

Сила Ампера

Если прямолинейный проводник длиной l , по которому протекает ток I , находится в однородном магнитном поле B , то на проводник со стороны поля действует *сила Ампера*

$$F = BIl \sin \alpha,$$

где α — угол между направлениями тока и поля.

ЗАДАЧА 1. Выведите формулу для силы Ампера, пользуясь выражением для силы Лоренца и формулой $I = envS$ (см. формулу (5) из листка «[Постоянный ток](#)»).

ЗАДАЧА 2. Убедитесь, что для силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник с током в однородном магнитном поле, справедлива формула $\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B}l$.

ЗАДАЧА 3. Покажите далее, что для силы Ампера справедлива формула $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}V$, где \vec{j} — плотность тока, V — объём проводника.

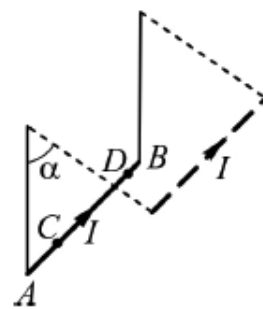
ЗАДАЧА 4. На горизонтальных рельсах, расположенных в вертикальном однородном магнитном поле B , покоится металлическая перемычка перпендикулярно рельсам. Расстояние между рельсами l , масса перемычки m , коэффициент трения между рельсами и перемычкой равен μ . Какой ток нужно пропустить через перемычку, чтобы она сдвинулась с места?

$$\frac{1B}{\mu mg} = I$$

ЗАДАЧА 5. Горизонтальный проводник длиной l и массой m , подвешенный за концы на двух проводах, расположен в вертикальном однородном магнитном поле B . По проводнику течёт постоянный ток I . Найдите угол отклонения проводов от вертикали.

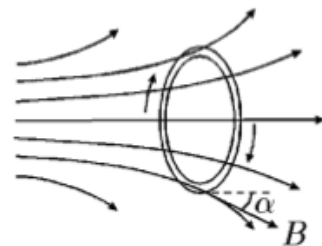
$$\left(\frac{6m}{lI^2}\right) \sin^2 \alpha = \nu$$

ЗАДАЧА 6. (МОШ, 2010, 11) Тяжёлый металлический стержень AB подвешен в горизонтальном положении на двух лёгких вертикальных проводах в лаборатории, где в некотором объёме создано однородное магнитное поле, линии индукции которого вертикальны. Участок CD стержня всё время находится в магнитном поле, а провода-подвески — вне поля. В первом опыте на стержень подали напряжение, и в нём очень быстро возник ток силой I . Максимальный угол, на который подвески стержня отклонились от вертикали, был при этом равен $\alpha = 60^\circ$. Во втором опыте силу тока через стержень плавно увеличивали от нуля до того же значения I . На какой угол β отклонились подвески во втором опыте?



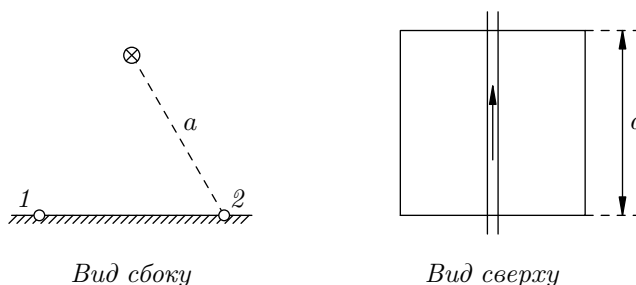
$$\cos \beta = \frac{\alpha}{\nu} = \left(\frac{\nu \cos^2 \alpha}{\nu \cos^2 \alpha - 1}\right) \sin^2 \alpha = \beta$$

ЗАДАЧА 7. (Савченко, 9.1.14) Кольцо радиуса R , по которому циркулирует ток I , поместили в неоднородное аксиально-симметричное поле. Ось кольца совпадает с осью симметрии магнитного поля. Индукция магнитного поля B , действующего на ток, направлена под углом α к оси симметрии поля. Масса кольца m . Определите ускорение кольца.



$$a = \frac{m}{2\pi R I \sin \alpha}$$

ЗАДАЧА 8. (МФТИ, 1999) На непроводящей горизонтальной поверхности стола лежит проводящая жёсткая тонкая квадратная рамка из однородного куска проволоки со стороной, равной a . Рамка находится в магнитном поле длинного горизонтального провода с током, расположенного симметрично над рамкой (см. рисунок). Масса рамки m , индукция магнитного поля у боковых сторон рамки 1 и 2 равна B . Коэффициент трения скольжения рамки о поверхность стола равен μ ($\mu < 1/3$). Какой силы ток нужно пропустить по рамке, чтобы она начала скользить по столу, не отрываясь от него?



