

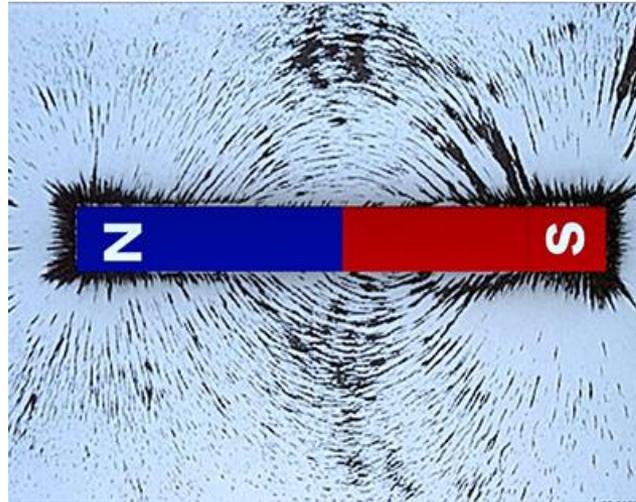
Магнитное поле

Индукция магнитного поля

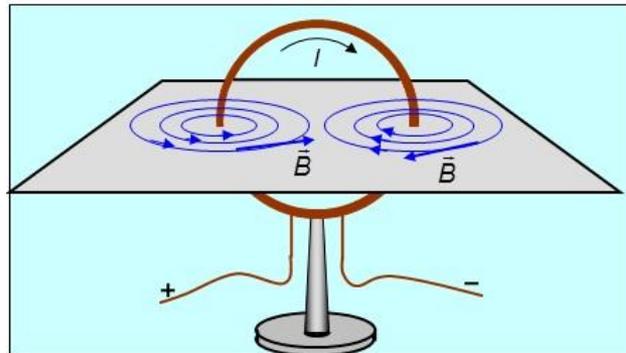
Силы Ампера и Лоренца

Источники магнитного поля

1. Постоянный магнит



2. Проводники с током

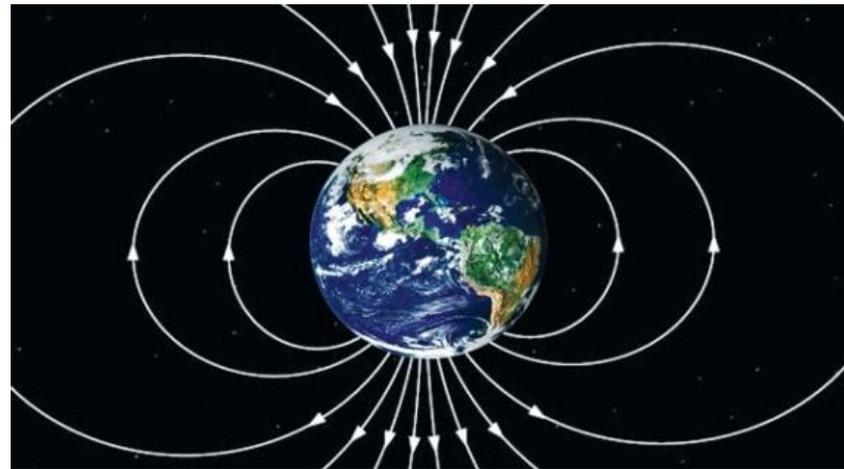
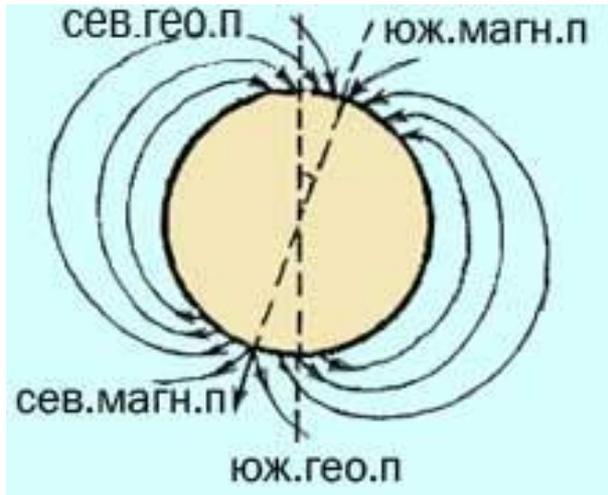


