

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**имени М. В. Ломоносова**

---

**Физический факультет**

**кафедра общей физики и физики конденсированного состояния**

**Методическая разработка**

**по общему физическому практикуму**

## **МАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

**(теоретическое введение к задачам №53, №57, №58, №59 из раздела  
«Электричество и магнетизм»)**

**Доцент Пустовалов Г.Е.**

**Москва - 2012**

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

## Магнитные взаимодействия. Понятие о магнитном поле

К магнитным относят следующие виды взаимодействий: 1) постоянных магнитов между собой, 2) проводников, по которым течет электрический ток, с постоянными магнитами и 3) проводников, по которым течет ток, друг с другом. Согласно гипотезе Ампера, магнитные свойства вещества и, в частности, свойства постоянных магнитов объясняются наличием в веществе микроскопических (молекулярных) замкнутых токов. Таким образом, эта гипотеза сводит все магнитные взаимодействия к взаимодействию между собой электрических токов.

Подобно тому, как электрические взаимодействия описываются при помощи электрического поля, для описания магнитных взаимодействий используется представление о магнитном поле, которое создает вокруг себя электрический ток, текущий по проводнику. На проводник с током, помещенный в какую-либо область, занятую магнитным полем, действует магнитное поле, существующее в этой области. Таким образом, задача об изучении взаимодействий проводников, по которым текут токи, распадается на две части: 1) нахождение магнитного поля, создаваемого током, и 2) определение сил, действующих со стороны магнитного поля на помещенный в это поле проводник. Здесь мы ограничимся лишь второй частью этой задачи, считая, что магнитное поле в интересующей нас области пространства известно.

## Вектор магнитной индукции

Чтобы ввести величину, характеризующую магнитное поле в некоторой области пространства, следует обратиться к основному свойству магнитного поля - его действию на проводники, по которым идет ток. Так как

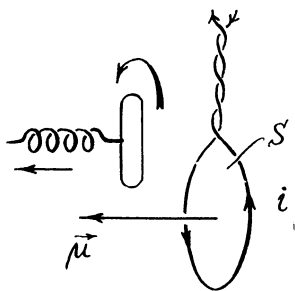


Рис. 1

постоянный ток может идти только по замкнутому контуру, то в качестве пробного проводника удобно взять контур, размеры которого малы по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно изменяется. Такой пробный контур может иметь вид плоской рамки или петли (рис. 1). Проводники, подводящие к нему ток, должны быть расположены тесно друг к другу или сплетены. В этом случае компенсируются как силы, действующие на подводящие проводники со стороны исследуемого поля, так и магнитное поле, создаваемое ими.

Как показывает опыт, на контур с током, помещенный в магнитное поле, действует момент сил  $\vec{M}$ . Величина  $M$  этого момента сил зависит от ориентации контура в магнитном поле. При данной ориентации она пропорциональна площади  $S$ , ограниченной контуром, и силе  $i$  тока в нем, но не зависит от формы контура. Учитывая это, для характеристики

магнитных свойств контура с током вводится величина, называемая *магнитным моментом*. Магнитный момент  $\vec{\mu}$  контура представляет собой вектор, величина которого

$$\mu = iS, \quad (1)$$

а направление определяется правилом буравчика: магнитный момент перпендикулярен плоскости контура и имеет направление перемещения винта буравчика, если ручка буравчика вращается в плоскости контура в ту сторону, куда идет ток (рис. 1).

Рассматривая поведение подобного контура в магнитном поле, можно установить определение основной величины, характеризующей магнитное поле, - *вектора магнитной индукции*  $\vec{B}$  следующим образом.

Из опыта следует существование такой ориентации контура, при которой величина  $M$  момента сил, действующих на него со стороны магнитного поля, равна нулю и контур находится в состоянии устойчивого равновесия. Направление вектора  $\vec{\mu}$  магнитного момента контура при этой ориентации принимается за направление вектора магнитной индукции в данной области пространства.

С другой стороны, если контур повернуть так, чтобы магнитный момент  $\vec{\mu}$  контура составил угол  $\frac{\pi}{2}$  с его направлением в положении равновесия, то величина момента сил, действующих на контур со стороны магнитного поля, оказывается максимальной. Независящее от свойств контура отношение максимальной величины  $M_{\text{макс}}$  момента сил к величине  $\mu$  магнитного момента контура принимается за величину  $B$  вектора магнитной индукции в данной области пространства, т.е.

$$B = \frac{M_{\text{макс}}}{\mu}. \quad (2)$$

Употребляемые на практике для исследования распределения вектора магнитной индукции в пространстве приборы (магнитометры) обычно основаны на методах, более чувствительных по сравнению с действием магнитного поля на контур с током. В этих приборах используются действие магнитного поля на постоянные магниты, явление электромагнитной индукции, ядерный магнитный резонанс и целый ряд других методов.