$$\frac{B a}{\mu m g} < I$$

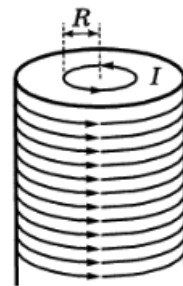
ЗАДАЧА 9. Жёсткое проволочное кольцо радиуса R находится в однородном магнитном поле B , перпендикулярном плоскости кольца. По кольцу течёт постоянный ток I . Найдите силу упругости, возникающую в проволоке. Магнитное взаимодействие различных участков проволоки не учитывать.

$$F = I R B$$

ЗАДАЧА 10. («Покори Воробьёвы горы!», 2017, 10–11) Из медной проволоки с площадью сечения S сделано кольцо радиусом R , по которому течет ток I . Кольцо помещается в однородное магнитное поле так, что его ось совпадает с направлением линий магнитной индукции. Найдите максимальное значение индукции B магнитного поля, при которой кольцо не разорвется, если прочность меди на разрыв равна σ (этот параметр равен отношению силы, которая требуется для разрыва проволоки, к площади её поперечного сечения).

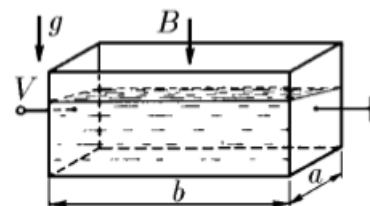
$$B_{\max} = \frac{\sigma R}{I S}$$

ЗАДАЧА 11. (Всеросс., 1995, финал, 10) Внутри длинного соленоида вдали от его торцов магнитное поле однородно и его индукция равна B . Один из торцов соленоида закрывают картонным диском, на котором соосно закрепляют небольшой круговой виток из проволоки так, что центр витка совпадает с осью соленоида (рис.). Найдите силу натяжения проволоки витка, если его радиус равен R , а сила тока протекающего по нему равна I .



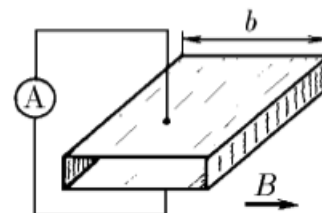
$$I = \frac{1}{2} B I R$$

ЗАДАЧА 12. (Савченко, 9.1.4) В прямоугольную кювету, две противоположные стенки которой металлические, а остальные сделаны из изолятора, налит электролит, плотность которого ρ , удельная проводимость λ . К металлическим стенкам кюветы приложено напряжение V , и вся кювета помещена в однородное вертикальное магнитное поле индукции B . Определите разность уровней жидкости около неметаллических стенок кюветы. Длина кюветы a , ширина b .



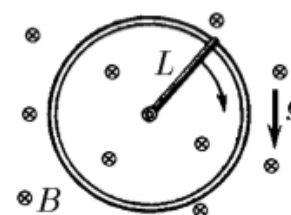
$$\frac{q b \sigma}{\lambda B \rho \nu} = \nu \nabla$$

ЗАДАЧА 13. (Савченко, 11.1.15) В трубе прямоугольного сечения $a \times b$ находится газ плотности ρ . Вертикальные стенки трубы — изоляторы, горизонтальные — электроды. В одном из концов трубы зажигают разряд, после чего ток I поддерживается постоянным. Возникшая область горения разряда магнитными силами вталкивается внутрь трубы, «сгребая» перед собой газ. Определите установившуюся скорость плазменной «пробки», считая, что она всё время больше скорости звука в газе. Магнитное поле индукции B перпендикулярно вертикальным стенкам трубы.



$$\frac{q d}{B I} \wedge = a$$

ЗАДАЧА 14. (Савченко, 11.1.23) В поле тяжести помещено вертикально металлическое кольцо. Металлический стержень длины L и массы m шарнирно закреплён в центре кольца и касается его другим концом. Однородное магнитное поле индукции B перпендикулярно плоскости кольца. По какому закону надо менять ток в стержне, чтобы стержень вращался равномерно с угловой скоростью ω , если в начальный момент стержень находился в верхнем положении? Трением пренебречь.



$$I \omega \sin \frac{\pi}{2} = \frac{1}{2} B m \omega$$

Криволинейный проводник

Задача 15. 1) По криволинейному проводнику, расположенному в магнитном поле \vec{B} , протекает ток I . Объясните формулу

$$\vec{F} = I \int_l d\vec{l} \times \vec{B}.$$

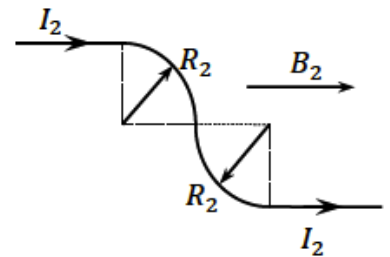
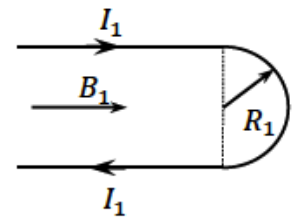
2) Пусть дополнительно известно, что магнитное поле однородно. Покажите, что в этом случае

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B},$$

где вектор \vec{l} соединяет начало и конец проводника.

