



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО МАГНЕТИЗМУ Э9, Э11

Авторы

Беликова Т.С.,
Егорова С.И.,
Жданова Т.П.,
Лемешко Г.Ф.,
Осипенко И.А.,
Попова И.Г.,
Пруцакова Н.В.,
Шкиль Т.В.

Ростов-на-Дону, 2022

Аннотация

Практикум содержит краткую теорию по теме «Магнитное поле», описание рабочих установок и методику экспериментального исследования.

Практикум предназначен для студентов инженерных специальностей всех форм обучения, в программу учебного курса которых входит выполнение лабораторных работ по физике (раздел «Электричество и магнетизм»).

Авторы

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Белкова Т.С.,

д.т.н. , профессор кафедры «Физика»

Егорова С.И.,

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Жданова Т.П.,

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Лемешко Г.Ф.,

доцент кафедры «Физика»

Осипенко И.А.,

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Попова И.Г.,

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Пруцакова Н.В.,

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Шкиль Т.В.

Оглавление

1. Краткая теория.....	4
2. Лабораторная работа № Э9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ	9
3. Лабораторная работа № Э11 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ АМПЕРА.....	14
4. Список литературы.....	19

Краткая теория

Магнитное поле – это форма материи, окружающей движущиеся электрические заряды и намагниченные тела. Силовую характеристику магнитного поля называют индукцией магнитного поля \vec{B} .

Графически магнитное поле принято изображать с помощью линий магнитной индукции. *Линии магнитной индукции (силовые линии магнитного поля)* – воображаемые линии, в каждой точке которой вектор магнитной индукции \vec{B} направлен по касательной (рис. 1).

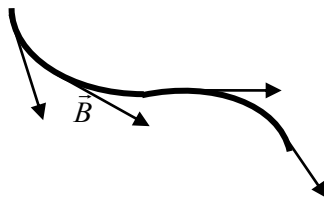


Рис. 1.

Линии индукции магнитного поля всегда замкнуты, т. е. не имеют ни начала, ни конца и всегда охватывают проводники с током. Замкнутость линий индукции свидетельствует об отсутствии в природе магнитных зарядов. Поле, силовые линии которого всегда замкнуты, называется *вихревым*. Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля: магнитное поле не имеет микроскопических источников. Магнитных зарядов, подобных электрическим, в природе не существует.

Магнитное поле называется *однородным*, если вектор индукции \vec{B} во всех точках поля одинаков по модулю и направлению.

Для магнитного поля справедлив *принцип суперпозиции*: вектор индукции \vec{B} магнитного поля, порождаемого несколькими движущимися зарядами (или токами), равен векторной сумме векторов индукции \vec{B}_i полей, порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i .$$

Закон Био-Савара-Лапласа позволяет определить вектор индукции магнитного поля $d\vec{B}$, создаваемого элементарным проводником $d\vec{l}$ с током I в некоторой произвольной точке:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3} ,$$

где $d\vec{l}$ – вектор, численно равный длине $d\ell$ элемента проводника и совпадающий по направлению с током I ; \vec{r} – радиус-вектор, проведенный из элемента проводника $d\ell$ в рассматриваемую точку поля.

Если учесть, что $[d\vec{l}, \vec{r}] = d\ell \cdot r \cdot \sin \alpha$, то модуль вектора $d\vec{B}$, т.е. его

числовое значение, будет равен:

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}.$$

Сила, с которой магнитное поле действует на элемент проводника $d\vec{\ell}$ с током I , находящегося в магнитном поле, определяется законом Ампера.

Закон Ампера в векторной форме: сила $d\vec{F}_A$, с которой магнитное поле действует на элемент проводника $d\vec{\ell}$ с током I , находящегося в магнитном поле, прямо пропорциональна силе тока I и векторному произведению элемента $d\vec{\ell}$ на магнитную индукцию \vec{B}

$$d\vec{F}_A = I[d\vec{\ell}, \vec{B}].$$

Направление силы Ампера можно определить по *правилу левой руки*: если ладонь левой руки расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в неё, а четыре вытянутых пальца направить по току, то отогнутый большой палец укажет направление силы.

