

Магнитное поле

Основные законы и формулы

- Закон Ампера

$$\Delta F = IB\Delta l \sin \alpha$$

[ΔF — модуль силы, действующей на малый отрезок проводника Δl с током I , помещенный в однородное магнитное поле с индукцией B ; α — угол между вектором \vec{B} и элементом проводника с током].

- Связь между векторами магнитной индукции в вакууме и в однородной и изотропной среде

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0$$

[B_0 — магнитная индукция поля, создаваемого проводником с током в вакууме; \vec{B} — магнитная индукция поля, создаваемого тем же проводником в однородной и изотропной среде; μ — магнитная проницаемость среды].

- Принцип суперпозиции (наложения) магнитных полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n = \sum_i \vec{B}_i$$

[\vec{B} — магнитная индукция результирующего поля; \vec{B}_i — магнитные индукции складываемых полей].

- Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным проводником с током I :

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

[μ_0 — магнитная постоянная; μ — магнитная проницаемость среды; r — расстояние данной точки от оси проводника].

- Магнитная индукция B в центре кругового проводника с током I

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

[μ_0 — магнитная постоянная; μ — магнитная проницаемость среды; R — радиус кольца].

- Магнитная индукция поля внутри соленоида в вакууме и среде

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}; \quad B = \mu_0 \mu \frac{NI}{l}$$

[μ_0 — магнитная постоянная; l — длина соленоида; N — число его витков; I — сила тока; μ — магнитная проницаемость среды].

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

$$\Delta F = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} \Delta l$$

[R — расстояние между проводниками; Δl — отрезок проводника].

- Сила Лоренца

$$F_{\text{л}} = QvB \sin \alpha$$

[Q — заряд частицы; v — ее скорость; B — магнитная индукция; α — угол между векторами скорости \vec{v} и магнитной индукции \vec{B}].

- Формула Лоренца

$$F = QE + QvB \sin \alpha$$

[Q — заряд частицы, движущейся со скоростью v ; E — напряженность электрического поля; B — индукция магнитного поля; α — угол между векторами \vec{v} и \vec{B}].

- Магнитный момент контура с током I

$$p_m = IS$$

[S — площадь контура с током].

- Механический (вращающий) момент, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле с индукцией B ,

$$M = Bp_m \sin \alpha$$

[p_m — магнитный момент контура с током; α — угол между вектором нормали к поверхности рамки и вектором магнитной индукции].

- Магнитный поток сквозь поверхность S

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

[B — индукция магнитного поля; α — угол между вектором \vec{B} и положительной нормалью к площади этой поверхности].

- Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

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

[$\Delta \Phi$ — магнитный поток, пересеченный движущимся проводником].

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1 По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводникам, расстояние между которыми $d = 15$ см, текут токи $I_1 = 70$ А и $I_2 = 50$ А в противоположных направлениях. Определите магнитную индукцию B в точке A , удаленной на $r_1 = 20$ см от первого и на $r_2 = 30$ см от второго проводника (рис. 87).

$d = 15 \text{ см} = 0,15 \text{ м}$ $I_1 = 70 \text{ А}$ $I_2 = 50 \text{ А}$ $r_1 = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$ $r_2 = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$	Решение. На рисунке 87 изображены два параллельных прямолинейных проводника с токами I_1 (направлен перпендикулярно чертежу к нам) и I_2 (направлен перпендикулярно чертежу от нас). Индукция магнитного поля в точке A , согласно принципу суперпозиции,
$B = ?$	$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2,$

где \vec{B}_1 и \vec{B}_2 — индукция магнитных полей, созданных в этой точке соответственно проводниками с токами I_1 и I_2 (векторы \vec{B}_1 и \vec{B}_2 направлены из точки A по касательным к линиям магнитной индукции, т. е. к окружностям радиусами $I_1 A$ и $I_2 A$).

Модуль индукции магнитного поля, создаваемого прямым током, определяется (рассматриваем случай вакуума) по формуле

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

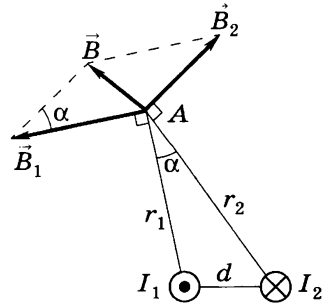


Рис. 87

По теореме косинусов модуль вектора \vec{B}

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

где $B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1}$; $B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_2}$; $\cos \alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - d^2}{2r_1 r_2}$.