3. Катодные лучи и газовый разряд

4. Токи поляризации

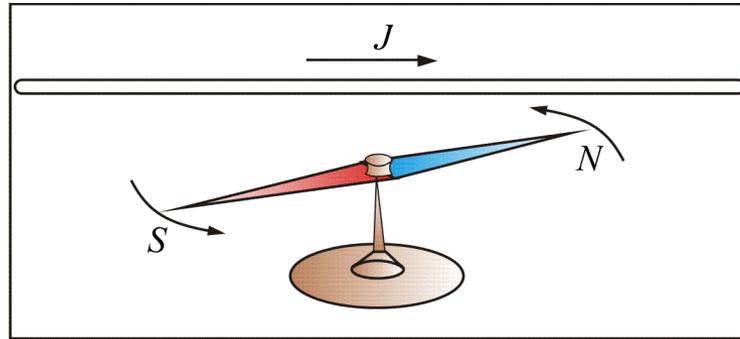
5. Конвективный ток

6. Магнитное поле Земли

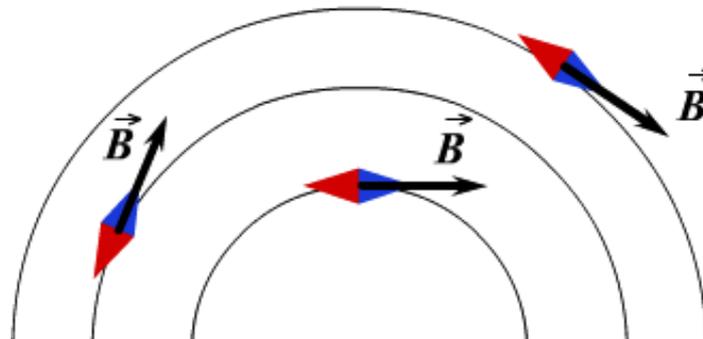


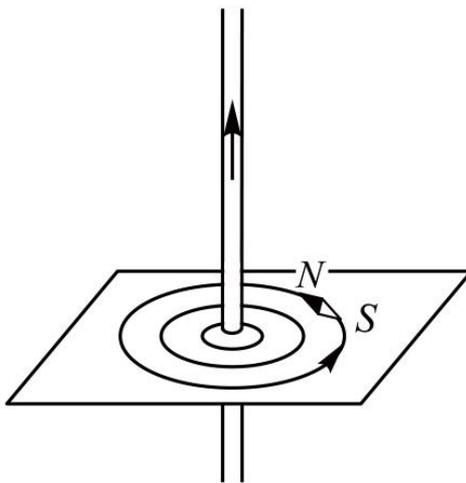
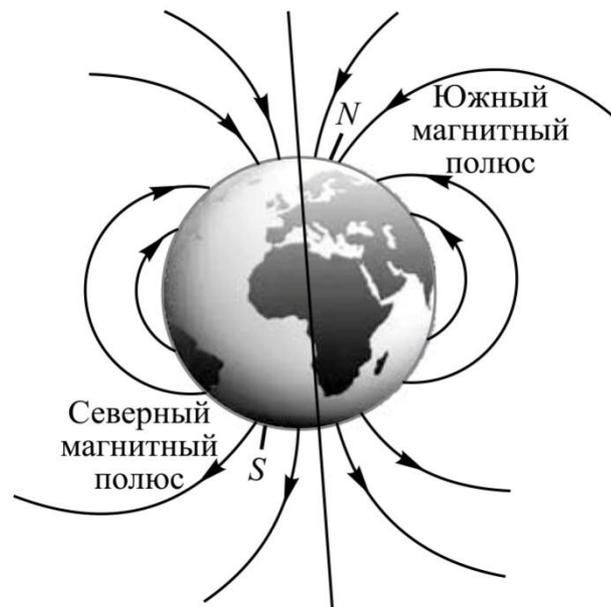
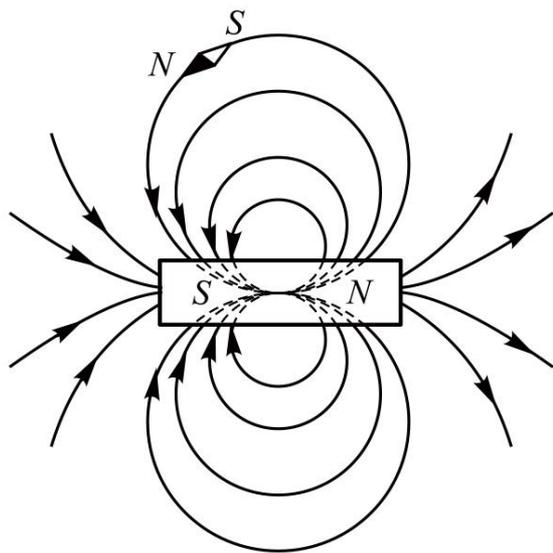
Любой направленно движущийся заряд, а также переменное во времени электрическое поле вызывают появление в пространстве магнитного поля.

Исследование магнитного поля



Векторные линии магнитного поля (линии магнитной индукции) – линии, по которым устанавливается магнитная стрелка. При этом северный полюс магнитной стрелки указывает направление линии.



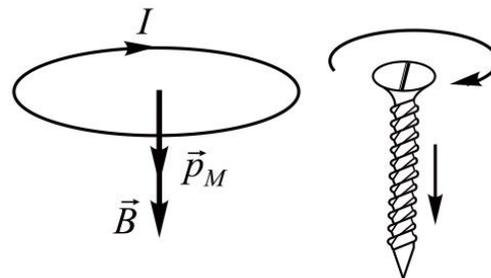


Индукция магнитного поля

$$\frac{M_{max}}{IS} = \text{const.}$$

Произведение IS называется **магнитным моментом** контура с током:

$$p_M = IS$$



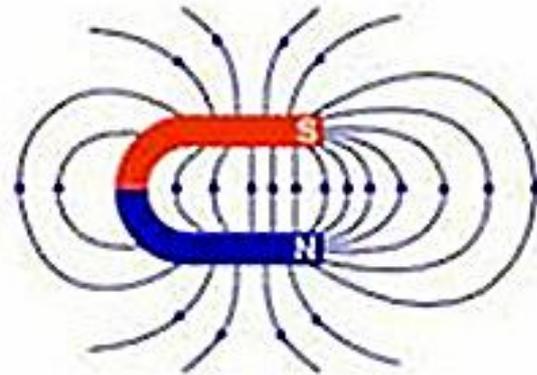
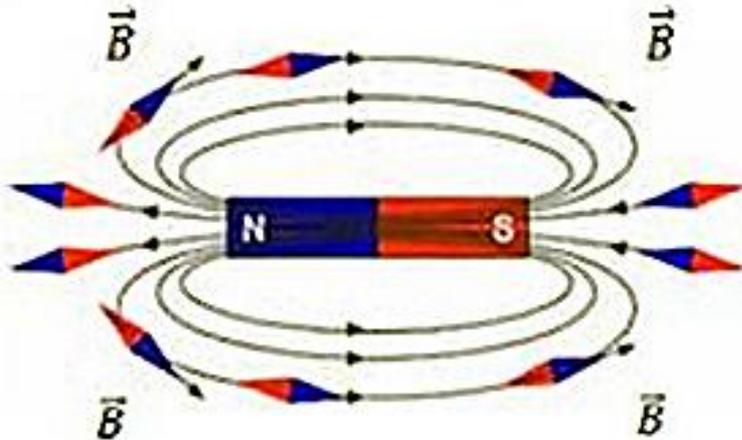
Величина магнитной индукции определяется максимальным вращательным моментом, действующим на контур с током, магнитный момент которого равен единице:

$$B = \frac{M_{max}}{p_M}$$

Линии магнитной индукции – линии, касательная в каждой точке которой совпадает с направлением вектора магнитной индукции в этой точке.

Тесла – это магнитная индукция однородного магнитного поля, которое действует с максимальным вращательным моментом $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ на контур с током, магнитный момент которого равен $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

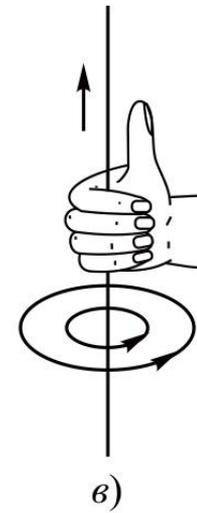
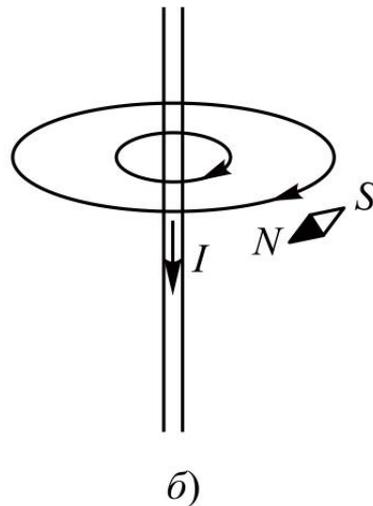
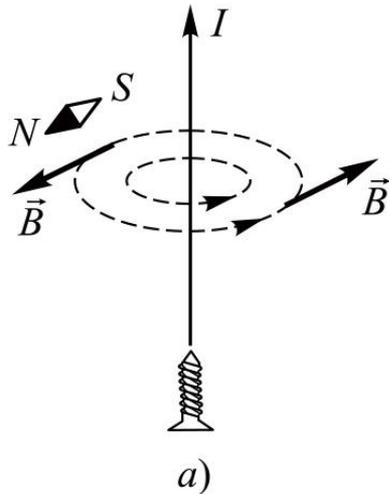
Однородное и неоднородное магнитные поля



Определение направления вектора магнитной индукции

Правило правого винта: если направление поступательного движения винта совпадает с направлением тока, то направление вращения головки винта укажет направление линий магнитной индукции.

