II. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

2. 1. Магнитное поле в вакууме

Справочные сведения

Сила, действующая на элемент тока $I\overrightarrow{dl}$, помещенный в магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, равна:

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

На контур с током, помещенный в магнитное поле, действует вращающий момент:

$$\vec{M} = \left[\vec{P}_M\,\vec{B}\right],$$

где $\vec{P}_M = IS\vec{n}_0$ — магнитный момент контура с током,
$\vec{n}_0$ — единичный вектор, перпендикулярный к контуру,
S — площадь, охватываемая контуром,
I— ток в контуре.

Работа силы Ампера при перемещении проводника с током в магнитном поле равна:

$$dA=Id\Phi,$$

где $d\Phi$ — магнитный поток, пересекаемый проводником с током. Магнитный поток через элементарную площадку dS:

$$d\vec{\Phi} = \left(\vec{B}d\vec{S}\right)$$

Напряженность магнитного поля:

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

где $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}\ \frac{\text{Г}}{\text{М}}$ магнитная постоянная,
μ — магнитная проницаемость среды
Закон Био - Савара - Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\cdot\frac{1}{r^3}\left[d\vec{l}\,\vec{r}\right],$$

где $I\overrightarrow{dl}$ — элемент тока,
$\vec{r}$ — радиус-вектор, проведенный от элемента проводника к точке, в которой определяется индукция магнитного поля.
Индукция точки поля, созданного проводником с током:

$$\vec{B} = \sum \overrightarrow{dB_i}.$$

а) Индукция магнитного поля прямого проводника с током конечной длины в произвольной точке A равна:

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

Для бесконечно длинного прямого проводника с током

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0}.$$

б) Индукция магнитного поля в центре кругового тока радиусом R:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} = \frac{\mu\mu_0 P_M}{2\bar{n}R^3}.$$

Индукция магнитного поля в точке, лежащей на оси кругового тока на расстоянии h от его центра:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2}\frac{IR^2}{\left(R^2 + h^2\right)^{3/2}} = \frac{\mu\mu_0 P_M}{2\pi\left(R^2 + h^2\right)^{3/2}}.$$

в) Индукция магнитного поля в точке, лежащей на оси соленоида:

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} nI\left(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1\right)$$

(здесь n — число витков, приходящихся на единицу длины соленоида, a_2, a_1 - углы, образованные положительным направлением оси соленоида (по направлению вектора $\vec{B}$ в соленоиде) и прямыми от исследуемой точки до концов соленоида).

Для бесконечно длинного соленоида

$$B = \mu\mu_0 nI.$$

Закон полного тока. Циркуляция вектора напряженности $\vec{H}$ вдоль замкнутого контура равна алгебраической сумме постоянных токов, охватываемых этим контуром:

$$\oint_L \left(\vec{H}\,\overrightarrow{dl}\right) = \sum_{i=1} I_i.$$

Полная сила Лоренца:

$$\vec{F}_Л = q\vec{E} + q\left[\vec{v}\vec{B}\right].$$

Магнитная сила Лоренца, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$:

$$\vec{F} = q\left[\vec{v}\vec{B}\right].$$

ЭДС Холла, возникающая на гранях пластины, по которой идет ток, находящийся в магнитном поле:

$$E_H = \frac{IB_n}{S} h \frac{I}{ne} = \frac{IB_n}{S} hR_H,$$

где B_n - индукция поля, нормального току;

$S = ah$; $R_H = \frac{1}{ne}$ - постоянная Холла,

n — концентрация свободных носителей заряда

Индуктивность катушки:

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

где N — число витков обмотки,

l— длина катушки,

S — площадь сечения катушки,

μ — относительная магнитная проницаемость вещества, заполняющего катушку.

При наличии в цепи двух катушек с индуктивностями L_1 и L_2 и взаимной индуктивностью M общая индуктивность системы равна:

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M$$

где М = К $\sqrt{L_1L_2}$,

К,- коэффициент связи. (Знак «+» берется, если поля одинаково направлены.)

Энергия магнитного поля:

$$W_N = \frac{1}{2} LI^2.$$

Плотность энергий магнитного поля:

$$\omega_M = \frac{W_M}{V} = \frac{1}{2}\mu_0\mu H^2 = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0\mu} = \frac{1}{2} BH.$$

Коэффициент взаимной индукции двух катушек (для частного случая, когда две катушки надеты на общий магнитопровод):

$$M = \mu_0\mu n_1 n_2 lS.$$

(Здесь n_1 и n_2 - плотности намоток катушек — число витков на единицу длины.)

Подъемная сила электромагнита:

$$F = \frac{1}{2} B^2 \frac{S}{\mu_0},$$

где S — площадь магнитопровода.

Установившийся ток в цепи с индуктивностью и с сопротивлением:

$$i = \frac{E}{R}\left[1-\exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right],$$

где t - время, прошедшее с момента замыкания цепи,

$\frac{L}{R}$ - время релаксации.

Ток в цепи с катушкой и сопротивлением при размыкании изменяется по закону:

$$i = I_{макс} exp\left(-\frac{R}{L}t\right),$$

где $\frac{L}{R}$ - время релаксации.

Намагниченность магнетика - магнитный момент единицы объема:

$$I = \frac{x}{\mu_0}B_0,$$

где x - магнитная восприимчивость вещества (величина безразмерная),

B_0— индукция внешнего магнитного поля, μ_0 = 4π•$^{10-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

Полная индукция в веществе, находящемся в магнитном поле с индукцией $\vec{B}_0$:

$$\vec{B} = \vec{B}_0(1+x) = \vec{B}_0\mu,$$

где $1 + x = \mu$ - относительная магнитная проницаемость.

Примеры решения задач

Задачи настоящего параграфа охватывают следующие темы: а) нахождение поля по заданной конфигурации токов методом суперпозиции и с помощью закона полного тока; б) действие магнитного поля на ток и на движущийся заряд; в) работа сил магнитного поля.

За исходное явление при изучении электромагнетизма следует считать взаимодействие токов и, следовательно, в качестве силовой характеристики магнитного поля берется индукция $\vec{B}$ поля.

