

## 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  $\alpha$  — 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.

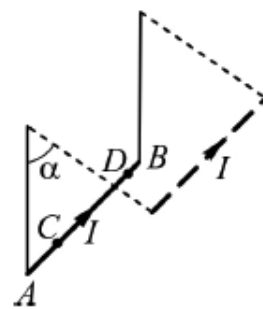
**ЗАДАЧА 4.** На горизонтальных рельсах, расположенных в вертикальном однородном магнитном поле  $B$ , покоится металлическая перемычка перпендикулярно рельсам. Расстояние между рельсами  $l$ , масса перемычки  $m$ , коэффициент трения между рельсами и перемычкой равен  $\mu$ . Какой ток нужно пропустить 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.

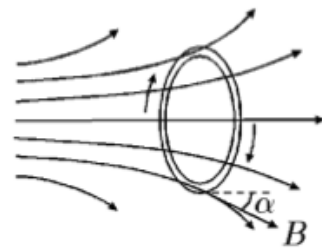
$$\left(\frac{6m}{lI^2}\right) \sin^2 \alpha = \nu$$

**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  $\beta$  отклонились подвески во втором опыте?



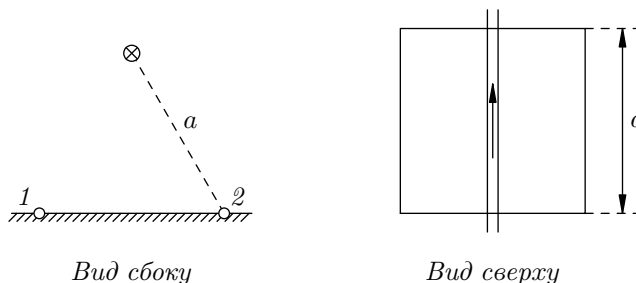
$$\cos \beta = \frac{\alpha}{\nu} = \left(\frac{\nu \cos^2 \alpha}{\nu \cos^2 \alpha - 1}\right) \sin^2 \alpha = \beta$$

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  $\alpha$  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  $\mu$  ( $\mu < \frac{1}{\sqrt{3}}$ ). Какой силы ток нужно пропустить по рамке, чтобы она начала скользить по столу, не отрываясь от него?



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

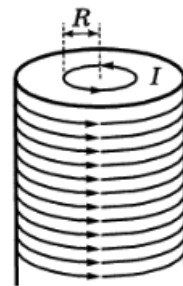
ЗАДАЧА 9. Жёсткое проволочное кольцо радиуса  $R$  находится в однородном магнитном поле  $B$ , перпендикулярном плоскости кольца. По кольцу течёт постоянный ток  $I$ . Найдите силу упругости, возникающую в проволоке. Магнитное взаимодействие различных участков проволоки не учитывать.

$$F = I R B$$

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  $\sigma$  (этот параметр равен отношению силы, которая требуется для разрыва проволоки, к площади её поперечного сечения).

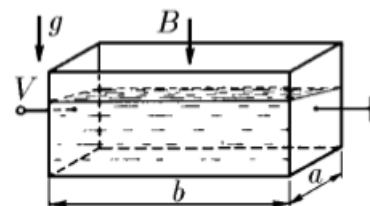
$$B_{\max} = \frac{\sigma R}{I S}$$

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  $I$ .



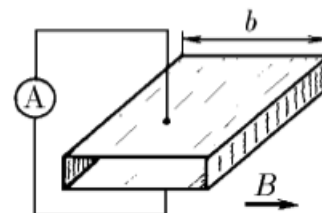
$$I R \frac{dB}{dz} = T$$

ЗАДАЧА 12. (Савченко, 9.1.4) В прямоугольную кювету, две противоположные стенки которой металлические, а остальные сделаны из изолятора, налит электролит, плотность которого  $\rho$ , удельная проводимость  $\lambda$ . 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  $b$ .



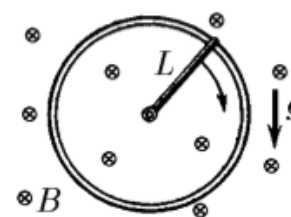
$$\frac{q b \sigma}{\lambda B \rho \nu} = \eta \nabla$$

ЗАДАЧА 13. (Савченко, 11.1.15) В трубе прямоугольного сечения  $a \times b$  находится газ плотности  $\rho$ . 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  $\omega$ , если в начальный момент стержень находился в верхнем положении? Трением пренебречь.