Подставив эти выражения в формулу (1), найдем искомую магнитную индукцию

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \sqrt{\frac{I_1^2}{r_1^2} + \frac{I_2^2}{r_2^2} - \frac{I_1 I_2}{r_1^2 r_2^2} (r_1^2 + r_2^2 - d^2)}$$

$$[B] = \text{H} \cdot \text{A}^2 \sqrt{\frac{\text{A}^2}{\text{M}^2}} = \frac{\text{H}}{\text{A} \cdot \text{M}} = \text{Тл}.$$

Ответ: $B = 42,8 \text{ мкТл}$.

2 Два параллельных проводника длиной $l = 1,5 \text{ м}$ каждый находятся в вакууме на расстоянии $d = 10 \text{ см}$ друг от друга. По проводникам текут токи одинакового направления. Определите силу тока I_2 во втором проводнике, если сила взаимодействия между проводниками $F = 3 \text{ мН}$, а сила тока в первом проводнике $I_1 = 40 \text{ А}$.

$$\begin{aligned} l &= 1,5 \text{ м} \\ d &= 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м} \\ F &= 3 \text{ мН} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \\ \mu &= 1 \\ I_1 &= 40 \text{ А} \end{aligned}$$

$$I_2 = ?$$

Решение. Токи I_1 и I_2 направлены перпендикулярно чертежу к нам (обозначены на рис. 88).

Токи создают вокруг себя магнитное поле, линии магнитной индукции которого представляют собой окружности (их направление задано на приведенном рисунке).

По условию задачи $d < l$, поэтому проводники можно считать бесконечно длинными. Тогда индукция магнитного поля, создаваемого проводниками с токами I_1 и I_2 :

$$\begin{aligned} B_1 &= \mu_0 \mu \frac{I_1}{2\pi d}, \\ B_2 &= \mu_0 \mu \frac{I_2}{2\pi d}. \end{aligned} \quad (1)$$

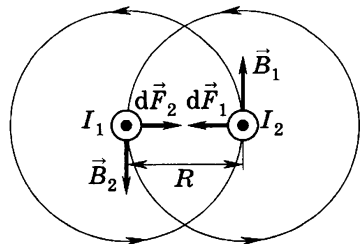


Рис. 88

Направление векторов \vec{B}_1 и \vec{B}_2 определяется правилом правого винта.

Согласно закону Ампера, на каждый элемент длины проводника Δl с током I_2 действует в магнитном поле, создаваемом током I_1 , сила

$$\Delta F_1 = I_2 B_1 \Delta l \quad (2)$$

(ее направление определено по правилу левой руки и указано на рис. 88). Аналогичные рассуждения (ток I_1 находится в магнитном поле, создаваемом током I_2) приводят к выражению

$$\Delta F_2 = I_1 B_2 \Delta l. \quad (3)$$

Подставив выражения (1) в формулы (2) и (3), найдем

$$\Delta F_1 = \mu_0 \mu \frac{I_1 I_2}{2\pi d} \Delta l$$

и

$$\Delta F_2 = \mu_0 \mu \frac{I_1 I_2}{2\pi d} \Delta l,$$

откуда следует, что $\Delta F_1 = \Delta F_2 = \Delta F$,

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

Просуммировав это выражение по всем элементам Δl длины проводников, имеем

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

откуда находим искомую силу тока во втором проводнике

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

$$[I_2] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Гн}/(\text{м}) \cdot \text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Гн} \cdot \text{А}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Вб}/(\text{А}) \cdot \text{А}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Вб}} = \frac{\text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}}{\text{В} \cdot \text{с}} = \text{А}.$$

Ответ: $I_2 = 25 \text{ А}$.

