

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра физики

М. В. БУЙ, А. П. ПАВЛЕНКО, И. В. ПРИХОДЬКО

# Ф И З И К А

Часть 4

## МАГНЕТИЗМ

Учебно-методическое пособие для студентов  
инженерно-технических специальностей ФБО

*Одобрено методическими комиссиями  
строительного факультета и факультета  
безотрывного обучения*

Гомель 2011

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра физики**

**М. В. БУЙ, А. П. ПАВЛЕНКО, И. В. ПРИХОДЬКО**

# **Ф И З И К А**

**Часть 4**

## **МАГНЕТИЗМ**

**Учебно-методическое пособие для студентов  
инженерно-технических специальностей ФБО**

**Гомель 2011**

УДК 53 (075.8)  
ББК 22.3  
Б90

Рецензент – д-р техн. наук, профессор *О. В. Холодилов*  
(УО «БелГУТ»).

**Буй, М.В.**

Б90 Физика : учеб.-метод. пособие для студентов инженерно-технических специальностей ФБО. В 6 ч. Ч. 4: Магнетизм / М. В. Буй, А. П. Павленко, И. В. Приходько; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 90 с.  
ISBN 978-985-468-876-3 (ч. 4)

Приведены общие методические указания, разделы программы, основная и дополнительная литература, основные сведения из теории, примеры решения задач, задания для контрольных работ и справочные таблицы по разделу “Магнетизм” программы курса физики для инженерно-технических специальностей вузов.

Предназначено для методического обеспечения самостоятельной работы по физике студентов инженерно-технических специальностей безотрывной формы обучения.

**УДК 53 (075.8)**  
**ББК 22.3**

ISBN 978-985-468-876-3 (ч. 4)  
ISBN 978-985-468-670-7

© Буй М. В., Павленко А. П., Приходько И. В., 2011  
© Оформление. УО «БелГУТ», 2011

## **ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Курс физики втузов делится на шесть разделов. Изучение каждого раздела сопровождается выполнением одной контрольной работы из восьми задач. Варианты задач контрольных работ выдаются преподавателем на установочной сессии.

Изучение курса физики студентом безотрывной формы обучения состоит из следующих основных этапов: самостоятельного изучения физики по учебной литературе, решения задач, выполнения контрольных работ и их защиты преподавателю, выполнения лабораторных работ, сдачи зачетов и экзаменов.

### **Самостоятельная работа по учебной литературе**

Самостоятельная работа по учебно-методическим пособиям является главным видом учебной работы студента безотрывной формы обучения. При этом необходимо руководствоваться следующим:

1 Курс физики следует изучать систематически в течение всего учебного процесса. Освоение курса в сжатые сроки перед экзаменом не дает глубоких и прочных знаний по физике.

2 Избрав какое-нибудь учебно-методическое пособие в качестве основного, студент должен придерживаться его при изучении всего курса или, по крайней мере, целого раздела. Замена одного пособия другим в процессе изучения ведет к утрате логической связи между отдельными вопросами. Если же основное пособие не дает полного ответа на отдельные вопросы программы, необходимо обратиться и к другим учебно-методическим пособиям.

3 Работа над учебной литературой сопровождается составлением конспекта, в котором записываются формулировки законов и выражающие их формулы, определением физических величин и единиц их измерения, выполненным чертежом и решением типовых задач.

4 Изучая курс физики, студент встречается с большим количеством единиц измерения, которые объединены в Международную систему единиц (СИ). Студент должен помнить, что без основательного

знания систем единиц, без умения пользоваться ими при решении физических задач невозможно усвоить курс физики и, тем более, применять физические знания на практике.

5 Вся работу по овладению курсом физики студент должен подвергать систематическому самоконтролю с помощью вопросов, которые приводятся в данном учебно-методическом пособии.

Студент не должен ограничиваться только запоминанием физических формул. Он должен осмыслить их и уметь самостоятельно вывести.

### **Решение задач**

Необходимым условием успешного изучения курса общей физики является систематическое решение задач, которое помогает уяснить физический смысл явлений, закрепить в памяти студента формулы, выработать навыки практического применения теоретических знаний.

Решая задачи, необходимо выполнить следующее:

1 Выбрать основные законы и формулы, которые используются при решении задачи, разъяснить буквенные обозначения, употребляемые при написании формул.

Если для решения задачи нужна формула, которая является частным случаем, не выражает физический закон или не является определением какой-нибудь физической величины, ее следует вывести.

2 При необходимости сделать чертеж или рисунок, поясняющий содержание задачи. Выполнить его нужно аккуратно при помощи чертежных принадлежностей.

3 Решение задачи должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями.

4 Все величины, входящие в условие задачи, необходимо выразить в единицах СИ.

5 Решить задачу в общем (буквенном) виде – получить конечную расчетную формулу. Проверить правильность полученной формулы. Для этого подставить в правую часть формулы вместо обозначений величин наименования их единиц и проверить, получается ли в результате единица искомой величины. Верно полученная рабочая формула должна давать правильную размерность искомой величины.

6 В окончательную формулу, полученную в результате решения задачи в общем виде, подставить числовые значения, выраженные в

единицах одной системы (СИ).

7 Произвести вычисления величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближенных вычислений. Точность результатов не должна превышать точности исходных данных, в том числе и табличных. При необходимости представлять результат в виде степенной функции.

8 Оценить правдоподобность полученного результата.

9 Записать в ответе числовое значение и размерность единицы измерения искомой величины в системе СИ.

В отдельных случаях при решении громоздких задач целесообразно производить вычисления промежуточных величин.

### **Выполнение контрольных работ**

По каждому разделу курса общей физики студент-заочник приступает к выполнению контрольных работ только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы, внимательного ознакомления с примерами решения задач и задач, предназначенных для самостоятельного решения, приведенных в этом пособии по каждому разделу курса.

Студенту при выполнении контрольных работ необходимо руководствоваться следующим:

1 Контрольные работы от первой до последней выполняются только по условиям задач данного пособия. Замена какой-либо контрольной работы другой, взятой из аналогичного пособия, не допускается.

2 Контрольные работы выполняются в тонкой школьной тетради, на лицевой стороне которой приводятся сведения по следующему образцу:

Кафедра физики

Контрольная работа № \_\_\_\_ по физике  
студента \_\_\_\_ курса Иванова Ивана Ивановича  
Учебный шифр № \_\_\_\_  
246028, г. Гомель, ул. Кожара, д. 27, кв. 15

3 Выполнять контрольные работы следует чернилами или шариковой ручкой. Для замечаний преподавателя на страницах тетради оставляют поля.

4 Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы. Вначале указывается номер задачи в соответствии с пособием. Условия задач переписываются полностью, без сокращений. Далее следует условие задачи в кратком виде и решение задачи.

5 Все решаемые задачи сопровождаются краткими, но исчерпывающими пояснениями, раскрывающими физический смысл употребляемых формул, и с обязательным выполнением основных правил решения задач.

6 В конце каждой контрольной работы студент-заочник должен указать название учебника или учебного пособия, которым он пользовался, автора и год издания, чтобы рецензент в случае необходимости мог конкретно указать, что следует студенту изучить для завершения контрольной работы.

7 Выполненные работы должны быть в указанный срок представлены на рецензирование. Если прорецензированная работа не зачтена, то в той же тетради нужно исправить ошибки, выполнить все требования преподавателя и в кратчайший срок сдать работу на повторное рецензирование. Работу над ошибками следует выполнять на оставшейся после первоначального решения задачи части листа (при этом должно быть понятно, где начинаются исправления); при отсутствии места для исправлений работу над ошибками можно выполнять в конце тетради или подклеить дополнительные листы. Исправления внутри первоначального текста решения задачи не допускаются!

**В случае невыполнения перечисленных требований контрольные работы рецензироваться не будут!**

8 На повторное рецензирование исправленные задачи представляются вместе с незачтенной работой.

9 Студент должен быть готов при защите контрольной работы дать пояснения по существу решения входящих в нее задач.

10 Студент допускается к экзаменационной сессии только при условии выполнения всех контрольных работ.

## **ВОПРОСЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПО РАЗДЕЛАМ ПРОГРАММЫ**

**Магнитное поле в вакууме.** Магнитное взаимодействие. Магнитное поле. Магнитная индукция. Силовые линии магнитного поля. Закон Био – Савара – Лапласа. Магнитное поле прямолинейного и кругового токов. Закон Ампера. Сила взаимодействия параллельных токов. Магнитный момент контура с током. Магнитное поле движущегося заряда. Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока для магнитного поля в вакууме. Магнитное поле соленоида и тороида.

**Движение заряженных частиц в магнитном и электрическом полях.** Сила Лоренца. Эффект Холла. Ускорение заряженных частиц. Масс-спектрометры.

**Магнитное поле в веществе.** Понятие об элементарных токах в веществе. Элементарный ток во внешнем магнитном поле. Намагниченность. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость. Напряженность магнитного поля. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетики и их свойства. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Природа ферромагнетизма.

**Электромагнитная индукция.** Поток вектора магнитной индукции. Потокосцепление. Работа по перемещению проводника с током и контура с током в магнитном поле. Опыты Фарадея. ЭДС электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Токи при размыкании и замыкании цепи. Индуктивность контура. Явление самоиндукции. Взаимная индукция. Трансформатор.

**Энергия магнитного поля.** Энергия магнитного поля соленоида. Плотность энергии магнитного поля.

**Основы теории Максвелла.** Обобщение закона электромагнитной индукции. Ток смещения. Уравнения Максвелла для произвольных полей.

## Рекомендуемая литература

### *Основная*

- 1 **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 т. / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т.2. – 496 с.
- 2 **Детлаф, А.А.** Курс физики / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М. : Высшая школа, 1989. – 608 с.
- 3 **Трофимова, Т.И.** Курс физики / Т.И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1990. – 478 с.
- 4 **Трофимова, Т.И.** Сборник задач по курсу физики / Т.И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1991. – 303 с.
- 5 **Чертов, А.Г.** Задачник по физике / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. – М. : Высшая школа, 1988. – 526 с.

### *Дополнительная*

- 6 **Волькенштейн, В.С.** Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1985. – 381 с.
- 7 **Калашников, С.Г.** Электричество / С.Г. Калашников. – М. : Высшая школа, 1964. – 668 с.
- 8 **Матвеев, А.Н.** Электричество и магнетизм / А.Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1983. – 463 с.
- 9 **Иродов, И.Е.** Задачи по общей физике / И.Е. Иродов. – М. : Наука, 1988. – 416 с.
- 10 **Савельев, И.В.** Сборник задач и вопросов по общей физике / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1988. – 288 с.
- 11 **Чертов, А.Г.** Физические величины / А.Г. Чертов. – М. : Высшая школа, 1990. – 315 с.
- 12 **Сена, Л.И.** Единицы физических величин и их размерности / Л.И. Сена. – М. : Наука, 1988. – 432 с.
- 13 **Физика : задания к практическим занятиям / под ред. Ж.П. Лагутиной.** – Минск : Вышэйшая школа, 1989. – 236 с.
- 14 **Сборник задач по физике / под ред. М.С. Цедрика.** – Минск : Вышэйшая школа, 1976. – 320 с.
- 15 **Фирганг, Е.В.** Руководство к решению задач по курсу общей физики / Е.В. Фирганг. – М. : Высшая школа, 1977. – 351 с.
- 16 **Кухлинг, Х.** Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М. : Мир, 1985. – 520 с.

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

**Закон Био – Савара – Лапласа** Элемент  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$  создает в некоторой точке пространства магнитное поле, магнитная индукция  $d\vec{B}$  которого определяется формулой

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3},$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;

$\mu$  – магнитная проницаемость среды;

$\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный от элемента  $d\vec{l}$  до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Модуль вектора

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

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

Направление вектора  $d\vec{B}$  перпендикулярно векторам  $\vec{r}$  и  $d\vec{l}$  и определяется правилом правого вита: направление вращения головки винта дает направление  $d\vec{B}$ , если поступательное движение винта соответствует направлению тока в проводнике.

Единица магнитной индукции – тесла (Тл).

Если магнитное поле создается несколькими проводниками с токами, то результирующее магнитное поле определяется как результат наложения полей от каждого проводника по принципу суперпозиции: магнитная индукция результирующего поля равна векторной сумме магнитных индукций складываемых полей, т.е.

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

В частном случае наложение двух полей

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

а модуль магнитной индукции

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2 \cos \alpha},$$

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

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

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

или в вакууме

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

Единица напряженности магнитного поля – ампер на метр (А/м).

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

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{r},$$

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),

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

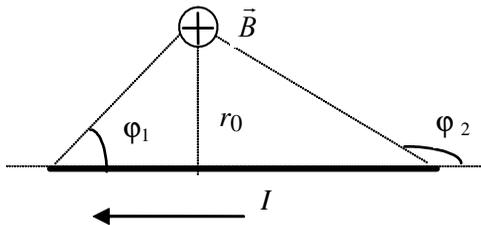


Рисунок 1

Магнитное поле точечного заряда  $q$ , свободно движущегося с нерелятивистской скоростью  $v$ ,

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

где  $\alpha$  – угол между вектором скорости и радиус-вектором;

$r$  – модуль радиус-вектора, проведённого от заряда к точке наблюдения.

**Закон Ампера.** Сила, действующая на элемент длины  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ ,

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \times \vec{B}].$$

Модуль силы Ампера

$$dF = IB dl \sin \alpha,$$

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

Направление силы Ампера устанавливается с помощью **правила левой руки**: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора индукции входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление действующей на отрезок проводника силы. Сила Ампера всегда перпендикулярна проводнику и вектору индукции магнитного поля.

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

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

где  $R$  – расстояние между проводниками;

$dl$  – длина отрезка проводника.

Два параллельных проводника с токами одинакового направления притягиваются, с токами противоположного направления – отталкиваются.

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

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}] \quad \text{или для модуля} \quad M = p_m B \sin \alpha,$$

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

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

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

$\alpha$  – угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{n}$ .

Сила Лоренца, действующая на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ ,

$$\vec{F} = q [\vec{v} \times \vec{B}] \quad \text{или для модуля} \quad F = |q| v B \sin \alpha ,$$

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

Сила Лоренца перпендикулярна векторам и ее направление определяется с помощью того же **правила левой руки**: если левую руку расположить так, чтобы составляющая вектора индукции, перпендикулярная скорости заряда, входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на  $90^\circ$  большой палец покажет направление действующей на заряд силы Лоренца.

Холловская поперечная разность потенциалов

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

где  $I$  – сила тока;

$B$  – магнитная индукция;

$d$  – толщина пластинки;

$n$  – концентрация носителей заряда.