Для прямолинейного проводника длиной ℓ с постоянным током I , помещённого в однородное магнитное поле индукции B , сила Ампера выражается формулой:

$$F_A = BI\ell \sin \alpha,$$

где α – угол между направлением тока и вектором \vec{B} .

Индукция магнитного поля – физическая векторная величина, численно равная силе, действующей в однородном магнитном поле на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно линиям индукции :

$$B = \frac{F_A}{I \cdot \ell}.$$

Единицей индукции магнитного поля является тесла:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

1 Тл – магнитная индукция такого однородного поля, в котором на проводник длиной 1 м с током 1 А , помещённый перпендикулярно магнитным силовым линиям, действует сила 1 Н .

Большой интерес представляет действие магнитного поля на замкнутые проводники с током, поскольку данное явление лежит в основе действия всех современных электрических двигателей и электроизмерительных приборов

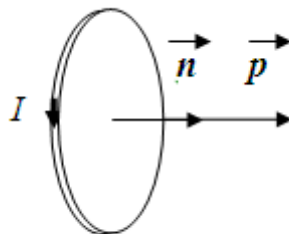


Рис. 2.

магнитоэлектрической и электродинамической систем.

Положение контура с током в магнитном поле задается с помощью единичного вектора нормали \vec{n} к плоскости рамки. За положительное направление нормали к рамке принимается направление, связанное с током в рамке правилом правого винта: при вращении головки винта по направлению тока в рамке, поступательное движение винта указывает направление нормали к ней (рис. 2).

Магнитный момент контура с током – это векторная физическая величина, численно равная произведению силы тока на площадь контура:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, [p_m] = 1A \cdot \text{м}^2.$$

Пусть контур с током в виде прямоугольной рамки помещен в однородное магнитное поле, индукция которого \vec{B} , причем вектор \vec{B} лежит в плоскости рамки (рис.3).

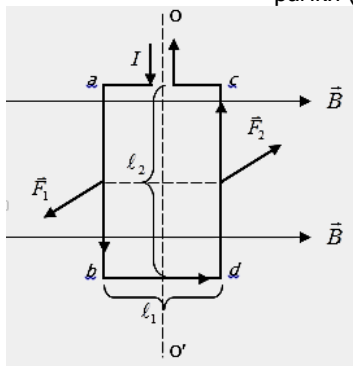


Рис.3.

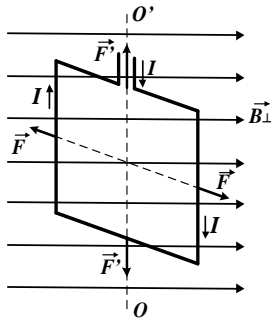


Рис. 4.

Рамка может вращаться вокруг оси OO' , перпендикулярной \vec{B} .

На стороны ab и cd будут действовать силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , создающие вращающий момент сил относительно закрепленной оси вращения OO' :

$$M = M_1 + M_2 = F_1 \frac{\ell_1}{2} + F_2 \frac{\ell_1}{2}$$

Согласно закону Ампера:

$$F_1 = F_2 = I \cdot B \cdot \ell_2.$$

Тогда

$$M = IB\ell_1\ell_2 = IBS = p_m B.$$

Следовательно, на любой плоский контур с током, помещенный в однородное магнитное поле, действует вращающий момент \vec{M} , стремящийся повернуть контур так, чтобы направление магнитного момента контура \vec{p}_m совпало с направлением магнитной индукции \vec{B} внешнего магнитного поля. В векторном виде

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}].$$

Таким образом, **индукция магнитного поля** – физическая векторная величина, численно равная максимальному вращающему моменту, действующему на рамку с магнитным моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению силовых линий магнитного поля.

Если вектор магнитной индукции \vec{B} перпендикулярен плоскости контура (рис.4), то контур не вращается, а испытывает растяжение. При изменении направления тока – сжатие.

Если поле неоднородно, под действием силы незакрепленный контур с током втягивается в область более сильного магнитного поля.

