цов векторов $\mathbf{B}_q$ и $\mathbf{H}_q$ вращение от $\mathbf{v}$ к $\mathbf{r}$ по кратчайшему пути видно происходящим против часовой стрелки (рис. 15.9, *а*). Если $q < 0$, то векторы $\mathbf{B}_q$ и $\mathbf{H}_q$ направлены в противоположную сторону (рис. 15.9, *б*).

Магнитное поле движущегося заряда в каждой точке пространства зависит от времени, так как в процессе движения заряда изменяются числовое значение и направление радиуса-вектора $\mathbf{r}$.

Магнитная индукция в точке A поля движущегося заряда численно равна

$$B_q = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin(\widehat{\mathbf{v}, \mathbf{r}})}{r^2}. \tag{15.50}$$

Из формулы (15.50) следует, что индукция B_q в любой точке магнитного поля движущегося заряда пропорциональна величине заряда, его скорости и относительной магнитной проницаемости среды и обратно пропорциональна квадрату расстояния данной точки поля от заряда. Индукция B_q зависит от угла между векторами $\mathbf{v}$ и $\mathbf{r}$. При прочих равных условиях она максимальна в точках плоскости, проведенной через заряд перпендикулярно вектору его скорости $\mathbf{v}$ Во всех точках поля, лежащих на прямой, совпадающей с вектором $\mathbf{v}$, магнитная индукция равна нулю.

Таким образом, магнитное поле движущегося заряда не является симметричным в отличие от электростатического поля неподвижного точечного заряда, которое обладает центральной симметрией.

Вопросы для повторения

1. В чем состоит закон Био—Савара—Лапласа?
2 Найдите выражение для силы взаимодействия между двумя длинными параллельными проводниками с током и, пользуясь им, поясните физический смысл относительной магнитной проницаемости среды
3. Какая величина называется электродинамической постоянной и чему она равна?
4 Чему равен и как направлен магнитный момент плоского контура с током?
5. От каких величин зависит магнитная индукция в точке, лежащей на оси бесконечно длинного соленоида?
6. Охарактеризуйте магнитное поле движущегося заряда.

Примеры решения задач

Задача 15.1. По проводу, согнутому в виде равностороннего треугольника со стороной, равной 50 см, проходит постоянный ток силой 3,14 А. Чему равна напряженность магнитного поля в центре треугольника?

Дано:
$I = 3{,}14$ А
$l = 0{,}5$ м
H — ?

Решение. Напряженность $\mathbf{H}$ магнитного поля треугольника с током равна векторной сумме напряженностей магнитных полей, создаваемых всеми его сторонами:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2 + \mathbf{H}_3.$$

В центре O треугольника (рис. 15.10) все эти векторы направлены из-за чертежа перпендикулярно его плоскости. Кроме того, из условия симметрии очевидно, что $H_1 = H_2 = H_3$. Следовательно, $\mathbf{H} = 3\mathbf{H}_1$ и $H = 3H_1$. По формуле (15.15) имеем

$$H_1 = \frac{1}{4\pi}\,\frac{I}{r_0}\,(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2);\quad H = \frac{3}{4\pi}\,\frac{I}{r_0}\,(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2).$$

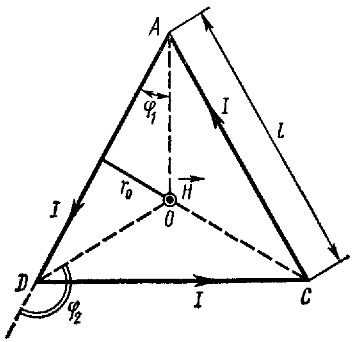

Рис. 15.10

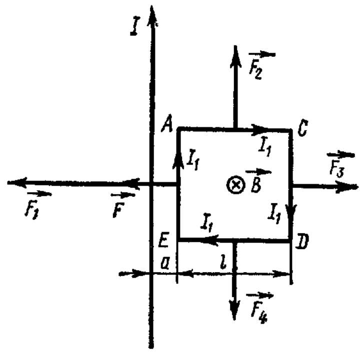

Рис. 15.11

Из рис. 15.10 видно, что $\varphi_2 = \pi - \varphi_1$ и $r_0 = (l/2)\operatorname{tg}\varphi_1$, где l — длина стороны треугольника. Поэтому

$$H = \frac{3I}{2\pi l}\,\frac{\cos\varphi_1 - \cos(\pi - \varphi_1)}{\operatorname{tg}\varphi_1} = \frac{3I\cos^2\varphi_1}{\pi l \sin\varphi_1}.$$

Так как $\varphi_1 = \pi/6$, то $\sin\varphi_1 = 1/2$, $\cos\varphi_1 = \sqrt{3}/2$ и

$$H = 9I/2\pi l.$$

Произведем вычисления в СИ:

$$H = \frac{9I}{2\pi l} = \frac{9\cdot 3,14}{2\cdot 3,14\cdot 0,5}\,\frac{\text{А}}{\text{м}} = 9\ \text{А/м}.$$

Задача 15.2. С какой силой действует постоянный ток силой 10 А, проходящий по прямолинейному бесконечно длинному проводнику, на контур из провода, изогнутого в форме квадрата? Проводник расположен в плоскости контура параллельно двум его сторонам. Длина стороны контура 40 см, сила тока в нем 2,5 А. Направления токов указаны на рис. 15.11. Расстояние от прямолинейного тока до ближайшей стороны контура равно 2 см.