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

## Криволинейный проводник

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

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

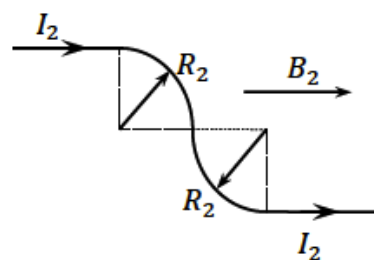
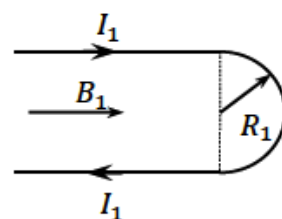
2) Пусть дополнительно известно, что магнитное поле однородно. Покажите, что в этом случае

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

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

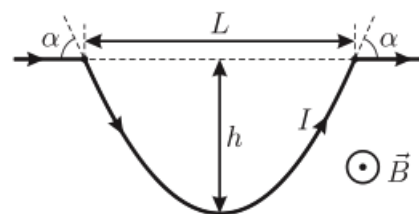
Задача 16. (МОШ, 2016, 11) А) Проводник с током  $I_1$ , состоящий из двух параллельных участков, соединённых проводочной полуокружностью радиусом  $R_1$ , помещён в однородное магнитное поле индукцией  $B_1$ , направленное вдоль параллельных участков провода (верхний рисунок). Определите модуль силы, 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  $\alpha$  с горизонтом. Найдите силу  $T$  натяжения провода в его нижней точке. Размеры  $L$  и  $h$  известны.



$$\boxed{T = \frac{1}{2}(mg + ILB) \cot \alpha}$$

## 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.

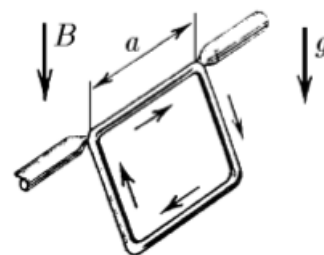
ЗАДАЧА 18. (Савченко, 9.1.7) В однородном магнитном поле поместили прямоугольную рамку с током. Индукция магнитного поля  $B$  параллельна одной паре сторон рамки. Площадь рамки  $S$ , ток в ней  $I$ .

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.

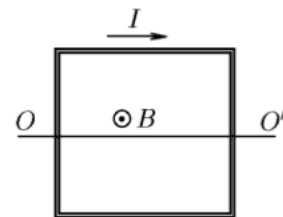
ЗАДАЧА 19. В условиях предыдущей задачи убедитесь, что магнитное поле стремится повернуть рамку так, чтобы совместить направления векторов  $\vec{\mu}$  и  $\vec{B}$ . Опишите положения равновесия рамки.

ЗАДАЧА 20. (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  $\alpha$ , её масса  $m$ , длина стороны  $a$ . Найдите ток в рамке.



$$\nu \text{ эгг} \frac{\nu \text{ эгг}}{\text{буи}} = I$$

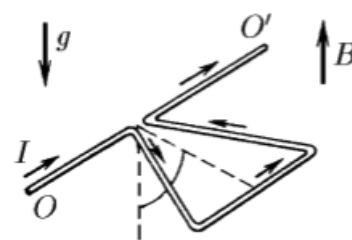
ЗАДАЧА 21. (Савченко, 9.1.8) В однородном магнитном поле индукции  $B$  находится квадратная рамка с током. Масса рамки  $m$ , ток в ней  $I$ . Определите частоту свободных колебаний рамки вокруг оси  $OO'$ .



$$\frac{m}{I B a} \sqrt{\lambda} = \nu$$

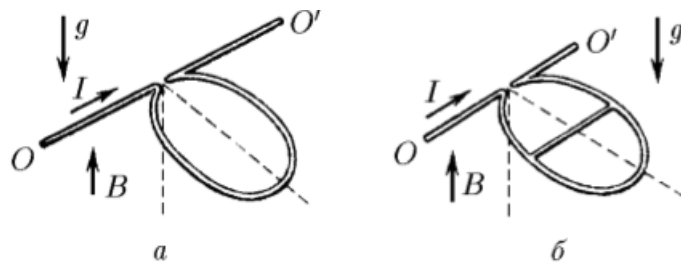
ЗАДАЧА 22. (Савченко, 9.1.10) Докажите, что момент сил, действующий на любую плоскую рамку с током в однородном магнитном поле индукции  $B$ , равен  $\vec{\mathcal{M}} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ .

ЗАДАЧА 23. (Савченко, 9.1.9) Треугольная проволочная рамка с током может вращаться вокруг горизонтальной оси  $OO'$ , проходящей через вершину треугольника. Масса единицы длины проволоки  $\rho$ , ток в рамке  $I$ . Рамка находится в магнитном поле индукции  $B$ , направленном вдоль поля тяжести. Определите угол отклонения плоскости треугольника от вертикали.



$$\frac{\delta d \nu}{\delta I} = \nu \text{ эгг}$$

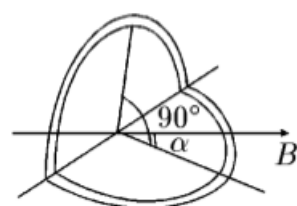
ЗАДАЧА 24. (Савченко, 9.1.11) а) Проволочная рамка в виде окружности с током может вращаться вокруг горизонтальной оси  $OO'$ . Масса единицы длины проволоки  $\rho$ , ток в рамке  $I$ . Рамка находится в магнитном поле индукции  $B$ , направленном вдоль поля тяжести. Определите угол отклонения плоскости 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  $\rho$ . Ток, входящий в рамку, равен  $I$ . Рамка находится в магнитном поле индукции  $B$ , направленном параллельно полю тяжести. На какой угол от вертикали отклонится рамка?

$$\frac{\delta d\tau}{\delta I} \frac{(x+z)(x+1)}{(x+y)^2} = \nu \delta \tau \quad (g : \frac{\delta d\tau}{\delta I} = \nu \delta \tau \quad \nu)$$

ЗАДАЧА 25. (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  $\alpha$ , другая — под углом  $\frac{\pi}{2} - \alpha$  к направлению индукции  $B$ . Ток в витке  $I$ . Определите момент сил, действующих на виток.

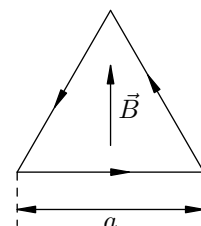


$$\mathcal{M} = \nu \cos \alpha - \nu \sin \alpha \quad \nu = \frac{2}{R} I B \sin \alpha$$

ЗАДАЧА 26. (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?

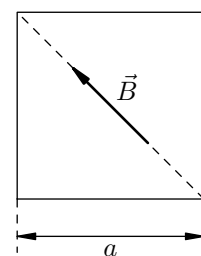
$$B = \frac{I n \nu}{P}$$

ЗАДАЧА 27. (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?



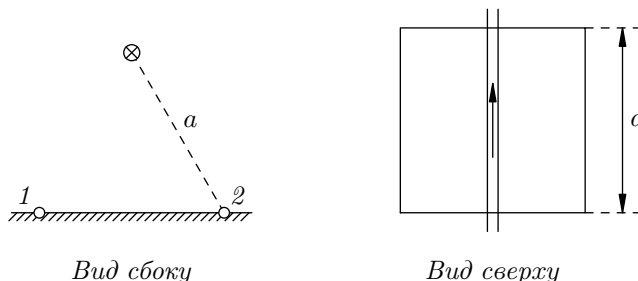
$$I = \frac{g \nu \varepsilon}{B m \nu}$$

ЗАДАЧА 28. (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?



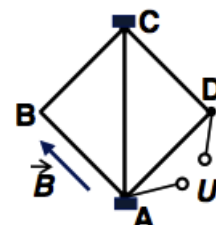
$$I = \frac{g \wedge g \nu}{B m \nu}$$

Задача 29. (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.



$$\frac{\varepsilon \wedge B^0}{Mg} \leq I$$

Задача 30. («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  $S = 1,8$  мм<sup>2</sup>, длина стороны квадрата  $a = 1$  м.



$$I = \frac{4+2\sqrt{2}}{2} \frac{d}{BSU} \frac{\varepsilon \wedge + \varepsilon}{2} \approx 1,9 \text{ Н}; M = \frac{d}{BSU} \frac{\varepsilon \wedge + 9}{1+2\sqrt{2}} \approx 0,33 \text{ Н} \cdot \text{м}$$