При нахождении индукции магнитного поля методом суперпозиции с использованием либо непосредственно закона Био-Савара-Лапласа, либо из формул, выведенных ранее из этого закона; следует помнить, что этот закон справедлив только для линейных токов, т.е. для проводников, поперечные размеры которых пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием от проводника до заданной точки поля. Отсутствие каких-либо данных о поперечных сечениях проводников в условии задачи является неявным указанием на линейность тока При использовании закона полного тока так же, как и теоремы Гаусса, надо знать, какие выводы делаются на основании симметрии токов. Существенно, что в законе полного тока фигурирует индукция результирующего поля, создаваемого всеми токами, поэтому, применяя этот закон, следует тщательно анализировать конфигурацию токов, создающих поле, не забывая о подводящих проводах.

Решение задач о движении заряженных частиц в электрическом и магнитном полях основано на составлении уравнения динамики материальной точки с учетом сил, действующих на заряженную частицу со стороны магнитного и электрическог поля. В некоторых задачах к уравнению динамики необходимо добавить кинематические уравнения.

З*адача1***.** Бесконечно длинный прямой проводник, обтекаемый током l=5А, согнут под прямым углом. Найти индукцию магнитного поля в точках *A* и *C*, находящихся на биссектрисе угла, и в точке *D* на продолжении одной из его сторон. Расстояние от вершины угла до каждой из точек r = 10 см.

Решение

В любой точке *К* индукция магнитного поля может быть найдена как векторная сумма индукций магнитных полей, созданных токами, протекающими по вертикальной *1* и горизонтальной *2* частям провода, т.е.

$$\vec{B}_{к} = \vec{B}_{1к} + \vec{B}_{2к}.$$

Используем формулу поля конечного прямого тока

$$B = \frac{\mu_0 l}{4\pi a}(\cos a_1 - \cos a_2),$$

,где a – расстояние от рассматриваемой точки М поля до проводника с током, a_1, a_2 - углы, образованные радиус-векторами, проведенными из начала и из конца проводника к этой точке, и напрвлением тока. Оговорка в условии относительно бесконечной длины проводника позволяет пренебречь полем, создаваемым подводящими проводами, идущими к источнику.

Рассмотрим сначала точку *A*:

для первого проводника $a_,$=0; a_2=135˚;

для второго проводника $a_,$=45˚; a_2=π.

Расстояние от точки *A* до каждого из проводников $a=r\cos 45^\circ$.

Подставляя полученные значения углов в формулу, находим

$$B_{1A} = B_{2A} = \frac{\mu_0 l}{2\pi r\sqrt{2}}\left(1+\frac{\sqrt{2}}{2}\right).$$

Векторы индукции полей, создаваемых проводниками *1* и *2* в точке *A*, направлены перпендикулярно плоскости рисунка «от нас». Следовательно,

$$B_A = B_{1A} + B_{2A} = \frac{\mu_0 l}{\pi r\sqrt{2}}\left(1+\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = 2{,}4\ 10^{-5}\ \text{Тл}.$$

В точке *C*:
для первого проводника $a''_{,}=0$; $a_2''=45°$;
для второго проводника $a''_{,}= 135\ °$; $a_2''=\pi$;
векторы индукции $\vec{B}_{1C}$ и $\vec{B}_{2C}$ по-прежнему направлены в одну сторону, перпендикулярно плоскости рисунка «на нас».

Получим окончательный ответ:

$$B_C = B_{C1} + B_{C2} = \frac{\mu_0 l}{\pi r\sqrt{2}}\left(1-\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = 0{,}4\ 10^{-5}\ \text{Тл}.$$

В точке *D* проводник *l* не создает поля, так как эта точка лежит на его продолжении.

Задача 2. К тонкому однородному проволочному кольцу радиуса *ρ* подводят ток *l* . Найти индукцию магнитного поля в центре кольца, если подводящие провода, делящие кольцо на две дуги длиной l_1 и l_2, расположены радиально и бесконечно длинны.

Решение

Вследствие радиального расположения подводящие провода не будут создавать поля в центре кольца, а условие «бесконечной длины» позволяет пренебречь полем, создаваемой той частью провода, которая подходит к источнику. Поэтому индукция магнитного поля в центре кольца

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_{2к}. \tag{3.1.1}$$

где $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ – векторы индукции магнитных полей, созданных соответственно дугами l_1 и l_2. Ток *l* в кольце разветвляется на токи i_1 и i_2 и, направленные в противоположные стороны, и, соответственно, векторы $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ будут направлены в разные стороны. Поэтому векторное равенство (3.1.1) можно заменить скалярным:

$$B=B_1-B_2. \tag{3.1.2}$$

Для нахождения B_1 *и* B_2 применим закон Био-Савара-Лапласа:

$$dB=\mu_0\frac{idl\sin d\vec{l},\vec{r}_0}{4\pi r^2}. \tag{3.1.3}$$

Интегрируя выражение (3.1.3) по дугам l_1 и l_2 и учитывая, что для любого элемента dl угол $d\vec{l}\ ,\vec{r}_0 = \frac{\pi}{2}$, $r=\rho$, получаем

$$\left.\begin{aligned} B_1 &= \frac{\mu_0 i_1 l_1}{4\pi\rho^2} \\ B_2 &= \frac{\mu_0 i_{21} l_2}{4\pi\rho^2} \end{aligned}\right\} \qquad (3.1.4)$$

Подставляя выражения (3.1.4) в равенство (3.1.2), находим

$$B = \frac{\mu_0}{\rho^2 4\pi}(i_1 l_1 - i_2 l_2).$$

Токи i_1 и i_2 параллельны и, следовательно, обратно пропорциональны сопротивлениям дуг, т.е. обратно пропорциональны их длинам:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{l_2}{l_1},$$

откуда $i_1 l_1 = i_2 l_2$, и искомая индукция

$$B=0.$$

Можно показать, что из выражения (3.1.4) при замене длины дуги длиной окружности $l=2\pi\rho$ получается известная формула индукции поля в центре витка:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\rho}.$$

Задача 3.При каком соотношении между длиной l и диаметром D соленоида поле в центре его можно рассчитывать по формуле бесконечно длинного соленоида, чтобы ошибка расчета не превышала 1%?