Земля представляет собой естественный магнит. Северный магнитный полюс Земли (N) находится вблизи южного географического полюса (s), а южный магнитный (S) – у северного географического (n).

В пространстве, окружающем Землю, существует магнитное поле, силовые линии которого изображены на рис. 5. Силовые линии магнитного поля выходят из северного магнитного полюса и заканчиваются на южном магнитном полюсе.

Если на нити свободно подвесить магнитную стрелку так, чтобы точка подвеса совпала с центром тяжести стрелки, то стрелка установится по касательной к силовой линии магнитного поля Земли, т. е. вдоль вектора индукции магнитного поля Земли \vec{B}_3 . В любой точке земной поверхности вектор \vec{B}_3 составляет с поверхностью планеты некоторый угол, называемый углом наклона. Этот угол изменяется от нуля на магнитном экваторе до 90° на магнитном полюсе. В северном полушарии вектор \vec{B}_3 будет наклонён к земле, а в южном – от земли.

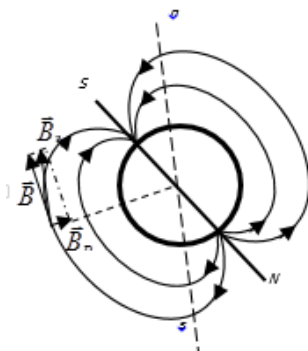


Рис. 5.

Вектор индукции магнитного поля Земли \vec{B}_3 можно разложить на две составляющие: горизонтальную \vec{B} и вертикальную \vec{B}_B . Если магнитная стрелка может свободно вращаться только в горизонтальной плоскости, то она будет всегда устанавливаться под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в плоскости магнитного меридиана.

Естественное магнитное поле Земли в средних широтах европейской части России имеет значение полного вектора приблизительно $B_{ест} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.

Лабораторная работа № 39 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цель работы: определение индукции магнитного поля Земли.

Оборудование: катушки Гельмгольца, источник тока, реостат, тесламетр цифровой, датчик Холла, цифровой мультиметр, инclinатор - прибор, служащий для измерения величины наклона силы земного магнетизма.

Описание установки

Экспериментальная установка представлена на рис. 6.

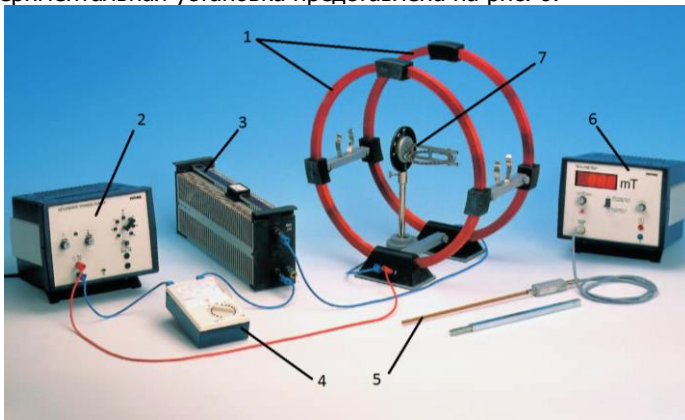


Рис.6.

Катушки Гельмгольца (1) соединены последовательно и подключены к генератору постоянного тока (2) через реостат (3). Мультиметр (4) используется в качестве амперметра. Датчик Холла (5) подсоединен к тесламетру (6). (7)- инclinатор.

Задание 1. Определение индукции магнитного поля в катушках Гельмгольца и определение коэффициента пропорциональности системы.

1. Зафиксировать датчик Холла на штативном стержне так, чтобы цилиндрическая основа была направлена внутрь оси катушки в центре катушек Гельмгольца.

2. Отрегулировать нулевую точку тесламетра с помощью ручки a (рис.6).

3. Включить источник постоянного тока.

4. С помощью реостата изменять силу тока от нуля до I_{\max} (примерно 0,5 А) через 0,05 А, измеряя для каждого значения тока индукцию поля, создаваемого катушками Гельмгольца, $B_{\text{кат}}$. Результаты занести в табл.1.