**Закон полного тока для магнитного поля в вакууме** (теорема о циркуляции вектора магнитной индукции)

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

где  $d\vec{l}$  – вектор элементарной длины контура, направленный вдоль обхода контура;

$B_l$  – составляющая вектора магнитной индукции в направлении касательной контура  $L$  произвольной формы;

$\mu_0$  – магнитная постоянная;

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

Магнитная индукция поля внутри соленоида (в вакууме), имею-

щего  $N$  витков и длину  $l$ ,

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l}.$$

Магнитная индукция поля внутри тороида (в вакууме)

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

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  $dS$ .

Магнитный поток через плоский контур площадью  $S$  в случае:

а) неоднородного поля

$$\Phi_B = \int_S B_n dS;$$

б) однородного поля

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

где  $\alpha$  – угол между вектором нормали к плоскости контура и вектором магнитной индукции;

$B_n$  – проекция вектора магнитной индукции на нормаль.

Потокосцепление, т.е. полный магнитный поток, сцеплённый со всеми  $N$  витками соленоида или тороида,

$$\Psi = N\Phi_B,$$

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

Для соленоида

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

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды.

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

$$A = I \Delta \Phi_B,$$

где  $\Delta \Phi_B$  – магнитный поток, пересечённый движущимся проводником.

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле

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

где  $I$  – сила тока в контуре;

$\Delta \Psi$  – изменение потокосцепления контура.

Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)

$$\varepsilon_i = - N \frac{d \Phi_B}{d t} = - \frac{d \Psi}{d t} ,$$

где  $\varepsilon_i$  – ЭДС индукции;

$N$  – число витков контура.

Частные случаи применения закона электромагнитной индукции:

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

$$\varepsilon_i = B N S \sin \omega t ;$$

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

$$U = B l v \sin \alpha ,$$

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

Количество электричества  $q$ , протекающего в контуре,

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

где  $\Delta \Psi$  – изменение потокосцепления;

$R$  – сопротивление контура.

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

$$\varepsilon_s = - L \frac{d I}{d t} ,$$

где  $L$  – индуктивность контура.

Потокосцепление контура индуктивностью  $L$  с током  $I$

$$\Psi = LI.$$

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 предварительно использовать, график зависимости магнитной индукции  $B$  поля в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля  $H$  (рисунок 2), а затем воспользоваться формулой

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

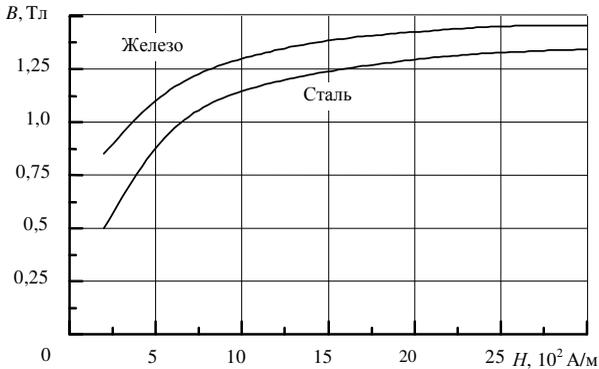


Рисунок 2

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

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

где  $I_0$  – сила тока в цепи при  $t = 0$ ;

$R$  – активное сопротивление цепи;

$L$  – индуктивность цепи;

$\varepsilon$  – ЭДС источника тока.

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

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

Объёмная плотность энергии однородного магнитного поля

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

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.

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 в единице объёма вещества.

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** (теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля в веществе):

$$\oint_L \vec{H} dl = I,$$

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

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 4

**Пример 1** Три длинных параллельных проводника с токами силой по  $5\text{ А}$  в каждом пересекают перпендикулярную к ним плоскость в точках, являющихся вершинами правильного треугольника со стороной  $0,1\text{ м}$ . 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.

Дано:

$I = 5\text{ А},$   
 $d = 0,1\text{ м}.$   
 $B - ?$

Решение.

Магнитная индукция в центре  $\triangle ACD$  (рисунок 3) по принципу суперпозиции равна в этой точке векторной сумме индукций магнитных полей, создаваемых каждым из токов по-отдельности:

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

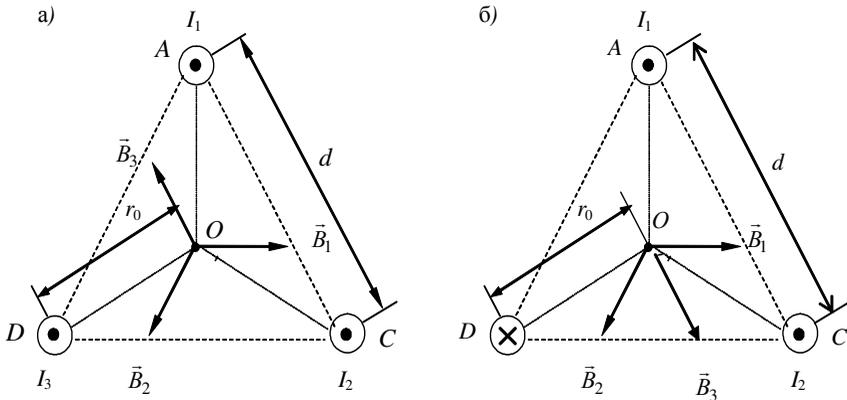


Рисунок 3

Векторы  $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3$  перпендикулярны соответственно к отрезкам  $AO, CO, DO$ , и их направления определяются по правилу правого винта. Так как силы токов равны, а рассматриваемая точка расположена симметрично относительно провод-

ников, то модули индукций также равны между собой:

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

где  $r_0 = \frac{AC}{2 \cos 30^\circ} = \frac{d}{\sqrt{3}}$  – расстояние от центра до проводников.

Если токи  $I_1, I_2, I_3$  одинаково направлены (например, как показано на рисунке 3,а), то 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 ( $B = 0$ ).

Если токи направлены, как показано на рисунке 3,б), то 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:

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

Проверим размерность полученной формулы:

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

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

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

О т в е т:  $B = 3,46 \cdot 10^{-5}$  Тл.

**Пример 2** 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.

Дано:  
 $l = 100 \text{ см} = 0,1 \text{ м},$   
 $I = 10 \text{ А},$   
 $r_0 = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}.$   
 $B = ?$

Решение.  
 Магнитное поле в точке пространства создается отрезком проводника с током (рисунок 4). Согласно

закону Био – Савара – Лапласа модуль вектора  $\vec{B}$  от элемента  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$  в точке, положение которой определяется радиус-вектором  $\vec{r}$ , вычисляется по формуле

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

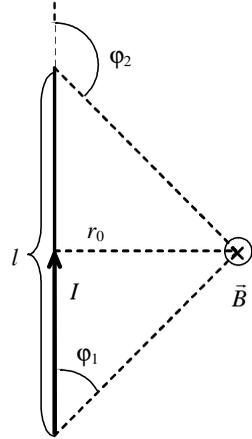


Рисунок 4

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

Интегрирование этой формулы (в соответствии с принципом суперпозиции) по всем элементам  $d\vec{l}$  отрезка проводника приводит к следующему соотношению для модуля вектора индукции магнитного поля, создаваемого всем проводником:

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

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между векторами, соединяющими концы отрезка провода с точкой  $A$ , и направлением провода. 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  $\cos \varphi_1 = 0,707$ , а  $\cos \varphi_2 = -0,707$ .

Проверка единиц аналогична примеру 1.

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

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10}{4\pi \cdot 0,5} (0,707 + 0,707) = 2,82 \cdot 10^{-6} \text{ Тл}.$$

О т в е т:  $B = 2,86 \cdot 10^{-6}$  Тл.

**Пример 3** Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом (рисунок 5). По проводу течет ток  $I = 100$  А. Какова магнитная индукция  $B$  в точке  $A$ , если  $r = 1$  м?

Д а н о:  
 $I = 100$  А,  
 $r = 1$  м.  
 $B = ?$

Р е ш е н и е .

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 I и II, бесконечных с одной стороны и ограниченных с другой стороны изломом:

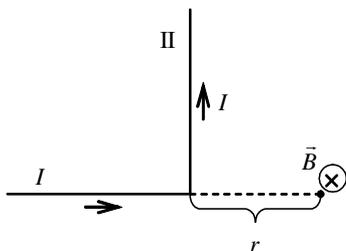


Рисунок 5

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

Согласно закону Био – Савара – Лапласа модуль вектора  $\vec{B}$  от элемента  $d\vec{l}$  проводника с током  $I$  вычисляется по формуле

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

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

Для отрезка проводника в результате интегрирования этой формулы получим:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi r} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (5)$$

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

В точке  $A$  магнитная индукция поля, создаваемого отрезком  $I$ ,  $B_1 = 0$ , т.к. для каждого элемента  $dl$  этого отрезка по формуле (4)  $dB = 0$ .

Магнитную индукцию поля  $B_2$  в точке  $A$ , создаваемого от-

резком II, определяем по формуле (5). В этом случае  $\varphi_1 = 90^\circ$  и  $\varphi_2 = 180^\circ$ , соответственно  $\cos\varphi_1 = 0$ , а  $\cos\varphi_2 = -1$ .

Таким образом,

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

Проверим размерность полученной формулы:

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

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

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

О т в е т:  $B = 10^{-5}$  Тл.

**Пример 4** 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  $c = 10$  см, а ток в ней сонаправлен току  $I$ .

Д а н о:

$$\begin{array}{l} I = 6 \text{ А,} \\ a = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м,} \\ b = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м,} \\ I_1 = 1 \text{ А,} \\ c = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м.} \\ \hline F_1 - ? \quad F_2 - ? \\ F_3 - ? \quad F_4 - ? \end{array}$$

Р е ш е н и е.

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

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi r}, \quad (6)$$

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  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$ ,  $\vec{F}_3$  и  $\vec{F}_4$ , направленные, согласно правилу «левой руки», как показано на рисунке 6.

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

$$d\vec{F} = I_1 [d\vec{l} \times \vec{B}], \quad (7)$$

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 (7) для модуля силы можно записать в виде

$$dF = IBdl,$$

где  $dl$  – длина элемента стороны рамки.

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

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

С учетом формулы (6), а также того, что диэлектрическая проницаемость воздуха  $\epsilon = 1$  и в данном случае  $r = c$ , получим:

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

Аналогично для стороны рамки III ( $r = c + b$ ), поэтому

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

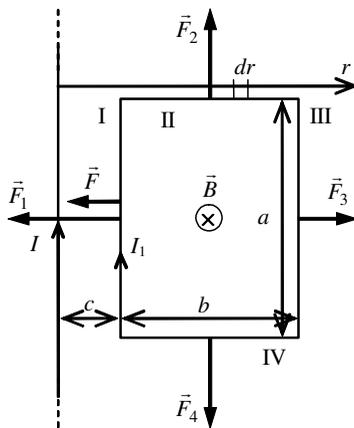


Рисунок 6

Сила  $F_2$ , действующая на сторону II 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  $c$  до  $c + b$ . Так как все векторы  $d\vec{F}$  направлены одинаково, то принцип суперпозиции сводится к интегрированию модулей сил:

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

Сила  $F_4$ , действующая на сторону IV рамки, по величине равна силе  $F_2$ , т.к. каждому элементу  $d\vec{l}$  стороны IV соответствует аналогичный элемент стороны II, 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:

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

Подставим в формулы численные значения и произведем расчет:

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

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

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

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

**Пример 5** Проводник длиной  $l = 1 \text{ м}$ , по которому течет ток силой  $I = 2 \text{ А}$ , согнут в форме полукольца и расположен в плоскости, перпендикулярной к направлению индукции маг-

нитного поля. Найти силу, действующую на этот проводник в магнитном поле с индукцией  $B = 10^{-5}$  Тл.

Р е ш е н и е.

Д а н о:  
 $l = 1$  м,  
 $I = 2$  А,  
 $B = 10^{-5}$  Тл,  
 $\varphi = 90^\circ$   


---

 $F = ?$

На элемент проводника с током  $d\vec{l}$ , помещенный в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ , действует сила, которую определяют по закону Ампера:

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}].$$

В данном случае угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{B}$  равен  $\pi/2$ , и эту формулу (8) для модуля силы можно записать в виде

$$dF = IBdl. \quad (8)$$

Силы, действующие на каждый элемент проводника с током, направлены по радиусам полукольца и лежат в одной плоскости. Выбрав координатные оси, как показано на рисунке 7, найдем проекции сил:

$$dF_x = dF \sin \alpha;$$

$$dF_y = dF \cos \alpha.$$

Результирующая сила, действующая на все элементы полукольца, в силу симметрии будет направлена вдоль оси Oy, значит

$$F = F_y = \int_l dF \cos \alpha.$$

Подставив сюда (8), получим

$$F = \int_l IBdl \cos \alpha. \quad (9)$$

Элемент дуги  $dl = R d\alpha = l d\alpha / \pi$ , а угол  $\alpha$  изменяется от  $-\pi/2$  до  $\pi/2$ . Тогда из (9) следует

$$F = \frac{IBl}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \alpha d\alpha = \frac{2IBl}{\pi}.$$

Размерность полученной величины очевидна, т.к. формула

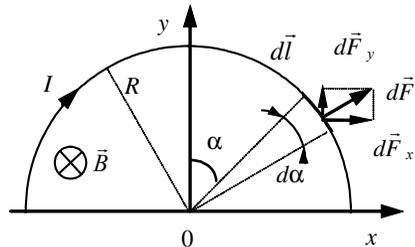


Рисунок 7

по структуре совпадает с формулой закона Ампера.

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$F = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 1}{3,14} = 1,27 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$

О т в е т:  $F = 1,27 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$

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

Д а н о:  
 $r = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м},$   
 $M_{\max} = 6,5 \text{ мкН}\cdot\text{м} =$   
 $= 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м},$   
 $I = 2 \text{ А.}$ 

---

 $B - ?$

Р е ш е н и е.  
Индукцию магнитного поля можно определить из выражения механического момента, действующего на виток с током,

$$M = p_{\max} B \sin \alpha.$$

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

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

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

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

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:

$$B = \frac{6,5 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 2} = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

О т в е т:  $B = 104 \text{ мкТл.}$

**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.

Д а н о:  
 $a = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$ ,  
 $I = 100 \text{ А}$ ,  
 $B = 1 \text{ Тл}$ ,  
 $\varphi = 90^\circ$ .  


---

 $A - ?$

Р е ш е н и е.

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

$$M = p_m B \sin \varphi, \quad (10)$$

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 (10), будет стремиться возратить 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

$$dA = M d\varphi.$$

Подставив выражение (10) 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:

$$A = IBa^2 \int_0^{\pi/2} \sin \varphi d\varphi = IBa^2 (-\cos \varphi) \Big|_0^{\pi/2} = IBa^2. \quad (11)$$

Убедимся, что правая часть равенства (11) дает единицу работы:

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

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

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

О т в е т:  $A = 1 \text{ Дж}$ .

