Магнитное поле тока.

- Вокруг проводников с током и постоянных магнитов существует силовое поле (магнитное), которое оказывает силовое действие на другие проводники с током или постоянные магниты.

Но ток – это направленное движение зарядов.

- Вокруг всякого движущегося заряда помимо электрического поля образуется еще и магнитное поле.
- Магнитное поле – это материя, связанная с движущимися зарядами и обнаруживающая себя по действию на магнитные стрелки и движущиеся заряды, помещенные в это поле.

Основное свойство магнитного поля:

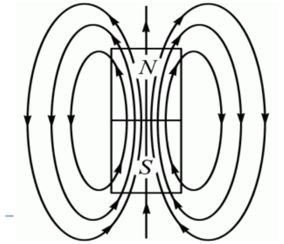
- Магнитное поле действует на движущиеся заряды, а на неподвижные не действует.

Вектор магнитной индукции – силовая характеристика магнитного поля, ее можно изобразить с помощью магнитных силовых линий.

Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции, называются силовыми линиями магнитного поля.

Направление силовых линий определяется правилом правого винта (буравчика).

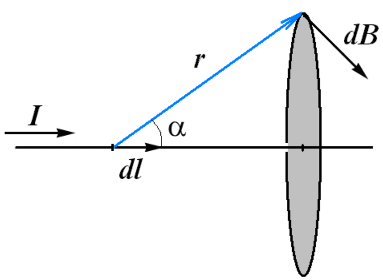
- Силовые линии магнитного поля замкнутые и не пересекаются. Следовательно, магнитное поле – вихревое.
- Закон Био – Савара – Лапласа.



Жан Батист Био и Феликс Савар экспериментально определили, что магнитная индукция зависит от:

- тока I, протекающего по проводнику,
- формы и размеров проводника,
- положения точки относительно проводника,
- состояния окружающей среды (магнитной проницаемости).

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



dB*ᵢ*

$\boldsymbol{dB_i}$ создается участком длиной ***dl*** проводника с током I,

r – радиус-вектор от элементарного тока до точки, в которой ищется поле.

α – угол между элементарным током $I \cdot \boldsymbol{dl}$ и ***r***.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн / м; Н/А^2] - магнитная постоянная.

Магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма (суперпозиция) полей, создаваемых отдельными элементарными участками тока:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{n} B_i. \qquad \vec{B} = \int_L \frac{\mu\mu_0 I\left[d\vec{l}, \vec{r}\right]}{4\pi r^3}$$

- $\boldsymbol{H}$ – вектор напряженности магнитного поля, измеряемая в СИ [А/м].

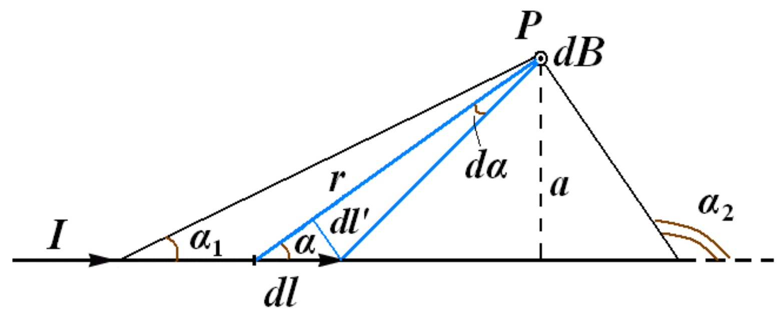
$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

- Закон Био – Савара – Лапласа для $\boldsymbol{H}$:

$$\boxed{d\vec{H} = \frac{I\left[d\vec{l},\vec{r}\right]}{4\pi r^3}}$$

Магнитное поле прямолинейного проводника с током.

Поле в точке P, расположенной на расстоянии a от проводника конечной длины с током I.



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I\left[d\vec{l},\vec{r}\right]}{4\pi r^3} \qquad dB = \frac{\mu_0 I dl\sin\alpha}{4\pi r^2}$$

Так как $d\alpha$ мал, то $dl' = rd\alpha$;

$$dl = \frac{rd\alpha}{\sin\alpha} \qquad a = r\sin\alpha \qquad dl = \frac{ad\alpha}{\sin^2\alpha}$$

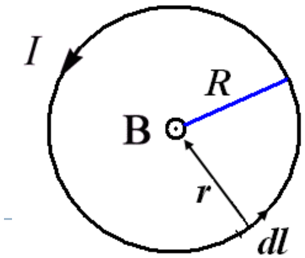
$$dB = \frac{\mu_0 I \dfrac{ad\alpha}{\sin^2\alpha}}{4\pi\dfrac{a^2}{\sin^2\alpha}}\sin\alpha = \frac{\mu_0 I\sin\alpha d\alpha}{4\pi a} \qquad B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2}\frac{\mu_0 I\sin\alpha d\alpha}{4\pi a} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a}\left(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\right)$$

Если проводник бесконечной длины, тогда $\alpha_1=0$, $\alpha_2=180^0$ =>

$$\boxed{B = \frac{2\mu_0 I}{4\pi a} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}}$$

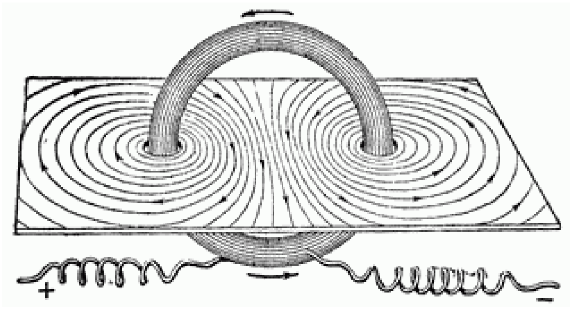
Магнитное поле в центре кругового тока:

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



$r = R, \quad \alpha = 90^0$

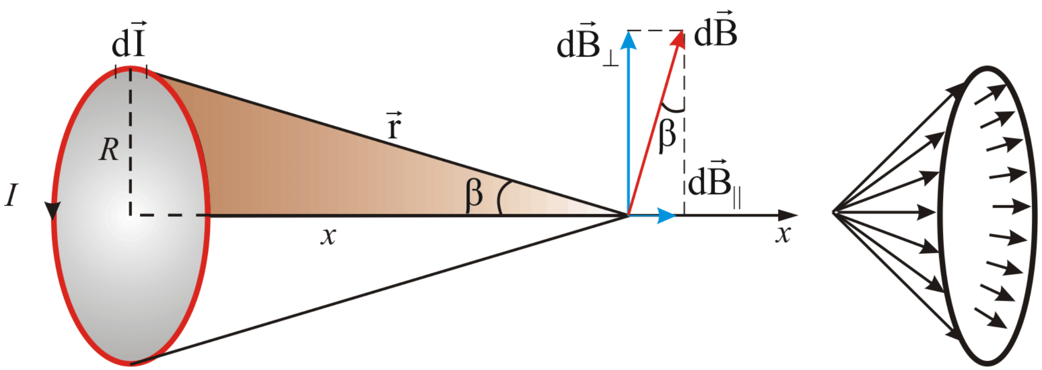
$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin\alpha}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi R^2}$$



$$B = \oint_l \frac{\mu_0 I dl}{4\pi R^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Магнитное поле на оси кругового проводника с током:

$$dB_{||} = dB \sin\beta \qquad \sin\beta = \frac{R}{r}$$



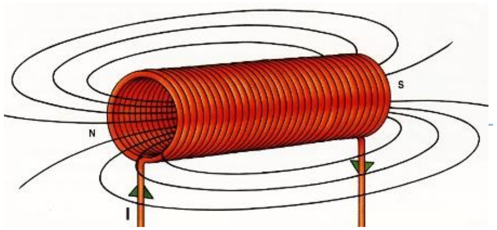
$$dB_{||} = dB\frac{R}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl}{r^2}\frac{R}{r}$$

$$r = \sqrt{R^2 + x^2}$$

$$B = \int_0^{2\pi R} dB_{||} = \frac{\mu_0 I R}{4\pi r^3}\int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\pi R^2 I}{\left(R^2 + x^2\right)^{3/2}}$$

$$x = 0 \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

<u>Поле соленоида</u>:



<u>Соленоид</u> – система одинаковых круговых токов, расположенных так, что их плоскости параллельны, а центры круговых токов расположены на одной прямой, называемой осью соленоида.

Если в соленоиде N витков, то магнитная индукция $B = \int_1^N dB$

Индукция магнитного поля витка с током в точке, расположенном на расстоянии x от плоскости витка:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\pi R^2 I}{(R^2+x^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0}{2}\frac{R^2 I}{(R^2+x^2)^{3/2}}$$

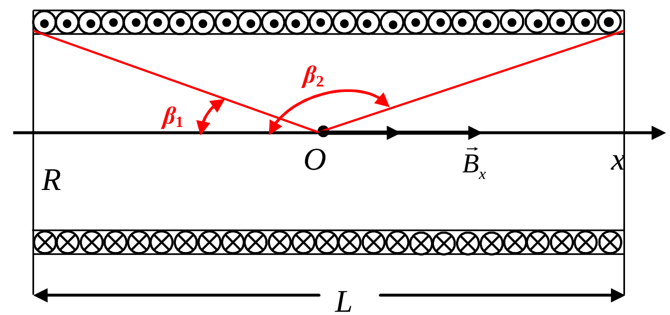
На малый участок dx длины соленоида приходится $dN=ndx$ витков, где $n=N/L$ – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида.

$$dB = \frac{\mu_0}{2}\frac{R^2 I}{(R^2+x^2)^{3/2}} ndx$$

$$r = \sqrt{R^2+x^2} = \frac{R}{sin\beta}$$

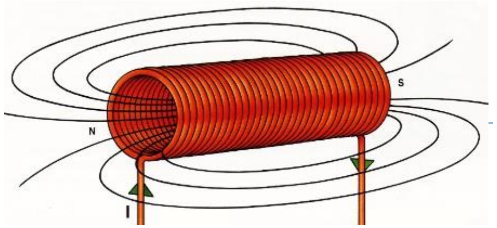
$$x = Rctg\beta$$

$$\Rightarrow dx = \frac{Rd\beta}{sin^2\beta}$$



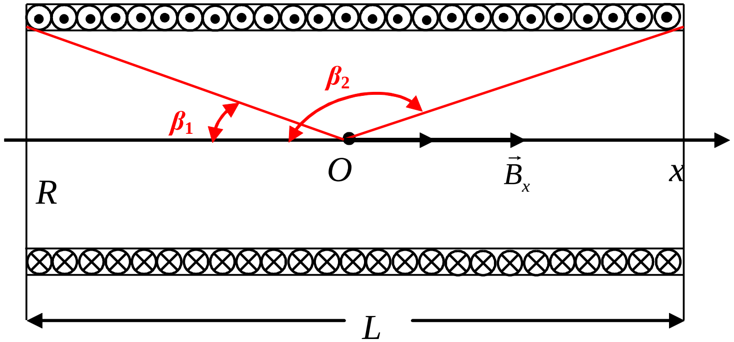
$$B = \frac{\mu_0 nI}{2}\int_{\beta_1}^{\beta_2}\frac{R^2 sin^3\beta R d\beta}{R^3 sin^2\beta} = \frac{\mu_0 nI}{2}\int_{\beta_1}^{\beta_2} sin\beta d\beta = \frac{\mu_0 nI}{2}(cos\beta_1 - cos\beta_2)$$

Поле соленоида:



Соленоид – система одинаковых круговых токов, расположенных так, что их плоскости параллельны, а центры круговых токов расположены на одной прямой, называемой осью соленоида.

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2}\int_{\beta_1}^{\beta_2}\frac{R^2 sin^3\beta R d\beta}{R^3 sin^2\beta} = \frac{\mu_0 nI}{2}\int_{\beta_1}^{\beta_2} sin\beta d\beta = \frac{\mu_0 nI}{2}(cos\beta_1 - cos\beta_2)$$



В центре соленоида: $\beta_2 = 180^0 - \beta_1$

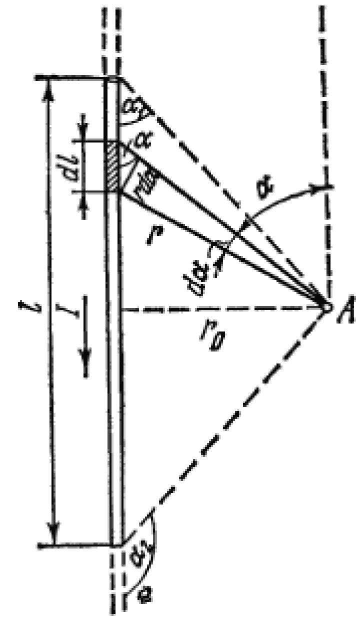
$$\Rightarrow B = \mu_0 nI cos\beta_1$$

$$cos\beta_1 = \frac{L}{\sqrt{L^2 + 4R^2}} \Rightarrow B = \mu_0 nI\frac{L}{\sqrt{L^2 + 4R^2}}$$

Если соленоид бесконечно длинный, то $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 180^0$

$$\Rightarrow B = \mu_0 nI$$

Задача 1. Определить магнитную индукцию поля, создаваемого отрезком бесконечно длинного прямого провода, в точке, равноудаленной от концов отрезка и находящейся на расстоянии 20 см от его середины. Сила тока, текущего по проводу, равна 30 А, длина отрезка равна 60 см.



- Решение:

$l = 60$ см
$r_0 = 20$ см
$I = 30$ А

$B - ?$

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

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{dl \cdot \sin\alpha}{r^2}$$

$$dl = \frac{r\,d\alpha}{\sin\alpha}$$

$$r = \frac{r_0}{\sin\alpha}$$

$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{\cancel{\sin\alpha} \cdot r_0 \cdot d\alpha \cdot \sin^2\alpha}{\cancel{\sin\alpha} \cdot \cancel{\sin\alpha} \cdot r_0^2}$$

$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \sin\alpha\, d\alpha$$

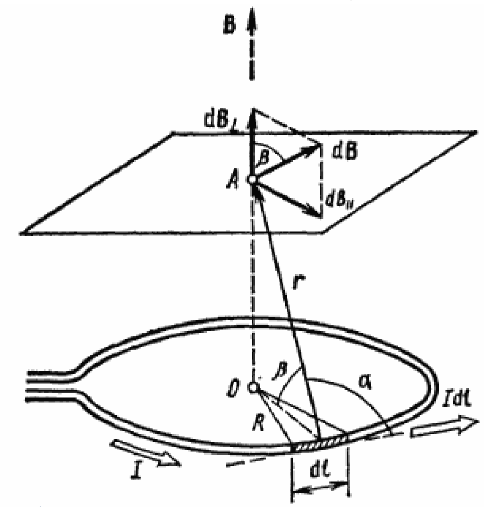
$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \sin\alpha\, d\alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$$

При симметричном расположении точки А относительно отрезка провода: $\alpha_2 = \pi - \alpha_1 \Rightarrow \cos\alpha_2 = -\cos\alpha_1$.

$$\Rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0} \cos\alpha_1 \qquad \cos\alpha_1 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4r_0^2}} \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0} \cdot \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4r_0^2}}$$

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 30 \cdot 0{,}6}{2\pi \cdot 0{,}2\sqrt{4 \cdot 0{,}04 + 0{,}36}} = 25 \text{ мкТл}$$

Задача 2. По тонкому проводящему кольцу радиусом R=10 см течет ток 80 А. Найти магнитную индукцию в точке А, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние 20 см.



- Решение:

$R = 10$ см
$r = 20$ см
$I = 80$ А

$B - ?$

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

$$\vec{B} = \int_l d\vec{B} \qquad \vec{B} = \int d\vec{B}_{\perp} + \int d\vec{B}_{\parallel}$$

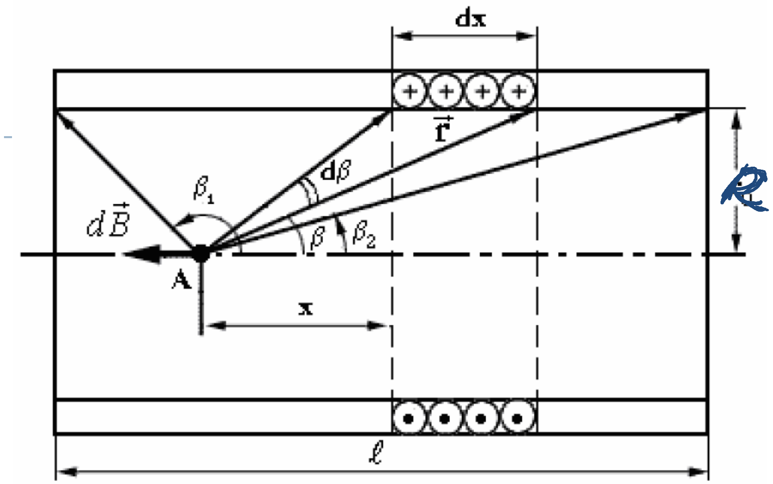
$\int d\vec{B}_{\parallel} = 0$ – в силу симметрии $\qquad dB_{\perp} = dB \cdot \cos\beta$

$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \cos\beta}{r^2} \qquad B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \cos\beta \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \cos\beta \cdot 2\pi R$$

$$\cos\beta = \frac{R}{r} \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I R^2}{2 r^3} \qquad B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot 0{,}01}{2 \cdot 0{,}008} = 6{,}28 \cdot 10^{-5}\ \text{Тл}$$

Задача 3. Получить выражение для магнитной индукции поля на оси соленоида.

- <u>Решение:</u>



ℓ, R, I | $B - ?$

Магнитное поле, создаваемое одним витком на расстоянии x от плоскости витка:

$$dB = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2+x^2)^{3/2}}.$$

В соленоиде N витков. На малый участок длины dx приходится $dN = n dx$ витков, $n = N/\ell$ – число витков на единицу длины.

$$\Rightarrow B = \int dB \cdot n dx \qquad x = R \cdot \mathrm{ctg}\beta \Rightarrow dx = \frac{R d\beta}{\sin^2\beta}; \quad r = \sqrt{R^2+x^2} = \frac{R}{\sin\beta} \Rightarrow$$

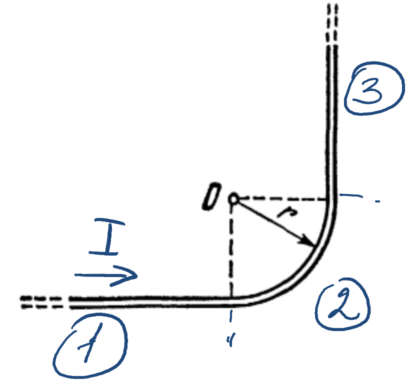
$$B = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\mu_0 I R^2 n \cdot R \sin^3\beta \, d\beta}{2 \cdot R^3 \cdot \sin^2\beta} = \frac{\mu_0 n I}{2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin\beta \, d\beta = \frac{\mu_0 n I}{2}(\cos\beta_1 - \cos\beta_2)$$

Если точка A находится в центре соленоида, то $\beta_2 = \pi - \beta_1$

$$B = \mu_0 n I \cos\beta_1 = \frac{\mu_0 n I \cdot \ell}{\sqrt{\ell^2 + 4R^2}}$$

- Если соленоид бесконечно длинный, то $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = \pi \Rightarrow$
$B = \mu_0 n I = \mu_0 N I / \ell$.

Задача 4. По бесконечно длинному прямому проводу, изогнутому так, как это показано на рис. 1, течет ток I=100 А. Определить магнитную индукцию B в точке O, если r =10 см.



- <u>Решение:</u>

$r = 10$ см
$I = 100$ А
$B - ?$

$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3$, $\vec{B}_1 \uparrow\uparrow \vec{B}_2 \uparrow\uparrow \vec{B}_3$.

$\vec{B}_1$ и $\vec{B}_3$ создаются полубесконечным проводом $\Rightarrow B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$

$\alpha_1 = 0,\ \alpha_2 = \pi/2 \Rightarrow B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}$.

$B_3 = B_1$

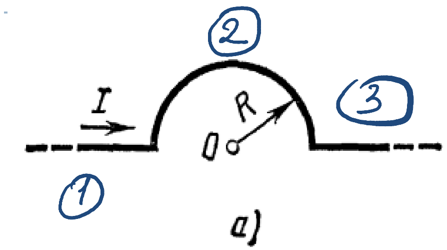
$\vec{B}_2$ создаётся дугой длиной $l = \frac{2\pi r}{4} = \frac{\pi r}{2} \Rightarrow B_2 = \frac{B_{кольца}}{4}$

$B_{кольца} = \frac{\mu_0 I}{2r} \Rightarrow B_2 = \frac{\mu_0 I}{8r}$

$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} + \frac{\mu_0 I}{8r} = \frac{\mu_0 I(4+\pi)}{8\pi r}$

$B = \frac{4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 100\,(4+\pi)}{8\pi\cdot 0{,}1} = 0{,}357$ мТл

Задача 5. Бесконечно длинный тонкий проводник с током I=50 А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом R=10 см. Определить в точке O магнитную индукцию В поля, создаваемого этим током, в случаях а – е, изображенных на рис. 2.



- Решение:

$I = 50A$

$R = 10 см$

$B - ?$

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 .$$

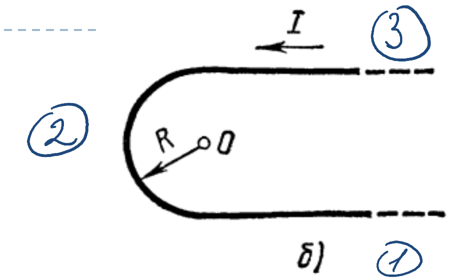
$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \quad , \alpha_1 = 0 \; , \alpha_2 = 0 \Rightarrow B_1 = 0$$

$$B_3 = B_1 = 0$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4R}$$ – для полукольца.

$$\Rightarrow B = B_2 = \frac{\mu_0 I}{4R} \qquad B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50}{4 \cdot 0,1} = 0,157 мТл$$

Задача 5. Бесконечно длинный тонкий проводник с током I=50 А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом R=10 см. Определить в точке O магнитную индукцию B поля, создаваемого этим током, в случаях а – е, изображенных на рис. 2.



- Решение:

$I = 50A$

$R = 10см$

$B - ?$

$\vec{B} = \vec{B_1} + \vec{B_2} + \vec{B_3}$ $\qquad \vec{B_1} \uparrow\uparrow \vec{B_2} \uparrow\uparrow \vec{B_3}$

$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = \pi/2$

$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$; $B_3 = B_1$

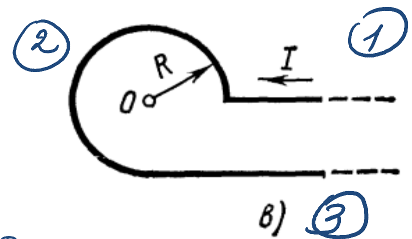
$B_2 = \frac{\mu_0 I}{4R}$ – от полукольца

$B = \frac{2\mu_0 I}{4\pi R} + \frac{\mu_0 I}{4R} = \underline{\frac{\mu_0 I}{4\pi R}(2+\pi)}$

$B = \frac{\cancel{4\pi} \cdot 10^{-7} \cdot 50(2+\pi)}{\cancel{4\pi} \cdot 0{,}1} = \underline{0{,}257 мТл}$

Задача 5. Бесконечно длинный тонкий проводник с током I=50 А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом R=10 см. Определить в точке O магнитную индукцию В поля, создаваемого этим током, в случаях а – е, изображенных на рис. 2.

- Решение:



$I = 50A$

$R = 10 см$

$B - ?$

$$\vec{B} = \vec{B_1} + \vec{B_2} + \vec{B_3}$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \quad \alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = 0 \Rightarrow B_1 = 0$$

$$B_3 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \quad \alpha_1 = \pi/2, \quad \alpha_2 = \pi \Rightarrow B_3 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$$

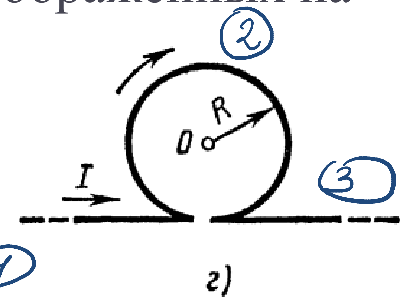
B_2 – от $\frac{3}{4}$ кольца $\Rightarrow B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R}\cdot\frac{3}{4} = \frac{3\mu_0 I}{8R}$

$$\vec{B_2} \uparrow\uparrow \vec{B_3}$$

$$B = \frac{3\mu_0 I}{8R} + \frac{\mu_0 I}{4\pi R} = \underline{\frac{\mu_0 I}{8\pi R}(3\pi + 2)}$$

$$B = \frac{4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 50(3\pi + 2)}{8\pi\cdot 0{,}1} = \underline{0{,}286 мТл}$$

Задача 5. Бесконечно длинный тонкий проводник с током *I*=50 А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом *R*=10 см. Определить в точке *O* магнитную индукцию B поля, создаваемого этим током, в случаях а – е, изображенных на рис. 2.