Решение

Эта задача носит расчетный характер, в ней устанавливаются пределы применимости понятия бесконечно длинного соленоида. Необходимо отметить что формулы индукции магнитного поля $B_{расч}$ в центре бесконечно длинного соленоида и индукции B в центре конечного соленоида выведены в предположении сплошного «наката» тока, т.е. в предположении, что витки расположены вплотную друг к другу и плоскость каждого из них перпендикулярна оси соленоида.

Индукция поля в центре бесконечно длинного соленоида

$$B_{расч} = \mu_0\, l\, n, \qquad (3.1.5)$$

где n - число витков, приходящихся на единицу длины.

В центре конечного соленоида индукция

$$B=\tfrac{1}{2}\mu_0\, l\, n\, (\cos a_1 - \cos a_2), \qquad (3.1.6)$$

Легко видеть, что

$$\cos a_1 = -\cos a_2 = \frac{1}{\sqrt{l^2+D^2}}\,. \qquad (3.1.7)$$

Вынося в выражении (3.1.7) l за знак радикала, получаем

$$\cos a_1 = \frac{1}{\sqrt{1+\dfrac{D^2}{l^2}}} = 1-\frac{D^2}{2l^2}\,, \qquad (3.1.8)$$

при этом учитывается, что $\dfrac{D^2}{l^2} \ll 1$.

Таким образом, поле в центре данного соленоида

$$B=\mu_0\, l\, n\left(1-\frac{D^2}{2l^2}\right). \qquad (3.1.9)$$

По условию задачи относительная ошибка, сделанная при расчете поля по формуле (3.1.5), не должна превышать 1%.

Следовательно,

$$\delta B = \frac{B_{расч} - B}{B_{расч}} \le 0{,}01.$$

Подставляя сюда выражения (3.1.5) и (3.1.9), находим

$$\frac{D^2}{2l^2} \le 0{,}01. \quad \text{Отсюда} \quad \frac{l}{D} \ge 7.$$

Задача 4. В однородном магнитном поле, индукция которого B, в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, расположены два проводника длиной l каждый, обтекаемый током i. Первый проводник прямой, второй согнут в форме полукольца. Найти силы, действующие на каждый проводник со стороны магнитного поля. Поле направлено перпендикулярно плоскости (от нас»).

Решение

По формуле Ампера сила, действующая на элемент dl проводника,

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

В данном случае угол между элементом тока и магнитным полем для обоих проводников во всех точках равен $\pi/2$. Поэтому формула Ампера может быть записана в виде

$$d\vec{F} = idl\vec{B}. \qquad (3.1.10)$$

1.Силы, действующие на каждый элемент первого проводника, параллельны между собой и направлены перпендикулярно поверхности проводника. Параллельность всех элементарных сил позволяет написать выражение для результирующей силы с учетом равенства (3.1.10)

$$\vec{F}_1 = \int_l d\vec{F} = \int_l idl\vec{B}.$$

Интеграл следует брать по всему проводнику *l*. Вынося за знак интеграла постоянные сомножители *B* и *i*, получаем

$$\vec{F}_1 = i\vec{B}\int_l dl = i\vec{B}l \qquad (3.1.11)$$

2.Для второго проводника все элементарные силы направлены в разные стороны, и следует отдельно искать проекцию результирующей силы на оси *x* и *y*:

$$\left.\begin{aligned} F_x &= \int_l d\,F_x; \\ F_y &= \int_l d\,F_y. \end{aligned}\right\} \qquad (3.1.12)$$

Здесь dF_x и dF- проекции элементарных сил соответственно на оси *x* и *y*. Интегрирование проводится по всему проводнику *l*.

$$\left.\begin{aligned} d\,F_x &= dF \sin a, \\ d\,F_y &= dF \cos a. \end{aligned}\right\} \qquad (3.1.14)$$

При переходе от одного элемента полукольца к другому угол *a* меняется, причем его предельные значения равны $\pm\dfrac{\pi}{2}$.

Чтобы провести интегрирование выражений (3.1.12), элемент дуги *dl* надо выразить через приращение угла *a:*

$dl = r_0\,da$.

Подставляя выражения (3.1.10) и (3.1.14) в формулы (3.1.10) и производя интегрирование в указанных пределах, получаем

$$F_x = iBr_0 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \sin a\,da = 0;$$

$$F_y = iBr_0 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \cos a\,da = 2\,iBr_0.$$

Выражая радиус полукольца через его длину и учитывая, что F_x = 0, находим

$$F_{11} = 2\, iB\frac{l}{\pi}.$$

Тот факт, что результирующая сила будет направлена вдоль оси y и что она окажется меньше, чем для прямого проводника, можно было предсказать из качественного анализа.

Выражения для F_1 и F_{11} справедливы в любой системе единиц.

Задача 5. Электрон, обладающий энергией W=10^3 *эВ*, влетает в однородное электрическое поле E=800 В/*см* перпендикулярно силовым линиям поля. Каковы должны быть направление и величина индукции магнитного поля, чтобы электрон не испытывал отклонений?

Решение

По условию задачи силы, действующие на электрон со стороны электрического и магнитного полей, должны быть направлены в противоположные стороны и равны по величине, т.е.

$-\vec{F}_э = \vec{F}_м$.

Сила $\vec{F}_э = e\vec{E}$; она направлена против вектора $\vec{E}$. Следовательно, сила

$\vec{F}_м = e[\mathbf{vB}]$ должна быть параллельна силовым линиям электрического поля. Применяя правило левой руки, но направляя согласно этому правилу вытянутые пальцы против скорости электрона (заряд электрона отрицателен и векторное произведение [vB] направлено против силы $\vec{F}_м$), находим, что магнитное поле должно быть перпендикулярно плоскости рисунка и направлено «от нас».

Найдем теперь индукцию магнитного поля. Так как $\vec{F}_м = evB$ $(\mathbf{v}, \vec{B} = \frac{\pi}{2})$ и $\boldsymbol{F_э = eE}$, то $e\mathbf{vB} = e\mathbf{E}$. Отсюда $B = \frac{E}{\text{v}}$. Скорость электрона $\text{v} = \sqrt{\frac{2W}{m_э}}$.