**Пример 8** 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.

Д а н о:

$$l = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м},$$

$$v = 5 \text{ м/с},$$

$$B = 0,1 \text{ Тл},$$

$$I = 50 \text{ А}.$$

$$A - ?$$

Р е ш е н и е

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

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

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  $l$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  равен  $\pi/2$ , то модуль силы Ампера, действующую на весь проводник длиной  $l$ , можно определить по формуле

$$F = IBl.$$

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

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{Fds}{dt} = F\mathbf{v} = IBl\mathbf{v} .$$

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:

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

О т в е т:  $P = 5 \text{ Вт}$ .

**Пример 9** Электрон, пройдя ускоряющее напряжение  $U = 900 \text{ В}$ , влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 1 \text{ мТл}$  под углом  $\alpha = 60^\circ$  к линиям индукции. Определить траекторию движения электрона.

Д а н о:

$$U = 900 \text{ В},$$

$$B = 1 \text{ мТл} = 1 \cdot 10^3 \text{ Тл},$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$R - ? \quad h = ?$$

Р е ш е н и е.

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

Модуль этой силы для электрона

$$F = e\mathbf{v}B \sin \alpha ,$$

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

Движение электрона удобно представить как наложение двух движений: 1) со скоростью  $v_1 = v \sin \alpha$  перпендикулярно вектору  $\vec{B}$ ; 2) со скоростью  $v_2 = v \cos \alpha$  параллельно этому вектору (рисунок 8). 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 ли-

нии.

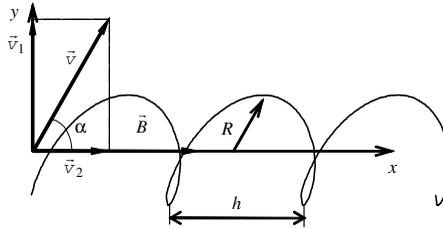


Рисунок 8

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. Электрон будет двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, со скоростью, равной  $v_1$ .

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

$$F = e v_1 B = \frac{m v_1^2}{R}.$$

Из этой формулы найдем радиус винтовой линии:

$$R = \frac{m v \sin \alpha}{e B}.$$

Входящую в это выражение скорость выразим через конечную (после ускорения в электрическом поле) кинетическую энергию электрона  $W_k$ , которая по одноименной теореме 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:

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

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

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

О т в е т:  $R = 8,8 \cdot \text{см}$ ,  $h = 32 \text{ см}$ .

**Пример 10** Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $105 \text{ В}$  и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое и магнитное поля. Напряженность электрического поля  $20 \text{ кВ/м}$ , индукция магнитного поля  $0,1 \text{ Тл}$ . Найти отношение заряда частицы к ее массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории.

Д а н о:

$$U = 105 \text{ В},$$

$$E = 20 \text{ кВ/м},$$

$$B = 0,1 \text{ Тл},$$


---


$$\frac{q}{m} - ?$$

Р е ш е н и е.

Заряженная частица, прошедшая ускоряющую разность потенциалов, приобретает кинетическую энергию, равную по одноименной теореме (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 для движения под прямым углом к магнитному полю формулой  $F_{\text{Л}} = qvB$ .

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:

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

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:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{q}{m} \right] &= \frac{1}{B} \left( \frac{V}{m} \frac{1}{Tл} \right)^2 = B \left( \frac{1}{m} \frac{A \cdot m}{H} \right)^2 = \frac{Дж \cdot A^2}{Кл} \left( \frac{c^2}{кг \cdot м} \right)^2 = \\ &= \frac{Кл^2}{c^2} \frac{кг \cdot м^2}{Кл \cdot c^2} \frac{c^4}{кг^2 \cdot м^2} = \frac{Кл}{кг}. \end{aligned}$$

Подставим численные значения и произведем расчет:

$$\frac{q}{m} = \frac{1}{2 \cdot 10^5} \left( \frac{20 \cdot 10^3}{0,1} \right)^2 = 1,9 \cdot 10^8 \frac{Кл}{кг}.$$

О т в е т:  $\frac{q}{m} = 1,9 \cdot 10^8 \frac{Кл}{кг}.$

**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*

*$E_B = 0,75 \text{ мВ/м}$ . Плотность натрия  $\rho = 0,97 \text{ г/см}^3$ .*

Д а н о:

$$\begin{aligned} j &= 150 \text{ А/см}^2 = \\ &= 1,5 \cdot 10^6 \text{ А/ м}^2, \\ E_B &= 0,75 \text{ мВ/м} = \\ &= 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ В/м}, \\ B &= 2 \text{ Тл}. \end{aligned}$$

$n - ?$

$I$  – сила тока;

Р е ш е н и е.

Для Холловской разности потенциалов справедлива формула:

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

где  $e$  – заряд электрона;

$B$  – магнитная индукция;

$d$  – толщина пластинки.

Откуда следует выражение для концентрации:

$$n = \frac{IB}{e\Delta\varphi d}.$$

Для однородных стационарных полей  $E_B = \frac{\Delta\varphi}{a}$ ,

где  $a$  – ширина пластинки.

С учетом того, что плотность тока  $j = \frac{I}{S} = \frac{I}{ad}$ , получим:

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

Проверим размерность полученной величины:

$$[n] = \frac{\text{А Тл м}}{\text{м}^2 \text{ Кл В}} = \frac{\text{А}}{\text{м} \cdot \text{Кл}} \frac{\text{Н Кл}}{\text{А} \cdot \text{м Дж}} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} = \frac{1}{\text{м}^3}.$$

Подставим численные значения и произведем расчет:

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

О т в е т:  $n = 2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

**Пример 12** 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.

Д а н о:  
 $I_1 = 10 \text{ А}$ ,  
 $I_2 = 15 \text{ А}$ ,  
 $I_3 = 20 \text{ А}$ .

Р е ш е н и е.

Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции (иначе закон полного тока для вакуума) выражается формулой

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} - ? \quad \left| \quad \oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k ,\right.$$

где интеграл в левой части получил название циркуляции вектора магнитной индукции;

$d\vec{l}$  – вектор элементарной длины контура, направленный вдоль обхода контура;

$B_l$  – составляющая вектора магнитной индукции в направлении касательной контура  $L$  произвольной формы;

$\mu_0$  – магнитная постоянная; в правой части стоит алгебраическая сумма  $N$  токов, охватываемых контуром.

В этой сумме ток берется положительным, если его направление совпадает с направлением обхода контура, и отрицательным – в обратном случае. В нашей задаче  $N = 3$  (три тока).

Тогда  $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0(I_1 + I_2 - I_3)$  Ток  $I_3$  берется со знаком минус,

т.к. его направление противоположно токам  $I_1$  и  $I_2$ .

Проверим размерность полученной величины:

$$\left[ \oint_L \vec{B} d\vec{l} \right] = \text{Тл} \cdot \text{м}, \quad [\mu_0 I] = \frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot \text{А} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Тл} \cdot \text{м}.$$

Единицы обеих частей совпадают.

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} (10 + 15 - 20) = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{м}.$$

О т в е т:  $\oint_L \vec{B} d\vec{l} = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ Тл} \cdot \text{м}.$

**Пример 13** Пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $B$ , определить индукцию  $B$  и напряженность  $H$  магнитного поля на оси тороида без сердечника, по обмотке которого, содержащей 1000 витков, протекает ток силой 1 А. Внешний диаметр тороида равен 60 см, внутренний – 40 см (рисунок 9).

Д а н о:

$$N = 1000,$$

$$I = 1 \text{ А},$$

$$D_1 = 60 \text{ см} = 0,6 \text{ м},$$

$$D_2 = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м}.$$

$$B - ? \quad H - ?$$

### Р е ш е н и е.

Так же как и в задаче предыдущего примера, применим закон полного тока для магнитного поля в вакууме. Тогда циркуляция вектора магнитной индукции:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k. \quad (12)$$

Контур  $L$ , по которому происходит циркуляция вектора  $\vec{B}$ , представляет собой окружность радиуса  $r = D/2$ , где средний диаметр равен  $D = \frac{D_1 + D_2}{2}$ . Отсюда  $r = \frac{D_1 + D_2}{4}$ .

Этот контур охватывает  $N$  токов (по числу витков в катушке). Тогда формула (12) примет вид

$$\oint_L B_l dl = \mu_0 NI. \quad (13)$$

Произведем интегрирование ее левой части. Рассматриваемый контур совпадает с силовой линией магнитного поля, поэтому и в силу симметрии  $B_l = B = \text{const}$  в точках контура. Его длина:  $L = 2\pi r$ .

Тогда формула (13) примет вид:  $B2\pi r = \mu_0 NI$ . Выразим отсюда магнитную индукцию (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

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

В данной задаче проще изменить порядок расчетов:

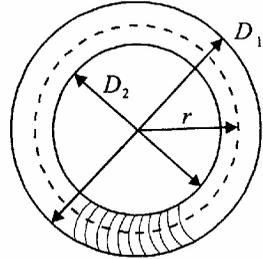


Рисунок 9

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

Проверим размерности полученных величин:

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

Подставим в формулы численные значения и произведем расчет:

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

О т в е т:  $B = 8 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}; \quad H = 637 \frac{\text{А}}{\text{м}} .$

**Пример 14** Железный сердечник находится в однородном магнитном поле напряженностью  $H = 5 \text{ кА/м}$ . Определить индукцию  $B$  магнитного поля в сердечнике и магнитную проницаемость  $\mu$  железа.

Д а н о:  
 $H = 5 \text{ кА/м}$ .  
 $B - ? \mu - ?$

Р е ш е н и е .

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:  $B = \mu_0 \mu H$ , откуда следует

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

Величину индукции магнитного поля  $B$  найдем из графика на рисунке 2. Для железа при  $H = 5 \text{ кА/м}$ ,  $B = 1,1 \text{ Тл}$ .

Проверим единицу полученной величины:

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

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$\mu = \frac{1,1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^3} = 1,7 \cdot 10^2.$$

О т в е т:  $B = 1,1$  Тл;  $\mu = 1,7 \cdot 10^2$ .

**Пример 15** Плоский контур площадью  $S = 25 \text{ см}^2$  находится в магнитном поле с индукцией  $B = 0,01$  Тл. Определить магнитный поток, пронизывающий контур, если его плоскость составляет угол  $60^\circ$  с линиями индукции.

Д а н о:  
 $S = 25 \text{ см}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ,  
 $B = 0,01$  Тл,  
 $\alpha = 60^\circ$

---

$\Phi - ?$

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

где  $\varphi$  – угол между вектором индукции магнитного поля и нормалью к поверхности контура.

Согласно условию  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha$ , поэтому  $\cos \varphi = \sin \alpha$ . Окончательно получим:

$$\Phi_B = BS \sin \alpha.$$

Размерность магнитного потока очевидна.

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

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

О т в е т:  $\Phi_B = 0,22$  мкВб.

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

стержня возникает разность потенциалов  $0,1 \text{ В}$ .

Д а н о:  
 $B = 0,1 \text{ Тл}$ ,  
 $l = 1 \text{ м}$ ,  
 $U = 0,1 \text{ В}$ .  

---

 $\omega = ?$

Р е ш е н и е.

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 формулы можно преобразовать:

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

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:

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

О т в е т:  $\omega = 2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$

**Пример 17** В плоскости квадратной рамки с сопротивлением  $R = 7 \text{ Ом}$  и стороной  $a = 20 \text{ см}$  расположен на расстоянии  $r_0 = 20 \text{ см}$  от нее прямой бесконечный проводник (рисунок 10). Проводник параллелен одной из сторон рамки. Сила тока в проводнике изменяется по закону  $I = \alpha t^3$ , где  $\alpha = 2 \text{ А/с}^3$ . Определить силу тока в рамке в момент времени  $10 \text{ с}$ .

Д а н о:

$$\begin{aligned} R &= 7 \text{ Ом}, \\ a &= 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}, \\ r_0 &= 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}, \\ I &= \alpha t^3, \\ \alpha &= 2 \text{ А/с}^3, \\ t &= 10 \text{ с}. \end{aligned}$$


---


$$I_1 - ?$$

Р е ш е н и е.

Вследствие изменения силы тока в проводнике магнитный поток через рамку изменяется и в ней возникает индукционный ток. Рамка находится в неоднородном магнитном поле. Для расчета магнитного потока разделим площадь рамки на столь узкие полоски (см. рисунок 10), чтобы в пределах каждой из них магнитное поле можно было считать однородным.

На основании свойств магнитного поля (для всех точек поверхности рамки вектор индукции перпендикулярен ей), и на основании формулы для поля бесконечного прямолинейного проводника формула для элементарного магнитного потока через узкую полоску примет вид

$$d\Phi = B a dx = \frac{\mu_0 I a dx}{2\pi x},$$

где  $dx$  – ширина полоски;  
 $x$  – расстояние от нее до бесконечного проводника.

Интегрируя это уравнение по  $x$  в пределах от  $r_0$  до  $r_0 + a$ , находим поток через всю рамку:

$$\Phi = \frac{\mu_0 I a}{2\pi} \int_{r_0}^{r_0+a} \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 a \alpha t^2}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{a}{r_0}\right).$$

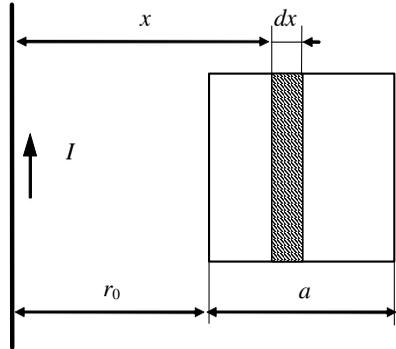


Рисунок 10

По закону Фарадея определяем ЭДС индукции (по модулю)

$$\mathcal{E}_i = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{3\mu_0 a \alpha t^2}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{a}{r_0}\right),$$

а из закона Ома – силу тока:

$$I = \frac{3\mu_0 a \alpha t^2}{2\pi R} \ln\left(1 + \frac{a}{r_0}\right)$$

Проверим размерность полученной величины:

$$[I] = \frac{\frac{\text{Гн}}{\text{м}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{Ом}} \cdot \frac{\text{А} \cdot \text{с}^2}{\text{с}^3}}{\frac{\text{Вб}}{\text{А}} \cdot \frac{\text{А}}{\text{В}} \cdot \frac{\text{с}}{\text{В}}} = \frac{\text{В}}{\text{В}} \text{А} = \text{А}.$$

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$I = \frac{3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,2 \cdot 2 \cdot 10^2}{2\pi \cdot 7} \ln\left(1 + \frac{0,2}{0,2}\right) = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

О т в е т:  $I = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$

**Пример 18** Соленоид без сердечника с однослойной обмоткой из проволоки диаметром  $d = 0,4 \text{ мм}$  имеет длину  $l = 0,5 \text{ м}$  и площадь поперечного сечения  $S = 60 \text{ см}^2$ . За какое время при напряжении  $U = 10 \text{ В}$  и силе тока  $I = 1,5 \text{ А}$  в обмотке выде-

лится количество теплоты, равное энергии поля внутри соленоида? Поле считать однородным.