Таблица 1

I, A										
$B_{кат.}, мТл$										

5. Построить график зависимости $B_{кат}(I)$.
6. Определить по графику коэффициент пропорциональности $k = tg\alpha = B_{кат} / I (мТл / A)$, где α – угол наклона графика $B_{кат}(I)$.
7. Убрать датчик Холла из катушек Гельмгольца.
8. Отключить источник постоянного тока.

Примечание: Коэффициент k можно получить, исходя из закона Био-Савара-Лапласа. Индукция магнитного поля внутри катушек равна

$$B_{кат} = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 N}{R} I = k \cdot I,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная; N – число витков в катушке; I – сила тока в катушке, R – радиус катушки Гельмгольца.

Для данной установки $N = 154$, $R = 0,2 \text{ м}$,
 $k = 0,692 \cdot 10^{-3} \text{ Тл/А} = 0,692 \cdot 10^{-3} \text{ мТл/мА}$.

Задание 2. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

1. Расположить инклинатор между катушками так, чтобы центр круга совпадал с центром пары катушек. При этом повернуть его так, чтобы стрелка показывала 0° (без тока). Чтобы убедиться в верном положении стрелки (север-юг) несколько раз надо осторожно повернуть стрелку. Возникшую силу трения можно уменьшить, слегка постучав по прибору.
2. Включить источник постоянного тока.
3. Измерить зависимость угла отклонения β (рис.7) магнитной стрелки от своего начального положения от малых токов катушки. Можно использовать токи задания 1. Ток менять с помощью реостата.
4. Отключить генератор постоянного тока.

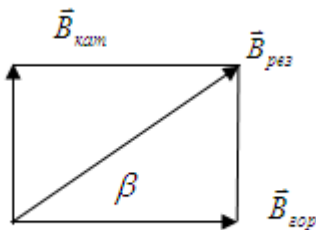


Рис. 7

5. Результаты занести в табл.2.

Таблица 2

NN	I, mA	$\beta,$ <i>град</i>	$tg\beta$	$B_{кат},$ <i>мТл</i>	$B_{гор},$ <i>мТл</i>	$\Delta B_{гор},$ <i>мТл</i>	$\delta B_{гор},$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
...							
n							
Средние значения							

6. Индукцию магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца, находим для каждого значения силы тока с использованием калибровочного коэффициента по формуле

$$B_{кат} = k \cdot I.$$

7. Из рис.7 видно, что горизонтальная составляющая магнитного поля равна

$$B_{гор} = \frac{B_{кат}}{tg\beta} = \frac{k \cdot I}{tg\beta}.$$

Найти $B_{гор}$ для каждого значения силы тока.

8. Рассчитать среднее значение:

Физика

$$\langle B_{\text{зор}} \rangle = \frac{\sum B_{i\text{зор}}}{n}.$$

9. Рассчитать абсолютные погрешности измерений:

$$\Delta B_{i\text{зор}} = \left| \langle B_{\text{зор}} \rangle - B_{i\text{зор}} \right|.$$

10. Вычислить среднюю абсолютную погрешность:

$$\langle \Delta B_{\text{зор}} \rangle = \frac{\sum \Delta B_{i\text{зор}}}{n}.$$

11. Вычислить относительную погрешность:

$$\delta B_{\text{зор}} = \frac{\langle \Delta B_{\text{зор}} \rangle}{\langle B_{\text{зор}} \rangle}.$$

12. Записать окончательный результат в виде:

$$B_{\text{зор}} = \langle B_{\text{зор}} \rangle \pm \langle \Delta B_{\text{зор}} \rangle.$$

Задание 3. Определение вертикальной составляющей магнитного поля Земли.

1. При катушках без тока повернуть градуированный круг инклинометра в вертикальную плоскость.
2. Определить угол φ между направлением стрелки и горизонталью.
3. Найти вертикальную составляющую магнитного поля $B_{\text{верт}}$ (рис.8):

$$B_{\text{верт}} = \langle B_{\text{зор}} \rangle \cdot \text{tg} \varphi$$

Задание 4. Определение индукции магнитного поля Земли.