Для наглядности магнитное поле изображают при помощи *линий магнитной индукции*, проводя их так, чтобы направление касательной к линии в каждой точке совпадало бы с направлением вектора магнитной индукции. В отличие от линий напряженности электрического поля, которые начинаются и заканчиваются на зарядах, линии магнитной индукции замкнуты (или уходят в бесконечность). Обычно линии магнитной индукции проводят так, что их густота (число линий, проходящих через единичную площадку, перпендикулярную вектору магнитной индукции) пропорциональна величине вектора магнитной индукции в данной области поля. В частности, однородное магнитное поле, для которого  $\vec{B} = \text{const}$  во всех

точках рассматриваемой области, изображается равноотстоящими параллельными линиями индукции.

### Закон Ампера

Для установления действия магнитного поля на проводник с током, имеющий произвольную форму, его следует разбить на участки (элементы тока) настолько малые, что магнитное поле, в котором находится участок, можно считать однородным, а сам участок прямолинейным отрезком.

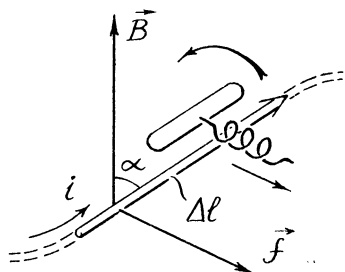


Рис. 2

Анализ опытных данных приводит к следующему закону, описывающему действие магнитного поля на прямолинейный участок проводника длины  $\Delta l$ , по которому течет ток силы  $i$  (рис. 2). Если этот участок находится в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ , то на него

действует сила  $\vec{f}$ , величина которой

$$f = i\Delta l B \sin \alpha, \quad (3)$$

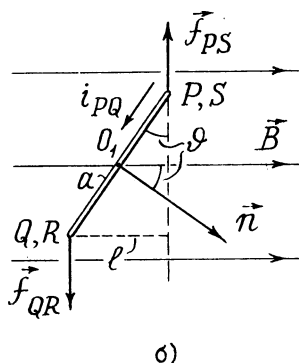
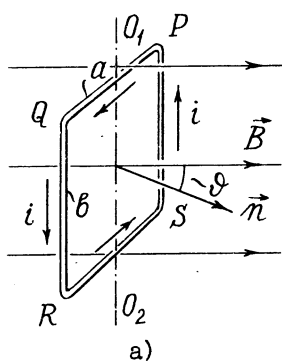
где  $\alpha$  - угол между направлениями вектора  $\vec{B}$  и отрезка  $\vec{\Delta l}$  (этот отрезок мы примем за вектор, направленный в сторону, куда течет по нему ток). Направление этой силы связано с направлением векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{\Delta l}$  правилом буравчика: если вращать ручку буравчика в плоскости, проходящей через направления  $\vec{B}$  и  $\vec{\Delta l}$ , по кратчайшему направлению от  $\vec{\Delta l}$  к  $\vec{B}$ , то направление перемещения буравчика совпадает с направлением силы  $\vec{f}$ . Формула для одновременного нахождения как величины силы  $\vec{f}$ , так и её направления может быть записана с учетом правил действий с векторами при помощи векторного произведения

$$\vec{f} = i [\vec{\Delta l}, \vec{B}]. \quad (4)$$

Эту формулу мы будем называть *законом Ампера*.

### Действие магнитного поля на рамку с током

Рассмотрим проводящий контур в виде прямоугольной рамки  $PQRS$  (рис. 3,а). Рамка помещена в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  и может вращаться



вокруг оси  $O_1O_2$ , проходящей через середины сторон  $PQ$  и  $RS$ , и направленной перпендикулярно линиям магнитной

Рис. 3

индукции. По рамке идет ток силы  $i$ . Пусть длина сторон  $PQ$  и  $RS$  равна  $a$ , а сторон  $QR$  и  $SP$  равна  $b$ . Найдем силы, действующие на стороны рамки, если нормаль  $\vec{n}$  к её плоскости образует угол  $\vartheta$  с направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

Обратимся к рис. 3,б, на котором изображена проекция рамки на плоскость, перпендикулярную оси  $O_1O_2$ . На этом рисунке ось изображается точкой  $O_1$ , стороны  $PQ$  и  $RS$  совпадают, стороны  $QR$  и  $SP$  видны в виде точек  $P,S$  и  $Q,R$ , а вектор магнитной индукции параллелен плоскости рисунка. Применяя правило буравчика, легко найти, что силы, действующие на стороны  $PQ$  и  $RS$ , направлены вдоль оси  $O_1O_2$  (перпендикулярны плоскости рисунка) противоположно друг другу. Действие этих сил уравнивается и может привести лишь к деформации рамки. Предполагая, что рамка достаточно жесткая и ее деформация незначительна, в дальнейшем мы эти силы не будем принимать во внимание.