Д а н о:  
 $d = 0,4 \text{ мм} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ,  
 $l = 0,5 \text{ м}$ ,  
 $S = 60 \text{ см}^2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ,  
 $U = 10 \text{ В}$ ,  
 $I = 1,5 \text{ А}$ ,  
 $Q = W$ .

---

$t - ?$

Р е ш е н и е.

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

$$Q = UI t. \quad (14)$$

Энергия поля внутри соленоида

$$W = wV = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} V = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} l S, \quad (15)$$

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

$$H = \frac{NI}{l}, \quad (16)$$

где  $N$  – общее число витков в соленоиде.

Подставим (16) в (15), и согласно условию приравняем полученное соотношение с (1). В результате получим:

$$UI t = \frac{\mu_0 \mu}{2} \left( \frac{NI}{l} \right)^2 l S,$$

откуда следует выражение для искомого времени

$$t = \frac{\mu_0 \mu N^2 l S}{2UI}. \quad (17)$$

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  $N = \frac{l}{d}$ . Подставив это выражение в (17), получим:

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

Проверим размерность полученной величины:

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

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

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

О т в е т:  $t = 1,8 \text{ мс}$ .

**Пример 19** *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.*

Д а н о:

$l = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$ ,  
 $\varepsilon = 0,8 \text{ В}$ ,  
 $B = 1 \text{ Тл}$ ,  
 $v = 2 \text{ м/с}$ ,  
 $R = 0,2 \text{ Ом}$ .

$\varepsilon_i = ?$   $I = ?$

Р е ш е н и е .

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 противоположна ЭДС источника.

Эквивалентная электрическая схема приведена на ри-

сунке 11,б.

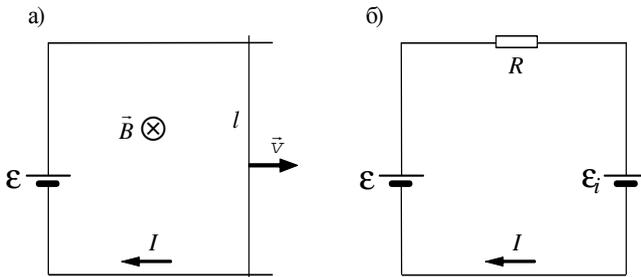


Рисунок 11

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

$$IR = \mathcal{E} - \mathcal{E}_i \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_i}{R} = \frac{\mathcal{E} - Blv}{R}.$$

Если  $\mathcal{E} < Blv$ , то направление электрического тока сменится на противоположное, а величина его силы будет определяться модулем этого выражения. Если направление магнитного поля противоположно указанному на рисунке 11,а, то изменится направление ЭДС индукции и конечное выражение для силы тока примет вид:

$$I = \frac{\mathcal{E} + Blv}{R}.$$

Проведем вычисления:

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

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

О т в е т:  $\mathcal{E}_i = 0,4 \text{ В}$ ;  $I = 2 \text{ А}$  или  $I = 6 \text{ А}$ .

**Пример 20** 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  $\mu$  железа, а также намагниченность  $J$  при значениях силы тока в обмотке тороида  $I_1 = 0,5 \text{ А}$  и  $I_2 = 5 \text{ А}$ .

Д а н о:

$d = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$ ,  
 $N = 400$ ,  
 $I_1 = 0,5 \text{ А}$ ,  
 $I_2 = 5 \text{ А}$ .

$H_1 - ? H_2 - ?$   
 $B_1 - ? B_2 - ?$   
 $\mu_1 - ? \mu_2 - ?$   
 $J_1 - ? J_2 - ?$

Р е ш е н и е.

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

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_L H_i dl = \sum_{i=1}^N I_i.$$

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 (рисунок 12), 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.

Найдем отсюда напряженность магнитного поля внутри тороида:

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

Отсюда после расчета получим два значения напряженности  $H_1 = 255 \text{ А/м}$ ,  $H_2 = 2550 \text{ А/м}$ .

Далее, используя график на рисунке 2, определим индукции магнитного поля для железа:

$B_1 = 0,9 \text{ Тл}$ ,  $B_2 = 1,45 \text{ Тл}$ .

Для однородного и изотропного магнетика магнитная проницаемость находится по формуле

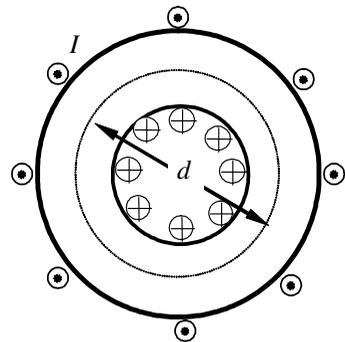


Рисунок 12

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

После расчетов получим:  $\mu_1 \approx 2800$ ,  $\mu_2 \approx 450$ .

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

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

Результаты расчетов:  $J_1 \approx 7,1 \cdot 10^5$  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.

О т в е т:  $H_1 = 255$  А/м,  $H_2 = 2550$  А/м,  $B_1 = 0,9$  Тл,  $B_2 = 1,45$  Тл,  $\mu_1 \approx 2800$ ,  $\mu_2 \approx 450$ ,  $J_1 \approx 7,1 \cdot 10^5$  А/м,  $J_2 \approx 1,1 \cdot 10^6$  А/м.

**Пример 21** *Обмотка тороида, имеющая стальной сердечник с воздушным зазором шириной  $l_0 = 3$  мм, содержит 1000 витков на метр длины. Средний диаметр тороида  $d = 30$  см. При какой силе тока  $I$  в обмотке тороида индукция магнитного поля в зазоре равна  $B_0 = 1$  Тл (рисунок 13)?*

Д а н о:  
 $l_0 = 3$  мм =  $3 \cdot 10^{-3}$  м,  
 $n = 1000$  м<sup>-1</sup>,  
 $d = 30$  см =  $0,3$  м,  
 $B_0 = 1$  Тл.  


---

 $I - ?$

Р е ш е н и е.  
 Циркуляция вектора напряженности магнитного поля по произвольному замкнутому контуру  $L$  (закон полного тока для магнитного поля в веществе):

$$\oint_L H_i dl = \sum_{i=1}^N I_i.$$

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:

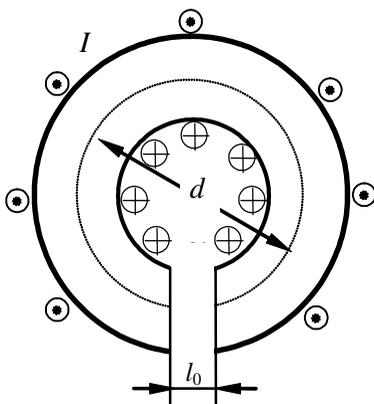


Рисунок 13

$$H(\pi d - l_0) + H_0 l_0 = IN = I\pi d n, \quad (18)$$

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

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

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0}. \quad (19)$$

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 (см. рисунок 2) определяем напряженность магнитного поля в сердечнике  $H = 700$  А/м. Из (18), с учетом (19) 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 правого слагаемого:

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

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

$$I = \frac{700}{1000} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 1000} \approx 3,2 \text{ А}.$$

О т в е т:  $I \approx 3,2 \text{ А}$ .

**Пример 22** На круглый деревянный цилиндр намотан один слой медной проволоки, масса которой  $m = 50 \text{ г}$ . Длина цилиндра равна  $l_0 = 60 \text{ см}$  и много больше его диаметра. Сопротивление обмотки  $R = 30 \text{ Ом}$ . Определить энергию магнитного поля катушки, если она подключена к источнику тока с ЭДС  $\varepsilon = 62 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $r = 1 \text{ Ом}$ .

Д а н о:

$m = 50 \text{ г}$ ,  
 $l_0 = 60 \text{ см} = 0,6 \text{ м}$ ,  
 $R = 30 \text{ Ом}$ ,  
 $\varepsilon = 62 \text{ В}$ ,  
 $r = 1 \text{ Ом}$ ,  
 $D = 8,93 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  
 $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

$W - ?$

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:

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

где  $N = \frac{l}{2\pi a}$  – число витков;

$S = \pi a^2$  – площадь поперечного сечения соленоида;

$a$  – радиус витка;

$l$  – длина провода, т. е. суммарная длина  $N$  витков, каждого длиной  $2\pi a$ .

Длину провода  $l$  найдем из следующих соотношений: масса проволоки  $m = DV = D l S_0$ ,

где  $V$  – объем проволоки;

$D$  – плотность меди (обозначено  $D$ , чтобы не путать в дальнейшем с удельным сопротивлением  $\rho$ );

$S_0$  – площадь поперечного сечения провода.

Сопротивление проволоки  $R = \rho l / S_0$ . Исключая из этих соотношений  $S_0$ , получим

$$l = \sqrt{\frac{mR}{D\rho}}.$$

Тогда число витков  $N = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{mR}{D\rho}}$ .

Следовательно,

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

Выразим силу тока в цепи по закону Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

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

$$W = \frac{LI^2}{2} = \mu_0\mu \frac{mR}{8\pi D\rho l_0} \left( \frac{\mathcal{E}}{R + r} \right)^2.$$

Проверим размерность полученной величины:

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

Подставим в формулу численные значения и произведем расчет:

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

О т в е т:  $W = 3,3$  мДж.

## ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 4

4.1 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?

4.2 Найти величину тока в проводнике, который изогнут в виде квадрата со стороной квадрата 40 см, если индукция магнитного поля в точке, расположенной в центре квадрата, равна 65 мкТл.

4.3 Определить индукцию магнитного поля в центре квадрата со стороной 10 см, по которому течет ток 20 А.

4.4 Определить индукцию магнитного поля в точке, находящейся на продолжении одной из сторон прямого угла, образованного бесконечно длинным проводником, по которому течет ток 15 А, на расстоянии 10 см от вершины угла.

4.5 Ток 10 А течет по бесконечно длинному проводнику, согнутому под углом  $90^\circ$ . Найти индукцию магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе угла на расстоянии 0,2 м от вершины.

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

4.7 Определить индукцию  $B$  магнитного поля, создаваемого отрезком прямого провода, в точке, равноудаленной от концов отрезка и находящейся на расстоянии  $R = 4$  см от его середины. Длина отрезка  $l = 20$  см, а сила тока в проводе  $I = 10$  А.

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

4.9 По двум параллельным бесконечно длинным прямым проводникам, находящимся на расстоянии  $AB = 10$  см друг от друга в вакууме, текут токи  $I_1 = 20$  А и  $I_2 = 30$  А одинакового направления. Определить индукцию  $B$  магнитного поля в точках, расположенных на прямой, соединяющей оба проводника, если: 1) точка  $C$  лежит на расстоянии  $r_1 = 2$  см левее левого провода; 2) точка  $D$  лежит на рас-

стоянии  $r_2 = 3$  см правее правого провода; 3) точка  $G$  лежит на расстоянии  $r_3 = 4$  см правее левого провода.

4.10 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. Найти индукцию магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии  $r_1 = 12$  см от первого и  $r_2 = 16$  см от второго проводника.

4.11 По двум параллельным бесконечно длинным прямым проводникам, находящимся на расстоянии  $d = 15$  см друг от друга, текут токи  $I_1 = 70$  А и  $I_2 = 50$  А противоположного направления. Определить индукцию магнитного поля в точке, расположенной посередине между проводниками. Чему равна индукция магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии  $r_1 = 20$  см от одного и  $r_2 = 30$  см от другого проводника?

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

4.13 Определить индукцию магнитного поля на оси тонкого проводочного кольца радиусом  $R = 10$  см, в точке, расположенной на расстоянии  $d = 20$  см от центра кольца, если индукция в центре кольца  $B = 50$  мкТл.

4.14 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.

4.15 Два бесконечно длинных прямых провода скрещены под прямым углом (рисунок 14). По проводам текут токи силой  $I_1 = 80$  А и  $I_2 = 60$  А. Расстояние между проводами  $d = 10$  см. Определить магнитную индукцию  $B$  в точке  $A$ , одинаково удаленной от обоих проводников.

4.16 По двум бесконечно длинным прямым проводам, скрещенным под прямым углом (см. рисунок 14), текут токи  $I_1 = 30$  А и  $I_2 = 40$  А. Расстояние между проводами  $d = 20$  см. Определить маг-

нитную индукцию  $B$  в точке  $C$ , одинаково удаленной от обоих проводников на расстояние, равное  $d$ .

4.17 Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом (рисунок 15). По проводу течет ток  $I = 20$  А. Какова магнитная индукция  $B$  в точке  $A$ , если  $r = 5$  см?

4.18 Бесконечно длинный прямой провод имеет изгиб (рисунок 16). По проводу течет ток  $I = 100$  А. Какова магнитная индукция  $B$  в точке  $O$ , если  $r = 10$  см?

4.19 Бесконечно длинный прямой провод согнут под прямым углом. По проводу течет ток  $I = 100$  А. Вычислить магнитную индукцию  $B$  в точках, лежащих на биссектрисе угла и удаленных от вершины угла на одинаковом расстоянии  $a = 10$  см.

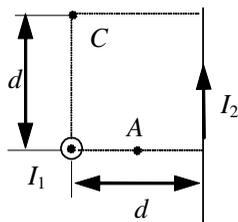


Рисунок 14

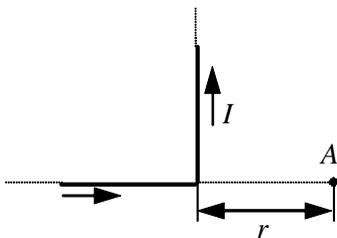


Рисунок 15

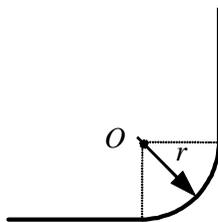


Рисунок 16

4.20 По бесконечно длинному прямому проводу, согнутому под углом  $\alpha = 120^\circ$ , течет ток  $I = 50$  А. Найти магнитную индукцию  $B$  в точках, лежащих на биссектрисе угла и равноудаленных от вершины угла на  $a = 5$  см.

4.21 По контуру в виде равностороннего треугольника течет ток  $I = 40$  А. Длина стороны треугольника  $a = 30$  см. Найти магнитную индукцию  $B$  в точках пересечения высот.