Правило правой руки

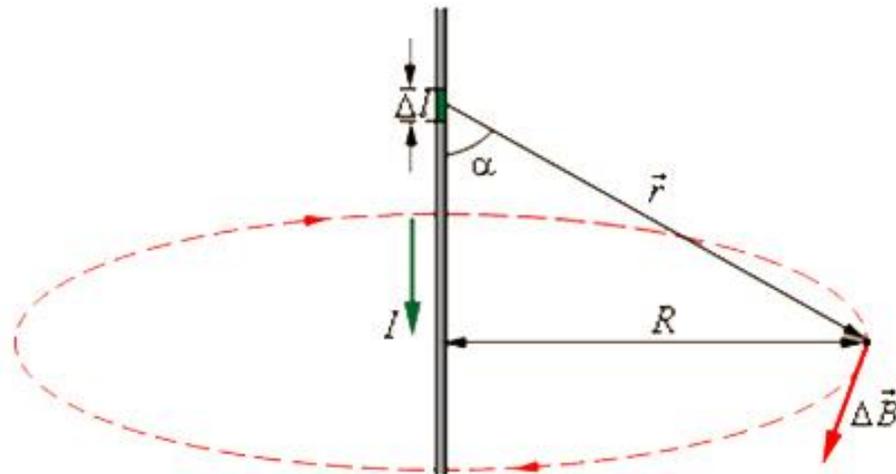


Магнитное поле проводников с током различной конфигурации

Закон *Био-Савара-Лапласа*:

$$\Delta B_i = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I \Delta l_i \sin \alpha}{r_i^2}$$

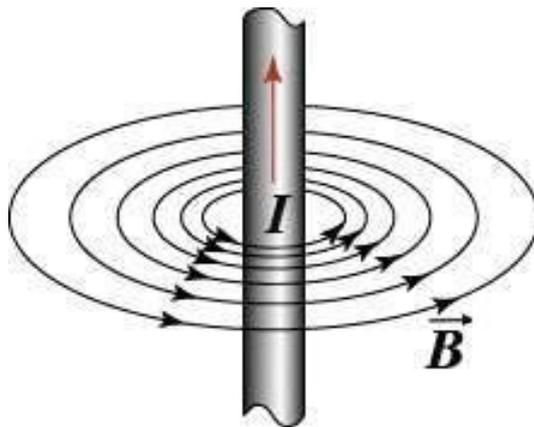
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн / м}$$



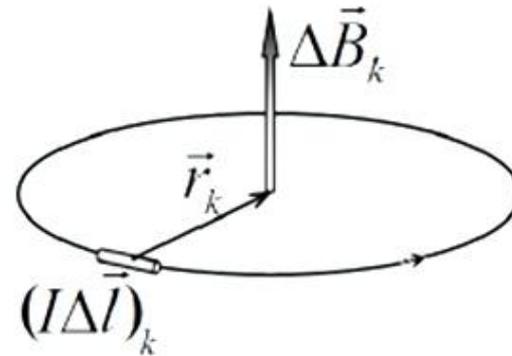
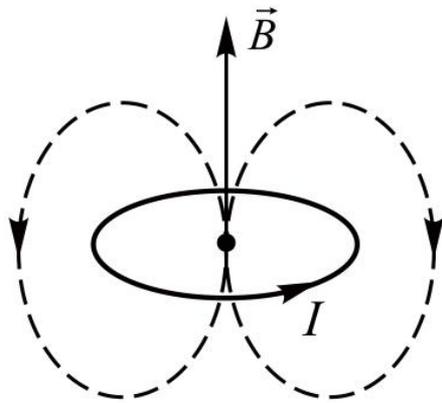
Индукции магнитного поля, созданного различными проводниками с током

1) Индукция поля, создаваемого бесконечным прямым проводником с током, на расстоянии d от проводника равна

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

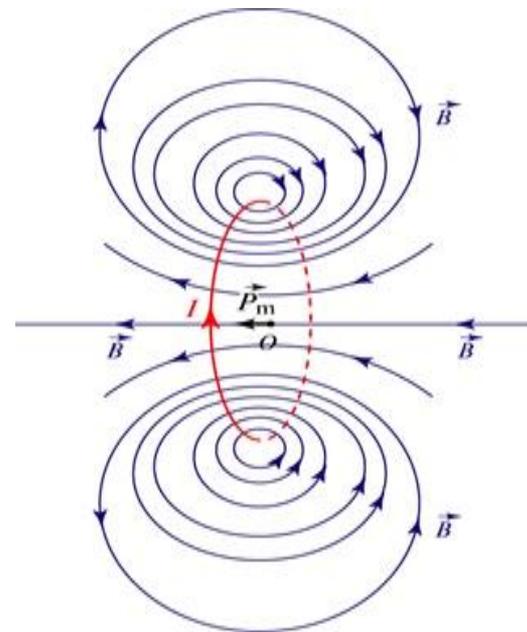


2) Магнитная индукция поля в центре кругового витка с током



$$\Delta B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I\Delta l_k}{r^2}$$

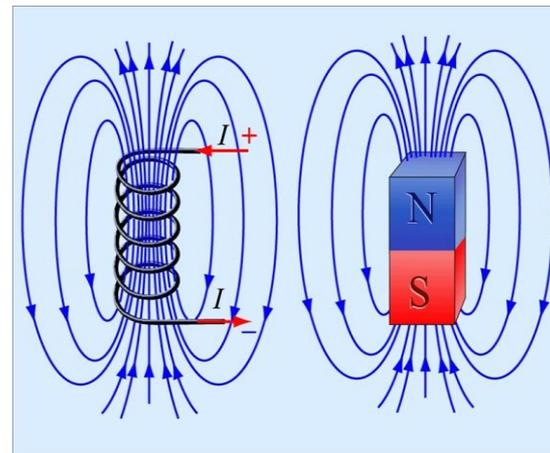
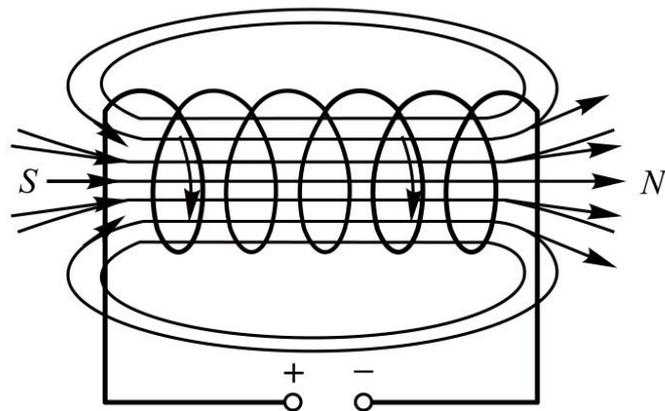
$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I2\pi r}{r^2} = \frac{\mu\mu_0 I}{2r}$$



3) Магнитная индукция поля в центре соленоида (вдали от концов соленоида, где поле существенно неоднородно) равна

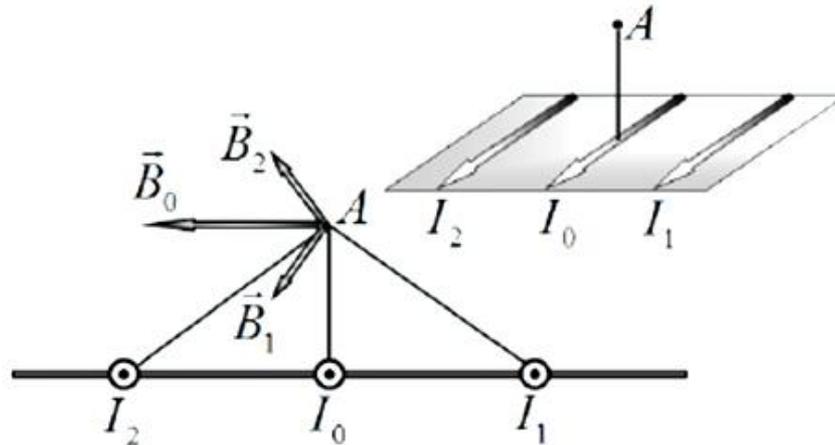
$$B = \mu\mu_0 I n,$$

где n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида. (**Соленоид** – длинная цилиндрическая катушка, состоящая из плотно намотанных витков проволоки).