3 Электрон, ускоренный разностью потенциалов 1 кВ, влетел в однородное магнитное поле, индукция которого равна $B = 10 \text{ мТл}$. Скорость электрона перпендикулярна направлению вектора магнитной индукции. Определите радиус r окружности, по которой движется электрон, и период T вращения этого электрона.

$$\begin{aligned}
 U &= 1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В} \\
 B &= 10 \text{ мТл} = 10^{-2} \text{ Тл} \\
 \alpha &= 90^\circ \\
 m &= 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \\
 e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r &= ? \\
 T &= ?
 \end{aligned}$$

Решение. Кинетическая энергия ускоренного электрона $\frac{mv^2}{2}$, согласно закону сохранения, равна работе, совершенной полем ($A = eU$):

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

откуда скорость, с которой электрон влетает в магнитное поле,

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}. \quad (1)$$

На движущийся электрон в магнитном поле действует сила Лоренца $F = evB \sin \alpha$. По условию задачи $\alpha = 90^\circ$, т. е. $F = evB$. Следовательно, сила Лоренца играет роль центростремительной силы.

Согласно второму закону Ньютона,

$$\frac{mv^2}{r} = evB, \quad (2)$$

откуда $r = \frac{mv}{eB}$. Подставив в эту формулу выражение (1), получим искомый радиус окружности, по которой будет двигаться электрон,

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{e}} \quad (3)$$

Период вращения электрона, т. е. время, за которое он совершает один полный оборот,

$$T = \frac{2\pi r}{v}. \quad (4)$$

Подставив в формулу (4) выражение (3), найдем искомый период вращения электрона

$$T = \frac{2\pi}{B} \frac{m}{e}$$

$$[r] = \frac{1}{\text{Тл}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{В}}{\text{Кл}}} = \frac{1}{\text{Тл}} \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{Дж}}{\text{Кл}^2}} = \frac{1}{\text{Тл} \cdot \text{Кл}} \sqrt{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2} =$$

$$= \frac{\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{Н} / (\text{А} \cdot \text{м})} = \frac{\text{А} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{Н}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{Н} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} / (\text{с})^2 \cdot \text{с}^2} = \text{м},$$

$$[T] = \frac{\text{кг}}{\text{Тл} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{кг}}{\text{Н} / (\text{А} \cdot \text{м}) \cdot \text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{м} / (\text{с}^2) \cdot \text{м} \cdot \text{с}} = \text{с}.$$

Ответ: $r = 10,7$ мм; $T = 3,57$ нс.

4 Электрон влетает в однородное магнитное поле, индукция которого 2 мТл, со скоростью $7,6$ Мм/с под углом $\alpha = 60^\circ$ к вектору индукции (рис. 89). Определите радиус витка и шаг спирали, по которой будет двигаться электрон.

$$B = 2 \text{ мТл} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$$

$$v = 7,6 \text{ Мм/с} = 7,6 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ Кл}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

R — ?

h — ?

Решение. Если скорость \vec{v} электрона направлена под углом α к вектору \vec{B} , то его движение можно представить в виде суперпозиции: 1) равномерного прямолинейного движения вдоль вектора \vec{B} со скоростью $v_{\parallel} = v \cos \alpha$; 2) равномерного движения со скоростью $v_{\perp} = v \sin \alpha$ по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{B} .

В результате сложения движений возникает движение по спирали.

Сила Лоренца \vec{F} действует на электрон в плоскости, перпендикулярной вектору \vec{B} , сообщая ему нормальное ускорение. В результате электрон описывает в этой плоскости окружность радиусом R . Согласно второму закону Ньютона,

$$ev_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{R}$$

или

$$evB \sin \alpha = \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{R},$$

откуда искомое выражение для радиуса витка спирали имеет вид

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

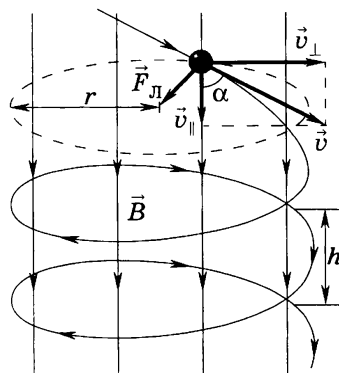


Рис. 89

Шаг спирали равен расстоянию h , на которое смещается электрон вдоль \vec{B} за один оборот:

$$h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha.$$

Так как $T v_{\perp} = 2\pi R$, то

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha},$$

откуда находим искомое выражение для шага спирали

$$h = \frac{2\pi R \cos \alpha}{v \sin \alpha} = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{e B}.$$

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{e B}$$

$$[R] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{Тл}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}}{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{Н}/(\text{А} \cdot \text{м})} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{Н} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}/(\text{с}^2) \cdot \text{с}^2} = \text{м},$$

$$[h] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{Тл}} = \text{м} \text{ (см. предыдущее преобразование)}.$$