1. Рассчитать индукцию магнитного поля Земли по формуле

$$B_{\text{полн}} = \sqrt{B_{\text{зор}}^2 + B_{\text{верт}}^2} \quad (\text{рис.8}).$$

2. Сравнить $B_{\text{полн}}$ с естественным полем Земли

$$(B_{\text{ест}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}).$$

3. Рассчитать относительную погрешность измерений по формуле:

$$\delta = \frac{|B_{\text{полн}} - B_{\text{ест}}|}{B_{\text{полн}}}.$$

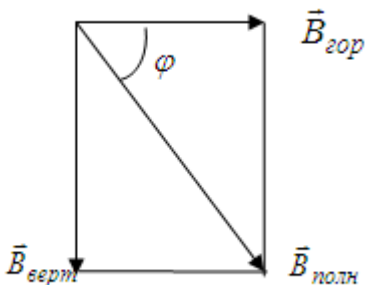


Рис. 8

Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией магнитного поля? В каких единицах она измеряется?
2. На какие объекты действует магнитное поле?
3. Что называется линией магнитной индукции? Как определяется направление магнитных силовых линий?
4. Как формулируется принцип суперпозиции магнитных полей?
5. Какое магнитное поле называется однородным? Изобразить его графически.
6. Что такое 1 Тл?
7. Сформулируйте закон Ампера.
8. Сформулируйте правило левой руки для определения силы Ампера.
9. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа.
10. Написать формулу вращательного момента контура.
11. Дать определение магнитного момента контура. Как он направлен?

Лабораторная работа № Э11 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ АМПЕРА

Цель работы: экспериментальное исследование силы Ампера и определение индукции магнитного поля.

Оборудование: электромагнит; набор проводящих рамок; металлическая лента со штепсельными вилками; соединительные проводники; источник питания универсальный; выпрямитель; весы; универсальный штатив.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка представлена на рис. 9.

От источника питания 1 постоянный ток I через металлическую ленту 2 и соединительные провода 3 пропускается через проводящую рамку 4; величина тока I измеряется амперметром 5; цепь тока замыкается ключом 6.

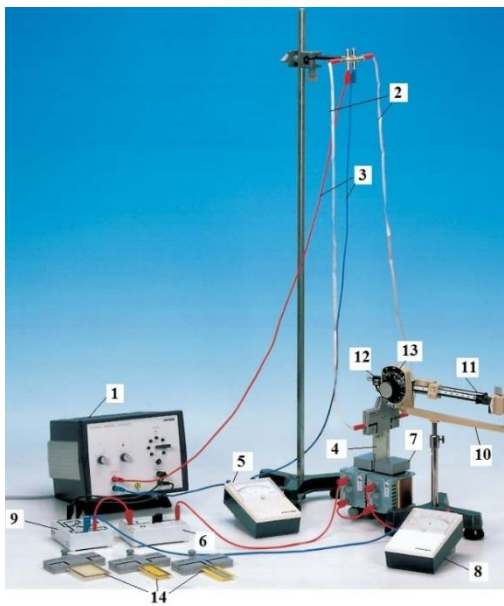


Рис. 9

Однородное магнитное поле возникает между полюсами электромагнита 7 при пропускании через его обмотку постоянного тока I_0 , который измеряется амперметром 8. Выпрямление переменного тока универсального источника питания осуществляется с помощью мостовой схемы 9.

Исследуемый проводник длиной l (длина указана на рамке) с током I представляет собой нижний горизонтальный участок проводящей рамки 4, которая помещается в однородное магнитное поле перпендикулярно магнитным силовым линиям (рис. 10).

Величина индукции B однородного магнитного поля зависит от силы тока $I_{\mathcal{O}}$ в обмотках электромагнита.

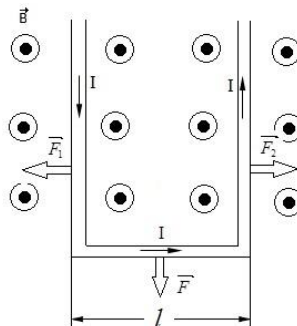


Рис. 10.