Принцип суперпозиции

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$



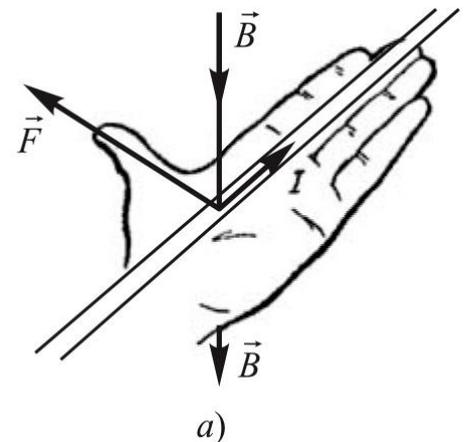
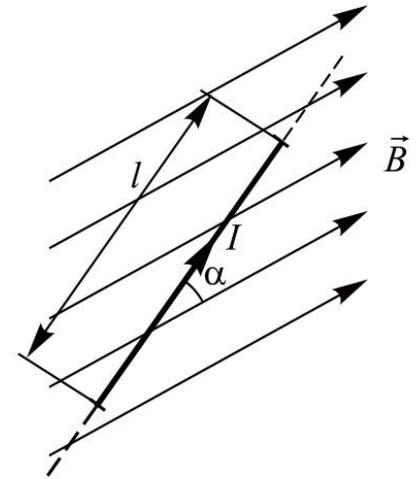
Закон Ампера

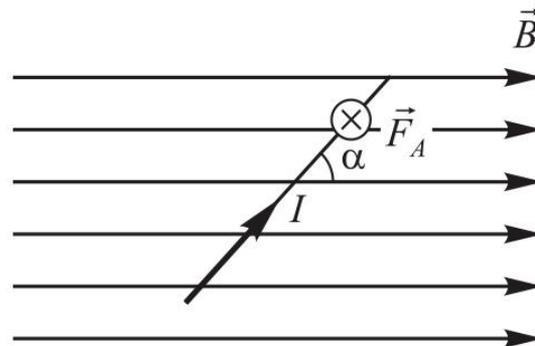
$$|\vec{F}| = I |\vec{B}| l \sin\alpha = IB l \sin\alpha$$

Закон Ампера

На проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует сила, прямо пропорциональная силе тока, идущего по проводнику, модулю вектора магнитной индукции, длине проводника, и синусу угла между направлениями тока в проводнике и вектором магнитной индукции.

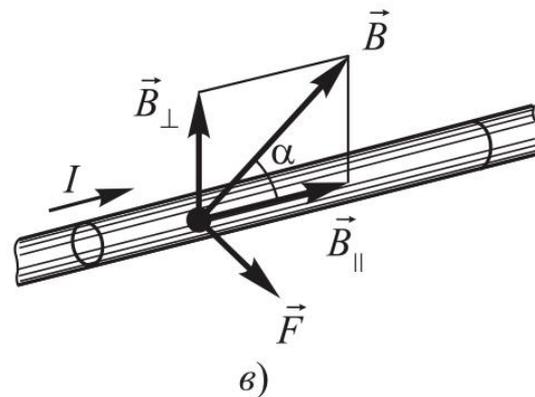
Правило левой руки: если левую руку расположить так, что линии вектора магнитной индукции входят в ладонь, четыре вытянутых пальца направить по току, то отогнутый большой палец укажет направление силы (см. рисунок).





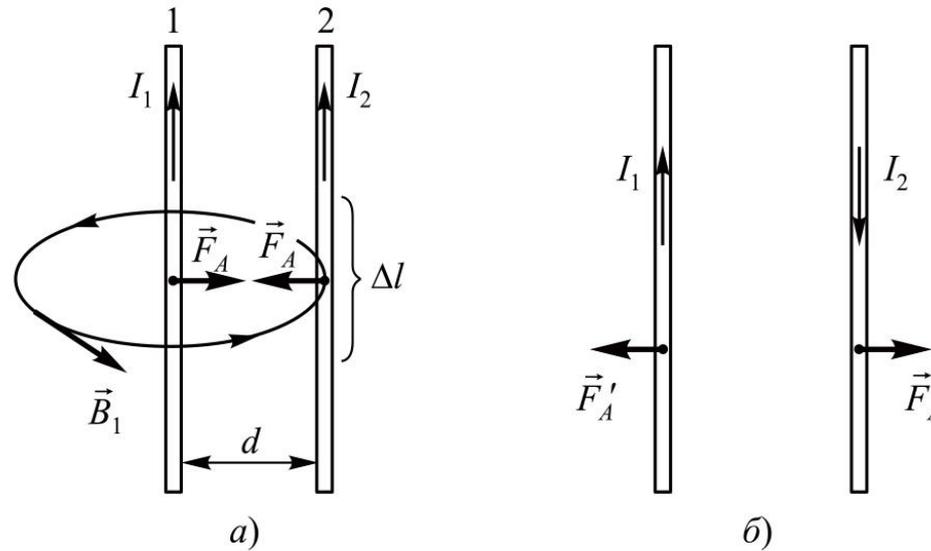
б)

Условные обозначения:
от нас — \otimes , к нам — \odot .



в)

Взаимодействие двух линейных проводников с током



По закону Ампера на проводник 2 действует магнитное поле проводника I_1 с силой:

$$F_A = I_2 B_1 \Delta l,$$

где Δl – элемент длины проводника 2:

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} \Delta l$$

Основная электрическая единица СИ – ампер.

1 Ампер – это сила такого тока, который идет по двум бесконечным параллельным проводникам ничтожно малого сечения, расположенным на расстоянии 1 м, в вакууме, и они взаимодействуют с силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины проводника.

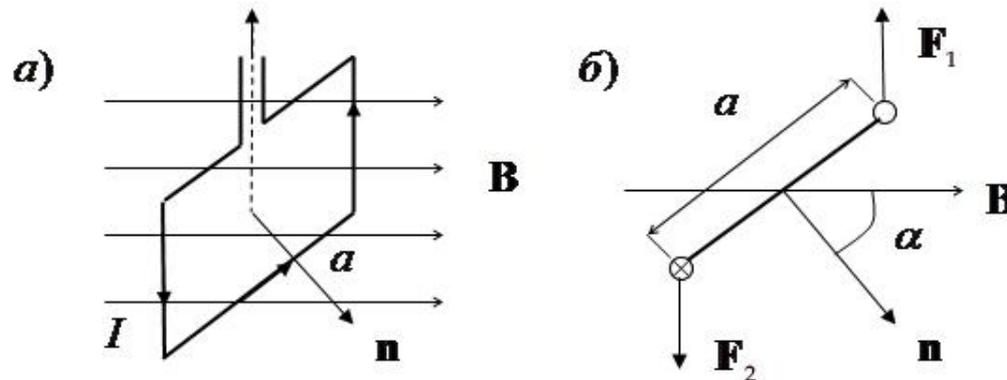
Рамка с током в магнитном поле

$$M_{\text{вр}} = F_1(a/2) \sin \alpha + F_3(a/2) \sin \alpha = Iba^2 \sin \alpha,$$