Ответ: $R = 1,87 \text{ см}; h = 6,79 \text{ см}.$

5 Электрон, влетев в однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B = 50 \text{ мТл}$, движется по окружности радиусом $R = 15 \text{ см}$. Определите магнитный момент эквивалентного кругового тока.

$$\begin{aligned} B &= 50 \text{ мТл} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл} \\ R &= 15 \text{ см} = 0,15 \text{ м} \\ e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ m &= 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \end{aligned}$$

Решение. Движение электрона по окружности эквивалентно круговому току, поэтому магнитный момент кругового тока

$$p_m - ? \quad \left| \quad p_m = IS = \frac{e}{T} S, \quad (1)\right.$$

где e — заряд электрона; T — период обращения электрона; S — площадь, которая ограничена окружностью, описываемой электроном.

Период обращения и площадь соответственно равны

$$T = \frac{2\pi R}{v} \quad \text{и} \quad S = \pi R^2, \quad (2)$$

где R — радиус окружности; v — скорость электрона.

Согласно второму закону Ньютона,

$$m a_n = F_{\text{л}},$$

где $a_n = \frac{v^2}{R}$ — нормальное ускорение, сообщаемое электрону силой Лоренца

$$F_{\text{Л}} = evB.$$

Тогда

$$\frac{mv^2}{R} = evB,$$

откуда скорость электрона

$$v = \frac{eBR}{m}. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) находим период обращения электрона

$$T = \frac{2\pi m}{eB}. \quad (4)$$

Подставив выражения (4) для T и (2) для S , найдем искомый магнитный момент эквивалентного кругового тока

$$p_m = \frac{e^2 BR^2}{2m}$$

$$[p_m] = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}} = \frac{\text{А}^2 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{Н} / (\text{А} \cdot \text{м}) \cdot \text{м}^2}{\text{кг}} = \frac{\text{А} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{Н}}{\text{м} \cdot \text{кг}} = \\ = \frac{\text{А} \cdot \text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Н}} = \text{А} \cdot \text{м}^2.$$

Ответ: $p_m = 15,8 \text{ пА} \cdot \text{м}^2$.

6 Определите магнитный момент p_m соленоида (без сердечника) длиной $l = 25 \text{ см}$, если магнитный поток Φ сквозь площадь поперечного соленоида равен $1,5 \text{ мкВб}$.

$$\begin{array}{l} l = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м} \\ \Phi = 1,5 \text{ мкВб} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Вб} \\ p_m = ? \end{array}$$

Решение. Магнитный момент соленоида, содержащего N витков,

$$p_m = ISN, \quad (1)$$

где I — сила тока, S — площадь поперечного сечения соленоида.

Магнитный поток сквозь площадь поперечного сечения соленоида

$$\Phi = BS,$$

где магнитная индукция поля внутри соленоида без сердечника

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

($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная). Тогда

$$\Phi = \mu_0 \frac{NI}{l} S,$$

откуда

$$I = \frac{\Phi l}{\mu_0 N S}. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в формулу (1), найдем искомый магнитный момент соленоида

$$p_m = \frac{\Phi l}{\mu_0}$$

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

Ответ: $p_m = 0,299 \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

7 На квадратную рамку со стороной $a = 20$ см, находящуюся в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5$ Тл, нормаль к которой составляет с направлением магнитного поля угол $\alpha = 30^\circ$, действует вращающий момент $M = 0,02$ Н·м (рис. 90). Определите площадь сечения $S_{\text{пр}}$ проводника, из которого изготовлена рамка, если по ней течет ток, плотность которого $j = 1$ А/мм².

