

Сила Лоренца

Если заряд q движется в магнитном поле B со скоростью v , то на заряд со стороны магнитного поля действует *сила Лоренца*

$$F = qvB \sin \alpha,$$

где α — угол между векторами \vec{v} и \vec{B} . Вектор \vec{F} перпендикулярен векторам \vec{v} и \vec{B} и направлен туда, глядя откуда кратчайший поворот вектора \vec{v} к вектору \vec{B} виден *против часовой стрелки*.

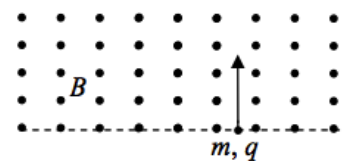
ЗАДАЧА 1. (*Ларморовский радиус*) В однородном магнитном поле с индукцией B движется со скоростью v частица массой m и зарядом q . Направление скорости частицы перпендикулярно линиям магнитного поля. Объясните, почему траекторией заряда является окружность, и найдите радиус этой окружности.

$$\frac{q^2 b}{\alpha m} = \gamma$$

ЗАДАЧА 2. В условиях предыдущей задачи скорость частицы увеличилась в два раза. Как изменился период обращения частицы?

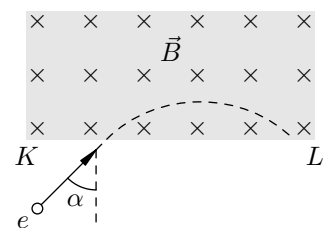
Период не изменился

ЗАДАЧА 3. (*Всеросс., 2014, I этап, 11*) Частица массой m , несущая заряд q , влетает со скоростью v в область однородного магнитного поля с индукцией B перпендикулярно линиям индукции и плоской границе области (см. рисунок). Определите максимальное расстояние, на которое удалится от границы области частица в процессе своего движения.



$$\frac{q^2 b}{\alpha m} = \gamma$$

ЗАДАЧА 4. (*МФТИ*) Электрон со скоростью $v = 10^9$ см/с влетает в область однородного магнитного поля с индукцией $B = 10^{-3}$ Тл (см. рисунок). Направление скорости перпендикулярно линиям индукции поля. Определите максимальную глубину h проникновения электрона в область магнитного поля (то есть наибольшее удаление электрона от прямой KL). Отношение заряда электрона к его массе $\gamma = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг, угол падения $\alpha = 30^\circ$.

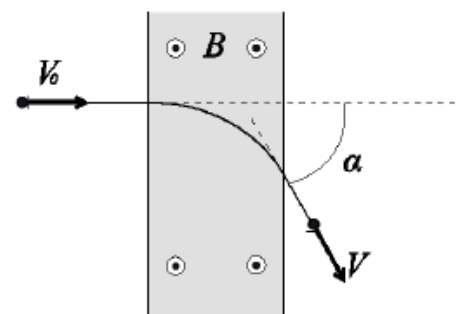


$$h = \frac{v \sin \alpha}{\omega} = \frac{q v \sin \alpha}{\gamma \omega} = \gamma$$

ЗАДАЧА 5. (*«Физтех», 2016, 11*) Частица массой $m = 6,6 \cdot 10^{-27}$ кг и зарядом $q = 3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл пролетает область однородного магнитного поля с индукцией $B = 0,03$ Тл, изменив направление своего движения на угол $\alpha = 0,8$ рад (см. рисунок). Начальная скорость частицы перпендикулярна границе поля и силовым линиям поля.

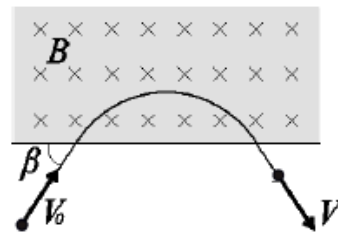
1) Найти отношение скорости v при вылете из поля к скорости v_0 при влёте в поле. Дать объяснение.