Здесь $m_э$=$9\cdot10^{-31}$ *кг* – масса электрона, W=10^3 *эВ* = $1{,}6\cdot10^{-16}$ Дж (по условию). Таким образом,

$$B = \boldsymbol{E}\sqrt{\frac{m_э}{2W}} = 4{,}2\cdot10^{-3}\ \text{Тл}.$$

Задача 5. В одной плоскости с бесконечно длинным прямым током I=20*а* на расстоянии x_0=1 *см* находятся две шины, параллельные току I. По шинам поступательно перемещается проводник длиной l=0,5 *м*. Скорость его υ=3 *м/сек*, постоянна и направлена вдоль шин. Найти разность потенциалов, возникающую на концах проводника.

Решение

Рассмотрим небольшой участок dx проводника l. Как обычно, будем считать dx настолько малым, что в его пределах поле будет постоянным. Тогда разность потенциалов на таком участке равна

$d\varphi = B\,dx\cdot \upsilon$

Здесь B – индукция поля, создаваемого током I на участке dx. Интегрируя полученное выражение по всей длине движущегося проводника, найдем искомую разность потенциалов.

Если обозначить через x расстояние от прямого тока до рассматриваемого участка, то индукция поля на рассматриваемом участке dx:

$$B=\frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$

и

$$d\varphi=\frac{\mu_0 I}{2\pi x}\cdot dx\cdot \upsilon.$$

При суммировании по всему проводнику l расстояние x будет меняться от x_0 до $x_0 + l$. Тогда

$$\varphi_1-\varphi_2=\int_1^2 d\varphi=\frac{\mu_0}{2\pi}I\upsilon\int_{x_0}^{x_0+l}\frac{dx}{x}.$$

Производя интегрирование, получаем

$$\varphi_1-\varphi_2=\frac{\mu_0}{2\pi}I\upsilon\ln\frac{x_0+l}{x_0}=4{,}7\cdot 10^{-5}B.$$

Задача 6 . Медный провод сечением S = 2 мм^2, согнутый в виде трех сторон квадрата, может вращаться относительно горизонтальной оси. Провод находится в однородном магнитном поле, направленном вертикально. Когда по проводу течет ток I = 10 А, провод отклоняется на угол a= 15°. Определите индукцию магнитного поля.

Решение.

Изогнутый проводник, повернувшись при включении тока на угол *а*, остается в равновесии. Следовательно, сумма моментов сил, действующих на него, равна нулю. Проводник с током находится в магнитном поле и поле тяготения Земли, поэтому на каждую- из трех, его частей действует сила Ампера и сила тяжести.

Рассмотрим движение проводника относительно неподвижного наблюдателя в системе координат с осью *x,* направленной по оси вращения, и осью *y,* направленной вертикально и проходящей через середину проводника, расположенного перпендикулярно полю, когда по нему не течет ток. Определим силу Ампера, действующую на эту часть провоника. Учитывая, что $\vec{B}$ и элемент тока $I\vec{l}$ взаимно перпендикулярны, получим для силы Ампера значение

$$F=IlB\,.$$

Момент этой силы, действующий на проводник относительно оси, равен:

$$\vec{M}_1 = [\vec{R}_1\vec{F}_1],$$

где $\vec{R}_1$- радиус-вектор, проведенный от оси вращения до точки приложения силы. Расстояние от оси вращения до точки приложения силы равно $R_1=l$, угол между радиус-вектором $\vec{R}_1$ и силой $\vec{F}_1$

$$\varphi_1 = -\left(\frac{\pi}{2} - a\right).$$

Проекция момента силы Ампера на ось *x* равна:

$$M_1 = -Fl\sin\left(\frac{\pi}{2} - a\right).$$

На проводник в поде тяготения Земли действует сила тяжести

$$P = 3lSDg.$$

Эта сила приложена к центру масс. Для определения радиус-вектора $\vec{R}_2$ этой силы найдем положение центра масс. В выбранной системе координат координаты центра масс равны соответственно

$$X_0=0 \text{ и } Y_0=\frac{2m\frac{l}{2}+ml}{3m} = \frac{2}{3}l.$$

Следовательно, расстояние от оси вращения до точки приложения силы тяжести $R_2 = \frac{2}{3}l,$ угол между радиус-вектором $\vec{R}_2$ и направлением силы $\vec{P}\varphi_2 = a$.

Проекция момента силы тяжести на ось x

$$M_2 = P \cdot \frac{2}{3} l \sin a = 2 \cdot l^2 SDg \sin a.$$

Сумма проекций моментов сил на ось x при равновесии должна быть равна нулю. Следовательно:

$$B = \frac{2SDg}{I} tga.$$

Вычисления дают: $B = 9{,}3 \cdot 10^{-3}$ Тл.

Задача 7 . По трем длинным проводам, расположенным в одной плоскости параллельно друг другу на расстоянии 3 см, текут токи $I_1=I_2$ и $I_3= -(I_1+I_2)$. Определите положение прямой, в точках которой напряженность поля, создаваемого токами, равна нулю.

Решение.

Предположим, что все три проводника расположены последовательно друг за другом: I_1, I_2, I_3 Тогда точка, в которой напряженность магнитного поля, создаваемого тремя токами, будет равна нулю, должна находиться между проводами с токами I_1 и I_2. Причем это будет не одна точка, а целое семейство точек, расположенных на прямой, параллельной проводникам с токами I_1, I_2, I_3 и находящейся с ними в одной плоскости.

Найдем положение этой прямой и ее расстояние от тока I_1. Так как длина проводников достаточно велика по сравнению с расстояниями a и x, то

$$H_1 = \frac{I}{2\pi x}; H_2 = \frac{I}{2\pi (a - x)}; H_3 = \frac{2I}{2\pi (2a - x)}$$

Для напряженности магнитного поля справедлив принцип суперпозиции:

$$\vec{H}_A = \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \vec{H}_3$$

Напряженности $\vec{H}_1$ и $\vec{H}_3$ направлены вертикально вниз, а $\vec{H}_2$ — вверх, поэтому $H_A = H_1 + H_3 - H_2$.

По условию $H_A = 0$, значит,

$$\frac{1}{2\pi x}+\frac{2I}{2\pi(a-x)}=\frac{I}{2\pi(a-x)}$$

Решив это уравнение относительно x, получим x = 2 см. Таким образом, прямая, в точках которой напряженность магнитного поля равна нулю, расположена на расстоянии 2 см от тока I_1 и 1 см от тока I_2.

