тиметр длины прямолинейного проводника с током в 1 СГСМ$_I$, расположенного перпендикулярно направлению поля. Из формулы (14.3) следует:

$$1\ \text{Гс} = 1\ \frac{\text{дин}}{\text{СГСМ}_I \cdot \text{см}} = \frac{10^{-5}\ \text{Н}}{10\ \text{А} \cdot 10^{-2}\ \text{м}} = 10^{-4}\ \text{Т}.$$

Единицей напряженности магнитного поля является **эрстед** (Э) — напряженность такого магнитного поля, магнитная индукция которого в вакууме равна 1 Гс. В СИ напряженность этого поля

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{10^{-4}}{4\pi\ 10^{-7}}\ \frac{\text{А}}{\text{м}} = \frac{10^3}{4\pi}\ \text{А/м}.$$

Следовательно, 1 Э $= (10^3/4\pi)$ А/м.

3. **Абсолютная система единиц Гаусса.** В этой системе, наиболее часто используемой в теоретической физике, все электрические величины выражаются в единицах системы СГСЭ, а все магнитные — в единицах системы СГСМ. Поэтому коэффициенты κ_2 в законе Био—Савара—Лапласа (15.3) и κ в законе Ампера (14.2) отличны от единицы: $\kappa_2 = \kappa = 1/c$, где c — так называемая **электродинамическая постоянная**, показывающая, скольким единицам заряда (или силы тока) в системе СГСЭ эквивалентна одна единица заряда (или силы тока) в системе СГСМ, т.е.

$$c = 3 \cdot 10^{10}\ \frac{\text{СГСЭ}_q}{\text{СГСМ}_q} = 3 \cdot 10^{10}\ \frac{\text{г}^{1/2} \cdot \text{см}^{3/2} \cdot \text{с}^{-1}}{\text{г}^{1/2} \cdot \text{см}^{1/2}} = 3 \cdot 10^{10}\ \text{см/с}.$$

В гауссовой системе единиц законы Ампера и Био — Савара — Лапласа имеют вид:

$$d\mathbf{F} = \frac{1}{c} I [d\mathbf{l}\ \mathbf{B}], \tag{15.23}$$

$$d\mathbf{H} = \frac{1}{c}\ \frac{I}{r^3} [d\mathbf{l}\ \mathbf{r}] \text{ и } d\mathbf{B} = \frac{\mu}{c}\ \frac{I}{r^3} [d\mathbf{l}\ \mathbf{r}]. \tag{15.24}$$

§ 15.4. Магнитное поле кругового тока

1. Найдем индукцию и напряженность магнитного поля в центре O кругового витка радиуса R с током I (рис. 15 5). По закону Био — Савара — Лапласа (15.6), магнитная индукция поля, создаваемого в точке O элементом dl витка с током,

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\ \frac{I\,dl \sin(\widehat{d\mathbf{l}, \mathbf{r}})}{r^2}.$$

В рассматриваемом примере радиус-вектор $\mathbf{r}$ перпендикулярен элементу тока $d\mathbf{l}$, а по модулю равен радиусу витка, так что

$\sin(\widehat{d\mathbf{l}, \mathbf{r}}) = 1$ и $r = R$. Поэтому

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I\,dl}{R^2}.$$

Все векторы $d\mathbf{B}$ магнитных полей, создаваемых в точке O различными участками $d\mathbf{l}$ кругового витка с током, направлены перпендикулярно плоскости чертежа «от нас». Поэтому индукция результирующего поля в точке O

$$B = \int_0^B dB = \int_l^{2\pi R} \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2}\, dl = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \int_0^{2\pi R} dl;$$

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}. \tag{15.25}$$

Напряженность магнитного поля в центре кругового тока

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

2. Определим индукцию и напряженность магнитного поля, создаваемого круговым витком с током в произвольной точке оси витка. Пусть кольцевой виток радиуса R с током I расположен перпендикулярно плоскости чертежа так, что его ось OO' лежит в плоскости чертежа (рис. 15.6). Векторы магнитной индукции

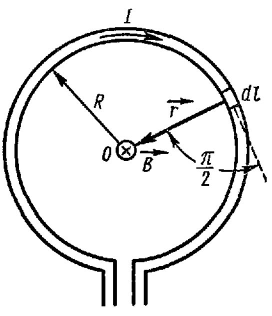

Рис. 15.5

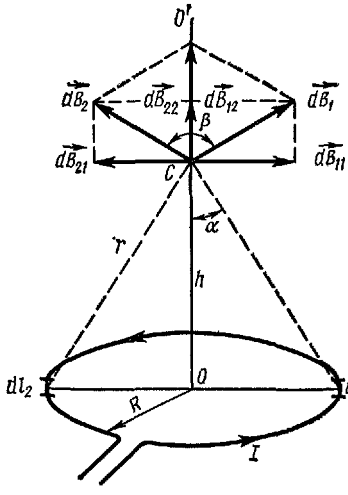

Рис. 15.6

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^3} [d\mathbf{l}\ \mathbf{r}]$$

поля, создаваемого в точке C, лежащей на оси OO', различными участками витка с током, не совпадают по направлению. Из написанной выше формулы и рис. 15.6 видно, что векторы $d\mathbf{B}$ расположены по образующим конуса с вершиной в точке C, осью OO' и углом β при вершине, равным $2[(\pi/2) - \alpha]$. Все векторы $d\mathbf{B}$ для равных по длине элементов dl витка численно равны между собой:

$$dB = dB_1 = dB_2 = \frac{\mu\mu_0 I\,dl \sin(\widehat{d\mathbf{l}, \mathbf{r}})}{r^2}.$$