4.22 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?

4.23 Бесконечно длинный тонкий проводник с током  $I = 50$  А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом  $R = 10$  см. Определить в точке  $O$  магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током в случае, изображенном на рисунке 17,а.

4.24 Бесконечно длинный тонкий проводник с током  $I = 10$  А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом  $R = 10$  см. Определить в точке  $O$  магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током в случае, изображенном на рисунке 17,б.

4.25 Бесконечно длинный тонкий проводник с током  $I = 20$  А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом  $R = 5$  см. Определить в точке  $O$  магнитную индукцию  $B$  поля, создаваемого этим током в случае, изображенном на рисунке 17,в.

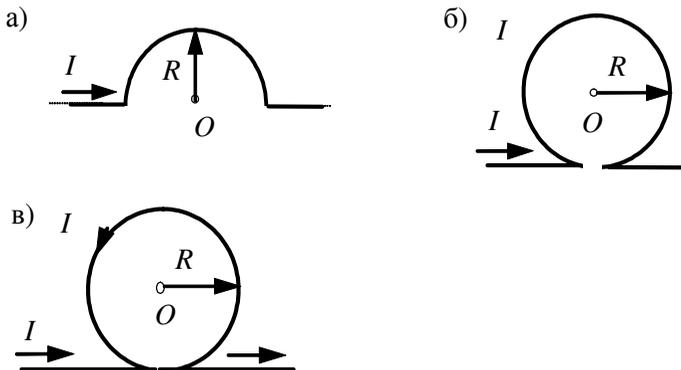


Рисунок 17

4.26 По плоскому контуру из тонкого провода течет ток силой  $I = 100$  А. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого этим током в точке  $O$ , в случае, изображенном на рисунке 18. Радиус изогнутой части контура  $R = 20$  см.

4.27 По плоскому контуру из тонкого провода течет ток силой  $I = 100$  А. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого этим током в точке  $O$ , в случае, изображенном на рисунке 17. Радиус изогнутой части контура равен  $R = 20$  см.

4.28 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  $R/2$ ?

4.29 Найти 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.

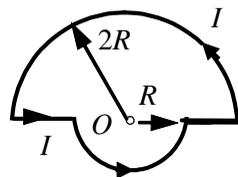


Рисунок 18

4.30 Определить магнитную индукцию в центре двух витков с одинаково направленными и равными токами  $I = 50$  А. Радиусы витков  $R_1 = 20$  см и  $R_2 = 10$  см. Витки расположены в одной плоскости.

4.31 По круговому контуру площадью  $S = 1$  м<sup>2</sup> течет постоянный ток  $I = 15$  А. Какова магнитная индукция поля, создаваемого этим током в точке, находящейся на оси контура на расстоянии  $r = 10$  м от центра круга?

4.32 По прямому бесконечно длинному проводнику течет ток  $I_1 = 3,14$  А. Круговой виток радиусом  $r = 30$  см расположен так, что перпендикуляр, опущенный из центра витка на провод, является нормалью и к плоскости витка. По витку протекает ток  $I_2 = 3$  А. Расстояние от центра витка до прямого проводника  $d = 20$  см. Определить магнитную индукцию в центре витка.

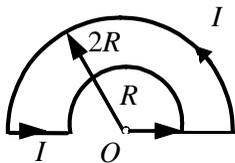


Рисунок 19

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

4.34 По двум прямым длинным проводникам проходят токи в противоположном направлении  $I_1 = 10$  А и  $I_2 = 20$  А. Расстояние между ними  $a = 20$  см. Определить положение точек, в которых магнитная индукция поля равна нулю.

4.35 Катушка длиной  $l = 20$  см содержит  $N = 200$  витков. По обмотке катушки течет ток  $I = 5$  А. Диаметр катушки равен  $d = 20$  см. Определить магнитную индукцию в центре катушки.

4.36 Ток, равный 10 А, циркулирует в контуре, имеющем форму квадрата со стороной 5 см. Найти индукцию магнитного поля в точке, лежащей в плоскости квадрата, равноудаленной на расстояние 4 см от противоположных вершин квадрата.

4.37 Ток, равный 10 А, циркулирует в контуре, имеющем форму квадрата со стороной 5 см. Найти индукцию магнитного поля в точке, лежащей в плоскости квадрата, равноудаленной на расстояние 12 см от противоположных вершин квадрата.

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

4.39 Деревянный шар радиусом  $R$  обмотан тонкой проволокой так, что витки ложатся по большим кругам, пересекаясь в концах одного и того же диаметра. Число витков шесть, и плоскости каждой пары соседних витков образуют угол  $30^\circ$ . По проволоке течет ток силой  $I$ . Найти величину и направление напряженности магнитного поля в центре шара.

4.40 Из одинаковых кусков проволоки спаян куб. К противоположным концам его диагонали приложена ЭДС. Какова напряженность  $H$  магнитного поля в центре куба? Поле подводящих проводов не учитывать.

4.41 В однородном магнитном поле с индукцией  $0,1$  Тл находится прямой медный проводник сечением  $8 \text{ мм}^2$ , концы которого подключены гибким проводом, находящимся вне поля, к источнику постоянного тока. Определить силу тока в проводнике, если известно, что при расположении его перпендикулярно к линиям индукции поля сила тяжести проводника уравнивается силой, действующей на проводник со стороны поля.

4.42 Чему равна механическая мощность, развиваемая при перемещении прямолинейного проводника длиной  $100$  см со скоростью  $2$  м/с перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $0,15$  Тл? Величина тока в проводнике  $5$  А.

4.43 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  $3 \text{ мм}^2$ .

4.44 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  $20 \text{ см}^2$ , а ее нормаль образует угол  $30^\circ$  с направлением поля?

4.45 В поле бесконечно длинного прямолинейного проводника, по которому течет ток  $I_1 = 20$  А, находится квадратная рамка со стороной  $a = 10$  см, по которой течет ток силой  $I_2 = 1$  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.

4.46 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.

4.47 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  $\alpha = 60^\circ$ . На контур действует механический момент  $M = 4,33 \cdot 10^{-3}$  Н·м. Найти индукцию магнитного поля.

4.48 По круговому контуру радиусом  $R = 2,2$  см течет ток. Контур помещен в магнитное поле с индукцией  $B = 2,2$  Тл. 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.

4.49 Между полюсами электромагнита создается однородное магнитное поле, индукция которого  $B = 0,03$  Тл. По прямому проводу, расположенному под углом  $\alpha = 30^\circ$  к силовым линиям поля, за время  $t$  проходит заряд, величина которого определяется законом  $q(t) = (0,5t + 2)$  Кл. Какова длина проводника, если на него действует сила  $F = 0,15$  мН?

4.50 В однородном магнитном поле под углом  $\alpha = 30^\circ$  к силовым линиям расположен прямой провод длиной 6,25 см. За время  $t$  по нему проходит заряд, величина которого определяется законом  $q(t) = (0,8t + 2,75)$  Кл. Сила, действующая при этом на провод, равна  $F = 2,5$  мН. Найти индукцию поля.

4.51 Из проволоки изготовлен контур в виде квадрата. На контур, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,125$  мТл, действует 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 составит  $\alpha = 60^\circ$  с направлением магнитного поля. Определить длину проволоки.

4.52 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.

4.53 Два прямолинейных длинных проводника находятся на расстоянии  $r_1 = 5$  см друг от друга. По проводникам текут в одном на-

правлении 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?

4.54 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?

4.55 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  $r_2 = 5r_1$ ?

4.56 Квадратная рамка площадью  $S = 25$  см<sup>2</sup> помещена в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл. 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.

4.57 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 1 А, а плоскость рамки параллельна линиям магнитной индукции. Определить: 1) магнитный момент рамки; 2) вращающий момент, действующий на рамку.

4.58 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.

4.59 По прямому горизонтально расположенному проводу пропускают ток  $I_1 = 10$  А. Под ним на расстоянии  $R = 1,5$  см находится параллельный ему алюминиевый провод, по которому пропускают ток  $I_2 = 1,5$  А. Какова должна быть площадь поперечного сечения алюминиевого провода, чтобы он удерживался незакрепленным?

4.60 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.

4.61 Контур из провода, изогнутого в форме квадрата со стороной  $a = 0,5$  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.

4.62 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 силу, действующую на рамку, если ближайшая к проводу сторона рамки находится на расстоянии  $c = 10$  см, а ток в ней сонаправлен току  $I$ .

4.63 Ток силой 1 А течет по тонкому проволочному полукольцу радиусом 50 см. Перпендикулярно плоскости полукольца возбуждено однородное магнитное поле с индукцией 0,01 Тл. Найти силу, растягивающую полукольцо. Действие на полукольцо магнитного поля подводящих проводов и взаимодействие отдельных элементов полукольца не учитывать.

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

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

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

4.67 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.

4.68 Магнитный момент  $p_m$  витка равен  $0,2 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Определить силу тока в витке, если его диаметр  $d = 10$  см.

4.69 Напряженность магнитного поля в центре кругового витка  $H = 200$  А/м. Магнитный момент витка  $p_m = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Вычислить силу тока  $I$  в витке и радиус  $R$  витка.

4.70 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.

4.71 Виток диаметром  $d = 10$  см может вращаться около вертикальной оси, совпадающей с одним из диаметров витка. Виток установили в плоскости магнитного меридиана и пустили по нему ток  $I = 1$  А. Какой вращающий момент  $M$  нужно приложить к витку, чтобы удержать его в начальном положении?

4.72 Рамка гальванометра длиной  $a = 3$  см и шириной  $b = 5$  см, содержащая  $N = 1000$  витков тонкой проволоки, находится в магнитном поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл. Плоскость рамки параллельна линиям индукции. Какой вращающий момент  $M$  действует на рамку, когда по витку течет ток силой  $I = 10$  мА? Каков магнитный момент  $p_m$  рамки при этом токе?

4.73 Короткая катушка площадью поперечного сечения  $S = 100$  см<sup>2</sup>, содержащая  $N = 100$  витков провода, по которому течет ток  $I = 1$  А, помещена в однородное магнитное поле напряженностью  $H = 10$  кА/м. Определить магнитный момент  $p_m$  катушки, а также вращающий момент  $M$ , действующий на нее со стороны поля, если ось катушки составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с линиями поля.

4.74 Шины генератора представляют собой две параллельные медные полосы длиной по  $l = 2$  м, отстоящие друг от друга на расстоянии  $d = 20$  см. Определить силу  $F$  взаимного отталкивания шин в случае короткого замыкания, когда по ним течет ток силой  $I = 10^4$  А.

4.75 Электрон в невозбужденном атоме водорода движется вокруг ядра по окружности радиусом  $r = 53$  пм. Вычислить магнитный момент  $p_m$  эквивалентного кругового тока и механический момент  $M$ , действующий на круговой ток, если атом помещен в магнитное поле с индукцией  $B = 0,1$  Тл, направленной параллельно плоскости орбиты электрона.

4.76 По двум тонким проводникам, изогнутым в виде кольца радиусом  $R = 20$  см, текут одинаковые токи по 1 А в каждом. Найти силу взаимодействия этих колец, если плоскости, в которых лежат кольца, параллельны, а расстояние между центрами колец  $d = 1$  мм.

4.77 Тонкое кольцо радиусом  $R = 10$  см несет заряд  $q = 10$  нКл. Кольцо равномерно вращается с частотой  $n = 10 \text{ с}^{-1}$  относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через ее центр. Определить магнитный момент  $p_m$  кругового тока, создаваемого кольцом.

4.78 Диск радиусом  $R = 10$  см несет равномерно распределенный по поверхности заряд  $q = 0,2$  мкКл. Диск равномерно вращается относительно оси, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр. Частота вращения  $n = 20 \text{ с}^{-1}$ . Определить магнитный момент  $p_m$  кругового тока, создаваемого диском.

4.79 Магнитное поле создано кольцевым проводником радиусом  $R = 20$  см, по которому течет ток  $I = 100$  А. На оси кольца расположено другое кольцо малых размеров с магнитным моментом  $p_m = 10 \text{ мА/м}^2$ . Плоскости колец параллельны, а расстояние между центрами  $d = 1$  см. Какова сила, действующая на малое кольцо?

4.80 Магнитная стрелка, помещенная в центре кругового проводника радиусом  $R = 5$  см, образует угол  $\alpha = 20^\circ$  с вертикальной плоскостью, в которой находится проводник. Когда по проводнику пустили ток силой  $I = 1$  А, то стрелка повернулась в таком направлении, что угол  $\alpha$  увеличился. Определить угол поворота стрелки.

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

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

4.83 В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции движется прямой проводник длина которого равна  $40$  см. При этом разность потенциалов, возникающая на его концах, составляет  $1 \cdot 10^{-5}$  В. Определить силу Лоренца, действующую на свободный электрон проводника.

4.84 Электрон, пройдя ускоряющее напряжение  $U = 500$  В, движется параллельно прямолинейному длинному проводнику на расстоянии  $r = 1$  см от него. Определить силу, действующую на электрон, если через проводник течет ток  $I = 10$  А.

4.85 Протон, ускоренный разностью потенциалов  $U = 500$  В, влетел в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 2$  мТл перпенди-

кулярно линиям магнитной индукции. Найти радиус окружности, по которой будет двигаться протон.

4.86 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.

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

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

4.89 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.

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

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

4.92 Решить предыдущую задачу для протона.

4.93 Между дуантами циклотрона приложено напряжение  $\pm 3 \cdot 10^4$  В. Индукция магнитного поля, заставляющего двигаться частицы по окружности, равна  $0,8$  Тл. Определить разность радиусов траекторий протонов после 4-го и после 9-го прохождения щели между дуантами.

4.94 Определить наименьшее значение радиуса дуантов циклотрона, предназначенного для ускорения протонов до энергии, равной  $8 \cdot 10^{-13}$  Дж, в котором индукция магнитного поля равна  $0,5$  Тл. Зависимость массы протона от его скорости не учитывать.

4.95 Найти скорость  $\alpha$ -частицы, которая при движении в пространстве, где имеются взаимно перпендикулярные электрические и магнитные поля, не испытывает никакого отклонения. Напряжен-

ность магнитного поля  $5 \text{ кА/м}$ , напряженность электрического поля  $6,28 \text{ кВ/м}$ . Скорость  $\alpha$ -частицы перпендикулярна к линиям напряженности того и другого полей.

4.96 Ион, несущий один элементарный заряд, движется в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,015 \text{ Тл}$  по окружности радиусом  $R = 10 \text{ см}$ . Определить импульс  $p$  иона.

