а	атто	$10^{-18}$

*ПРИЛОЖЕНИЕ Б*  
*(обязательное)*

**ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ФИЗИКА»**  
**(РАЗДЕЛ «МАГНЕТИЗМ»)**

**1 ВОПРОСЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ**  
**ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ.** Магнитное поле. Магнитная индукция. Силовые линии магнитного поля. Закон Био – Савара – Лапласа. Магнитное поле прямолинейного тока. Магнитное поле кругового тока. Магнитное поле движущегося заряда. Закон Ампера. Сила взаимодействия параллельных токов. Магнитный момент контура с током. Поток вектора магнитной индукции. Работа по перемещению проводника с током и контура с током в магнитном поле.

Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока для магнитного поля в вакууме. Магнитное поле соленоида. Магнитное поле тороида.

**ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ.** Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Эффект Холла. Масс-спектрометры.

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ.** Микротоки в веществе. Намагниченность. Магнитная восприимчивость. Магнитная проницаемость. Напряженность магнитного поля. Циркуляция вектора напряженности магнитного поля. Закон полного тока для магнитного поля в веществе. Диамагнетика. Парамагнетика. Ферромагнетика и их свойства. Гистерезис. Точка Кюри. Природа ферромагнетизма.

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.** Потокосцепление. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Токи при размыкании и замыкании цепи. Индуктивность контура. Явление самоиндукции. Взаимная индукция. Трансформатор. Энергия магнитного поля соленоида. Плотность энергии магнитного поля.

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.** Обобщение закона электромагнитной индукции. Ток смещения. Уравнения Максвелла для произвольных полей.

**2 ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

- 1 Магнитное поле. Магнитная индукция.
- 2 Принцип суперпозиции для магнитных полей.

- 3 Сила Лоренца.
- 4 Закон Ампера.
- 5 Взаимодействие параллельных токов. Единица силы тока – ампер.
- 6 Движение заряженных частиц в магнитном поле.
- 7 Ускорители заряженных частиц.
- 8 Эффект Холла и его применение.
- 9 Закон Био – Савара – Лапласа и его применение к расчету индукции магнитного поля.
- 10 Магнитное поле прямолинейного проводника с током.
- 11 Магнитное поле кругового витка с током.
- 12 Циркуляция вектора магнитной индукции для магнитного поля в вакууме.
- 13 Магнитное поле соленоида и тороида.
- 14 Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток).
- 15 Теорема Гаусса для магнитного поля.
- 16 Работа перемещения контура с током в магнитном поле.
- 17 Явление электромагнитной индукции (опыты Фарадея).
- 18 Закон электромагнитной индукции.
- 19 Вывод закона электромагнитной индукции из закона сохранения энергии.
- 20 Правило Ленца.
- 21 Движение проводника в магнитном поле.
- 22 Методы измерения магнитной индукции.
- 23 Вихревые токи (токи Фуко).
- 24 Явление самоиндукции. Индуктивность. ЭДС самоиндукции.
- 25 Электрический ток при замыкании и размыкании цепи.
- 26 Явление взаимной индукции. Трансформатор.
- 27 Генератор переменного тока.
- 28 Энергия магнитного поля.
- 29 Магнитные моменты электронов и атомов.
- 30 Диамагнетики.
- 31 Парамагнетики.
- 32 Намагниченность. Напряженность магнитного поля.
- 33 Циркуляция вектора магнитной индукции для магнитного поля в веществе.
- 34 Условия на границе раздела двух магнетиков.
- 35 Ферромагнетики и их свойства. Природа ферромагнетизма.
- 36 Ток смещения. Система уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной формах.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Магнитное поле в вакууме.....	3
2 Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях .....	6
3 Магнитное поле в веществе.....	9
4 Электромагнитная индукция .....	10
5 Основы теории Максвелла для электромагнитного поля .....	14
6 Примеры решения задач .....	17
7 Задачи для самостоятельной работы.....	43
8 Список рекомендуемой литературы.....	65
Приложение А Справочные таблицы.....	66
Приложение Б Вопросы по дисциплине «Физика» (раздел «Магнетизм»).....	68

Учебное издание

*АХРАМЕНКО Николай Арсеньевич,  
ДЕЛИКАТНАЯ Ирина Олеговна  
ШИЛЯЕВА Ксения Павловна*

МАГНЕТИЗМ

Пособие

Редактор *Я. В. Войтеховская*  
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 11.10.2021 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 4,05. Уч.-изд. л. 4,07. Тираж 300 экз.  
Зак. № 2640. Изд. № 30.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/361 от 13.06.2014.  
№ 2/104 от 01.04.2014.  
№ 3/1583 от 14.11.2017.  
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель.