

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор-директор ИФВТ  
\_\_\_\_\_.В.В. Лопатин  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

К.Е. Евдокимов

## **ЗАКОН АМПЕРА. СИЛА ЛОРЕНЦА**

Методические указания к практическим занятиям  
для студентов всех специальностей

Издательство  
Томского политехнического университета  
2010

УДК

**Евдокимов К.Е.**

Закон Ампера. Сила Лоренца: Методические указания к выполнению практических заданий для студентов всех специальностей/  
К.Е. Евдокимов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 12 с.

Физика является одной из тех наук, знание которой необходимо для успешного изучения общенаучных и специальных дисциплин. При изучении курса физики студенты должны прочно усвоить основные законы и теории, овладеть необходимыми навыками решения задач по физике. Единственный способ научиться решать задачи, пытаться решать их самостоятельно. Знание теории закрепляется с использованием ее для решения задач.

Методическое пособие содержит основные формулы, задачи различной степени сложности по разделу «Закон Ампера. Сила Лоренца» курса «Электричество и магнетизм».

Методические указания рассмотрены и  
рекомендованы к изданию методическим семинаром  
кафедры теоретической и экспериментальной физики  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Зав. кафедрой  
профессор, доктор физ.-мат. наук

В.Ф. Пичугин

Председатель учебно-методической комиссии

*Рецензент*

доктор физико-математических наук, доцент

*С.И. Борисенко*

© ГОУ ВПО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет», 2010

© Евдокимов К.Е., 2010

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2010

## Основные формулы

• Закон Ампера. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле,

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

где  $I$  — сила тока;  $\mathbf{l}$  — вектор, равный по модулю длине  $l$  проводника и совпадающий по направлению с током;  $\mathbf{B}$  — магнитная индукция поля.

Модуль вектора  $F$  определяется выражением

$$F = B I l \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{l}$  и  $\mathbf{B}$ .

• Сила взаимодействия двух прямых бесконечно длинных параллельных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$ , находящихся на расстоянии  $d$  друг от друга, рассчитанная на отрезок проводника длиной  $l$ , выражается формулой

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} l.$$

• Магнитный момент контура с током

$$\mathbf{p}_m = I \mathbf{S},$$

где  $\mathbf{S}$  — вектор, равный по модулю площади  $S$ , охватываемой контуром, и совпадающий по направлению с нормалью к его плоскости.

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

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \mathbf{B}].$$

Модуль механического момента

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

где  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{p}_m$  и  $\mathbf{B}$ .

• Сила  $\mathbf{F}$ , действующая на заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $\mathbf{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$  (сила Лоренца), выражается формулой

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{v} \mathbf{B}], \text{ или } F = |q| v B \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол, образованный вектором скорости  $\mathbf{v}$  движущейся частицы и вектором  $\mathbf{B}$  индукции магнитного поля.

## Примеры решения задач

**Пример 1.** По двум параллельным прямым проводам длиной  $l=2,5$  м каждый, находящимся на расстоянии  $d=20$  см друг от друга, текут одинаковые токи  $I=1$  кА. Вычислить силу  $F$  взаимодействия токов.

**Решение.** Взаимодействие двух проводников, по которым текут токи, осуществляется через магнитное поле. Каждый ток создает магнитное поле, которое действует на другой проводник. Предположим, что оба тока (обозначим их  $I_1$  и  $I_2$ ) текут в одном направлении.

Вычислим силу  $F_{1,2}$ , с которой магнитное поле, созданное током  $I_1$ , действует на проводник с током  $I_2$ . Расположение проводников, направления сил и силовых линий указано на рис. 1.

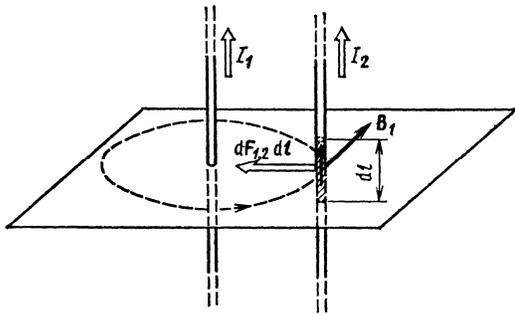


Рис. 1

Модуль магнитной индукции  $B_1$ , определяется соотношением

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \quad (1)$$

Согласно закону Ампера, на каждый элемент второго проводника с током  $I_2$  длиной  $dl_2$  действует в магнитном поле сила

$$dF_{1,2} = I_2 B_1 dl_2 \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между  $dl_2$  и  $B_1$ . Так как отрезок  $dl$  перпендикулярен вектору  $B_1$ , то  $\sin \alpha = 1$  и тогда

$$dF_{1,2} = I_2 B_1 dl_2 \quad (2)$$

Подставив в выражение (2)  $B_1$ , из (1), получим

$$dF_{1,2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} dl.$$

Силу  $F_{1,2}$  взаимодействия проводников с током найдем интегрированием по всей длине второго проводника:

$$F_{1,2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \int_0^{l_2} dl_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l_2.$$

Заметив, что  $I_1 = I_2 = I$  и  $l_2 = l$ , получим

$$F_{1,2} = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d}.$$

**Проверим размерность**

$$[F_{1,2}] = \frac{\text{Гн} \text{А}^2 \text{м}}{\text{м м}} = \frac{\text{Джс}}{\text{м}} = \text{Н}$$

**Произведем вычисления:**

$$F_{1,2} = \frac{4\pi 10^{-7} (10^3)^2 2,5}{2\pi 0,2} = 2,5 \text{ (H)}.$$

**Пример 2.** Провод в виде тонкого полукольца радиусом  $R=10$  см находится в однородном магнитном поле ( $B=50$  мТл). По проводу течет ток  $I = 10$  А. Найти силу  $F$ , действующую на провод, если плоскость полукольца перпендикулярна линиям магнитной индукции, а подводящие провода находятся вне поля.

**Решение.** Расположим провод в плоскости чертежа перпендикулярно линиям магнитной индукции и выделим на нем малый элемент  $dl$  с током. На этот элемент тока  $I dl$  будет действовать по закону Ампера сила  $F = I [l B]$ . Направление этой силы можно определить по правилу векторного произведения.

Используя симметрию, выберем координатные оси так, как это изображено на рис. 2.

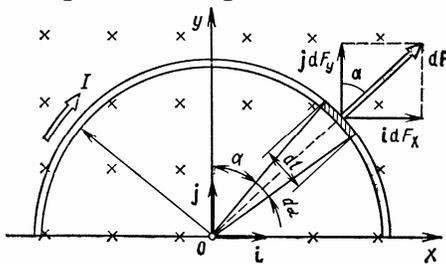


Рис. 2

Силу  $dF$  представим в виде

$$dF = i dF_x + j dF_y,$$

где  $i$  и  $j$  — единичные векторы (орты);  $dF_x$  и  $dF_y$  — проекции вектора  $dF$  на координатные оси  $Ox$  и  $Oy$ .

Силу  $F$ , действующую на весь провод, найдем интегрированием:

$$F = \int_L dF = i \int_L dF_x + j \int_L dF_y$$

где интегрирование ведется по всей длине провода  $L$ .

Из соображений симметрии первый интеграл равен нулю

$$\int_L dF_x = 0.$$

Тогда  $F = j \int_L dF_y$ . Из рис. 2 следует, что  $dF_y = dF \cos \alpha$ , где  $dF$  — модуль вектора  $dF$  ( $dF = I B dl$ , так как вектор  $dl$  перпендикулярен вектору  $B$ ). Выразив длину дуги  $dl$  через радиус  $R$  и угол  $\alpha$ , получим  $dF = I B R d\alpha$ .

Тогда

$$dF_y = I B R \cos \alpha d\alpha.$$

Введем  $dF_y$  под интеграл соотношения (1) и проинтегрируем в пределах от  $-\pi/2$  до  $\pi/2$  (как это следует из рис. 2)

$$F = j I B R \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos \alpha d\alpha = 2 j I B R.$$

Из полученного выражения видно, что сила  $F$  сонаправлена с положительным направлением оси  $Oy$  (единичным вектором  $j$ ). Найдем модуль силы  $F$ :

$$F = |\mathbf{F}| = 2 I B R.$$

**Проверим размерность:**

$$[F] = A \text{ Тл м} = A \frac{H \text{ м}}{A \text{ м}^2} \text{ м} = H.$$

**Произведем вычисления:**

$$F = 2 \cdot 10 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 0,1 \text{ Н}.$$

**Пример 3.** На проволочный виток радиусом  $r=10$  см, помещенный между полюсами магнита, действует максимальный механический момент  $M_{\max}=6,5$  мкН. Сила тока  $I$  в витке равна 2А. Определить магнитную индукцию  $B$  поля между полюсами магнита. Действием магнитного поля Земли пренебречь.

**Решение.** Индукцию  $B$  магнитного поля можно определить из выражения механического момента, действующего на виток с током в магнитном поле,

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

Момент максимален  $M = M_{\max}$ , если  $\alpha=\pi/2$  и  $\sin \alpha=1$ . Учтем также, что  $p_m = I S$ . Тогда

$$M_{\max} = I S B.$$

Площадь витка  $S = \pi r^2$ , следовательно

$$B = M_{\max} / (\pi r^2 I).$$

**Проверим размерность:**

$$[B] = \frac{H}{\text{м}^2 \text{ А}} = \text{Тл}$$

**Произведем вычисления:**

$$B = \frac{6,5 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,1^2 \cdot 2} = 1,04 \cdot 10^{-4} = 104 \text{ (мкТл)}$$

**Пример 4.** Электрон, имея скорость  $v=2$  Мм/с, влетел в однородное магнитное поле с индукцией  $B=30$  мТл под углом  $\alpha=30^\circ$  к направлению линий индукции. Определить радиус  $R$  и шаг  $h$  винтовой линии, по которой будет двигаться электрон.

**Решение.** На заряженную частицу, влетевшую в магнитное поле, действует сила Лоренца, перпендикулярная векторам магнитной индукции  $B$  и скорости  $v$  частицы:

$$F = q v B \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $q$  — заряд частицы.