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

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

4.99 Два иона, имеющие одинаковый заряд, но различные массы, влетели в однородное магнитное поле. Первый ион начал двигаться по окружности радиусом  $R_1 = 5 \text{ см}$ , второй – по окружности радиусом  $R_2 = 2,5 \text{ см}$ . Найти отношение  $m_1/m_2$  масс ионов, если до влета в поле они прошли одинаковую ускоряющую разность потенциалов.

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

4.101 В циклотроне требуется ускорять ионы гелия ( $\text{He}^{++}$ ). Частота переменной разности потенциалов, приложенной к дуантам, равна  $10 \text{ МГц}$ . Какова должна быть индукция магнитного поля, чтобы период обращения ионов совпадал с периодом изменения разности потенциалов?

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

4.103 Электрон, ускоренный разностью потенциалов  $720 \text{ В}$ , влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $0,9 \text{ мТл}$ , перпендикулярное направлению его движения. Определить радиус кривизны траектории частицы и период его обращения в магнитном поле.

4.104  $\alpha$ -частица, пройдя ускоряющее напряжение  $U = 900$  В, влетает в однородное магнитное поле, перпендикулярное направлению его движения. Радиус кривизны траектории частицы  $r = 12$  см. Определить величину индукции магнитного поля и значение момента импульса частицы в нем.

4.105 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?

4.106 Электрон влетает в однородное магнитное поле индукцией  $B = 5$  мТл 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.

4.107 Электрон, прошедший ускоряющую разность потенциалов  $100$  В, попал в вакууме в однородное магнитное поле и движется по окружности радиусом  $5$  см. Определить модуль магнитной индукции магнитного поля, если скорость электрона перпендикулярна линиям магнитной индукции.

4.108 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.

4.109 Определить число оборотов, которые должен сделать протон в магнитном поле циклотрона, чтобы приобрести кинетическую энергию  $10$  МэВ, если при каждом обороте протон проходит между дуантами с разностью потенциалов  $50$  кВ.

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

4.111 Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов  $105$  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.

4.112 Плоский конденсатор, между пластинами которого создано электрическое поле с напряженностью  $200$  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?

4.113 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  $6 \cdot 10^{-2}$  Тл, напряженность электрического поля 45 В/м.

4.114 Определить энергию, которую приобретает протон, сделав 30 оборотов в магнитном поле циклотрона, если максимальное значение переменной разности потенциалов между дуантами равно 50 кВ. Определить также относительное увеличение массы протона в сравнении с массой покоя, а также скорость протона.

4.115 Индукция магнитного поля циклотрона  $B = 10$  Тл. Какова частота ускоряющего поля между дуантами, если в циклотроне ускоряются дейтроны?

4.116 Определить частоту колебаний электрического поля в циклотроне, предназначенном для разгона протонов, если индукция магнитного поля в зазоре магнитов циклотрона равна 0,9 Тл.

4.117 Найти закон, по которому происходит увеличение радиуса кругов, описываемых протонами в циклотроне, если известно, что протоны проходят зазор между дуантами циклотрона при максимальном напряжении на них.

4.118 Решить предыдущую задачу для электрона.

4.119 Протон влетает со скоростью  $v = 100$  км/с в область пространства, где имеются электрическое ( $E = 210$  В/м) и магнитное ( $B = 3,3$  мТл) поля, совпадающие по направлению. Определить для начального момента движения в поле ускорение протона, если направление скорости  $v$ : 1) совпадает с направлением полей; 2) перпендикулярно этому направлению.

4.120 В циклотроне требуется ускорять ионы гелия ( $\text{He}^{2+}$ ). Частота переменной разности потенциалов, приложенной к дуантам равна 10 МГц. Какова должна быть индукция  $B$  магнитного поля, чтобы период  $T$  обращения ионов совпадал с периодом изменения разности потенциалов?

4.121 Какое численное значение должна иметь постоянная Холла для натрия, если считать, что на каждый его атом приходится один свободный электрон. Плотность натрия  $970 \text{ кг/м}^3$ .

4.122 Определите постоянную Холла для натрия, если для него отношение концентрации электронов проводимости к концентрации атомов составляет 0,984. Плотность натрия  $\rho = 0,97 \text{ г/см}^3$ .

4.123 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.

4.124 В случае эффекта Холла для натриевого проводника при плотности тока  $j = 150 \text{ А/см}^2$  и магнитной индукции  $B = 2 \text{ Тл}$  напряженность поперечного электрического поля  $E_B = 0,75 \text{ мВ/м}$ . Определите концентрацию электронов проводимости, а также ее отношение к концентрации атомов в этом проводнике. Плотность натрия  $\rho = 0,97 \text{ г/см}^3$ .

4.125 Определить постоянную Холла для меди, если для нее отношение концентрации электронов проводимости к концентрации атомов составляет 0,8.

4.126 Тонкая медная лента толщиной  $0,1 \text{ мм}$  помещена в однородное магнитное поле с индукцией  $0,9 \text{ Тл}$  так, что плоскость ленты перпендикулярна к силовым линиям поля. По ленте течет ток  $10 \text{ А}$ . Определить разность потенциалов, возникающую вдоль ширины ленты, считая, что в меди имеется по одному свободному электрону на каждый атом.

4.127 Через сечение медной пластинки толщиной  $d = 0,2 \text{ мм}$  пропускается ток  $I = 6 \text{ А}$ . Пластинка помещается в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 1 \text{ Тл}$ , перпендикулярное ребру пластинки и направлению тока. Считая концентрацию электронов проводимости равной концентрации атомов, определите возникающую в пластинке поперечную (холловскую) разность потенциалов.

4.128 В однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,9 \text{ Тл}$  помещена тонкая медная пластинка с током  $I = 5 \text{ А}$ . Толщина пластинки  $d = 0,01 \text{ мм}$ . Определить концентрацию свободных электронов в меди, если вдоль ширины ленты возникает разность потенциалов  $\Delta\varphi = 2 \text{ мкВ}$ .

4.129 Через сечение  $S = ab$  медной пластинки толщиной  $a = 0,5 \text{ мм}$  и высотой  $b = 10 \text{ мм}$  пропускается ток  $I = 20 \text{ А}$ . При помещении пла-

стинки в магнитное поле, перпендикулярное к ребру  $b$  и направлению тока, возникает поперечная разность потенциалов  $U = 3,1$  мкВ. Индукция магнитного поля  $B = 1$  Тл. Найти концентрацию  $n$  электронов проводимости в меди и их скорость  $v$  при этих условиях.

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

4.131 Определите постоянную Холла для алюминия, если для него отношение концентрации электронов проводимости к концентрации атомов составляет 2.

4.132 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 взаимно перпендикулярны. Ширина ленты  $b = 10$  см, плотность тока в ленте  $j = 5$  МА/м<sup>2</sup>.

4.133 Через сечение  $S = ab$  алюминиевой пластинки ( $a$  – толщина и  $b$  – высота) пропускается ток  $I = 5$  А. Пластинка помещена в магнитное поле, перпендикулярное к ребру  $b$  и направлению тока. Найти возникающую при этом поперечную разность потенциалов  $U$ . Индукция магнитного поля  $B = 0,5$  Тл. Толщина пластинки  $a = 0,1$  мм. Концентрацию электронов проводимости считать равной концентрации атомов.

4.134 Пластинка полупроводника толщиной  $d = 0,2$  мм помещена в магнитное поле, перпендикулярное к пластинке. Удельное сопротивление полупроводника  $\rho = 10$  мкОм·м. Индукция магнитного поля  $B = 1$  Тл. Перпендикулярно к направлению поля вдоль пластинки пропускается ток  $I = 0,1$  А. При этом возникает поперечная разность потенциалов  $U = 3,25$  мВ. Найти подвижность носителей тока в полупроводнике.

4.135 Определите, во сколько раз постоянная Холла у меди больше, чем у алюминия, если известно, что в алюминии на один атом в среднем приходится два свободных электрона, а в меди – 0,8 свободных электронов.

4.136 Определите, во сколько раз постоянная Холла у меди больше (меньше), чем у натрия, если известно, что в натрии на один

атом в среднем приходится 0,984 свободных электрона, а в меди – 0,8 свободных электронов. Плотности меди и натрия соответственно равны 8,93 и 0,97 г/см<sup>3</sup>.

4.137 Определите, во сколько раз постоянная Холла у натрия больше (меньше), чем у алюминия, если известно, что в алюминии на один атом в среднем приходится два свободных электрона, а в натрии – 0,984 свободных электронов. Плотности алюминия и натрия соответственно равны 2,7 и 0,97 г/см<sup>3</sup>.

4.138 В однородное магнитное поле с индукцией  $B = 1$  Тл помещена тонкая алюминиевая пластинка с током  $I = 10$  А. Толщина пластинки  $d = 0,01$  мм. Определить концентрацию свободных электронов в алюминии, если вдоль ширины ленты возникает разность потенциалов  $\Delta\phi = 0,01$  мкВ.

4.139 Определить подвижность носителей тока в полупроводнике, если в пластинке полупроводника толщиной  $d = 0,1$  мм, помещенной в магнитное поле с индукцией  $B = 1$  Тл, перпендикулярное к пластинке, возникает поперечная разность потенциалов  $U = 4$  мВ. Удельное сопротивление полупроводника  $\rho = 10$  мкОм·м.

4.140 Определить концентрацию свободных носителей тока в полупроводнике, если в пластинке полупроводника с током  $I = 10$  А толщиной  $d = 0,2$  мм, помещенной в магнитное поле с индукцией  $B = 1$  Тл, перпендикулярное к пластинке, возникает поперечная разность потенциалов  $U = 3,25$  мВ.

4.141 Вычислить циркуляцию вектора индукции вдоль контура, охватывающего токи  $I_1 = 10$  А,  $I_2 = 15$  А, текущие в одном направлении, и токи  $I_3 = I_4 = 20$  А, текущие в противоположном направлении.

4.142 Вычислить циркуляцию вектора индукции вдоль контура, охватывающего токи  $I_1 = 10$  А,  $I_2 = 15$  А,  $I_3 = 25$  А, текущие в одном направлении, и токи  $I_4 = I_5 = 20$  А, текущие в противоположном направлении.

4.143 Определить циркуляцию вектора магнитной индукции по окружности, через центр которой перпендикулярно ее плоскости проходит бесконечно длинный прямолинейный провод, по которому течет ток  $I = 5$  А.

4.144 По прямому бесконечно длинному проводнику течет ток  $I = 10$  А. Определить циркуляцию вектора магнитной индукции по окружности, центр которой совпадает с осью провода.

4.145 По прямому бесконечно длинному проводнику течет ток  $I = 10$  А. Определить, пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $B$ , магнитную индукцию  $B$  в точке, расположенной на расстоянии  $r = 10$  см от проводника.

4.146 Определить, пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $B$ , магнитную индукцию  $B$  в точке, расположенной на расстоянии  $r = 1$  см от бесконечно длинного проводника, по которому течет ток  $I = 1$  А.

4.147 Используя теорему о циркуляции вектора  $B$ , рассчитать магнитную индукцию поля внутри соленоида (в вакууме), если число витков соленоида равно  $N$  и длина соленоида равна  $l$ .

4.148 Соленоид длиной  $l = 0,5$  м содержит  $N = 1000$  витков. Используя теорему о циркуляции вектора  $B$ , определить магнитную индукцию поля внутри соленоида, если сопротивление его обмотки  $R = 120$  Ом, а напряжение на ее концах  $U = 60$  В.

4.149 Определить, пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $B$ , индукцию  $B$  и напряженность  $H$  магнитного поля внутри соленоида без сердечника длиной  $l = 0,1$  м, по обмотке которого, содержащей 200 витков, протекает ток 2 А.

4.150 Определить, пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $B$ , индукцию  $B$  и напряженность  $H$  магнитного поля на оси тороида без сердечника, по обмотке которого, содержащей 100 витков, протекает ток 1 А. Внешний диаметр тороида равен 50 см, внутренний – 45 см.

4.151 Используя теорему о циркуляции вектора  $B$ , определить сколько витков содержит обмотка соленоида без сердечника длиной 0,2 м, если по ней течет ток 1 А, а индукция магнитного поля внутри соленоида равна 6,3 Тл.

4.152 Определить индукцию и напряженность магнитного поля на оси тороида без сердечника, по обмотке которого, содержащей  $N = 200$  витков, идет ток силой  $I = 5$  А. Внешний диаметр тороида  $d_1 = 30$  см, внутренний –  $d_2 = 20$  см.

4.153 Пользуясь законом полного тока, определить максимальное и минимальное значения магнитной индукции  $B$  в тороиде без сердечника, диаметр тороида по средней линии  $D = 10$  см. В сечении тороид имеет круг радиусом  $r = 1,5$  см. По обмотке тороида, содержащей  $N = 500$  витков, течет ток  $I = 0,5$  А.

4.154 Диаметр тороида без сердечника по средней линии  $D = 30$  см. В сечении тороид имеет круг радиусом  $r = 5$  см. По об-

мотке тороида, содержащей  $N = 2000$  витков, течет ток  $I = 5$  А. Пользуясь законом полного тока, определить максимальное и минимальное значения магнитной индукции  $B$  в тороиде.

4.155 Магнитная индукция  $B$  на оси тороида без сердечника (внешний диаметр тороида  $d_1 = 60$  см, внутренний –  $d_2 = 40$  см), содержащего  $N = 200$  витков, составляет  $0,16$  мТл. Пользуясь теоремой о циркуляции вектора  $B$ , определите силу тока в обмотке тороида.

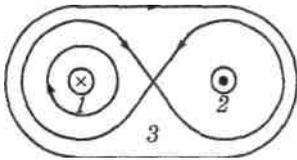


Рисунок 20

4.156 Определите циркуляцию вектора магнитной индукции для замкнутых контуров, изображенных на рисунке 20 если сила тока в обоих проводниках  $I = 2$  А.

4.157 Стальной сердечник тороида имеет воздушный зазор  $5$  мм. Длина средней линии сердечника равна  $1$  м. Сколько витков содержит обмотка тороида, если при силе тока  $I = 4$  А индукция магнитного поля в воздушном зазоре  $B = 0,5$  Тл? Рассеянием магнитного потока в воздушном зазоре можно пренебречь. Явление гистерезиса не учитывать.

4.158 В соленоиде длиной  $l = 0,4$  м и диаметром  $D = 5$  см создается магнитное поле, напряженность которого  $H = 1,5$  кА/м. Определите: 1) магнитодвижущую силу  $F_m$ ; 2) разность потенциалов  $U$  на концах обмотки, если для нее используется алюминиевая проволока диаметром  $d = 1$  мм.

4.159 Железное кольцо имеет воздушный зазор  $5$  мм. Длина средней линии кольца –  $1$  м. Сколько витков содержит обмотка на кольце, если при силе тока  $I = 4$  А индукция магнитного поля в воздушном зазоре  $B = 0,5$  Тл? Рассеянием магнитного потока в воздушном зазоре можно пренебречь. Явление гистерезиса не учитывать.