$a = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$
 $B = 0,5 \text{ Тл}$
 $\alpha = 30^\circ$
 $M = 0,02 \text{ Н} \cdot \text{м}$
 $j = 1 \text{ А/мм}^2 = 10^6 \text{ А/м}^2$

 $S_{\text{пр}} \text{ — ?}$

Решение. Плотность тока в рамке

$$j = \frac{I}{S_{\text{пр}}},$$

откуда сила тока

$$I = j S_{\text{пр}}. \quad (1)$$

Момент сил (вращающий момент), действующий на рамку с током, которая находится в однородном магнитном поле,

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

где магнитный момент рамки с током $p_m = IS$ (S — площадь поперечного сечения квадратной рамки $S = a^2$). Учитывая эти формулы, запишем

$$M = B I a^2 \sin \alpha. \quad (2)$$

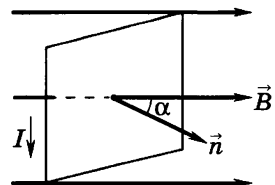


Рис. 90

Подставив формулу (1) в выражение (2), имеем

$$M = B j S_{\text{пр}} a^2 \sin \alpha,$$

откуда искомая площадь сечения проводника

$$S_{\text{пр}} = \frac{M}{B j a^2 \sin \alpha}$$

$$[S_{\text{пр}}] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Тл} \cdot \text{А} / (\text{м}^2) \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н} / (\text{А} \cdot \text{м}) \cdot \text{А}} = \text{м}^2.$$

Ответ: $S_{\text{пр}} = 2 \text{ мм}^2$.

8 В однородном магнитном поле с индукцией $B = 50 \text{ мТл}$ находится прямой проводник длиной $l = 10 \text{ см}$, расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции. По проводу течет ток $I = 1 \text{ А}$. Определите работу A сил поля, если провод переместился на расстояние $a = 4 \text{ см}$.

$$B = 50 \text{ мТл} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$l = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$I = 1 \text{ А}$$

$$a = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$A \text{ — ?}$$

Решение. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

$$A = I \Delta \Phi, \quad (1)$$

где $\Delta \Phi$ — магнитный поток, пересеченный движущимся проводником;

$$\Delta \Phi = BS \quad (2)$$

(учли, что прямой проводник расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции, т. е. угол α между вектором \vec{B} и нормалью к пересекаемой проводником площади поверхности равен нулю). Площадь поверхности, пересекаемой проводником,

$$S = al. \quad (3)$$

Подставив выражения (2) и (3) в формулу (1), найдем искомую работу

$$A = I B a l$$

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

Ответ: $A = 0,2 \text{ мДж}$.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

3.126. Определите индукцию B_0 магнитного поля в вакууме, если магнитная индукция B в однородной и изотропной среде с магнитной проницаемостью $\mu = 2$ составляет 10 мТл. [$B_0 = 5$ мТл]

3.127. Определите индукцию B однородного магнитного поля, если на активную часть проводника с током $I = 10$ А длиной $l = 10$ см, расположенного под углом $\alpha = 45^\circ$ к линиям магнитной индукции, действует сила $F = 50$ мН. [$B = 0,707$ Тл]

3.128. Проводник с током $I = 40$ А расположен перпендикулярно к линиям индукции магнитного поля ($B = 5$ мТл). Определите длину активной части проводника, если на него со стороны поля действует сила $F = 20$ мН. [$l = 10$ см]

3.129. Сила тока I в горизонтально расположенном проводнике длиной $l = 10$ см и массой $m = 5$ г равна 15 А. Определите индукцию B магнитного поля, в которое следует поместить проводник, чтобы он находился в равновесии. [$B = 32,7$ мТл]

3.130. Проводник длиной $l = 10$ см (он может перемещаться без трения) с током $I = 20$ А находится в однородном магнитном поле ($B = 10$ мТл), перпендикулярном плоскости контура. Определите работу A , совершенную источником тока, если проводник переместился на расстояние $s = 5$ см. [$A = 1$ мДж]

3.131. Определите индукцию B магнитного поля прямого тока в вакууме в точке, находящейся на расстоянии $r = 10$ см от проводника, если по проводнику течет ток $I = 60$ А. [$B = 0,12$ мТл]

3.132. Индукция B однородного магнитного поля в вакууме на расстоянии $r = 2,5$ см от бесконечно длинного проводника с током равна 0,4 мТл. Определите силу тока I в проводнике. [$I = 50$ А]

3.133. Определите магнитную индукцию B в вакууме на расстоянии $r = 20$ см от бесконечно длинного прямого проводника с током, если диаметр проводника $d = 4$ мм, а плотность тока j в проводнике равна 1 А/см². [$B = 0,126$ мкТл]