2) Найти время пролёта частицы через магнитное поле.



$$\frac{q^2 b}{\alpha m} = \gamma \quad (\gamma = v_0 / v)$$

ЗАДАЧА 6. («Физтех», 2016, 11) Электрон влетает в область однородного магнитного поля и через время $t = 0,91$ нс покидает поле (см. рисунок). Начальная скорость электрона перпендикулярна силовым линиям поля и составляет угол $\beta = 0,4$ рад с границей поля. Масса электрона $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, модуль его заряда $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

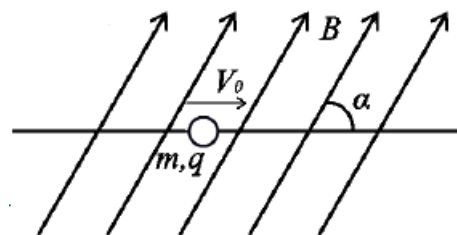


1) Найти отношение скорости v при вылете из поля к скорости v_0 при влёте в поле. Дать объяснение.

2) Найти индукцию магнитного поля.

$$\frac{mv}{v_0} = \frac{2\pi}{\beta} = B \left(\frac{2}{\beta} \right) = 0a/a \quad (1)$$

ЗАДАЧА 7. («Физтех», 2016, 11) Бусинка массой m с положительным зарядом q может скользить вдоль закреплённой длинной спицы. Бусинка со спицей помещены в однородное магнитное поле с индукцией B (см. рисунок). Угол между вектором индукции и спицей равен $\alpha = \arcsin \frac{2}{5}$. Бусинке сообщают скорость v_0 . Коэффициент трения между бусинкой и спицей равен μ . Действие силы тяжести не учитывать.



1) Найти силу трения, действующую на бусинку в момент, когда ее скорость станет $v_0/3$.

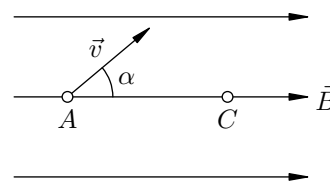
2) На какое расстояние сместится бусинка к моменту, когда ее скорость станет $v_0/3$?

$$\frac{Bbtq}{v_0 m} = s \quad (2) \quad B; \alpha; \mu; v_0; \frac{2}{5} = f \quad (1)$$

ЗАДАЧА 8. (Винтовая линия) В область однородного магнитного поля B влетает заряженная частица, скорость v которой направлена под острым углом α к вектору магнитной индукции. Объясните, почему траекторией частицы будет винтовая линия. Найдите радиус и шаг этой винтовой линии. Масса частицы равна m , заряд равен q .

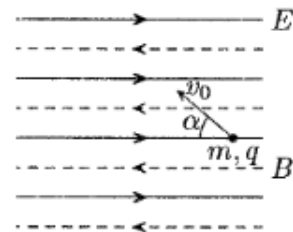
$$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}, \quad p = \frac{qB}{2\pi m v \cos \alpha}$$

ЗАДАЧА 9. (МФТИ) Электрон влетает в однородное магнитное поле. В точке A он имеет скорость v , которая составляет с направлением поля угол α (см. рисунок). При какой индукции магнитного поля электрон окажется в точке C ? Заряд электрона равен e , его масса равна m , расстояние $AC = L$.



$$B = \frac{2\pi m v}{eL} \cos \alpha, \quad n \in \mathbb{Z}$$

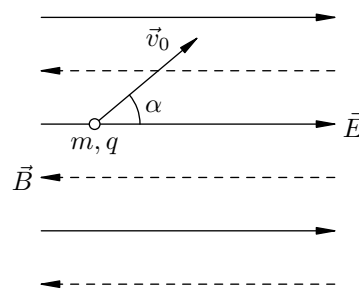
Задача 10. (МФТИ, 2002) Частица массой m с положительным зарядом q находится в однородных электрическом и магнитном полях. Напряжённость электрического поля равна E . Линии индукции магнитного поля параллельны силовым линиям электрического поля. В начальный момент частице сообщают скорость v_0 , направленную под углом α к линиям индукции (см. рисунок). Через некоторое время частица возвращается в начальную точку.



- Чему равно это время?
- Найти индукцию магнитного поля B , при которой возвращение в начальную точку возможно.

$$\dots, 3, 2, 1 = u, u \frac{v \cos \theta_0}{u \sin \theta} = E \quad ; \quad \frac{q b}{\alpha \cos \theta_0 m \omega} = \omega \quad (a)$$

Задача 11. (МФТИ, 2002) Частица массой m с положительным зарядом q находится в однородных электрическом и магнитном полях. Линии индукции магнитного поля параллельны силовым линиям электрического поля. В начальный момент частице сообщают скорость v_0 , направленную под углом α к силовым линиям (см. рисунок). Через время τ частица оказывается вновь на той же силовой линии электрического поля, с которой она стартовала, на расстоянии L от первоначальной точки.



- Чему равна напряжённость электрического поля E ?
- Найти индукцию магнитного поля B .

$$\dots, 3, 2, 1 = u, u \frac{v \cos \theta}{u \sin \theta} = E \quad ; \quad \frac{q b}{\alpha \cos \theta_0 m \omega} = E \quad (a)$$

Задача 12. («Покори Воробьёвы горы!», 2014, 10–11) Силовые линии однородного электрического поля с напряжённостью $E = 25$ В/м параллельны линиям индукции однородного магнитного поля с индукцией $B = 0,06$ Тл. α -частица влетает в эти поля под углом $\beta = 60^\circ$ к силовым линиям с начальной скоростью $v_0 = 25$ км/с. Найти отношение величины шага n -го витка винтовой линии, по которой движется частица, к радиусу этого витка. Считать, что масса α -частицы $m_\alpha = 4m_p$, заряд $q_\alpha = 2e$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона, $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг — масса протона.

$$u \tau \omega + 2 \pi r \beta \approx \frac{q \sin \theta_0 a}{E (1 - \sin^2 \theta)} + \beta \sin \theta \tau = \frac{u \tau}{u_p}$$

Задача 13. («Физтех», 2016, 11) Шарик массой m с зарядом q брошен с поверхности Земли со скоростью v_0 под углом α к горизонту. В области, где движется шарик, наряду с гравитационным полем создано однородное магнитное поле, линии индукции которого вертикальны. Через некоторое время шарик возвращается в точку старта. Силой сопротивления воздуха пренебречь.

- Найти продолжительность полёта.
- Найти возможные величины индукции магнитного поля.

$$\mathbb{N} \ni u \sin \theta, u \frac{v \sin \theta_0}{u \sin \theta} = E \quad ; \quad \frac{b}{\alpha \sin \theta_0} = \tau \quad (1)$$

ЗАДАЧА 14. («Физтех», 2016, 11) Шарик массой m с зарядом q брошен с поверхности Земли со скоростью v_0 под углом α к горизонту. В области, где движется шарик, наряду с гравитационным полем создано однородное магнитное поле, линии индукции которого вертикальны. Через время τ шарик оказался на некоторой высоте и на одной вертикали с точкой старта. Силой сопротивления воздуха пренебречь.

- 1) На какой высоте оказался шарик через время τ ?
- 2) Найти возможные величины индукции магнитного поля.

$$\mathbb{N} \ni u \text{ шгг } u \frac{vb}{m\omega} = B(z); \frac{z}{z_0} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g} = \eta \quad (1)$$

ЗАДАЧА 15. («Физтех», 2016, 11) Шарик массой m с зарядом q брошен с поверхности Земли со скоростью v_0 под углом α к горизонту. В области, где движется шарик, наряду с гравитационным полем создано однородное магнитное поле, линии индукции которого вертикальны. Через некоторое время шарик достигает максимальной высоты подъёма, оказавшись на одной вертикали с точкой старта. Силой сопротивления воздуха пренебречь.

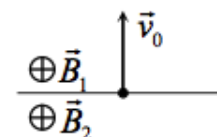
- 1) Через какое время шарик достиг максимальной высоты подъёма?
- 2) Найти возможные величины индукции магнитного поля.

$$\mathbb{N} \ni u \text{ шгг } u \frac{v_0 \sin \alpha}{m\omega} = B(z); \frac{v_0 \sin \alpha}{g} = \eta \quad (1)$$

ЗАДАЧА 16. («Покори Воробьёвы горы!», 2014, 10–11) В области над плоской поверхностью земли, заэкранированной от действия электрических полей, создано горизонтальное магнитное поле с индукцией B . В эту область влетел электрон, двигаясь горизонтально на высоте h , и продолжил своё движение равномерно-прямолинейно. Пролетев таким образом сквозь эту область, он вылетел в соседнюю, где было только поле тяжести. На каком расстоянии по горизонтали от точки вылета электрон врежется в землю? Отношение заряда к массе у электрона и ускорение свободного падения считать известными.