Из чертежа видно, что $r^2 = R^2 + h^2$ и $\sin(\widehat{d\mathbf{l}, \mathbf{r}}) = 1$, так как векторы $d\mathbf{l}$ и $\mathbf{r}$ перпендикулярны друг другу. Поэтому

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{R^2 + h^2}. \tag{15.26}$$

Рассмотрим векторы индукции $d\mathbf{B}_1$ и $d\mathbf{B}_2$ магнитных полей, создаваемых в точке C двумя равными по длине, но диаметрально противоположными элементами dl_1 и dl_2 кругового витка ($dl_1 = dl_2 = dl$). Разложим каждый из этих векторов на две составляющие: перпендикулярную оси OO' ($d\mathbf{B}_{11}$ и $d\mathbf{B}_{21}$) и направленную вдоль оси OO' ($d\mathbf{B}_{12}$ и $d\mathbf{B}_{22}$). Векторы $d\mathbf{B}_1$ и $d\mathbf{B}_2$ составляют с осью OO' одинаковые углы, равные $\beta/2$. Так как модули этих векторов также равны друг другу, то

$$d\mathbf{B}_{11} = -d\mathbf{B}_{21}; \quad d\mathbf{B}_{12} = d\mathbf{B}_{22}, \text{ причем } dB_{12} = dB_{22} = dB \sin\alpha.$$

Сумма векторов $d\mathbf{B}_1$ и $d\mathbf{B}_2$ равна

$$d\mathbf{B}_1 + d\mathbf{B}_2 = d\mathbf{B}_{12} + d\mathbf{B}_{22},$$

т. е. представляет вектор, направленный в д о л ь о с и в и т к а. Поэтому индукция $\mathbf{B}$ магнитного поля кругового витка в точке C также направлена вдоль оси OO' и численно равна

$$B = \int_l dB \sin\alpha. \tag{15.27}$$

Из рис. 15.6 видно, что $\sin\alpha = (R/r) = R/\sqrt{R^2 + h^2}$. Подставив это выражение в (15.27) и заменив dB по формуле (15.26), получим

$$B = \int_l \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{IR}{(R^2 + h^2)^{3/2}} dl = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{IR}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi r} dl;$$

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}}. \tag{15 28}$$

3. Площадь, охватываемая круговым витком, $S = \pi R^2$. Поэтому магнитная индукция в произвольной точке C оси кругового витка с током

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{IS}{(R^2 + h^2)^{3/2}}. \tag{15.29}$$

Произведение тока I в витке на площадь S этого витка называют **магнитным моментом** p_m витка с током:

$$p_m = IS. \tag{15.30}$$

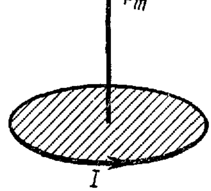

Рис. 15.7

Магнитный момент — векторная величина, направленная вдоль оси витка с током в ту же сторону, что и индукция $\mathbf{B}$ его магнитного поля. Из конца вектора $\mathbf{p}_m$ ток в витке виден идущим п р о т и в часовой стрелки (рис. 15.7).

Введем магнитный момент витка с током в

уравнение (15.29) и запишем его в векторной форме:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2\mathbf{p}_m}{(R^2 + h^2)^{3/2}}. \tag{15.31}$$

Тогда напряженность магнитного поля в точке C

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{2\mathbf{p}_m}{(R^2 + h^2)^{3/2}}. \tag{15.32}$$

Если точка C лежит далеко от центра кругового тока, т.е. $h \gg R$, то величиной R в знаменателе правой части (15.32) можно пренебречь:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{2\mathbf{p}_m}{h^3}. \tag{15.33}$$

Формула (15.33) по виду аналогична выражению для электрического смещения $\mathbf{D}$ в точках поля, лежащих на оси электрического диполя достаточно далеко от него [см. (2.10) и (2.19)[1]]. Поэтому магнитное поле кольцевого тока часто рассматривают как магнитное поле некоторого условного **«магнитного диполя»**, причем положительным или северным полюсом называют ту сторону плоскости витка, из которой линии магнитной индукции выходят, а отрицательным или южным магнитным полюсом — ту сторону плоскости витка, в которую они входят.

4. Введенное выше понятие о магнитном моменте кругового тока можно распространить также и на контур тока, имеющий произвольную форму:

$$\mathbf{p}_m = I \int_S \mathbf{n}\, dS, \tag{15.30'}$$

где $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали к элементарному участку dS поверхности S, ограниченной контуром, I — сила тока в контуре. Очевидно, что в случае п л о с к о г о контура поверхность S тоже плоская и все векторы $\mathbf{n}$ одинаково направлены (из конца вектора $\mathbf{n}$ ток в контуре должен быть виден идущим против часовой стрелки). Поэтому

$$\mathbf{p}_m = IS\mathbf{n} \text{ и } p_m = IS. \tag{15.30''}$$

В гл. XVII показано, что вектор $\mathbf{p}_m$ определяет взаимодействие между контуром тока и внешним магнитным полем.

§ 15.5. Магнитное поле соленоида

1. **Соленоидом** называется цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа намотанных вплотную друг к другу витков проводника, по которому идет ток. Соленоид можно рассматривать как систему последовательно соединенных круговых токов одинакового радиуса, имеющих общую ось. Магнитное поле тока, текущего по соленоиду, изображено на рис. 14.4, *г*.

---

[1] Можно показать, что выражения для $\mathbf{H}$ кругового витка и $\mathbf{D}$ электрического диполя имеют аналогичный вид не только в точках, лежащих соответственно на оси витка и оси диполя, но и во всех других точках.