4.160 По сечению проводника равномерно распределен ток плотностью  $\sigma = 2$  МА/м<sup>2</sup>. Найти циркуляцию вектора напряженности вдоль окружности радиуса  $r = 5$  мм, проходящей внутри проводника и ориентированной так, что ее плоскость составляет угол  $\alpha = 30^\circ$  с вектором плотности тока.

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

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

4.163 Напряженность магнитного поля в меди  $H = 1$  МА/м. Определить намагниченность  $J$  меди и магнитную индукцию.

4.164 Стальной брусок внесли в магнитное поле напряженностью  $H = 1600$  А/м. Определить намагниченность  $J$  стали\*.

4.165 Напряженность магнитного поля в платине  $H = 5$  А/м. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого молекулярными токами.

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

4.167 По обмотке соленоида индуктивностью  $L = 3$  мГн, находящегося в диамагнитной среде, течет ток  $I = 0,4$  А. Соленоид имеет длину  $l = 45$  см, площадь поперечного сечения  $S = 10$  см<sup>2</sup> и число витков  $N = 1000$ . Определить магнитную индукцию и намагниченность внутри соленоида.

4.168 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.

4.169 Индукция магнитного поля в железном стержне  $B = 1,2$  Тл. Определить для него намагниченность\*.

4.170 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\*.

4.171 Обмотка тороида с железным сердечником имеет 150 витков. Средний радиус тороида составляет  $r = 3$  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\*.

---

\* Для определения магнитной проницаемости воспользоваться кривой намагничивания (см. рисунок 2). Явление гистерезиса не учитывать.

\* Для определения магнитной проницаемости воспользоваться кривой намагничивания (см. рисунок 2). Явление гистерезиса не учитывать.

4.172 Индукция магнитного поля в стальном стержне  $B = 1,7$  Тл. Определить для этих условий магнитную проницаемость и намагниченность стали\*.

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

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

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

4.176 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.

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

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

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

4.180 Определить магнитную индукцию  $B$  поля, намагниченность  $J$  и магнитную проницаемость  $\mu$  железа при напряженности магнитного поля в нем  $H = 1400$  А/м\*.

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

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

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

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

4.185 Железный брусок внесли в магнитное поле напряженностью  $H = 1000$  А/м. Определить намагниченность  $J$  стали\*.

4.186 На стальной сердечник длиной  $0,2$  м намотано в один слой  $500$  витков провода. Определить магнитную проницаемость железа при силе тока в проводе  $0,1$  А\*.

4.187 На стальное кольцо намотано в один слой  $N = 1500$  витков провода. Средний диаметр кольца  $d = 25$  см. Определить индукцию  $B$  магнитного поля в железе и магнитную проницаемость  $\mu$  железа\*, если сила тока  $I$  в обмотке: 1)  $0,1$  А; 2)  $0,5$  А\*.

4.188 Определить намагниченность платины, помещенной в однородное магнитное поле напряженностью  $H = 1$  МА/м.

4.189 Напряженность магнитного поля в стекле  $H = 500$  кА/м. Определить намагниченность  $J$  стекла и магнитную индукцию поля.

4.190 Определить намагниченность  $J$  меди и магнитную индукцию поля в меди, если напряженность магнитного поля  $H = 100$  кА/м.

4.191 Определить намагниченность  $J$  марганца и магнитную индукцию поля в марганце, если напряженность магнитного поля  $H = 100$  кА/м.

4.192 Определить намагниченность  $J$  платины и магнитную индукцию поля в платине, если напряженность магнитного поля  $H = 100$  кА/м.

4.193 Определить намагниченность  $J$  алюминия и магнитную индукцию поля в алюминии, если напряженность магнитного поля  $H = 100$  кА/м.

4.194 По изолированному круговому контуру радиусом  $r = 40$  см, погруженному в воду, течет ток  $I = 2$  А. Определить намагниченность в центре витка.

---

\* Для определения магнитной проницаемости воспользоваться кривой намагничивания (см. рисунок 2). Явление гистерезиса не учитывать.

4.195 В стальном сердечнике соленоида магнитная индукция  $B = 1$  Тл. Железный сердечник заменили железным\*. Во сколько раз следует изменить силу тока в обмотке соленоида, чтобы индукция поля в сердечнике осталась неизменной\*?

4.196 Железный сердечник тороида, длина которого по средней линии равна 0,5 м, имеет воздушный зазор длиной 2 мм. Обмотка содержит 10 витков на каждый сантиметр длины. При какой силе тока индукция в зазоре будет равна 1 Тл\*?

4.197 Обмотка тороида со стальным сердечником имеет 100 витков. Средний радиус тороида  $r = 5$  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\*.

4.198 Напряженность магнитного поля в алюминии  $H = 1000$  А/м. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого молекулярными токами.

4.199 Напряженность магнитного поля в меди  $H = 500$  А/м. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого молекулярными токами.

4.200 Напряженность магнитного поля в марганце  $H = 5$  А/м. Определить индукцию магнитного поля, создаваемого молекулярными токами.

4.201 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.

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

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

4.204 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

---

\* Для определения магнитной проницаемости воспользоваться кривой намагничивания (см. рисунок 2). Явление гистерезиса не учитывать.

проводу сторона параллельна ей и находится на расстоянии  $l = 10$  см от провода. Определить магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку.

4.205 Площадь сечения железного<sup>1</sup> кольца равна  $6 \text{ см}^2$ . Магнитный поток через сечение кольца равен  $840 \text{ мкВб}$ . Определить магнитную проницаемость железа в этих условиях.

4.206 Соленоид со стальным\* сердечником имеет 10 витков на каждый сантиметр длины. По обмотке соленоида течет ток силой  $2 \text{ А}$ . Вычислить магнитный поток в сердечнике, если его площадь поперечного сечения  $4 \text{ см}^2$ .

4.207 На железное кольцо равномерно намотано в один слой 600 витков тонкого провода. Средний диаметр кольца равен  $30 \text{ см}$ , площадь его кругового сечения –  $6 \text{ см}^2$ . При какой силе тока в обмотке магнитный поток через сечение кольца будет равен  $840 \text{ мкВб}$ ?

4.208 В однородном магнитном поле, индукция которого равна  $B = 1 \text{ Тл}$ , находится прямой провод длиной  $l = 8 \text{ см}$ , расположенный перпендикулярно линиям индукции. По проводу течет ток  $I = 2 \text{ А}$ . Под действием сил поля провод переместился на расстояние  $s = 5 \text{ см}$ . Найти работу  $A$  сил поля.

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

4.210 Определить магнитный поток через площадь поперечного сечения катушки без сердечника, имеющей на каждом сантиметре длины 8 витков. Радиус катушки равен  $2 \text{ см}$ , сила тока в ней –  $2 \text{ А}$ .

4.211 Внутри соленоида с числом витков  $N = 200$  с сердечником ( $\mu = 200$ ). Напряженность магнитного поля  $H = 10 \text{ кА/м}$ . Площадь поперечного сечения сердечника  $S = 10 \text{ см}^2$ . Определить индукцию магнитного поля внутри соленоида и потокосцепление.

---

<sup>1</sup> Для определения магнитной проницаемости воспользоваться кривой намагничивания (см. рисунок 2). Явление гистерезиса не учитывать.

4.212 Квадратная рамка со стороной 10 см помещена в однородное магнитное поле напряженностью 100 кА/м. Плоскость рамки составляет с направлением магнитного поля угол  $60^\circ$ . Определить магнитный поток, пронизывающий рамку.

4.213 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 составляет 5 см. Найти магнитный поток, пронизывающий рамку.

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

4.215 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.

4.216 В однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $B = 0,2$  Тл находится квадратный проводящий контур со стороной  $l = 10$  см и током  $I = 20$  А. Плоскость квадрата составляет с направлением поля угол  $\alpha = 30^\circ$ . Определить работу удаления провода за пределы поля.

4.217 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.

4.218 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 вектора индукции поля угол  $\alpha = 30^\circ$ . Определить: 1) вращающий момент, действующий на катушку; 2) работу для удаления этой катушки из магнитного поля.

4.219 Определить работу, совершаемую при перемещении проводника длиной 0,2 м, по которому течет ток 5 А, в перпендикуляр-

ном магнитном поле напряженностью  $80 \text{ кА/м}$ , если перемещение проводника  $0,5 \text{ м}$ .

4.220 Прямой провод длиной  $l = 8 \text{ см}$  помещен перпендикулярно линиям в однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,01 \text{ Тл}$ . По проводу течет ток  $I = 2 \text{ А}$ . Под действием сил поля провод переместился на расстояние  $s = 5 \text{ см}$ . Найти работу  $A$  сил поля.

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

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

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

4.224 Соленоид длиной  $l = 0,5 \text{ м}$  содержит  $N = 1000$  витков. Вычислить потокосцепление  $\Psi$  при силе тока в обмотке  $I = 10 \text{ А}$ . Сечение соленоида  $S = 16 \text{ см}^2$ .

4.225 В одной плоскости с длинным прямым проводом, по которому течет ток  $I = 50 \text{ А}$ , расположена прямоугольная рамка так, что две большие стороны ее длиной  $l = 65 \text{ см}$  параллельны проводу, а расстояние от провода до ближайшей из этих сторон равно ее ширине. Каков магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку?

4.226 В однородном магнитном поле напряженностью  $H = 79,6 \text{ кА/м}$  помещена квадратная рамка, плоскость которой составляет с направлением магнитного поля угол  $\alpha = 45^\circ$ . Сторона рамки  $a = 4 \text{ см}$ . Найти магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку.

4.227 В магнитном поле, индукция которого  $B = 0,05 \text{ Тл}$ , вращается стержень длиной  $l = 1 \text{ м}$ . Ось вращения, проходящая через один

из концов стержня, параллельна направлению магнитного поля. Найти магнитный поток  $\Phi$ , пересекаемый стержнем при каждом обороте.

4.228 В одной плоскости с длинным прямым проводом, по которому течет ток  $I = 50$  А, расположена прямоугольная рамка так, что две большие стороны ее длиной  $l = 50$  см параллельны проводу, а расстояние  $l$  от провода до ближайшей из этих сторон равно ее ширине. Как изменится магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий рамку, если расстояние  $l$  увеличить в три раза ?

4.229 Квадратный контур со стороной 10 см, в котором течет ток 1 А, находится в магнитном поле с магнитной индукцией 8 Тл под углом  $30^\circ$  к магнитным силовым линиям. Какую работу нужно совершить, чтобы при неизменном токе в контуре изменить его форму на окружность?

4.230 При двукратном обводе магнитного полюса вокруг проводника с током силой  $I = 100$  А была совершена работа  $A = 0,001$  Дж. Найти магнитный поток, создаваемый полюсом.

4.231 Виток, по которому течет постоянный ток  $I = 2$  А, свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 50$  мТл. Диаметр витка 10 см. Какую работу  $A$  надо совершить, чтобы повернуть виток на  $\varphi = 90^\circ$  вокруг оси, совпадающей с диаметром контура?

4.232 Виток, по которому течет постоянный ток  $I = 2$  А, свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 50$  мТл. Диаметр витка 10 см. Какую работу  $A$  надо совершить, чтобы повернуть виток на  $\varphi = 180^\circ$  вокруг оси, совпадающей с диаметром контура?

4.233 Квадратный и круговые контуры, изготовленные из проволоки одинаковой длины  $l = 50$  см, в которых течет ток 1 А, находятся в магнитном поле с магнитной индукцией 1 Тл под углом  $45^\circ$  к магнитным силовым линиям. Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть контуры на  $\varphi = 45^\circ$ ?

4.234 В однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $B = 5$  Тл находится плоская катушка из 10 витков радиусом  $r = 10$  см. По катушке течет ток  $I = 1$  А. Плоскость катушки составляет с направлением вектора индукции поля угол  $\alpha = 45^\circ$ . Определить: 1) вращающий момент, действующий на катушку; 2) работу для удаления этой катушки из магнитного поля.

4.235 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.

4.236 Квадратный контур со стороной 10 см, в котором течет ток 1 А, находится в магнитном поле с магнитной индукцией 8 Тл под углом  $30^\circ$  к магнитным силовым линиям. Какую работу нужно совершить, чтобы при неизменном токе в контуре придать ему форму правильного шестиугольника?

4.237 Квадратная рамка со стороной  $a = 10$  см расположена в одной плоскости с прямым, бесконечно длинным проводом с током. Расстояние от провода до середины рамки  $l = 0,5$  м. Вычислить относительную погрешность, которая будет допущена при расчете магнитного потока, пронизывающего рамку, если поле в пределах рамки считать однородным, а магнитную индукцию равной значению ее в центре рамки.

4.238 Тороид квадратного сечения содержит  $N = 1000$  витков. Наружный диаметр тороида  $D = 40$  см, внутренний –  $d = 20$  см. Найти магнитный поток в тороиде, если сила тока  $I$ , протекающего по обмотке, равна 10 А. Учесть, что магнитное поле тороида не однородно.

4.239 Рамка, площадь которой  $S = 16$  см<sup>2</sup>, вращается в однородном магнитном поле с частотой  $n = 2$  с<sup>-1</sup>. Ось вращения находится в плоскости рамки и перпендикулярна к направлению магнитного поля. Напряженность магнитного поля  $H = 79,6$  кА/м. Найти зависимость магнитного потока  $\Phi$ , пронизывающего рамку, от времени  $t$  и наибольшее значение  $\Phi_{\max}$  магнитного потока.

4.240 В однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл движется равномерно проводник длиной  $l = 10$  см. По проводнику течет ток  $I = 2$  А. Скорость движения проводника  $v = 20$  см/с и направлена перпендикулярно к направлению магнитного поля. Найти работу  $A$  перемещения проводника за время  $t = 10$  с и мощность  $P$ , затраченную на это перемещение.

4.241 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?

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

4.243 На железный сердечник сечением  $S = 5 \text{ см}^2$  и длиной  $l = 30 \text{ см}$  намотан соленоид, содержащий  $N = 500$  витков медной проволоки сечением  $S_0 = 1 \text{ мм}^2$ . Чему равна индуктивность соленоида при подключении его к источнику с ЭДС  $1,26 \text{ В}$ ? Внутренним сопротивлением источника и сопротивлением подводящих проводов пренебречь.

4.244 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  $H = 2 \text{ кА/м}$ .

4.245 В магнитное поле с индукцией  $B = 50 \text{ мТл}$  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?

4.246 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.