- Решение:

$I = 50 A$
$R = 10 см$

$B - ?$

$\vec{B} = \vec{B_1} + \vec{B_2} + \vec{B_3}$

$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = \pi/2$ $\Rightarrow$

$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$ $\qquad B_3 = B_1$

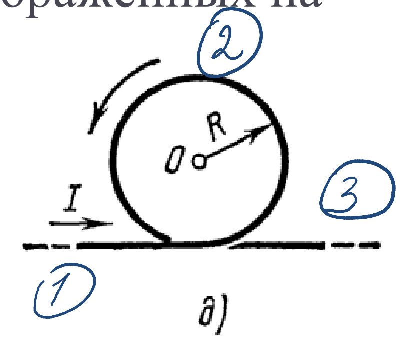
$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R}$ – для кольца.

$\vec{B_1} \uparrow\uparrow \vec{B_3}$ $\qquad \vec{B_2} \uparrow\downarrow \vec{B_1}$ $\Rightarrow B = B_1 + B_3 - B_2$

$B = \frac{2\mu_0 I}{4\pi R} - \frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}(1 - \pi)$ $\qquad B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50(\pi - 1)}{2\pi \cdot 0,1} = 0,214$ мТл

$B_2 > 2B_1 \Rightarrow \vec{B} \uparrow\uparrow \vec{B_2}$

Задача 5. Бесконечно длинный тонкий проводник с током I=50 А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом R=10 см. Определить в точке O магнитную индукцию В поля, создаваемого этим током, в случаях а – е, изображенных на рис. 2.



- Решение:

$I = 50 A$

$R = 10 см$

$B - ?$

$$\vec{B} = \vec{B_1} + \vec{B_2} + \vec{B_3}$$

$$\vec{B_1} \uparrow\uparrow \vec{B_2} \uparrow\uparrow \vec{B_3}$$

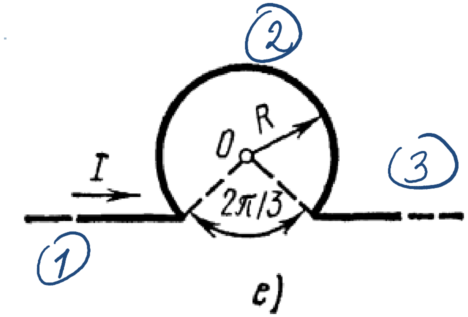
$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \quad \alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = \pi/2 \Rightarrow B_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$$

$$B_3 = B_1$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad \Rightarrow B = \frac{2\mu_0 I}{4\pi R} + \frac{\mu_0 I}{2R} = \underline{\frac{\mu_0 I}{2\pi R}(1+\pi)}$$

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50(1+\pi)}{2\pi \cdot 0{,}1} = \underline{0{,}414 \text{ мТл}}$$

Задача 5. Бесконечно длинный тонкий проводник с током I=50 А имеет изгиб (плоскую петлю) радиусом R=10 см. Определить в точке O магнитную индукцию B поля, создаваемого этим током, в случаях а – е, изображенных на рис. 2.



- <u>Решение:</u>

$I=50A$
$R=10см$
$B-?$

$$\vec{B}=\vec{B_1}+\vec{B_2}+\vec{B_3}$$

$$\vec{B_1}\uparrow\uparrow\vec{B_3} \qquad \vec{B_2}\uparrow\downarrow\vec{B_1}$$

$$\Rightarrow B=B_1+B_3-B_2.$$

$$B_1=\frac{\mu_0 I}{4\pi R}(\cos\alpha_1-\cos\alpha_2), \quad \alpha_1=0, \quad \alpha_2=\frac{\pi}{2}-\frac{2\pi}{6}=\pi/6$$

$$B_1=\frac{\mu_0 I}{4\pi R}\left(1-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$B_3=B_1$$