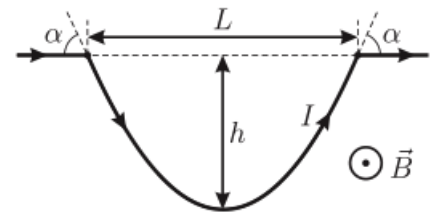
Задача 16. (МОШ, 2016, 11) А) Проводник с током I_1 , состоящий из двух параллельных участков, соединённых проводочной полуокружностью радиусом R_1 , помещён в однородное магнитное поле индукцией B_1 , направленное вдоль параллельных участков провода (верхний рисунок). Определите модуль силы, с которой магнитное поле действует на этот провод с током.

Б) Решите задачу в случае, когда провод состоит из двух параллельных участков, которые соединены двумя проводочными четвертями окружностей радиусом $R_2 = 10$ см, как показано на нижнем рисунке. Ток в проводе $I_2 = 30$ А, вектор индукции однородного магнитного поля $B_2 = 1$ Тл направлен вдоль параллельных участков провода.



$$\boxed{F = 2B_1 I_1 R_1} \quad \text{В) } F = 2B_2 I_2 R_2$$

Задача 17. (МОШ, 2008, 11) Участок гибкого провода массой m подвешен так, что его концы закреплены на одинаковой высоте (см. рисунок). Провод находится в однородном горизонтальном магнитном поле с индукцией B , и по нему течёт ток I . Силы, действующие на провод в точках подвеса, образуют углы α с горизонтом. Найдите силу T натяжения провода в его нижней точке. Размеры L и h известны.



$$\boxed{T = \frac{mg}{2} + IBL \sin \alpha}$$

Магнитный момент

Напомним, что если сила \vec{F} приложена в точке P , то *моментом* силы \vec{F} относительно точки O (называемой *полюсом*) называется вектор $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$, где $\vec{r} = \vec{OP}$ — радиус-вектор точки приложения P относительно полюса O .

ЗАДАЧА 18. Проведём через полюс O ось z перпендикулярно плоскости, проходящей через векторы \vec{r} и \vec{F} . Возьмём на этой оси любую точку T . Покажите, что проекция на ось z момента силы \vec{F} относительно полюса T не зависит от выбора точки T и равна по модулю Fl , где l — расстояние от точки O до линии действия силы \vec{F} (то есть плечо силы \vec{F} относительно оси z).

Примечание. Именно так — как произведение силы на плечо — вы всегда использовали момент силы в задачах статики. Теперь вам лучше понятно «правило моментов» (сумма моментов сил, вращающих систему в одну сторону, равна сумме моментов, вращающих в другую) — речь просто идёт о равенстве нулю проекции суммарного момента сил на ось z .

ЗАДАЧА 19. (*Момент пары*) Пусть в точке P приложена сила \vec{F} , а в точке Q — сила $-\vec{F}$. В таком случае мы говорим о *паре* сил.

Моментом пары сил называется векторная сумма моментов этих сил. Покажите, что момент пары не зависит от выбора полюса и равен $\vec{QP} \times \vec{F}$.

Магнитный момент. Рассмотрим плоский контур с током I , имеющий площадь S . *Магнитным моментом* этого контура называется вектор $\vec{\mu}$, имеющий длину IS и направленный перпендикулярно плоскости контура в то полупространство, из которого ток видится циркулирующим против часовой стрелки.

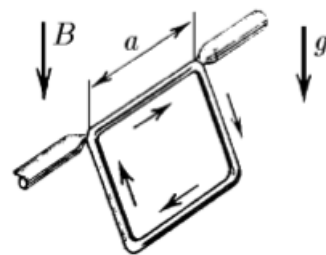
ЗАДАЧА 20. (*Савченко, 9.1.7*) В однородном магнитном поле поместили прямоугольную рамку с током. Индукция магнитного поля B параллельна одной паре сторон рамки. Площадь рамки S , ток в ней I .

