

их площади равны, а оси совпадают с осью соленоида. Поэтому магнитный момент p_m соленоида направлен вдоль его оси и численно равен

$$p_m = nLS, \quad (15.43)$$

где S — площадь витка, nL — общее число витков.

§ 15.6. Магнитное поле движущегося электрического заряда

1. В § 14.1 были приведены опыты (например, опыт А. Ф. Иоффе), неопровержимо доказывающие существование магнитного поля вокруг движущихся электрических зарядов. Закон Био — Савара — Лапласа позволяет найти выражения для индукции и напряженности этого магнитного поля.

Запишем закон Био — Савара — Лапласа в виде (15.5):

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^3} [d\mathbf{l} \mathbf{r}], \quad \text{или} \quad d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{r^3} [I d\mathbf{l} \mathbf{r}]. \quad (15.44)$$

Сила постоянного тока в однородном проводнике связана с плотностью j тока соотношением (8.5) $I = jS$, где S — площадь поперечного сечения проводника. Поэтому

$$I d\mathbf{l} = S d\mathbf{l} j \quad (15.45)$$

Предположим ради простоты, что ток в проводнике связан с упорядоченным движением одинаковых частиц-носителей заряда (например, электронов проводимости). Пусть q — заряд одной частицы, n_0 — их концентрация в проводнике, а \mathbf{v} — одинаковая для всех частиц скорость их упорядоченного движения. В таком случае вектор плотности тока

$$\mathbf{j} = qn_0\mathbf{v}. \quad (15.46)$$

Следует заметить, что в формулу (15.46) необходимо подставлять алгебраическое значение заряда q , так как согласно определению вектор плотности \mathbf{j} тока совпадает по направлению с движением положительных зарядов.

Подставив значение для \mathbf{j} из (15.46) в (15.45), получим

$$I d\mathbf{l} = qS d\mathbf{l} n_0 \mathbf{v}.$$

Произведение $S d\mathbf{l} n_0$ представляет собой полное число dn заряженных частиц, находящихся в объеме участка проводника длиной $d\mathbf{l}$: $S d\mathbf{l} n_0 = dn$, поэтому

$$I d\mathbf{l} = qv dn. \quad (15.45')$$

Подставим выражение для $I d\mathbf{l}$ в формулу (15.44):

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qdn}{r^3} [\mathbf{v} \mathbf{r}]. \quad (15.47)$$

Все dn зарядов упорядоченно движутся в одном направлении и с одинаковой скоростью. Поэтому индукция \mathbf{B}_q магнитного поля, создаваемого каждым из этих зарядов в отдельности, меньше индукции $d\mathbf{B}$ результирующего поля в dn раз:

$$\mathbf{B}_q = \frac{d\mathbf{B}}{dn} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^3} [\mathbf{v}\mathbf{r}]. \quad (15.48)$$

Напряженность магнитного поля заряда q , движущегося со скоростью \mathbf{v} ,

$$\mathbf{H}_q = \frac{\mathbf{B}_q}{\mu\mu_0} = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^3} [\mathbf{v}\mathbf{r}]. \quad (15.49)$$

2. В системах СГСМ и Гаусса формулы для \mathbf{B}_q и \mathbf{H}_q имеют следующий вид:

$$\mathbf{B}_q = \mu \frac{q}{r^3} [\mathbf{v}\mathbf{r}] \quad \text{и} \quad \mathbf{H}_q = \frac{q}{r^3} [\mathbf{v}\mathbf{r}] \quad (\text{СГСМ});$$

$$\mathbf{B}_q = \frac{\mu}{c} \frac{q}{r^3} [\mathbf{v}\mathbf{r}] \quad \text{и} \quad \mathbf{H}_q = \frac{1}{c} \frac{q}{r^3} [\mathbf{v}\mathbf{r}] \quad (\text{система Гаусса}),$$

где c — электродинамическая постоянная.

3. Выражения (15.48) и (15.49) для индукции и напряженности магнитного поля движущегося заряда были получены выше исходя из рассмотрения частного случая движения заряженных частиц — упорядоченного движения носителей заряда в проводнике. Именно поэтому в формулах (15.48) и (15.49) \mathbf{v} — скорость упорядоченного движения заряженной частицы. Однако в действительности формулы (15.48) и (15.49) пригодны для магнитного поля заряженной частицы, движущейся произвольным образом со скоростью \mathbf{v} . Например, если ток в проводнике отсутствует, то скорость упорядоченного движения носителей заряда равна нулю. Между тем каждая из этих частиц совершает тепловое движение и создает свое магнитное поле, индукция которого рассчитывается по формуле (15.48), где \mathbf{v} — скорость рассматриваемой частицы. Основываясь на выражении (15.48), можно показать, что в силу полной хаотичности теплового движения индукция результирующего магнитного поля всех носителей заряда, имеющих в проводнике, должна быть всюду равна нулю.

4. Из формул (15.48) и (15.49) следует, что индукция \mathbf{B}_q и напряженность \mathbf{H}_q магнитного поля движущегося заряда в произвольной точке A направлены перпендикулярно плоскости, проведенной через вектор \mathbf{v} скорости заряда q и радиус-вектор \mathbf{r} . Если $q > 0$, то из кон-

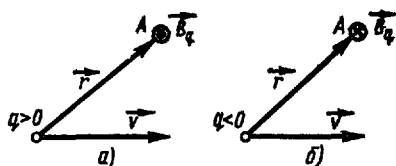


Рис. 15.9

¹ Предполагается, что скорость заряда во много раз меньше скорости света в вакууме.

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

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

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 равнобедренного треугольника со стороной, равной 50 см, проходит постоянный ток силой 3,14 А. Чему равна напряженность магнитного поля в центре треугольника?

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

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 черт перпендикулярно его плоскости. Кроме того, из условия симметрии оче-