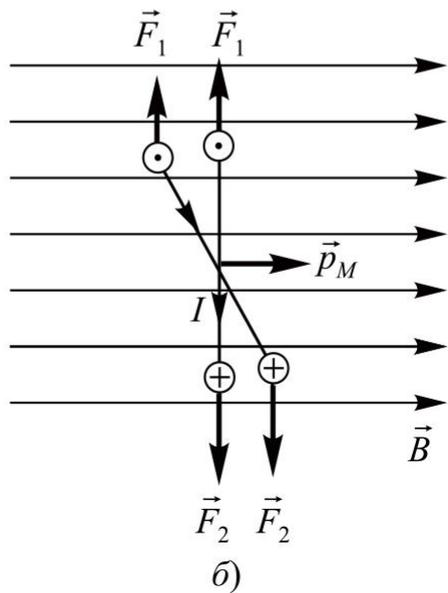
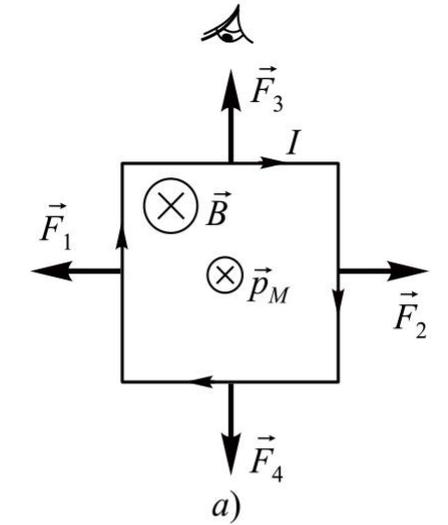
$$M_{\text{вр}} = ISB \sin \alpha = p_M B \sin \alpha,$$

$$\alpha = \pi/2 \rightarrow M_{\text{вр}} \text{ max.}$$

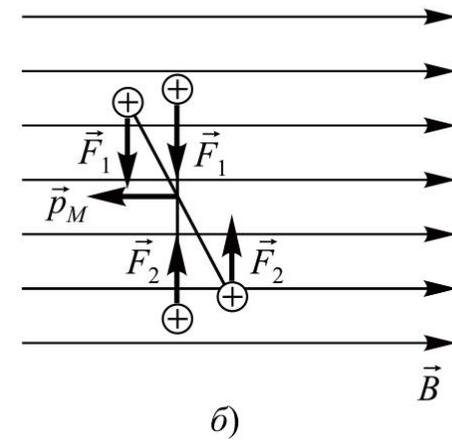
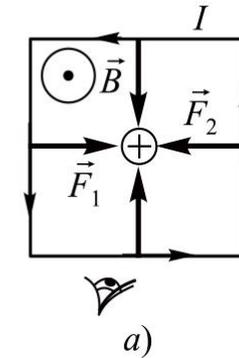
$$\alpha = 0 \text{ или } \pi \rightarrow M_{\text{вр}} = 0$$



Устойчивое положение равновесия



Неустойчивое положение равновесия



Движение заряженных частиц в магнитном поле

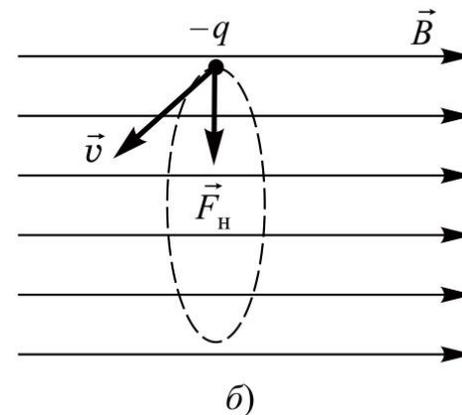
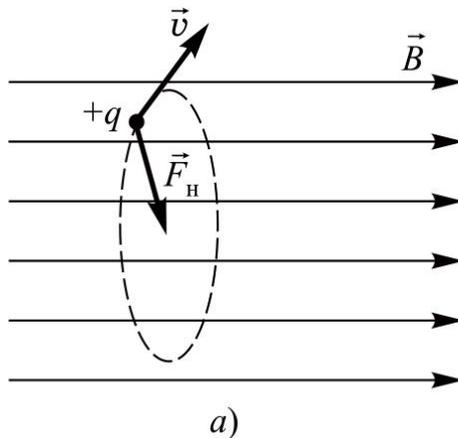
$$F_A = IB \sin \alpha$$

$$I = qn v S$$

$$F_A = qn v S l B \sin \alpha$$

$$n S l = N$$

$$F_{Л} = q v B \sin \alpha$$

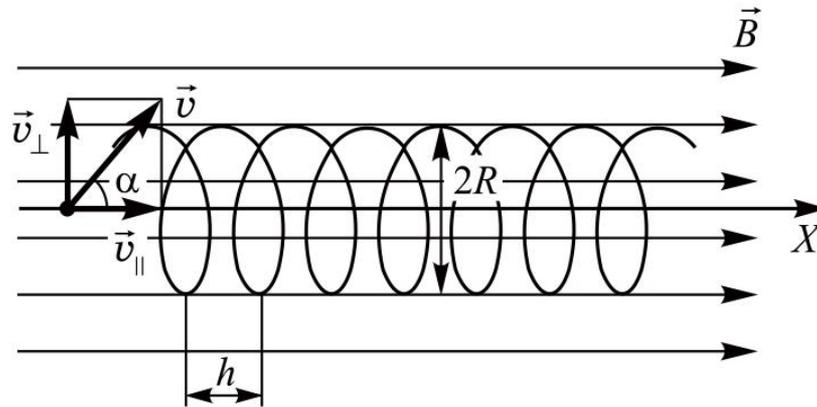


$$F_{\perp} = qvB$$

$$\frac{mv^2}{R} = qvB$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$



$$F_{\perp} = qv_{\perp}B$$

Магнитные свойства вещества

Диамагнетики ($\mu < 1$), **парамагнетики** ($\mu > 1$) и **ферромагнетики** ($\mu \gg 1$)

1. *Диамагнетики* (золото, свинец, медь) в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю. $\mu < 1$.

2. *Парамагнетики* (алюминий, платина, вольфрам) ($\mu > 1$)

Относительная магнитная проницаемость диа- и парамагнетиков не зависит от индукции внешнего магнитного поля, а зависит от материала, из которого они сделаны.

3. *Ферромагнетики* (железо, кобальт, никель)

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_m$$

где \vec{B}_0 – индукция внешнего магнитного поля,

\vec{B}_m – индукция поля, созданного ферромагнетиком, причем $\mu = B/B_0 \gg 1$.

Температура, при которой вещество теряет ферромагнитные свойства, называется **температурой (точкой) Кюри**. Вещество становится парамагнетиком. Температуры Кюри у железа 770°C , у кобальта 1130°C , у никеля 356°C . Объяснения магнитных свойств вещества основывалось на положении, что все магнитные поля создаются электрическим током.

Примеры решения задач

Определение индукции магнитного поля

Задача 1. Круговой виток радиуса r , по которому идет ток I_2 , находится вблизи бесконечного прямого провода, по которому идет ток I_1 . Проводник и виток лежат в одной плоскости. Расстояние от центра витка до проводника равно $2r$. Определите индукцию магнитного поля в центре витка. Чему должна быть равно отношение сил токов в проводниках, чтобы индукция магнитного поля в центре витка стала равной нулю?

Решение.