3.134. Два бесконечно длинных прямых провода с токами $I_1 = 60$ А и $I_2 = 30$ А, текущими в противоположных направлениях, расположены в воздухе на расстоянии $r = 10$ см друг от друга. Определите магнитную индукцию B поля, создаваемого обоими токами в точке A , которая лежит посередине между проводами. [$B = 360$ мкТл]

3.135. Два бесконечно длинных прямых провода с токами $I_1 = 60$ А и $I_2 = 30$ А, текущими в одинаковом направлении, расположены в воздухе на расстоянии $r = 10$ см друг от друга. Определите магнитную индукцию B поля, создаваемого обоими токами в точке A , которая лежит посередине между проводами. [$B = 120$ мкТл]

3.136. Два бесконечно длинных прямых проводника с токами $I_1 = 60$ А и $I_2 = 30$ А, текущими в одинаковом направлении, находятся на расстоянии $r = 9$ см друг от друга в воздухе. Определите, на каком расстоянии d от первого проводника находится точка A , расположенная вдоль прямой, соединяющей эти проводники, в которой индукция магнитного поля равна нулю. [$d = 6$ см]

3.137. Два бесконечно длинных прямолинейных проводника, по которым в противоположных направлениях текут токи $I_1 = 10$ А и $I_2 = 20$ А, находятся в вакууме на расстоянии $d = 5$ см друг от друга. Определите индукцию магнитного поля в точке A , расположенной на расстоянии $r_1 = 4$ см от первого проводника и $r_2 = 3$ см от второго. [$B = 0,142$ мТл]

3.138. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводникам, расстояние между которыми в вакууме $d = 15$ см, текут токи $I_1 = 70$ А и $I_2 = 50$ А в одинаковом направлении. Определите магнитную индукцию B в точке A , удаленной на $r_1 = 20$ см от первого и $r_2 = 30$ см от второго проводника. [$B = 178$ мкТл]

3.139. Магнитная индукция B в центре кругового проволочного витка в вакууме, по которому течет ток $I = 1$ А, составляет 6,28 мкТл. Определите радиус витка. [$R = 10$ см]

3.140. Магнитная индукция B в центре кругового проводника длиной $l = 20$ см равна 15 мкТл. Определите диаметр d проводника, если плотность тока в нем $j = 0,1$ А/мм². [$d = 5,51$ мм]

3.141. Соленоид без сердечника длиной $l = 1,2$ м изготовлен из вплотную прилегающей алюминиевой проволоки диаметром $d = 0,4$ мм. Определите индукцию B магнитного поля внутри соленоида, если диаметр витка $D = 3$ см и на концах проводника поддерживается разность потенциалов $U = 10$ В. Удельное сопротивление алюминия 26 нОм·м. [$B = 537$ мкТл]

3.142. Магнитная индукция B в центре кругового проволочного кольца с током $I = 10$ А из медной проволоки сечением $S = 0,4$ мм² составляет 5 мкТл. Определите разность потенциалов U между концами проволоки, образующей кольцо. Удельное сопротивление меди $\rho = 17$ нОм·м. [$U = 3,35$ В]

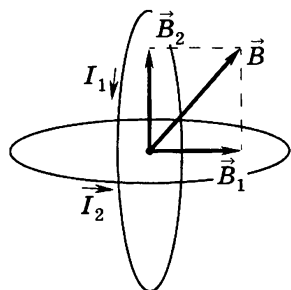


Рис. 91

3.143. Два кольцевых проводника радиусом $R = 5$ см с токами $I_1 = 2$ А и $I_2 = 3$ А расположены в вакууме в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 91). Определите индукцию B магнитного поля в центре этих колец. [$B = 21,5$ мкТл]

3.144. Круговой виток радиусом $R = 10$ см расположен относительно бесконечно длинного провода так, что его плоскость параллельна проводу. Перпендикуляр, восставленный на провод из центра витка, является нормалью к плоскости витка. Сила тока в проводе $I_1 = 4$ А, сила тока в витке $I_2 = 5$ А. Расстояние от центра витка до провода $d = 15$ см. Определите магнитную индукцию в центре витка. [$B = 99,4$ мкТл]

3.145. Длинный прямой соленоид без сердечника из проволоки диаметром $d = 0,3$ мм намотан так, что витки вплотную прилегают друг к другу. Пренебрегая толщиной изоляции провода, определите индукцию B магнитного поля внутри соленоида при силе тока $I = 5$ А. [$B = 20,9$ мТл]