а) Докажите, что момент сил, действующий на рамку, равен $\mathcal{M} = \mu B$, где $\mu = IS$ — магнитный момент рамки.

б) Повернём вектор \vec{B} вокруг оси, параллельной другой паре сторон рамки; пусть теперь он образует острый угол с нормалью к рамке. Докажите, что момент сил, действующий на рамку в этом случае, равен $\vec{\mathcal{M}} = \vec{\mu} \times \vec{B}$, где $\vec{\mu}$ — магнитный момент рамки.

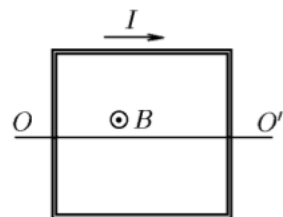
ЗАДАЧА 21. В условиях предыдущей задачи убедитесь, что магнитное поле стремится повернуть рамку так, чтобы совместить направления векторов $\vec{\mu}$ и \vec{B} . Опишите положения равновесия рамки.

ЗАДАЧА 22. (*Савченко, 9.1.6*) Квадратная рамка с током закреплена так, что может свободно вращаться вокруг горизонтально расположенной стороны. Рамка находится в вертикальном однородном магнитном поле индукции B . Угол наклона рамки к горизонту α , её масса m , длина стороны a . Найдите ток в рамке.



$$\oint \vec{v} \cdot \vec{e}_z = I$$

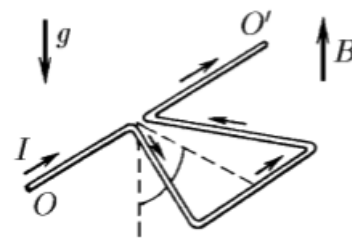
ЗАДАЧА 23. (*Савченко, 9.1.8*) В однородном магнитном поле индукции B находится квадратная рамка с током. Масса рамки m , ток в ней I . Определите частоту свободных колебаний рамки вокруг оси OO' .



$$\frac{m}{IB^2} \omega^2 = \epsilon$$

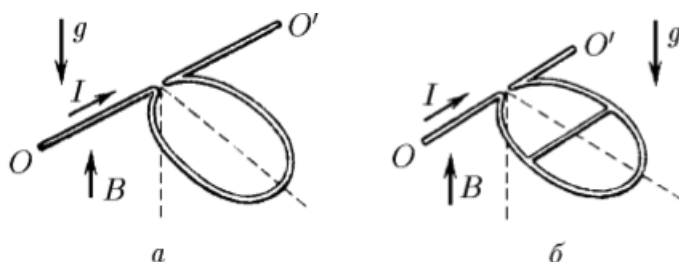
ЗАДАЧА 24. (*Савченко, 9.1.10*) Докажите, что момент сил, действующий на любую плоскую рамку с током в однородном магнитном поле индукции B , равен $\vec{\mathcal{M}} = \vec{\mu} \times \vec{B}$.

ЗАДАЧА 25. (Савченко, 9.1.9) Треугольная проволочная рамка с током может вращаться вокруг горизонтальной оси OO' , проходящей через вершину треугольника. Масса единицы длины проволоки ρ , ток в рамке I . Рамка находится в магнитном поле индукции B , направленном вдоль поля тяжести. Определите угол отклонения плоскости треугольника от вертикали.



$$\frac{\delta d_V}{\delta I} = \nu \delta \varphi$$

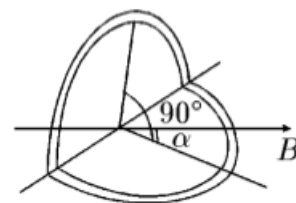
ЗАДАЧА 26. (Савченко, 9.1.11) а) Проволочная рамка в виде окружности с током может вращаться вокруг горизонтальной оси OO' . Масса единицы длины проволоки ρ , ток в рамке I . Рамка находится в магнитном поле индукции B , направленном вдоль поля тяжести. Определите угол отклонения плоскости окружности от вертикали.



б) Проволочная рамка в виде окружности имеет по диаметру проволочную перемычку, параллельную горизонтальной оси OO' , вокруг которой рамка может вращаться. Масса единицы длины рамки и перемычки одинакова и равна ρ . Ток, входящий в рамку, равен I . Рамка находится в магнитном поле индукции B , направленном параллельно полю тяжести. На какой угол от вертикали отклонится рамка?

$$\frac{\delta d_V}{\delta I} \frac{(x+z)(x+1)}{(x+y)x} = \nu \delta \varphi \quad (g; \frac{\delta d_V}{\delta I} = \nu \delta \varphi \quad \nu)$$

ЗАДАЧА 27. (Савченко, 9.1.12) Виток радиуса R согнули по диаметру под прямым углом и поместили в однородное магнитное поле индукции B так, что одна из плоскостей витка оказалась расположенной под углом α , другая — под углом $\frac{\pi}{2} - \alpha$ к направлению индукции B . Ток в витке I . Определите момент сил, действующих на виток.