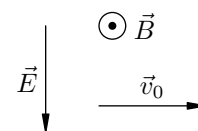
$$\frac{B^2}{4gz} = s$$

ЗАДАЧА 17. («Росатом», 2015, 11) В двух полупространствах созданы однородные магнитные поля с индукциями \vec{B}_1 и \vec{B}_2 ($B_2 = 2B_1$), векторы которых параллельны. Частица с зарядом q и массой m находится на границе раздела полей и имеет скорость \vec{v}_0 , направленную перпендикулярно границе раздела. Найти среднюю скорость смещения частицы вдоль границы раздела полей за большое время.



$$\frac{v_0}{2a} = \frac{(B_2 + B_1)v_0}{(B_2 - B_1)v_0} = \text{доп}$$

ЗАДАЧА 18. (МФТИ, 1992) Заряженная частица движется в однородных взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях. В некоторый момент времени её скорость \vec{v}_0 перпендикулярна векторам \vec{E} и \vec{B} (см. рисунок). Чему будет равно отношение изменения кинетической энергии к начальной кинетической энергии частицы в те моменты, когда вектор её скорости будет перпендикулярен \vec{v}_0 , если известно, что $E/(v_0 B) = \beta \ll 1$?



$$gz = 0 \text{ K/K} \nabla$$

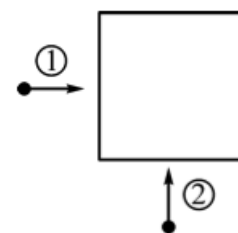
ЗАДАЧА 19. (МФО, 2015, 11) Протон (заряд $+e$, масса m) движется в электромагнитном поле по окружности радиуса R . В каждой точке траектории электрическое поле направлено к центру окружности и равно E . Индукция магнитного поля направлена перпендикулярно плоскости окружности и равна B . При каких условиях на параметры задачи протон движется со скоростью, много меньшей скорости света? Какой может быть кинетическая энергия протона? Решите задачу в общем случае и получите численный ответ в двух частных случаях:

- (а) $R = 1$ м, $E = 1$ кВ/м, $B = 0$;
- (б) $R = 1$ м, $E = 1$ кВ/м, $B = 0,1$ Тл.

Ответ представьте в электронвольтах (1 эВ — энергия, получаемая протоном при прохождении разности потенциалов 1 В). Элементарный заряд составляет $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса протона $m = 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг, скорость света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

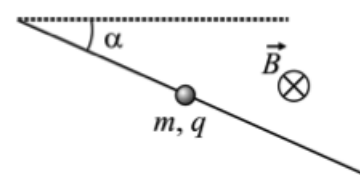
$$eBR \gg mc, eER \gg mc^2; K = \frac{1}{2} eER; K = \frac{1}{2} eER \left(1 + \alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + 2\alpha} \right), \text{ где } \alpha = \frac{eER}{2mB}; (a) K = 0,53 \text{ эВ}; (b) K = 470 \text{ эВ или } K = 500 \text{ эВ};$$

ЗАДАЧА 20. (МФО, 2012, 11) В некоторой области пространства созданы однородное электрическое и магнитное поля. Когда электрон влетает в эту область со скоростью v в направлении, показанном стрелкой 1, он движется в этой области прямолинейно и равномерно. Когда электрон с такой же по модулю скоростью влетает в электромагнитное поле вдоль стрелки 2, перпендикулярной направлению 1, он тоже движется в поле прямолинейно и равномерно. Определите направления векторов напряженности электрического поля E и магнитной индукции B . Найдите отношение модулей E/B .



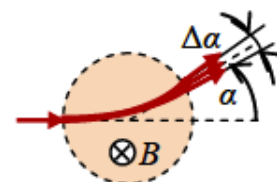
$$E_x = -E_y; E_z = 0; B_x = -B_y; E/B = v/\sqrt{2} \text{ (ось } x \text{ вдоль } 1, \text{ ось } y \text{ вдоль } 2)$$

ЗАДАЧА 21. (МФО, 2011, 11) Бусинка, насаженная на неподвижный стержень, образующий угол α с горизонтом (см. рисунок), имеет массу m и заряд q . Бусинка может скользить вдоль стержня с коэффициентом трения μ и начинает движение из состояния покоя, причём $\mu < \tan \alpha$. Система находится в однородном магнитном поле с индукцией B , линии которой горизонтальны (перпендикулярны плоскости рисунка и направлены за его плоскость). Какую максимальную скорость и какое максимальное ускорение будет иметь бусинка при движении? Стержень не проводит ток. Рассмотреть два случая: $q > 0$ и $q < 0$.