4.247 Определить, через какое время сила тока достигнет  $0,85$  предельного значения, если источник ЭДС замыкают на катушку сопротивлением  $R = 100 \text{ Ом}$  и индуктивностью  $0,5 \text{ Гн}$ .

4.248 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.

4.249 В магнитное поле, индукция которого изменяется 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  $t = 5 \text{ с}$ .

4.250 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  $I = 1 \text{ А}$ .

4.251 Плоскость проволочного витка площадью  $S = 100 \text{ см}^2$  и сопротивлением  $R = 5 \text{ Ом}$ , находящегося в однородном магнитном по-

ле напряженностью  $H = 10$  кА/м. При повороте витка в магнитном поле отсчет гальванометра, замкнутого на виток,  $q = 12,6$  мКл. Определить угол поворота витка.

4.252 В катушке длиной  $l = 30$  см, диаметром  $d = 5$  см с числом витков  $N = 1500$  равномерно увеличивается ток на  $0,2$  А за одну секунду. На катушку надето кольцо из медной проволоки сечением  $S_0 = 3$  мм<sup>2</sup>. Определить силу тока в кольце.

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

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

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

4.255 Бесконечно длинный соленоид длиной  $0,8$  м имеет однослойную обмотку из алюминиевого провода массой  $400$  г. Определить время релаксации для этого соленоида.

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

4.257 Две катушки индуктивности намотаны на общий сердечник. Индуктивность первой катушки  $L_1 = 0,12$  Гн, второй –  $L_2 = 3$  Гн. Сопротивление второй катушки  $R_2 = 300$  Ом. Определить силу тока  $I_2$  во второй катушке, если за  $0,1$  с сила тока в первой катушке уменьшилась от  $I_1 = 0,5$  А до нуля.

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

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

4.260 На расстоянии  $a = 1$  м от длинного прямого провода с током  $I = 1$  кА находится кольцо радиусом  $r = 1$  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.

4.261 Соленоид индуктивностью  $L = 4$  мГн содержит 600 витков. Определить магнитный поток  $\Phi$ , если по обмотке соленоида протекает ток  $I = 12$  А.

4.262 Соленоид содержит  $N = 1000$  витков. Площадь сечения сердечника  $S = 10$  см<sup>2</sup>. По обмотке протекает 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.

4.263 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 магнитного поля Земли 16 А/м.

4.264 Алюминиевый диск радиусом 40 см вращается вокруг вертикальной оси с частотой  $40$  с<sup>-1</sup>. Какова разность потенциалов между центром и краем диска?

4.265 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 равной  $H = 40$  А/м. Расстояние между рельсами равно 1,54 м.

4.266 В однородном магнитном поле ( $B = 0,2$  Тл) вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega = 100$  с<sup>-1</sup> вокруг вертикальной оси стержень длиной  $l = 0,5$  м. Определите ЭДС индукции, возникающей в стержне, если ось вращения проходит через конец стержня параллельно линиям магнитной индукции.

4.267 В однородное магнитное поле с индукцией  $B = 0,2$  Тл помещена прямоугольная рамка с подвижной стороной, длина которой

$l = 25$  см. Определите ЭДС индукции, возникающей в рамке, если ее подвижная сторона перемещается перпендикулярно линиям магнитной индукции со скоростью  $v = 1$  м/с.

4.268 В однородном магнитном поле ( $B = 0,1$  Тл) равномерно с частотой  $n = 500$  мин<sup>-1</sup> вращается рамка, содержащая  $N = 1000$  витков, плотно прилегающих друг к другу. Площадь рамки  $S = 100$  см<sup>2</sup>. Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна линиям магнитной индукции. Определите максимальную ЭДС, индуцируемую в рамке.

4.269 В однородном магнитном поле ( $B = 0,5$  Тл) равномерно вращается прямоугольная рамка, содержащая  $N = 100$  витков, плотно прилегающих друг к другу. Площадь рамки  $S = 150$  см<sup>2</sup>. Определите частоту вращения рамки, если максимальная ЭДС, индуцируемая в ней, равна 12 В.

4.270 В однородном магнитном поле равномерно вращается прямоугольная рамка с частотой  $n = 500$  мин<sup>-1</sup>. Амплитуда индуцируемой в рамке ЭДС равна 12 В. Определить максимальный магнитный поток через рамку.

4.271 Катушка длиной  $l = 20$  см и диаметром  $d = 5$  см содержит  $N = 100$  витков. По катушке течет ток  $I = 1$  А. Определить: 1) индуктивность катушки; 2) магнитный поток, пронизывающий площадь ее поперечного сечения.

4.272 Две длинные катушки намотаны на общий сердечник, причем индуктивности этих катушек  $L_1 = 0,64$  Гн и  $L_2 = 0,04$  Гн. Определить, во сколько раз число витков первой катушки больше, чем второй.

4.273 Определить, сколько витков проволоки, вплотную прилегающих друг к другу, диаметром  $d = 0,2$  мм с изоляцией ничтожной толщины надо намотать на картонный цилиндр диаметром  $D = 2$  см, чтобы получить однослойную катушку индуктивностью  $L = 300$  мкГн.

4.274 Определите индуктивность соленоида длиной  $l$  и сопротивлением  $R$ , если обмоткой соленоида является проволока массой  $m$ . Принять плотность проволоки и ее удельное сопротивление соответственно за  $\rho$  и  $\rho'$ .

4.275 Через катушку, индуктивность которой  $L = 200$  мГн, протекает ток, изменяющийся по закону  $I = 2 \cos 3t$ . Определить: 1) закон

изменения ЭДС самоиндукции; 2) максимальное значение ЭДС самоиндукции.

4.276 Трансформатор с коэффициентом трансформации 0,15 понижает напряжение с 220 до 6 В. При этом сила тока во вторичной обмотке равна 6 А. Пренебрегая потерями энергии в первичной обмотке, определить сопротивление вторичной обмотки трансформатора.

4.277 Автотрансформатор, понижающий напряжение с  $U_1 = 6$  кВ до  $U_2 = 220$  В, содержит в первичной обмотке  $N_1 = 2000$  витков. Сопротивление вторичной обмотки  $R_2 = 1$  Ом. Сопротивление внешней цепи (в сети пониженного напряжения)  $R = 12$  Ом. Пренебрегая сопротивлением первичной обмотки, определите число витков во вторичной обмотке трансформатора.

4.278 Средняя скорость изменения магнитного потока  $d\Phi/dt$  в бетатроне, рассчитанном на энергию  $W = 50$  МэВ, составляет 50 Вб/с. Определить: 1) число оборотов  $n$  электрона на орбите за время ускорения; 2) путь, пройденный электроном, если радиус орбиты  $r = 20$  см; 3) время ускорения.

4.279 В бетатроне скорость изменения магнитной индукции 60 Тл/с. Определить: 1) напряженность  $E$  вихревого электрического поля на орбите электрона, если ее радиус  $r = 0,5$  м; 2) силу  $F$ , действующую на электрон.

4.280 Электрон в бетатроне движется по орбите радиусом  $r = 0,4$  м и приобретает за один оборот кинетическую энергию  $W = 20$  эВ. Вычислить скорость изменения магнитной индукции, считая эту скорость в течение интересующего нас промежутка времени постоянной.

4.281 Определить энергию магнитного поля катушки, в которой при токе 7,5 А магнитный поток равен 4 мВб. Число витков в катушке 200.

4.282 Во сколько раз возрастет энергия магнитного поля катушки при увеличении силы тока в катушке на 50 %?

4.283 Во сколько раз возрастает энергия магнитного поля катушки с регулируемой индуктивностью при увеличении индуктивности на 50 % при неизменной силе тока?

4.284 На катушке сопротивлением 5 Ом и индуктивностью 25 мГн поддерживается постоянное напряжение 50 В. Сколько энергии выделится при размыкании цепи катушки?

4.285 Зависимость энергии магнитного поля от силы тока в катушке имеет вид:  $W = 0,04I^2$  Дж, где  $I$  сила тока в амперах,  $W$  – энергия в джоулях. Определить индуктивность катушки.

4.286 По катушке с известной индуктивностью протекает ток 2 А. Какой силы ток нужно пропустить по катушке, чтобы энергия магнитного поля этой катушки возросла в 4 раза?

4.287 Определить силу тока, протекающего по катушке с индуктивностью 0,25 мГн, если энергия магнитного поля катушки равна 2 мДж.

4.288 Катушка длиной 50 см с площадью поперечного сечения  $2 \text{ см}^2$  имеет индуктивность 0,2 мкГн. При какой силе тока энергия единицы объема магнитного поля внутри катушки равна  $1 \text{ мДж/м}^3$ .

4.289 На катушке с сопротивлением 5 Ом и индуктивностью 25 мГн поддерживается постоянное напряжение. Определить значение этого напряжения, если при размыкании цепи катушки выделилась энергия, равная 1,25 Дж.

4.290 Катушка диаметром  $d = 5$  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, магнитная индукция которого изменяется со скоростью  $1 \text{ мТл/с}$ . Ось катушки параллельна линиям индукции. Определить тепловую мощность, выделяющуюся в катушке, если ее замкнуть накоротко.

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

4.292 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 силой  $I = 5$  А.

4.293 На длинный сердечник радиусом  $R = 1$  см намотана однослойная катушка, содержащая  $n = 10$  витков на каждом сантиметре длины. Обмотка выполнена из медного провода сечением  $S = 1 \text{ мм}^2$ . 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 равной  $\mu = 400$ .

4.294 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?

4.295 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  $B = f(H)$  на рисунке 2.

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

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

4.298 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.

4.299 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 равной 0,1 Дж/м<sup>3</sup>?

4.300 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.

4.301 Обмотка тороида с немагнитным сердечником содержит 10 витков на 1 см длины. При какой силе тока в обмотке объемная плотность энергии станет равной 1 Дж/м<sup>3</sup>?

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

4.303 Тороид с железным сердечником длиной  $l = 20$  см имеет воздушный зазор  $b = 10$  см. По обмотке из  $N = 500$  витков течет ток  $I = 3$  А. Определить объемную плотность энергии магнитного поля в сердечнике и воздушном зазоре. Магнитная проницаемость сердечника в этих условиях  $\mu = 580$ . Рассеянием магнитного потока пренебречь.

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

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

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

4.307 По обмотке тороида течет ток  $I = 0,6$  А. Витки провода диаметром  $d = 0,4$  мм плотно прилегают друг к другу. Найти энергию  $W$  магнитного поля в стальном сердечнике тороида. Площадь сечения сердечника  $S = 4$  см<sup>2</sup>, диаметр средней линии  $D = 30$  см\*.

4.308 При индукции поля  $B = 1$  Тл плотность энергии магнитного поля в железе  $w = 200$  Дж/м<sup>3</sup>. Определить магнитную проницаемость  $\mu$  железа в этих условиях\*.

4.309 Определить объемную плотность энергии магнитного поля в стальном сердечнике, если индукция магнитного поля в нем равна  $B = 1$  Тл\*.

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

---

\* Для определения магнитной проницаемости воспользоваться кривой намагничивания (см. рисунок 2). Явление гистерезиса не учитывать.

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

4.312 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\*?

4.313 При некоторой силе тока объемная плотность энергии магнитного поля соленоида без сердечника составляет  $0,2 \text{ Дж/м}^3$ . Во сколько раз увеличится объемная плотность энергии при той же силе тока, если соленоид будет иметь железный сердечник\*?

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

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

4.316 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.

4.317 Трансформатор, понижающий напряжение с 220 до 12 В, содержит в первичной обмотке  $N = 2000$  витков. Сопротивление вторичной обмотки  $R_2 = 0,15 \text{ Ом}$ . Пренебрегая сопротивлением первичной обмотки, определите число витков во вторичной обмотке, если во внешнюю цепь (в сети пониженного напряжения) передают мощность  $P = 20 \text{ Вт}$ .

4.318 Самолет летит горизонтально со скоростью 900 км/ч, при этом на концах крыла самолета возникает разность потенциалов 0,6 В. Вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли равна 80 А/м. Какой размах имеет крыло самолета?

4.319 В магнитном поле под углом  $37^\circ$  к его направлению движется со скоростью 100 м/с прямой медный стержень длины 5 м, имеющий сечение  $0,85 \text{ см}^2$ . Угол между продольной осью проводника и горизонтальной составляющей его скорости равен  $53^\circ$ . На движение проводни-

ка затрачивается мощность магнитного поля 2300 кВт. Найти индукцию магнитного поля.

4.320 Катушка диаметра 0,40 м находится в переменном магнитном поле. При изменении индукции магнитного поля на 127,4 Тл в течение 2 с в обмотке катушки возбуждается ЭДС индукции 200 В. Сколько витков имеет катушка?

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

### СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

#### 1 Некоторые 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	$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ 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	$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

#### 2 Плотность твёрдых тел и жидкостей

Вещество	$\rho, 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Вещество	$\rho, 10^3$ г/м <sup>3</sup>
Алюминий	2,71	Вода (при 4 °С)	1
Железо	7,80	Глицерин	1,26
Медь	8,93	Дизельное топливо	1
Свинец	11,3	Масло трансформаторное	0,9
Серебро	10,5	Керосин	0,8
Эбонит	1,2	Масло касторовое	0,9

Магний	1,74	Спирт	0,83
--------	------	-------	------

### 3 Магнитные восприимчивости пара- и диамагнетиков

Парамагнетики	$\chi, 10^{-6}$	Диамагнетики	$\chi, 10^{-6}$
Азот	0,013	Водород	-0,063
Алюминий	23	Бензол	-7,5
Воздух	0,38	Висмут	-176
Вольфрам	176	Вода	-9
Жидкий кислород	3400	Каменная соль	-12,6
Кислород	1,9	Кварц	-15,1
Марганец	121	Медь	-10,3
Платина	360	Стекло	-12,3

### 4 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	$10^{-15}$
да	дека	$10^1$	а	атто	$10^{-18}$

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие методические указания. . . . .	3
Вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы . . . . .	7
Основные законы и формулы . . . . .	9
Примеры решения задач к контрольной работе № 4. . . . .	17
Задания к контрольной работ № 4. . . . .	49
Приложение А Справочные таблицы. . . . .	88

Учебное издание

*БУЙ Михаил Владимирович*  
*ПАВЛЕНКО Александр Петрович*  
*ПРИХОДЬКО Иван Васильевич*

**Ф И З И К А**

Часть 4

**Магнетизм**

Учебно-методическое пособие  
для студентов инженерно-технических специальностей ФБО

Редактор Т. М. Ризевская  
Технический редактор В. Н. Кучерова

Подписано в печать 22.07.2011г. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. л. 4,24. Тираж 1000 экз.  
Зак.№ 2236. Изд. № 45.

Издатель и полиграфическое исполнение  
Белорусский государственный университет транспорта:  
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.  
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.

246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.