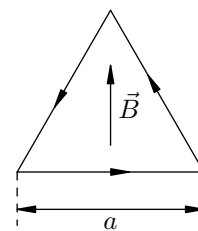


$$(\nu \cos - \nu \sin) \delta I \frac{\pi R^2}{2} = \mathcal{M}$$

ЗАДАЧА 28. (Савченко, 9.1.13) Катушка, по виткам которой течёт ток, вертикально стоит на плоскости. Общий вес катушки P , число витков n , радиус R , ток в витках I . При какой индукции однородного магнитного поля, направленного горизонтально, катушка под действием этого поля опрокинется?

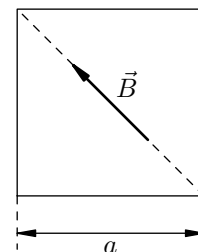
$$B = \frac{PI}{nR}$$

Задача 29. (МФТИ, 1999) На непроводящей горизонтальной поверхности стола лежит проводящая жёсткая тонкая рамка из однородного куска проволоки в виде равностороннего треугольника со стороной, равной a . Рамка находится в однородном горизонтальном магнитном поле, линии индукции которого перпендикулярны одной из сторон рамки (см. рисунок). Масса рамки m , величина индукции B . Какой силы ток нужно пропустить по рамке (против часовой стрелки), чтобы она начала приподниматься относительно одной из вершин треугольника?



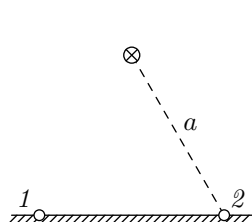
$$\frac{g v \varepsilon}{b \omega \psi} = I$$

Задача 30. (МФТИ, 1999) На непроводящей горизонтальной поверхности стола лежит проводящая жёсткая тонкая квадратная рамка из однородного куска проволоки со стороной, равной a . Рамка находится в однородном горизонтальном магнитном поле, линии индукции которого параллельны одной из диагоналей квадрата рамки (см. рисунок). Масса рамки m , величина индукции B . Какой силы ток нужно пропустить по рамке, чтобы она начала приподниматься относительно одной из вершин квадрата?

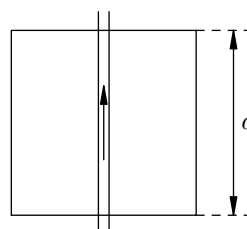


$$\frac{\varepsilon \wedge g v}{b \omega} = I$$

Задача 31. (МФТИ, 1999) На непроводящей горизонтальной поверхности стола лежит проводящая жёсткая тонкая квадратная рамка со стороной, равной a . Рамка находится в магнитном поле длинного горизонтального провода с током, расположенного симметрично над рамкой (см. рисунок). Масса рамки M , индукция магнитного поля у боковых сторон рамки 1 и 2 равна B . Коэффициент трения скольжения рамки о стол таков, что при некоторой величине тока, пропущенного через рамку, она начинает приподниматься (без скольжения) относительно одной из своих сторон. Найти величину этого тока.



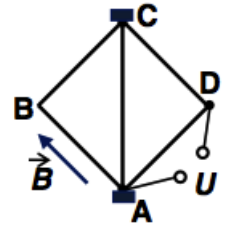
Вид сбоку



Вид сверху

$$\frac{M g}{B \sqrt{3}} \leq I$$

Задача 32. («Покори Воробьёвы горы!», 2018, 10–11) Из медной проволоки изготовлен квадратный контур с перемычкой. Контур подключён к источнику постоянного напряжения $U = 1,5$ В между точками А и D и помещён в магнитное поле с индукцией $B = 8$ мТл, причём силовые линии лежат в плоскости контура и параллельны двум его сторонам. Найдите величину и направление силы, действующей на контур со стороны магнитного поля, а также величину и направление момента сил, поворачивающего контур вокруг оси AC. Удельное сопротивление проволоки $\rho = 0,018$ мкОм · м, площадь сечения проволоки $S = 1,8$ мм², длина стороны квадрата $a = 1$ м.



$$F \cdot \sin \alpha \approx \frac{d}{\rho S L} \frac{z^2 + 9}{1 + z^2} = W; \quad M \approx \frac{d}{\rho S L} \frac{z^2 + 8}{z^2 + 1} = J$$