3.146. Индукция B магнитного поля на оси бесконечно длинного соленоида без сердечника при силе тока $I = 1$ А составляет 3,14 мТл. Определите диаметр провода, из которого изготовлена однослойная обмотка соленоида, если ее витки плотно прилегают друг к другу. [$d = 0,4$ мм]

3.147. Определите магнитную индукцию B на оси бесконечно длинного соленоида с никелевым сердечником, если на единицу длины соленоида приходится $n = 100$ витков, сила тока в обмотке соленоида $I = 5$ А, а магнитная проницаемость никеля $\mu = 200$. [$B = 0,126$ Тл]

3.148. Два параллельных проводника длиной $l = 1$ м каждый находятся в вакууме на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. По проводникам текут противоположно направленные токи. Определите силу тока I_2 во втором проводнике, если сила взаимодействия между проводниками $F = 10$ мН, а сила тока в первом проводнике $I_1 = 50$ А. [$I_2 = 100$ А]

3.149. Два параллельных проводника с одинаковыми токами находятся на расстоянии $r = 8$ см друг от друга и притягиваются с силой $F = 1$ мН. Определите силу тока в проводниках, если длина l каждого из них 4 м, а токи имеют одинаковое направление. [$I = 10$ А]

3.150. По прямому длинному, горизонтально расположенному проводу пропускают ток $I_1 = 20$ А. Под проводом на расстоянии $R = 1$ см находится параллельный ему алюминиевый провод, по которому течет ток $I_2 = 2$ А. Определите, какой следует выбрать площадь поперечного сечения S алюминиевого провода, чтобы удержать его незакрепленным. Плотность алюминия $\rho = 2,7$ г/см³. [$S = 3,02 \cdot 10^{-8}$ м²]

3.151. Два параллельных прямых проводника, по которым текут токи $I_1 = 20$ А и $I_2 = 50$ А, находятся в вакууме на расстоянии $r = 50$ см друг от друга. Определите силу, действующую на единицу длины проводника. [400 мкН/м]

3.152. Определите силу тока в воздушных проводах троллейбусной линии, если они расположены друг от друга на расстоянии $d = 0,6$ м и на каждый элемент $\Delta l = 1$ м длины проводов действует сила $\Delta F = 1,34$ Н. [$I = 2$ кА]

3.153. Вычислите значение магнитной постоянной μ_0 . [$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м]

3.154. Определите силу Лоренца $F_{\text{Л}}$, действующую на протон, влетевший со скоростью $v = 1$ Мм/с в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ Тл под углом $\alpha = 60^\circ$ к линиям индукции. [$1,39 \cdot 10^{-14}$ Н]

3.155. Протон и электрон влетают в однородное магнитное поле с одинаковой скоростью перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определите отношение радиусов кривизны траекторий протона и электрона. [1830]

3.156. Протон, ускоренный разностью потенциалов $U = 1$ кВ, влетая в однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B = 0,1$ Тл, движется по окружности. Определите радиус этой окружности. [$R = 4,57$ см]

3.157. Определите угловую скорость ω вращения протона по окружности, которую он описывает в однородном магнитном поле с индукцией $B = 5$ мТл. [$\omega = 5 \cdot 10^5$ с⁻¹]

3.158. Заряженная частица с кинетической энергией $E_k = 500$ эВ движется в однородном магнитном поле по окружност-

ти радиусом $R = 0,5$ м. Определите силу, действующую со стороны поля на частицу. $[F_{\text{л}} = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ Н}]$

3.159. Электрон, ускоренный разностью потенциалов $U = 1$ кВ, движется в вакууме параллельно прямолинейному длинному проводнику на расстоянии $r = 2,5$ см от него. Определите силу F , действующую на электрон, если ток в проводнике $I = 20$ А. $[F = 4,8 \cdot 10^{-16} \text{ Н}]$

3.160. Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ мТл со скоростью $v = 2$ Мм/с под углом $\alpha = 60^\circ$ к вектору \vec{B} . Определите радиус R витка и шаг h спирали, по которой будет двигаться электрон. $[R = 9,86 \text{ см}; h = 35,8 \text{ см}]$

3.161. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ мТл по винтовой линии (см. рис. 89). Определите скорость v электрона, если шаг h винтовой линии равен 20 см, а радиус витка $R = 5$ см. $[v = 1,04 \text{ Мм/с}]$