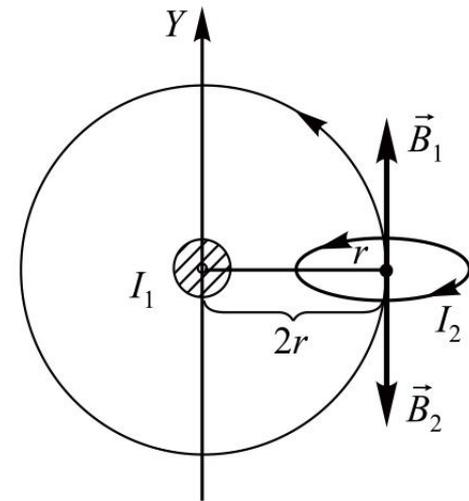
$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

$$B = B_1 - B_2$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_1}{2r} \quad B_1 = \frac{\mu_0 I_2}{4\pi r}$$

$$B = \frac{\mu_0}{2r} \left(I_1 - \frac{I_2}{2\pi} \right)$$

$$I_1 = \frac{I_2}{2\pi} \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = 2\pi$$



Задача 2. Два витка радиусами 10 см и 20 см расположены как показано на рисунке. Центры витков совпадают, а плоскости, в которых они лежат, расположены под углом 60° . Силы токов, идущих по виткам, 0,1 А и 0,2 А. Определите индукцию магнитного поля в точке O .

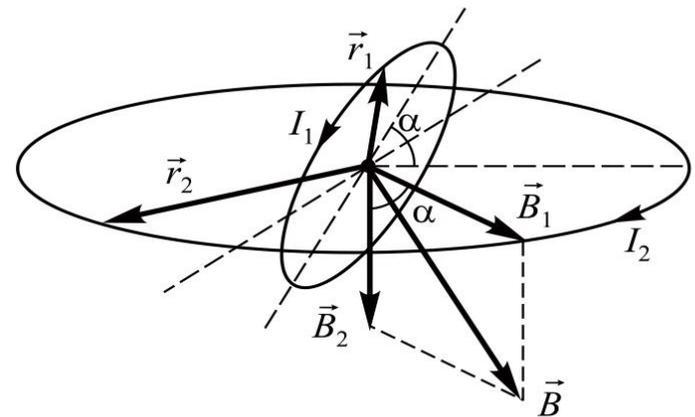
Решение.

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

$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu I_1}{2r_1} \quad B_2 = \frac{\mu_0 \mu I_2}{2r_2}$$

$$B^2 = B_1^2 + B_2^2 - 2B_1B_2 \cos(\pi - \alpha)$$

$$B_1 = B_2 \quad B = 2B_1 \cos 30^\circ \approx 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$$

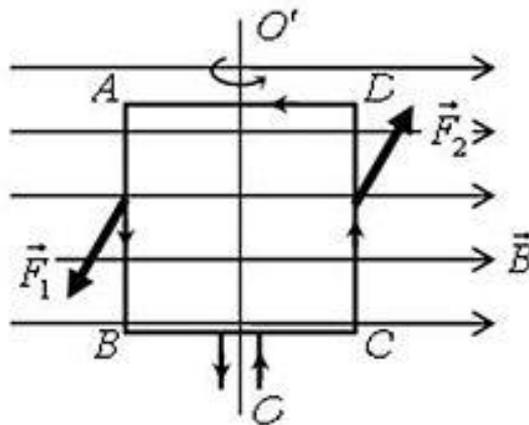


Закон Ампера

Задача 3. Квадратная рамка со стороной $a = 5$ см, имеющая $N = 10$ витков, находится в однородном магнитном поле с индукцией $0,1$ Тл. Сила тока идущего по рамке 4 А. Определите максимальный вращательный момент сил, действующих на рамку.

Решение.

$$M_{\text{вр}} = N I S B \sin \alpha = N I a^2 B \sin(\pi/2) = 10^{-2} \text{ Н}\cdot\text{м}$$



Задача 4. Квадратная рамка с током может вращаться вокруг горизонтальной оси $O-O_1$. Сторона рамки равна a . Ток в рамке I , масса единицы длины рамки ρ . Рамка находится в магнитном поле, вектор индукции которого направлен вертикально вверх. Определите угол отклонения плоскости рамки от вертикали.

Решение.

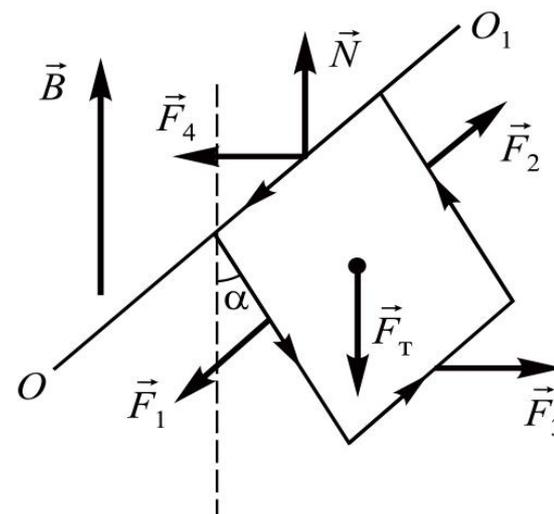
$$F_3 a \cos \alpha = I B a^2 \cos \alpha > 0$$

$$mg(a/2) \sin \alpha = 4\rho g(a^2/2) \sin \alpha < 0$$

$$I B a^2 \cos \alpha - 4\rho g(a^2/2) \sin \alpha = 0$$

$$\operatorname{tg} \alpha = I B / 2\rho g$$

$$[\operatorname{tg} \alpha] = \frac{\text{А} \cdot \text{Тл}}{(\text{М} / \text{с}^2) \cdot (\text{кг} / \text{М})} = \frac{\text{А} \cdot \text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{А} \cdot \text{М} \cdot \text{кг}} = 1$$



Задача 5. В однородном магнитном поле, индукция которого равна $B = 4 \cdot 10^{-2}$ Тл и направлена под углом $\beta = 30^\circ$ к вертикали, по вертикальным проводам без трения вверх движется прямой проводник массой $m = 10$ г, по которому идет ток $I = 3$ А. Через $t = 5$ с после начала движения проводник имеет скорость $v = 20$ м/с. Определите длину проводника l .

Решение.

$$F_A = IBl \sin \alpha, \quad \alpha = \pi / 2$$

$$ma = F_{Ax} - mg$$

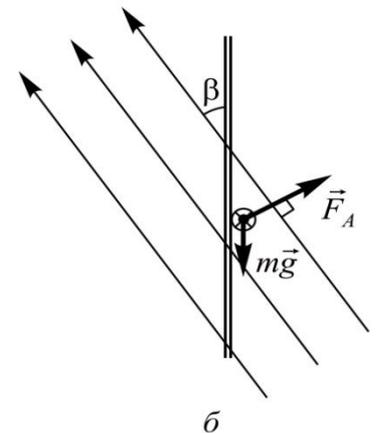
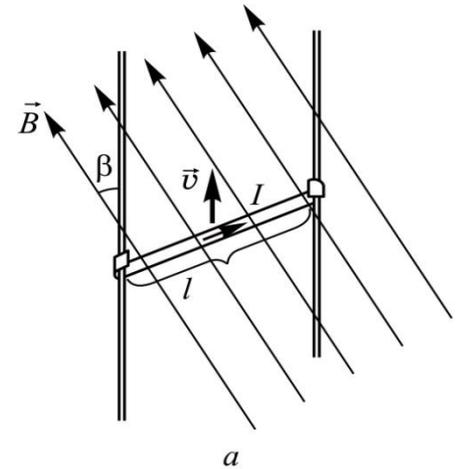
$$F_{Ax} = F_A \cos 60^\circ$$

$$ma = F_A \cos 60^\circ - mg = IBl \cos 60^\circ - mg$$

$$v = at = \frac{IBl \cos 60^\circ - mg}{m} t$$

$$l = \frac{mv + mgt}{tIB \cos 60^\circ} = \frac{m(v + gt)}{tIB \cos 60^\circ} = \frac{7}{3} \text{ м}$$

$$[l] = \frac{\text{кг} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) + \text{кг} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right) \text{с}}{\text{с} \cdot \text{А} \cdot \text{Тл}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{с}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{Н}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}} = \text{м}$$



Сила Лоренца

Задача 6. Протон влетает в область однородного магнитного поля шириной l , индукция магнитного поля. Скорость протона перпендикулярна индукции поля и границе области поля. Под каким углом α к первоначальному направлению движения протон вылетит из области поля?