Задача 8 . По тороидальной катушке с числом витков N = 1000 течет ток 5А. Средний диаметр катушки d = 40 см, радиус витков r = 5 см. Определите напряженность магнитного поля в точках, находящихся от центра тороида на расстояниях a_1 = 5 см, a_2 = = 20 см и a_3 = 23 см.

Рещение.

Воспользуемся теоремой о циркуляции вектора напряженности магнитного поля. В качестве контуров интегрирования возьмем окружности с центрами в центре тороида и радиусами, равными расстоянию от центра тороида до заданных точек.

Точка *I* находится иа расстоянии 5 см от центра тороида. Окружность, проведенная через эту точку, не будет охватывать тока. поэтому

$$H_1=0.$$

Точка 2 лежит на окружности, радиус которой равен среднему радиусу тороида ($2a_2 = d$). Плоскость, охватываемую этим контуром, пересекают N витков с током I, следовательно,

$$\oint_L Hdl = NI.$$

Откуда

$$H_2 = \frac{NI}{\pi d}.$$

Точка 3 лежит внутри тороида, то находится на расстоянии

$$a_3 > a_{.2}.$$

Проведя рассуждения, аналогичные предыдущим, получим:

$$H_3 = \frac{NI}{2\pi a_3}.$$

При заданных размерах катушки поле внутри тороида не будет однородным. Оно максимально у внутренней стороны обмотки и уменьшается по мере приближения к наружной стороне обмотки.

Проведем расчет:

$H_2 = 4\cdot10^3$ А/м; $H_3 = 3{,}46\text{-}10^3$ А/м.

Задача 9. Электрон, имеющий скорость $8 \cdot 10^8$ см/с, влетает в однородное магнитное поле с индукцией $B = 3{,}14 \cdot 10^{-2}$ Тл под углом 30° к ее направлению. Определите радиус и шаг винтовой линии, по которой будет двигаться электрон.

Решение

.

Разложим скорость электрона на две составляющие: параллельную линиям индукции и перпендикулярную им:

$$\vec{\upsilon}_1 = \vec{\upsilon}\cos a,$$

$$\vec{\upsilon}_2 = \vec{\upsilon}\sin a.$$

Благодаря наличию составляющей скорости $\vec{\upsilon}_2$ на электрон действует сила Лоренца, поэтому он движется по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Радиус этой окружности определяется условием

$$\frac{m\upsilon_2^2}{R} = e\upsilon_2 B,$$

так как сила Лоренца является центростремительной силой. Отсюда

$$R = \frac{\upsilon_2}{\frac{e}{m}B} = \frac{\upsilon \sin a}{\frac{e}{m}B}.$$

Вдоль направления вектора $\vec{B}$ сила не действует, поэтому частица движется равномерно со скоростью

$$\upsilon_1 = \upsilon\ cos a.$$

В результате сложения двух движений электрон движется по винтовой линии радиусом R и шагом винта h:

$$h = \upsilon_1 T,$$

где T — период движения по окружности:

$$T = \frac{2\pi R}{\upsilon_2}.$$

Учитывая полученные соотношения получаем:

$$h = \frac{2\pi\upsilon \cos a}{\frac{e}{m}B}.$$

Вычисления дают:

$$R = 0{,}07 \text{ м}; \quad h = 0{,}79 \text{ м}.$$

Задача 10. В цилиндрическом магнетроне анод представляет металлический цилиндр радиусом b = 1 см, а катод - металлическую нить радиусом $a \ll b$, расположенную по оси цилиндра. Постепенно увеличивая индукцию магнитного поля, направленного вдоль оси цилиндра, добились того, что при анодном напряжении U_a = 100 В и индукции $B = 6{,}7 \cdot 10^{-3}$ Тл анодный ток стал равен нулю. Какое значение удельного заряда получается по результатам этого опыта?

Решение

Электроны не достигают анода при индукции поля $B \geq B_{кр}$. Так как по условию задачи индукция *B,* при которой ток отсутствует, наименьшая, то $B = B_{кр}$.

Траектория одного из электронов при $B = B_{кр}$ касается поверхности анода.

Радиус кривизны траектории электрона (окружности)

$$R = \frac{b}{2},$$

Сила Лоренца является центростремительной силой:

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

Электроны приобретают энергию за счет работы сил электрического поля, т. е.

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = eU_a.$$

Решая совместно уравнения , получаем:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{b^2 B^2}.$$

Подстановка данных задачи дает:

$$\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11}\ \text{Кл/кг}.$$

Задача 11 . Двухпроводная линия состоит из двух медных проводов радиусом *a* = 1 мм. Расстояние между осями проводов *d* = 5 см. Определите индуктивность единицы длины такой линии.

Решение.

Вычислим магнитный поток черезплощадь, ограниченную осями проводов, для отрезка линии длиной 1 м.

В области $0 < x < a$ (внутри провода) напряженность поля (оно неоднородно):

$$H_1 = \frac{I}{2\pi\alpha^2}x.$$

Индукция в этой области $B_1=\mu_0 \dfrac{1}{2\pi\alpha^2} x.$

Так как поле неоднородно, то найдем магнитный поток через элементарную площадку $dS = l \bullet dx$):

$$d\Phi=\mu_0 \frac{Il}{2\pi\alpha^2} xdx.$$

Тогда поток через площадку $S=la$ можно найти интегрированием:

$$\Phi_1= \int_0^a \mu_0 \frac{l}{2\pi\alpha^2} xdx = \frac{\mu_0}{4\pi} Il.$$

В области $x > a$ напряженность поля

$$H_2= \frac{I}{2\pi x},$$

а индукция $$B_2= \frac{I\mu_0}{2\pi x}.$$

Значит, поток через остальную часть площади, создаваемый током, идущим по одному проводу, будет равен:

$$\Phi_2 = \int_a^d B_2 ds = \int_a^d \mu_0 \frac{I}{2\pi x} dx = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln \frac{d}{a}.$$

Поток через всю площадь $S = ld$, создаваемый током, идущим по одному проводу, найдем суммированием:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2= \frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{2}+\ln\frac{d}{a}\right)It.$$

Так как токи в проводах направлены противоположно, то направления полей, создаваемых обоими токами между осями проводов, одинаковы . Следовательно, полный поток, создаваемый токами, идущими по обоим проводам, будет в два раза больше потока, создаваемого током, идущим по одному проводу:

$$\Phi_{полн} = 2\Phi= \frac{\mu_0}{\pi}\left(\frac{1}{2}+\ln\frac{d}{a}\right)It.$$

Индуктивность системы $L = \dfrac{\Phi}{I}$, поэтому индуктивность единицы длины двухпроводной линии

$$L = \frac{\mu_0}{\pi}\left(\frac{1}{2}+\ln\frac{d}{a}\right).$$

Подставляя числовые данные, получаем

$$L = 1{,}76 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/ м}$$

Индивидуальные задания.