Стороны рамки  $QR$  и  $SP$  перпендикулярны вектору  $\vec{B}$  (плоскости рисунка на рис. 3,б). Поэтому при вычислении величин  $f_{QR}$  и  $f_{SP}$  сил, действующих на эти стороны, в формуле (3) следует взять значения  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  и  $\sin \alpha = 1$ . Учитывая, что  $\Delta l = QR = SP = b$ , получим

$$f_{QR} = f_{SP} = iBb. \quad (5)$$

Направления сил  $\vec{f}_{QR}$  и  $\vec{f}_{PS}$ , найденные при помощи правила буравчика с учётом того, что по сторонам  $QR$  и  $SP$  токи текут в противоположных по отношению к плоскости рисунка направлениях, показаны на рис. 3,б. Если угол  $\vartheta$  отличен от нуля, то эти силы действуют вдоль параллельных прямых в противоположные стороны и образуют пару сил. Как известно, пара сил создает момент сил, вызывающий вращение рамки (если, конечно, он не уравнивается какими-либо другими моментами сил). Величина  $M$  этого момента сил равна  $fl$ , где  $f$  - величина одной из сил пары, а  $l$  - расстояние между линиями, вдоль которых действуют эти силы. Из рис. 3,б видно, что  $l = a \sin \vartheta$ . Таким образом, со стороны магнитного поля на рамку действует момент сил, величина которого

$$M = f_{QR}l = iBab \sin \vartheta = iBS \sin \vartheta = \mu B \sin \vartheta. \quad (6)$$

Здесь  $S = ab$  - площадь, ограниченная рамкой, а  $\mu = iS$  величина магнитного момента рамки.

Согласно (6) величина  $M$  момента сил зависит от угла  $\vartheta$  между направлением нормали  $\vec{n}$  к плоскости рамки и направлением вектора  $\vec{B}$  магнитной индукции. В частности, при  $\vartheta = 0$  величина  $M$  равна нулю, а при  $\vartheta = \frac{\pi}{2}$  она принимает максимальное значение

$$M_{\text{макс}} = iBS. \quad (7)$$

## Поток магнитной индукции

Потоком магнитной индукции через элементарную площадку называется

$$d\Phi = B dS \cos \alpha = B_n dS. \quad (8)$$

Здесь  $B$  - величина магнитной индукции в области, где находится площадка,  $dS$  - её площадь,  $\alpha$  - угол между направлениями вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к площадке,  $B_n = B \cos \alpha$  - проекция вектора магнитной индукции на направление нормали (рис. 4). Площадка предполагается практически плоской и настолько малой, что вектор магнитной индукции во всех её точках можно считать одинаковым по величине и направлению.

Поток магнитной индукции через произвольную поверхность представляет собой сумму потоков через элементарные площадки, на которые разбита эта поверхность, и выражается в виде интеграла по этой поверхности:

$$\Phi = S \int B_n dS. \quad (9)$$

Знак потока зависит от выбора направлений нормалей к элементарным площадкам. Этот выбор, в частности, может осуществляться следующим способом. Выбирается положительное направление обхода по контуру,

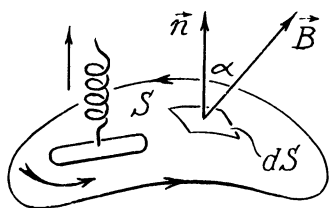


Рис. 4

Выбирается положительное направление обхода по контуру, ограничивающему поверхность  $S$  (на рис. 4 это направление показано стрелкой на контуре). Для выбора направления нормали используется правило буравчика: нормаль направляют в сторону перемещения буравчика, если его ручка вращается в направлении положительного обхода контура.

## Электромагнитная индукция

Явление электромагнитной индукции состоит в том, что при изменении магнитного потока  $\Phi$  через поверхность  $S$ , ограниченную замкнутым проводящим контуром, в этом контуре возникает *электродвижущая сила* (ЭДС). Согласно закону электромагнитной индукции, установленному Фарадеем, ЭДС индукции  $\mathcal{E}$  равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока, т.е.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (10)$$

Здесь предполагается, что при вычислении магнитного потока  $\Phi$  руководствуются приведенными выше правилами выбора нормалей к элементарным площадкам поверхности  $S$ , причем знак минус показывает, что положительному изменению потока соответствует направление ЭДС против взятого в качестве положительного направления обхода контура. Направление ЭДС, получающееся таким образом, находится в соответствии с

*правилом Ленца*, согласно которому ток, вызванный в контуре ЭДС индукции, имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует причине, вызвавшей изменение магнитного потока.