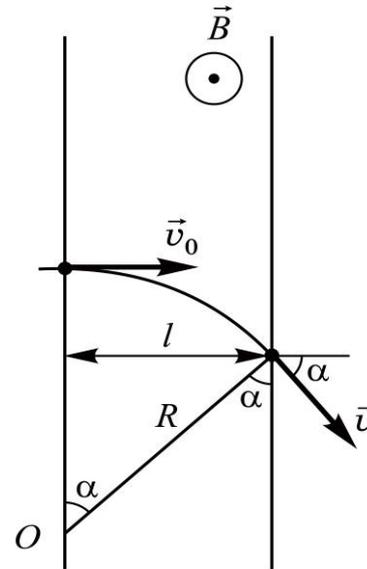
Решение.

$$\sin \alpha = l / R$$

$$R = \frac{m_p v}{q_p B}$$

$$\sin \alpha = \frac{l q_p B}{m_p v}$$

$$\alpha = \arcsin \frac{l q_p B}{m_p v}$$



Задача 7. Электрон влетает в однородное магнитное поле со скоростью $v = 10^6$ м/с, направленной под углом $\alpha = 30^\circ$ к линиям магнитной индукции. Определите параметры траектории электрона R и h . Индукция магнитного поля равна $B = 10^{-2}$ Тл. Масса $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг и заряд электрона соответственно равны $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг и $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Решение.

$$v_{\parallel} = v \cos \alpha, v_{\perp} = v \sin \alpha$$

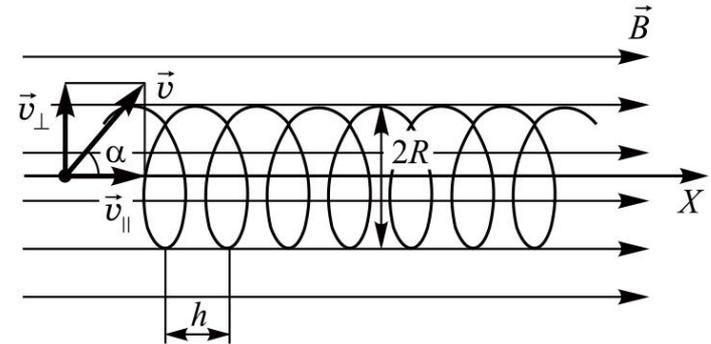
$$F_{\perp} = q v_{\perp} B$$

$$R = \frac{m v_{\perp}}{q B} = \frac{m v \sin \alpha}{q B} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$T = \frac{2 \pi m}{q B}$$

$$h = v_{\parallel} T = v \cos \alpha \frac{2 \pi m}{q B} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$[R] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{Кл} \cdot \text{Тл}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{Н}} = \text{м} \quad [h] = \frac{\text{м} \cdot \text{кг}}{\text{с} \cdot \text{Кл} \cdot \text{Тл}} = \text{м}$$



Задача 8. Электрон, прошедший разность потенциалов $\Delta\varphi = 71$ кВ, влетает в вакууме в однородное магнитное поле под углом $\alpha = 37^\circ$ к линиям магнитной индукции и движется по винтовой линии радиусом $R = 54$ мм. Определите индукцию магнитного поля и шаг винтовой линии.

Решение.

$$v_{\parallel} = v \cos \alpha, v_{\perp} = v \sin \alpha$$

$$F_n = qv_{\perp} B$$

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$$

$$B = \frac{mv \sin \alpha}{qR}$$

$$\frac{mv^2}{2} = q\Delta\varphi \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2q\Delta\varphi}{m}}$$

$$B = \frac{\sin \alpha}{qR} \sqrt{\frac{2m\Delta\varphi}{q}} = 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$T = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha}$$

$$h = v_{\parallel} T = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha = 452 \text{ мм}$$

Задача 9. Частицы ускоряются в циклотроне. Заряд частиц $q=2/|qe|$
 Индукция магнитного поля $B = 0,1$ Тл, частота ускоряющего напряжения $\nu = 6$ МГц. Определите кинетическую энергию частиц W_k в момент, когда они движутся по радиусу равному $R = 2$ м.

Решение.

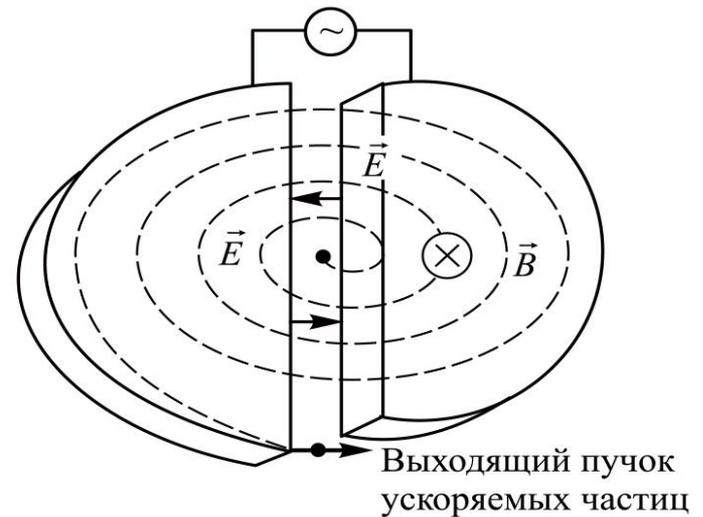
$$W_k = mv^2 / 2$$

$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu$$

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi m}{qB} \quad m = \frac{qB}{2\pi\nu}$$

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{qB}{2\pi\nu} \frac{(2\pi R\nu)^2}{2} = \pi R^2 qB\nu = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}$$

$$[W_k] = \text{м}^2 \cdot \text{Кл} \cdot \text{Тл} \cdot \text{Гц} = \frac{\text{м}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}$$



Задача 10. Частицы с одинаковыми массами, но одна с зарядом q , а другая нейтральная, влетают одновременно со скоростью v перпендикулярно линиям магнитной индукции однородного поля индукцией B . Магнитное поле имеет четкую границу. Определите зависимость от времени расстояния между частицами $l(t)$, если считать, что это расстояние в начальный момент времени равно нулю. Массы частиц малы, и силой тяжести можно пренебречь.