В случае, если частицей является электрон, формулу (1) можно записать в виде

$$F = |e| v B \sin \alpha.$$

Так как вектор силы Лоренца перпендикулярен вектору скорости, то модуль скорости не будет изменяться под действием этой силы. Но при постоянной скорости, как это следует из формулы (1), останется постоянным и значение силы Лоренца. Известно, что постоянная сила, перпендикулярная скорости, вызывает движение по окружности.

Следовательно, электрон, влетевший в магнитное поле, будет двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, со скоростью  $v_{\perp}$ , равной поперечной составляющей и, скорости (рис. 3); одновременно он будет двигаться и вдоль поля со скоростью  $v_{\parallel}$ :

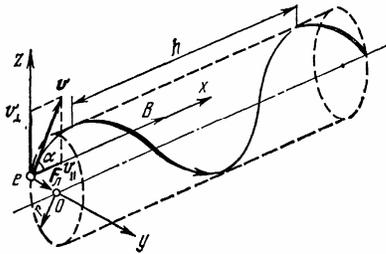


Рис. 3

$$v_{\perp} = v \sin \alpha, \quad v_{\parallel} = v \cos \alpha$$

В результате одновременного участия в движениях по окружности и по прямой электрон будет двигаться по винтовой линии.

Найдем радиус окружности, по которой движется электрон. Сила Лоренца  $F$  сообщает электрону нормальное ускорение  $a_n$ . По второму закону Ньютона,  $F = m a_n$ , где  $F = |e| v_{\perp} B$  и  $a_n = v_{\perp}^2 / R$ .

Тогда

$$|e| v_{\perp} B = m v_{\perp}^2 / R$$

откуда после сокращения на  $v$ . находим радиус винтовой линии:

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

Шаг винтовой линии равен пути, пройденному электроном вдоль поля со скоростью  $v_x$  за время, которое понадобится электрону для того, чтобы совершить один оборот,

$$h = v_{\parallel} T \quad (2)$$

где  $T = 2\pi R/v_{\perp}$  — период вращения электрона. Подставив это выражение для  $T$  в формулу (2), найдем

$$h = \frac{2\pi R v_{\parallel}}{v_{\perp}} = 2\pi R \operatorname{ctg}\alpha.$$

**Проверим размерность:**

$$[R] = \frac{\text{кг м}}{\text{с Кл Тл}} = \frac{\text{кг м м}^2}{\text{с Кл В с}} = \frac{\text{Джс м}}{\text{Джс}} = \text{м}$$

$$[h] = \text{м}$$

**Произведем вычисления:**

$$R = \frac{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot \sin 30^{\circ}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 30 \cdot 10^{-3}} = 1,9 \cdot 10^{-4} = 0,19 \text{ (мм)}$$

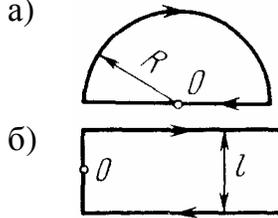
$$h = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,19 \operatorname{ctg} 30^{\circ} = 2,06 \cdot 10^{-3} = 2,06 \text{ (мм)}$$

## Типичные задачи для решения на практическом занятии:

1. Заряженная частица, прошедшая ускоряющую разность потенциалов  $2\text{кВ}$ , движется в магнитном поле с индукцией  $15,1\text{мТл}$  по окружности радиусом  $1\text{см}$ . Определить ее скорость и отношение заряда к массе.

2. Два протона движутся параллельно друг другу с одинаковой скоростью  $v = 300\text{ км/с}$ . Найти отношение сил магнитного и электрического взаимодействия данных протонов.

3. Найти модуль и а) направление силы, действующей на единицу длины тонкого проводника с током  $I = 8\text{ А}$  в точке  $O$ , если проводник изогнут следующим образом



б) радиус закругления  $R = 10\text{ см}$

расстояние между длинными параллельными участками проводника  $l = 20\text{ см}$

4. Два длинных прямых взаимно перпендикулярных провода отстоят друг от друга на расстояние  $a$ . В каждом проводе течет ток  $I$ . Найти максимальное значение силы Ампера на единицу длины провода в этой системе.

5. Найти вращающий момент, действующий на катушку гальванометра, помещенной в магнитное поле с индукцией  $0,1\text{Тл}$  так, что ее плоскость составляет угол  $60^\circ$  с направлением силовых линий магнитного поля. Катушка имеет размеры прямоугольника  $2,3\text{см}$  и по ней течет ток  $0,1\text{мкА}$ .



Учебное издание

ЕВДОКИМОВ Кирилл Евгеньевич

## ЗАКОН АМПЕРА. СИЛА ЛОРЕНЦА

Методические указания к выполнению практических заданий  
для студентов всех специальностей

Подписано к печати \_\_. \_\_. 11. Формат 60x84/16. Бумага «Классика».

Печать RISO. Усл.печ.л. 1,86. Уч.-изд.л. 1,68.

Заказ . Тираж 50 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  тпу. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