2.1.1. Тонкое кольцо массой 10 г и радиусом $R = 8\,см$ несет заряд, равномерно распределенный с линейной плотностью $\tau = 10\,{нКл}/{м}$. Кольцо равномерно вращается с частотой $n = 15\,с^{-1}$ относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через его центр. Определить: 1)магнитный момент p_m кругового кольца; 2) отношение магнитного момента к моменту импульса кольца.

Ответ: $p_m = 2\pi^2 R^3 n\tau$; $p_m = 1{,}5$ нА/м^2

2.1.2. Принимая, что электрон в атоме водорода движется по круговой орбите, определите отношение магнитного момента p_m эквивалентного кругового тока к моменту импульса L орбитального движения электрона. Ответ: $\dfrac{p_m}{L_1} = \dfrac{q}{2m}$ = 8,79·10^9 Кл/кг

2.1.3. По двум длинным параллельным проводам текут токи в одинаковых направлениях. $I_1=2I_2$. Расстояние между ними равно a. Определить положение точек, в которых магнитное поле равно нулю.

Ответ: $x = \dfrac{2}{3}a$.

2.1.4. Вычислить напряженность магнитного поля, создаваемого отрезком АВ прямолинейного проводника с током 20 А в точке С, расположенной на перпендикуляре к середине этого отрезка на расстоянии 5 см от него. Отрезок виден из точки С под углом 60˚.

Ответ: $H = \dfrac{I(\cos a_1 - \cos a_2)}{4\pi a}$; Н = 31,8 А/м.

2.1.5. Ток $I = 20\,А$, протекая по кольцу из медной проволоки сечением $S = 1\,мм^2$, создает в центре кольца напряженность магнитного поля $H = 178\,{А}/{м}$. Какая разность потенциалов U приложена к концам проволоки, образующей кольцо?

Ответ: $U = \dfrac{\pi\rho I^3}{SH}$; U = 0,12 В

2.1.6. По витку, имеющему форму квадрата со стороны а = 20 см, идет ток I = 5А. Определите напряженность магнитного поля в точке пересечения диагоналей и в одной из точек пересечения сторон.

Ответ: $H_1 = \dfrac{4I}{\pi a\sqrt{2}}$; H_1 = 22,6 А/м; $H_2 = \dfrac{I}{2\pi a\sqrt{2}}$; H_2 = 2,82 А/м.

2.1.7 По прямолинейному проводнику проходит ток I = 12 А. Определите напряженность магнитного поля в точке, равноудаленной от концов проводника длинной l и находящейся на расстоянии a = 8 см от оси проводника. Рассмотрите два случая: а) l= 20 см и б) $l>>a$

Ответ: а) 18,6 А/м; б) 23,8 А/м.

2.1.8.Какой силы ток протекает по кольцу из медной проволоки сечением 1мм , если разность потенциалов на концах проволоки 0.12 В а напряженность магнитного поля в центре кольца 178 А/м?

Ответ: 20А.

2.1.9. Прямой бесконечный провод имеет круговую петлю радиусом r = 8см. Определите величину тока в проводе, если известно, что напряженность магнитного поля в центре петли H = 100А/м.

Ответ: $I = \dfrac{2\pi RH}{1+\pi}$; I = 12,1 А

2.1.10. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводникам, расстояние между которыми $d = 10\,см$, текут токи $I_1 = 40\,A$ и $I_2 = 80\,A$ в одном направлении. Определить магнитную индукцию B в точке, удаленной от первого проводника на $r_1 = 12\,см$ и от второго – на $r_2 = 16\,см$. Ответ: B = 120мкТл

2.1.11. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводникам, расстояние между которыми $d = 15\,см$, текут токи $I_1 = 70\,A$ и $I_2 = 50\,A$ в противоположных направлениях. Определить магнитную индукцию B в точке, удаленной от первого проводника на $r_1 = 20\,см$ и от второго – на $r_2 = 30\,см$.

Ответ: $B = \dfrac{\mu_0}{2\pi}\sqrt{\left(\dfrac{I_1}{r_1^2}\right)^2 + \left(\dfrac{I_2}{r_2}\right)^2 - \dfrac{I_1 I_2}{(r_1 r_2)^2}(r_1^2 + r_2^2 - d^2)}$;$B$ =42,8 Тл

2.1.12.Напряженность H магнитного поля в центре кругового витка с магнитным моментом $p_m = 1{,}5\,A\cdot м^2$ равна 150 А/м. Определить: 1)радиус витка; 2)силу тока в витке.

Ответ: $R = \sqrt[3]{\dfrac{pm}{2\pi H}}$; R = 11,7 см; I = 2 RH; I = 35,1А.

2.1.13.Какова магнитная индукция поля, созданного плоским круговым током в 15 А, который обтекает площадь S= 1м^2 на расстоянии r = 10 м от центра круга по направлению радиуса.

Ответ: $B = \dfrac{\mu_0}{4\pi} \cdot \dfrac{\rho m}{r^3}$; B = 1,5нТл.