3.162. Определите скорость v , с которой должен двигаться перпендикулярно скрещенным под прямым углом однородным электрическому ($E = 150$ кВ/м) и магнитному ($B = 0,1$ Тл) полям пучок заряженных частиц, чтобы этот пучок не отклонялся. $[v = 1,5 \text{ Мм/с}]$

3.163. Покоящийся в начальный момент протон ускоряется однородным электрическим полем. Через время $t = 0,1$ с он влетает в магнитное поле с индукцией $B = 2$ мТл, которое перпендикулярно электрическому. Как и во сколько раз отличаются в этот момент нормальная a_n и тангенциальная a_τ составляющие ускорения? $[B \text{ 1920 раз}]$

3.164. Определите магнитный момент p_m кольца диаметром $d = 25$ см при силе тока в нем $I = 15$ А. $[p_m = 736 \text{ мА} \cdot \text{м}^2]$

3.165. Определите радиус R плоской катушки, имеющей $N = 50$ витков, если при силе тока $I = 1$ А магнитный момент катушки $p_m = 0,628 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. $[R = 20 \text{ см}]$

3.166. В однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B = 10$ мкТл помещена квадратная рамка со стороной $a = 15$ см. Определите магнитный поток Φ , пронизывающий рамку, если нормаль к плоскости рамки составляет с направлением магнитного поля угол $\alpha = 30^\circ$. $[\Phi = 195 \text{ нВб}]$

3.167. Магнитный момент p_m соленоида без сердечника длиной $l = 50$ см равен $0,4 \text{ А} \cdot \text{м}^2$. Определите поток Φ магнитной индукции через площадь поперечного сечения этого соленоида. $[\Phi = 1 \text{ мкВб}]$

3.168. Соленоид без сердечника содержит $N = 300$ витков и имеет длину $l = 50$ см. Определите полный магнитный поток Φ , пронизывающий соленоид, если площадь поперечного сечения соленоида $S = 20$ см² и сила тока $I = 2$ А. [$\Phi = 905$ мкВб]

3.169. Электрон, влетая в однородное магнитное поле с индукцией $B = 1$ мТл, движется по окружности. Определите радиус R этой окружности, если магнитный момент p_m эквивалентного кругового тока равен 12 пА · м². [$R = 92,4$ см]

3.170. Прямоугольная рамка со сторонами $a = 10$ см и $b = 15$ см, содержащая $N = 50$ витков, помещена во внешнее однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Нормаль к рамке составляет с направлением магнитного поля угол $\alpha = \pi/6$. Определите вращающий момент сил, действующих на рамку, если по ней течет ток $I = 2$ А. [$M = 75$ мН · м]

3.171. Прямоугольная рамка со сторонами $a = 10$ см и $b = 15$ см, содержащая $N = 100$ витков, помещена во внешнее однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,2$ Тл. Определите максимальный вращающий момент, действующий на рамку в этом поле, если сила тока в рамке $I = 1$ А. [$M_{\max} = 0,3$ Н · м]

3.172. На квадратную рамку со стороной $a = 15$ см, находящуюся в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,2$ Тл, нормаль к которой составляет с линиями магнитной индукции угол $\alpha = 45^\circ$, действует вращающий момент $M = 2,25$ мН · м. Определите плотность тока j в рамке, если площадь сечения проводника $S_{\text{пр}}$, из которого изготовлена рамка, равна 3 мм². [$j = 2,36$ А/мм²]

3.173. Определите работу перемещения проводника с током $I = 2$ А в магнитном поле, если магнитный поток $\Delta\Phi$, пересеченный движущимся проводником, составляет $0,01$ Вб. [$A = 20$ мДж]

3.174. Определите работу A , которую надо совершить при перемещении проводника длиной $l = 0,2$ м с током $I = 5$ А на расстояние $a = 10$ см, если индукция B однородного магнитного поля равна $0,1$ Тл. Проводник движется перпендикулярно линиям магнитной индукции. [$A = 10$ мДж]

3.175. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции расположен прямой проводник длиной $l = 40$ см, по которому течет ток $I = 2$ А. Определите индукцию B магнитного поля, если работа A сил поля по перемещению проводника на расстояние $a = 5$ см равна $0,1$ мДж. [$B = 2,5$ мТл]