Дано:
$I = 10$ А
$I_1 = 2,5$ А
$\mu = 1$
$l = 0,4$ м
$a = 0,02$ м

F — ?

Решение. Во всех точках контура $ACDE$ векторы $\mathbf{B}$ индукции магнитного поля прямолинейного тока I направлены перпендикулярно плоскости контура (за чертеж при выбранных на рис. 15.11 направлении тока I и взаимном расположении прямолинейного проводника и контура). Стороны контура AC и DE одинаково расположены по отношению к прямолинейному проводнику с током I, однако направления тока I_1 в них прямо противоположны. Поэтому силы $\mathbf{F}_2$ и $\mathbf{F}_4$, действующие со стороны магнитного поля тока I на участки AC и DE контура с током I_1, численно равны и противоположны по направлению:

$$\mathbf{F}_2 = -\mathbf{F}_4,\ \text{так что}\ \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_4 = 0.$$

Таким образом, результирующая сила $\mathbf{F}$, действующая на контур, равна векторной сумме сил $\mathbf{F}_1$ и $\mathbf{F}_3$, приложенных к сторонам контура EA и CD:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_3.$$

Силы $\mathbf{F}_1$ и $\mathbf{F}_3$ направлены в противоположные стороны и по формуле (15.19′) численно равны:

$$F_1 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\,\frac{2II_1}{a}\,l, \quad F_3 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\,\frac{2II_1}{a+l}\,l.$$

Результирующая сила $\mathbf{F}$ направлена в ту же сторону, что и сила $\mathbf{F}_1$, и численно равна

$$F = F_1 - F_3 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\,2II_1 l\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+l}\right) = \frac{\mu\mu_0}{2\pi}\,\frac{II_1 l^2}{a(a+l)}.$$

Произведем вычисления в СИ:

$$F = \frac{\mu\mu_0}{2\pi}\,\frac{II_1 l^2}{a(a+l)} = \frac{4\cdot 3{,}14\cdot 10^{-7}\cdot 10\cdot 2{,}5\cdot 0{,}4^2}{2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}02\cdot 0{,}42}\ \text{Н} =$$

$$= 9{,}52\cdot 10^{-5}\ \text{Н} = 95{,}2\ \text{мкН}.$$

Задача 15.3. Тонкий диск, радиус которого 25 см, сделан из диэлектрика и равномерно заряжен по поверхности. Заряд диска 5 Кл. Диск вращается в воздухе вокруг оси, проходящей через его центр и перпендикулярной его плоскости, с постоянной угловой скоростью, делая 5 оборотов за секунду. Определить магнитную индукцию в центре диска.

Дано:
$R = 0{,}25$ м
$q = 5$ Кл
$n = 5$ об/с
$\mu = 1$
B — ?

Решение. Вращающийся заряженный диск эквивалентен бесконечно большому числу бесконечно малых концентрических кольцевых токов. Магнитные поля в общем центре кольцевых токов направлены в одну и ту же сторону перпендикулярно плоскости диска. По формуле (15.25) магнитная индукция dB в центре кольцевого тока dI, радиус которого r, равна

$$dB = \mu\mu_0\frac{dI}{2r}. \tag{а}$$

Поверхностная плотность заряда q диска равна $\sigma = q/2\pi R^2$. Поэтому заряд dq, находящийся на поверхностях бесконечно тонкого кольца, ограниченного цилиндрическими поверхностями радиусов r и $r + dr$, выразится формулой

$$dq = 2\sigma\cdot 2\pi r dr = \frac{2q}{R^2}\,r dr.$$

Сила тока, соответствующая n оборотам этого кольца за секунду,

$$dI = \frac{2q}{R^2}\,n r dr.$$

Подставив в (а) выражение dI и проинтегрировав по r от 0 до R, получим

$$B = \frac{\mu\mu_0 qn}{R^2}\int_0^R dr = \frac{\mu\mu_0 qn}{R}.$$

Произведем вычисления в СИ:

$$B = \frac{\mu\mu_0 qn}{R} = \frac{4\cdot 3{,}14\cdot 10^{-7}\cdot 5\cdot 5}{0{,}25}\ \text{Т} = 1{,}26\cdot 10^{-4}\ \text{Т} = 0{,}126\ \text{мТ}.$$