2.1.14. Круговой виток радиусом $R = 15\,см$ расположен относительно бесконечно длинного провода так, что его плоскость параллельна проводу. Перпендикуляр, восстановленный на провод из центра витка, является нормалью к плоскости витка. Сила тока в проводе $I_1 = 1\,A$, сила тока в витке $I_2 = 5\,A$. Расстояние от центра витка до провода $d = 20\,см$. Определить магнитную индукцию в центре витка. Ответ: $B = \mu_0 \left(\left(\dfrac{I_1^2}{(2\pi d)^2} \right) + \dfrac{I_2^2}{2R^2} \right)^{\frac{1}{2}}$; B = 21,2 мкТл

2.1.15. По тонкому проводу течет ток I. Чему равна напряженность магнитного поля в центре полукольца радиусом r, сделанного из этого провода? Какая сила будет действовать на полукольцо, если его поместить в однородное магнитное поле с индукцией B, перпендикулярной его плоскостью? (Провода, подводящие ток, находятся вне поля). Ответ: $H = \dfrac{I}{2r}$; $F = 2JBr$

2.1.16. По прямому горизонтально расположенному проводу пропускают ток $I_1 = 10\,A$. Под ним на расстоянии $R = 1{,}5\,см$ находится параллельный ему алюминиевый провод, по которому пропускают ток $I_2 = 1{,}5\,A$. Определить, какой должна быть площадь поперечного сечения алюминиевого провода, чтобы он удерживался незакрепленным. Плотность алюминия $\rho = 2{,}7\ {}^{г}\!/\!_{см^3}$.

Ответ: $S = \dfrac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi R \rho g}$; S = 7,5нм^2

2.1.17. Два бесконечных прямолинейных параллельных проводника с одинаковыми токами, текущими в одном направлении, находятся друг от друга на расстоянии R. Чтобы их раздвинуть до расстояния $2R$, на каждый сантиметр длины проводника затрачивается работа $A = 138\ нДж$. Определить силу тока в проводниках.

Ответ: $I = \sqrt{\dfrac{2\pi A}{\mu_0 I \ln 2}}$; I = 10А

2.1.18. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции движется прямой проводник длиной 40 см. Определить силу Лоренца, действующую на свободный электрон проводника, если возникающая на его концах разность потенциалов составляет 10 мкВ. Ответ: 4 10 Н

2.1.19. По тонкому проволочному полукольцу радиусом $R = 50\,см$ течет ток $I = 1\,A$. Перпендикулярно плоскости полукольца возбуждено однородное магнитное поле с индукцией $B = 0{,}01\,Тл$. Найти силу, растягивающую полукольцо. Ответ: $F = 2IBR$; $F = 0{,}001$Н

2.1.20. Два прямолинейных длинных проводника с током I_1=20 А и J_2=30 А находятся на расстоянии 10 см друг от друга. Какую работу на единицу длинны проводников надо совершить, чтоб расстояние между ними увеличить вдвое? Ответ: $A = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi} \ln \frac{x_1}{x_2}$; $A = 8{,}3\cdot10^{-5}$Дж/м

2.1.21. В однородном магнитном поле напряженностью Н = 79,6 кА/м помещена квадратная рамка, плоскость которой составляет с направлением магнитного поля угол $\alpha = 45^\circ$. Сторона рамки а = 4 см. Найти магнитное поток Ф, пронизывающий рамку.

Ответ: Φ = 113мкВб

2.1.22. В магнитном поле, индукция которого В = 0,05 Тл, вращается стержень длиной l = 1м. Ось вращения, проходящая через один из концов стержня, параллельна направлению магнитного поля. Найти магнитный поток Ф, пересекаемый стержнем при каждом обороте. Ответ: Φ = 157мВб

2.1.23. В однородном вертикальном магнитном поле висит подвешанный за один конец стержень. Масса стержня m=60г, длина его l=10см, период колебаний T в 2 раза меньше его периода колебаний в отсутствии поля. Магнитный момент стержня P_m=4.9 А·м^2. Определить индукцию магнитного поля.

Ответ: $B = \frac{mgl}{2P_m}\left(\frac{T_1^2}{T^2} - 1\right)$, $B = 1{,}8\cdot10^{-2}\,Тл$

2.1.24. Какая сила действует на каждую единицу объема куска висмута, помещенного в магнитное поле индукции В = 0,1 Тл и градиент магнитной индукции $\frac{dB}{dx} = 0{,}5$ Тл/м^2.

Ответ: $F = \frac{\lambda B}{\mu_0}\cdot\frac{dB}{dx}$; F = 10Н/м

2.1.25. По прямому горизонтально расположенному проводу пропускают ток I_1 = 10А. Под ним на расстоянии R = 1,5 находится параллельный ему алюминиевый провод, по которому пропускают ток I_2 = 1,5 А. Определите, какой должна быть площадь поперечного сечения алюминиевого провода, чтобы он удерживался незакрепленным. Плотность алюминия ρ = 2,7 г/см^3

Ответ: $S = \dfrac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi R\rho g}$; S = 7,5 ·10^{-9}м^2

2.1.26. Два бесконечных прямолинейных параллельных проводника с одинаковыми токами, текущими в одном направлении, находятся друг от друга на расстоянии *R*. Чтобы их раздвинуть до расстояния *2R*, на каждый сантиметр длинны проводника затрачивается работа *А* = 138 нДж. Определите силу тока в проводниках.

Ответ: $I = \sqrt{\dfrac{2\pi A}{\mu_0 I \ln 2}}$; *I* = 10А

2.1.27. Два одинаковых прямых магнита длинной 10 см расположены на одной прямой и повернуты друг к другу разноименными полосами, расстояние между ними *d* = 20. Определить магнитный момент каждого из них, если сила притяжения между ними F= 10^{-4} Н. Ответ: $p_m = \sqrt{\dfrac{2\pi F d^4}{3\mu_0}}$; p_m =51,6Ам^2

2.1.28. Электрон движется в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0{,}1 Тл$ по окружности. Определить угловую скорость электрона. Ответ: $\omega = \dfrac{eB}{m}$; ω = 1,76·10 рад/с

2.1.29.Электрон, обладая скоростью υ = 10 Мм/с, влетел в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Индукция магнитного поля В = 0,2 мТл. Определите нормальное и тангенциальное ускорение электрона.