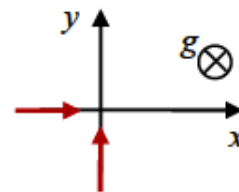
$$\left. \begin{array}{l} \text{при } q > 0 \\ \text{при } q < 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} (v \cos \alpha - \mu \sin \alpha) B \\ v \sin \alpha B \end{array} = \text{хвост} \quad ; \quad \left. \begin{array}{l} \text{при } q > 0 \\ \text{при } q < 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} (v \cos \alpha - \mu \sin \alpha) \frac{q|b|n}{bu} \\ (v \cos \alpha + \mu \sin \alpha) \frac{q|b|n}{bu} \end{array} = \text{хвост}_a$$

ЗАДАЧА 22. («Покори Воробьевы горы!», 2016, 10–11) Узкий пучок ионов с одинаковым зарядом, но с немного различающимися массами направляют в область цилиндрической формы, в которой создано однородное магнитное поле, направленное по оси цилиндра. Скорость ионов перпендикулярна этой оси. После прохождения области пучок отклонился от направления первоначального движения на угол $\alpha = 30^\circ$, и у него появилась расходимость с углом $\Delta\alpha \approx 0,6^\circ$ (начальная расходимость была пренебрежимо мала по сравнению с этой). Найти (в процентах) разброс масс ионов пучка ($\Delta m/m = ?$).



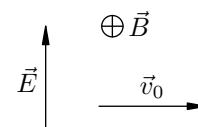
$$\frac{\Delta m}{m} \approx \frac{\alpha}{\sin \alpha} \approx 2,1\%$$

ЗАДАЧА 23. («Покори Воробьёвы горы!», 2016, 10–11) Электростатическая пушка «выстреливает» наночастицы с удельным зарядом $\beta = +5 \cdot 10^{-5}$ Кл/кг со скоростью $v = 3500$ м/с. Выстрелы производились горизонтально в вакуумированном пространстве, в котором было создано магнитное поле, линии индукции которого также горизонтальны. Оказалось, что существуют два взаимно перпендикулярных направления, в которых наночастицы двигаются после выстрела прямолинейно. Связав с этими направлениями систему координат, найдите направление и величину индукции магнитного поля. Ускорение свободного падения принять равным $g = 10$ м/с².



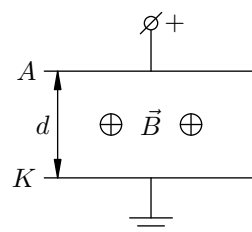
$$\frac{v}{g} \approx \frac{\beta g}{v \beta g} = \beta$$

ЗАДАЧА 24. (МФТИ, 1997) Положительно заряженная частица движется в однородных взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях (см. рисунок). В некоторый момент времени скорость частицы перпендикулярна векторам \vec{E} и \vec{B} и равна v_0 . Чему будет равна скорость этой частицы в те моменты, когда вектор её скорости будет составлять 180° с вектором \vec{v}_0 , при условии, что $E = v_0 B$? Поле тяжести не учитывать.



$$0.08$$

ЗАДАЧА 25. (МФТИ, 1997) Вакуумный плоский диод, в котором расстояние между катодом K и анодом A равно d , находится в однородном магнитном поле, индукция которого равна B и направлена параллельно плоскости электродов (см. рисунок). При каком минимальном напряжении на диоде электроны с поверхности катода смогут достичь анода? Электроны у поверхности катода можно считать неподвижными, а полем тяжести пренебречь.



$$\frac{m \omega}{2 e R^2 B^2} = \Omega$$

ЗАДАЧА 26. Сплошной металлический цилиндр радиусом R вращается вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью ω . Объясните, почему в цилиндре при этом появляется электрическое поле, и найдите разность потенциалов между поверхностью цилиндра и осью вращения. При какой индукции магнитного поля, направленного вдоль оси цилиндра, электрическое поле в цилиндре не возникнет? Отношение заряда электрона к его массе равно γ .

$$\frac{\omega}{\gamma} = \beta, \quad \frac{\omega^2 R^2}{2} = \Omega$$