Решение.

$$x_1 = vt, y_1 = 0$$

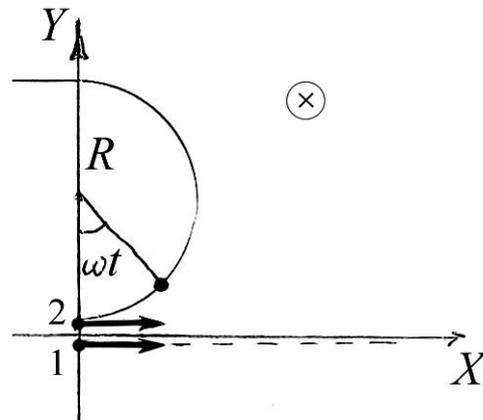
$$F_n = qvB$$

$$R = \frac{mv}{qB} \quad v = \omega R \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{qB}{m}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$t < \frac{T}{2} \quad x_2 = R \sin \frac{qB}{m} t, \quad y_2 = R \left(1 - \cos \frac{qB}{m} t \right)$$

$$l(t) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = \sqrt{2R^2 + v^2 t^2 - 2R \left(vt \cdot \sin \frac{qB}{m} t + R \cos \frac{qB}{m} t \right)}$$



$$t > \frac{T}{2} \quad x_1 = vt,$$

$$x_2 = -v \left(t - \frac{T}{2} \right), \quad y_2 = 2R$$

$$x_1 - x_2 = v \left(2t - \frac{T}{2} \right)$$

$$l(t) = \sqrt{v^2 \left(2t - \frac{T}{2} \right)^2 + 4R^2}$$

$$l(t) = v \sqrt{\left(2t - \frac{\pi m}{qB} \right)^2 + 4 \frac{m^2}{q^2 B^2}}$$

Задача 11. Ток I идет по проводнику прямоугольного сечения помещенному в однородное магнитное поле. К точкам A и C подключен вольтметр, показывающий разность потенциалов между двумя поверхностями проводника, равную U . Концентрация свободных электронов в проводнике n_0 . Определите индукцию магнитного поля B .

Решение. Эффект Холла

$$F_L = q_e v B$$

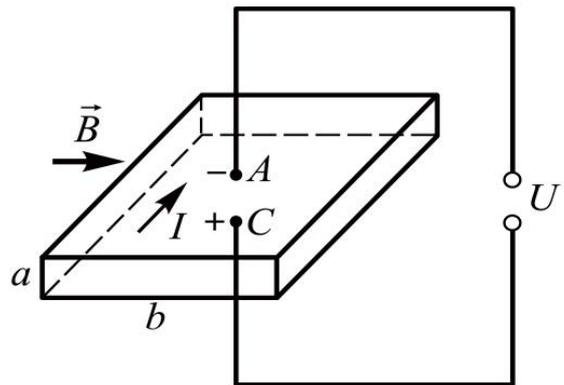
$$F_{эл} = F_L$$

$$\frac{q_e U}{a} = q_e v B \quad B = \frac{U}{va}$$

$$I = q_e n_0 v a b, \quad v = \frac{I}{q_e n_0 a b}$$

$$B = \frac{U q_e n_0 b}{I}$$

$$[B] = \left[\frac{\text{В} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{м}}{\text{А}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[\frac{\text{Н}}{\text{Ам}} \right] = [\text{Тл}]$$



Задача 12. Частица массой m , имеющая положительный заряд q , влетает со скоростью v_0 под углом α в электрическое и магнитное поля, направленные параллельно. Напряженность электрического поля E , индукция магнитного поля B ($\uparrow\uparrow$). Определите параметры траектории частицы.

Решение.

$$v_{0\parallel} = v_0 \cos \alpha, v_{0\perp} = v_0 \sin \alpha$$

$$F_{\perp} = qv_{0\perp} B$$

$$R = \frac{mv_{0\perp}}{qB} = \frac{mv_0 \sin \alpha}{qB}$$

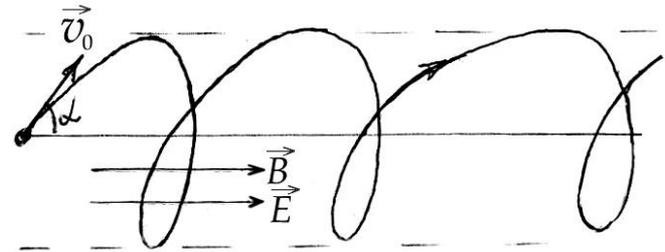
$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$ma = qE$$

$$v_{\parallel} = v_0 \cos \alpha + at = v_0 \cos \alpha + \frac{qE}{m} t$$

$$h = v_{\parallel} T = \left(v_0 \cos \alpha + \frac{qE}{m} t \right) \frac{2\pi m}{qB}$$

$$[h] = \frac{\text{кг} \cdot \text{А} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{Н}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} + \frac{\text{Кл} \cdot \text{Н}}{\text{Кл} \cdot \text{кг}} \text{с} \right) = \frac{\text{кг} \cdot \text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{Кл} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} + \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \text{с} \right) = \text{м}$$



Задача 13. Частица массой m , имеющая положительный заряд q , влетает со скоростью v_0 под углом α в электрическое и магнитное поля. При этом напряженность электрического поля E и индукция магнитного поля B направлены в противоположные стороны ($\uparrow\downarrow$). Определите момент времени, когда частица остановится и начнет двигаться в обратном направлении.

Решение.

$$v_{0\parallel} = v_0 \cos \alpha, v_{0\perp} = v_0 \sin \alpha$$

$$F_{\perp} = qv_{0\perp} B$$

$$R = \frac{mv_{0\perp}}{qB} = \frac{mv_0 \sin \alpha}{qB} \quad T = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$ma = qE$$

$$v_{\parallel} = v_0 \cos \alpha - at = v_0 \cos \alpha - \frac{qE}{m} t$$

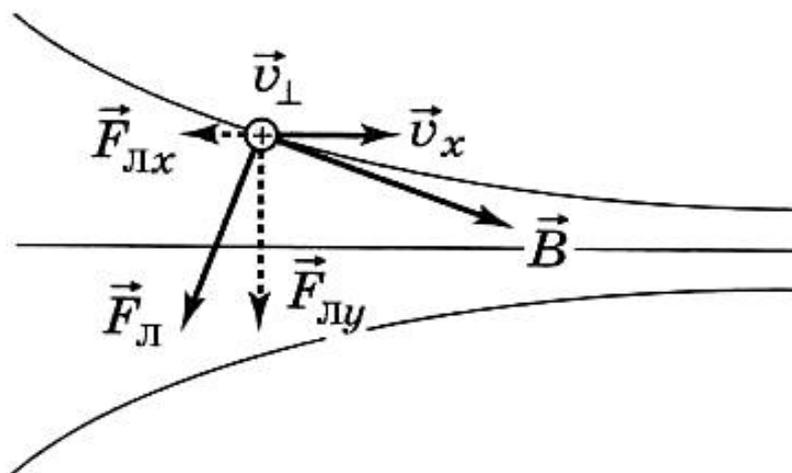
$$h = v_{\parallel} T = \left(v_0 \cos \alpha - \frac{qE}{m} t \right) \frac{2\pi m}{qB}$$

$$v_{\parallel} = v_0 \cos \alpha - at = v_0 \cos \alpha - \frac{qE}{m} t = 0$$

$$t = \frac{mv_0 \cos \alpha}{qE}$$

Задача 14. Показать, что в неоднородном магнитном поле частица может начать двигаться в противоположном направлении.

Решение.



Спасибо за внимание!