Ответ: a_n= 1,76·10^{14}м/с^2; a_τ = 0

2.1.30. Электрон движется прямолинейно с постоянной скоростью υ= 0,2 Мм/с. Определите магнитную индукцию *В* поля, создаваемого электроном в точке, находящейся на расстоянии r =2 нм от электрона и лежащей на прямой, проходящей через мгновенное положение электрона и составляющей угол α = 45° со скоростью движения электрона. Ответ: $B = \dfrac{M_0 e\upsilon}{4\pi r^2}\sin\alpha$; *В* = 566мкТл

2.1.31. Электрон, влетев в однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B = 2\,мТл$, движется по круговой орбите радиусом $R = 15\,см$. Определить магнитный момент p_m эквивалентного кругового тока. Ответ: $p_m = \dfrac{e^2 BR^2}{2m}$; p_m = 0,63·10Ам^2

2.1.32. Электрон, обладая скоростью $v = 1$Мм/с, влетает в однородное магнитное поле под углом $\alpha = 60^0$ к направлению поля и начинает двигаться по спирали. Напряженность магнитного поля $H = 1{,}5\,{}^{кА}\!/_{м}$. Определить: 1)шаг спирали; 2)радиус витка спирали. Ответ: $R = \dfrac{\upsilon m \sin\alpha}{q\mu_0 H}$; R = 2,62см

2.1.33. Согласно теории Бора, электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите радиусом r = 52,8 пм. Определите магнитную индукцию B поля, создаваемого электроном в центре круговой орбиты. Ответ: $B = \dfrac{\mu_0 e^2}{8\pi r^2 \sqrt{\pi\varepsilon_0 rm}}$; B = 1,25Тл

2.1.34. В однородное магнитное поле с магнитной индукцией 0,2 Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции с постоянной скоростью влетает заряженная частица. В течение 5 мкс включается электрическое поле напряженностью 0,5 кВ/м в направлении, параллельном магнитному полю. Определите шаг винтовой траектории заряженной частицы. Ответ: $h = \dfrac{2\pi Et}{B}$; h = 7,85см

2.1.35. Ионы двух изотопов с массами $m_1 = 6{,}5 \cdot 10^{-26}$кг и $m_2 = 6{,}8 \cdot 10^{-26}$кг, ускоренные разностью потенциалов $U = 0{,}5\,кВ$, влетают в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0{,}5\,Тл$ перпендикулярно линиям индукции. Принимая заряд каждого иона равным элементарному электрическому заряду, определить, на сколько будут отличаться радиусы траекторий ионов в магнитном поле.

Ответ: $R_1 - R_2 = \dfrac{1}{B}\sqrt{\dfrac{2U}{e}}\left(\sqrt{m_1} - \sqrt{m_2}\right)$; $R_1 - R_2$ = 0,9мм

2.1.36. Электрон движется в однородном магнитном поле с угловой скоростью электрона ω = 1,76·10^{11}рад/с по окружности. Определить индукцию В. Ответ: $B = \frac{\omega m}{e}$; B = 0,1Тл

2.1.37. Электрон, ускоренный разностью потенциалов $U = 0{,}5$ кВ, движется параллельно длинному прямолинейному проводнику на расстоянии $r = 1 см$ от него. Определить силу, действующую на электрон, если через проводник пропускать ток $I = 10\,A$.

Ответ: $F = \frac{\mu_0 eI\sqrt{eu}}{\pi r\sqrt{2m}}$; F = 4,24·10^{-16}Н

2.1.38. Протон, ускоренный разностью потенциалов U= 0,5 кВ, влетая в однородное магнитное поле с магнитной индукцией B= 2 мТл, движется по окружности. Определите радиус этой окружности.

Ответ: $R = \frac{\sqrt{2mqu}}{qB}$; R = 1,61м

2.1.39. Электрон, влетев в однородное магнитное поле с магнитной индукцией В = 2 мТл, движется по круговой орбите радиусом R = 15 см. Определите магнитный момент p_m эквивалентного кругового тока.

Ответ: $p_m = \frac{e^2 BR^2}{2m}$; p_m =0,63пАм^2

2.1.40. Определите, при какай скорости пучок заряженных частиц, двигаясь перпендикулярно скрещенному под прямым углом однородным электрическому (E = 100кВ/м) и магнитному (B = 50мТл) полям, не отклоняется. Ответ: $\upsilon = \frac{E}{B}$; υ = 2мм/с

2.1.41. В одной плоскости с длинным прямым проводом, по которому течет ток $I = 50\,A$, расположена прямоугольная рамка так, что две большие ее стороны длиной $l = 65\,см$ параллельны проводу, а расстояние от провода до ближайшей из этих сторон равно ширине рамки, которая составляет $a = 50\,см$. Каков магнитный поток, пронизывающий рамку? Ответ: $\varPhi = \frac{\mu_0 Ia}{2\pi} \cdot \ln \frac{(l + a)}{a}$;

$\varPhi$ = 0,44мкВб

2.1.42. Траектория пучка электронов, движущихся в вакууме в магнитном поле (B = 70 гс), - дуга окружности с радиусом 3 см. Определить скорость и энергию электронов.

Ответ: $3{,}7\cdot10^9$см/сек; 3900эв.

2.1.43.Покоящийся электрон ускоряется постоянным электрическим полем. Через 0,01 с он влетает в магнитное поле индукцией B = 10^{-5} Тл перпендикулярно электрическому. Найти отношение нормального ускорения к тангенциальному.

Ответ: $\dfrac{a_n}{a\tau} = \dfrac{e}{m} tB$; $\dfrac{a_n}{a\tau}$ = 17600

2.1.44. Найти радиус кривизны траектории, период обращения, момент импульса электрона, ускоренного напряжением 1000 В, влетевшем перпендикулярно линиям индукции магнитного поля B = $1{,}2\cdot10^{-3}$ Тл.

Ответ: $R = \dfrac{m\upsilon}{eB}$; R = 0,09м; $T = \dfrac{2\pi m}{Be}$; $T = 3\cdot10^{-8}$с;
$L = 1{,}5\cdot10^{-24}$кг·м^2/с

2.1.45. Определить радиус траектории движения электрона в магнитном поле индукции В = 10^{-3} Тл, если он влетает в него под углом в 30° со скоростью $\upsilon = 6\cdot10^3$ км/с.

Ответ: $R = \dfrac{m\upsilon \sin\alpha}{eB}$; $R = 1{,}7\cdot10^{-2}$м.