B_2 – от $\frac{2}{3}$ кольца $\Rightarrow B_2=\frac{2}{3}\frac{\mu_0 I}{2R}=\frac{\mu_0 I}{3R}$

$$B=\frac{2\mu_0 I}{4\pi R}\left(1-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)-\frac{\mu_0 I}{3R}=\frac{\mu_0 I}{R}\left(\frac{1}{2\pi}-\frac{\sqrt{3}}{4\pi}-\frac{1}{3}\right)=\frac{\mu_0 I}{4\pi R}\left(2-\sqrt{3}-4\pi\right)$$

$$B=\frac{4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 50\left(2-\sqrt{3}-4\pi\right)}{4\pi\cdot 0,1}=0,196 \text{ мТл}$$

Задача 6. Катушка длиной l=20 см содержит N=100 витков. По обмотке катушки идет ток I=5А. Диаметр d катушки равен 20 см. Определить магнитную индукцию B в точке, лежащей на расстоянии a=10 см от ее конца.

- Решение:

$l = 20$ см
$N = 100$
$I = 5$ А
$d = 20$ см
$a = 10$ см

$B - ?$

$$B = \frac{\mu_0 I n}{2}(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)$$

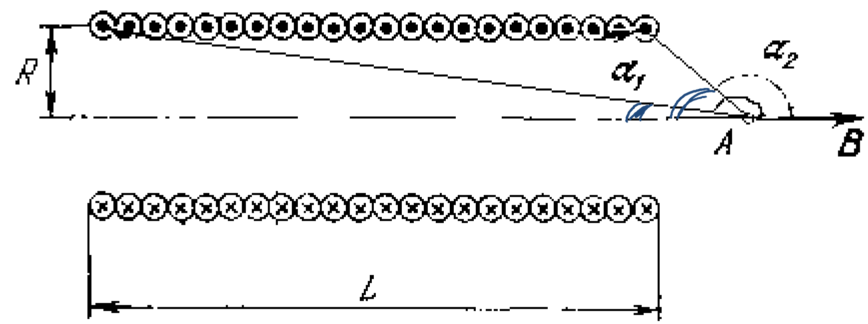
$$n = \frac{N}{l}$$

$$\cos\alpha_1 = \frac{2(l+a)}{\sqrt{d^2+4(l+a)}}$$

$$\cos\alpha_2 = \frac{2a}{\sqrt{d^2+4a^2}} \Rightarrow$$

$$B = \frac{\mu_0 I N}{l}\left(\frac{l+a}{\sqrt{d^2+4(l+a)}} - \frac{a}{\sqrt{d^2+4a^2}}\right)$$

$$B = 0{,}375 \text{ мТл}$$



Задача 7. Обмотка катушки диаметром d=10 см состоит из плотно прилегающих друг к другу витков тонкой проволоки. Определить минимальную длину катушки, при которой магнитная индукция в середине ее отличается от магнитной индукции бесконечного соленоида, содержащего такое же количество витков на единицу длины, не более чем на 0,5 %. Сила тока, протекающего по обмотке, в обоих случаях одинакова.

- Решение:

$d = 10\text{см}$

$k = 0{,}5\% = 0{,}005$

$l_{min} - ?$

$$B_\infty = \mu_0 n I$$

$$B_{сол} = \frac{\mu_0 n I l}{\sqrt{l^2+d^2}};$$

$$k = \frac{\Delta B}{B_\infty} = \frac{(B_\infty - B_{сол})}{B_\infty} = 1 - \frac{B_{сол}}{B_\infty}$$

$$k = 1 - \frac{\mu_0 n I l}{\sqrt{l^2+d^2}\cdot\mu_0 n I} = 1 - \frac{l}{\sqrt{l^2+d^2}}$$

$$\frac{l}{\sqrt{l^2+d^2}} = (1-k) \qquad \frac{l^2}{l^2+d^2} = (1-k)^2 \Rightarrow l^2 = (1-k)^2(l^2+d^2)$$

$$l^2(1-(1-k)^2) = (1-k)^2 d^2 \qquad l^2(1-1+2k-k^2) = l^2 k(2-k)$$

$$\Rightarrow l_{min} = d\cdot(1-k)/\sqrt{k(2-k)}. \qquad l_{min} = 0{,}996\text{м}$$