Как видно из рис. 10, силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , действующие на вертикальные участки рамки с током в магнитном поле, одинаковы по величине и компенсируют друг друга. Следовательно, сила, действующая на рамку с током со стороны магнитного поля, согласно закону Ампера определяется формулой $F_A = BIl \sin \alpha$, где l - длина нижнего горизонтального участка рамки. Так как проводник l расположен перпендикулярно магнитным силовым линиям, $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$, т.е. для данной установки $F_A = BIl$.

Эта сила может быть определена с использованием весов 10, позволяющих определять массу с точностью до 0,01 г. Измерительная часть весов состоит из горизонтальной шкалы 11, круговой шкалы 12 и нониуса 13.

Измерение массы на весах выполняется согласно показаниям на линейной, круговой шкале и нониусе.

К установке прилагается комплект различных рамок 14.

При отсутствии тока в проводнике на рамку массой m_p действует только сила тяжести $m_p g$, направленная вертикально вниз. Величина m_p определяется с помощью аналитических весов.

При пропускании тока I через проводник l на него действуют и сила тяжести $m_p g$, и сила Ампера $F_A = BIl$, направленная на данной установке вертикально вниз (рис. 10).

Поскольку силы сонаправлены, их равнодействующая F равна:

$$F = m_p g + F_A. \quad (1)$$

При этом показания весов изменяются и соответствуют силе F , которая может быть выражена формулой

$$F = m g, \quad (2)$$

где m - новые показания весов.

Согласно (1) и (2),

$$mg = m_p g + F_A,$$

$$F_A = (m - m_p) g = \Delta m g. \quad (3)$$

Примечание. Если направление тока I в рамке поменять на противоположное, F_A будет направлена вверх; в этом случае:

$$F_A = (m_p - m) g.$$

Порядок выполнения работы

Задание 1. *Определение зависимости силы Ампера от силы тока в проводнике, $F_A = f(I)$.*

1. Измерить с помощью весов массу рамки m_p и занести результат измерения в табл. 3; туда же записать значение l для данной рамки.

2. Включить блок питания, переключку «Power» выставить на значение, указанное преподавателем. По амперметру 8 определить силу тока $I_{\mathcal{E}}$ в цепи электромагнита. При этом значение $I_{\mathcal{E}}$ рекомендуется выбирать примерно равным 1 А. Результат занести в табл. 1.

3. На блоке питания регулятор «А» установить на предельном значении; ключ К замкнуть.

4. Используя регулятор «U» и амперметр 5, установить первое значение силы тока в проводнике в соответствии с заданием преподавателя (рекомендуется начинать с 1 А).

5. Используя весы, произвести измерение m массы рамки в этом случае.

6. Повторить п. 4-5 для других значений силы тока в проводнике с шагом 0.5 А или 1 А по указанию преподавателя. Полученные результаты занести в табл. 7.

7. Выключить блок питания.

8. Рассчитать величину $\Delta m = m - m_p$. В соответствии с формулой (3) рассчитать $F_A = \Delta m \cdot g$.

9. Используя данные табл. 3, построить график зависимости $F_A = f(I)$ и сделать вывод о характере этой зависимости.

Таблица 3

$m_p =$ г, $l =$ м, $I_{\mathcal{O}} =$ А							
№	I , А	m , г	Δm , г	F_A , мН	B , мТл	ΔB , мТл	δB
1							
2							
3							
4							
5							
Средние значения							

Задание 2. Определение значения индукции магнитного поля между полюсами электромагнита.

- Используя данные табл. 1, рассчитать значения B по формуле

$$B = \frac{F_A}{I \cdot l}.$$

- Рассчитать и занести в табл. 1 значения

$$\langle B \rangle = \frac{\sum B_i}{n}; \Delta B_i = |\langle B \rangle - B_i|;$$

$$\langle \Delta B \rangle = \frac{\sum \Delta B_i}{n}; \delta B = \frac{\langle \Delta B \rangle}{\langle B \rangle}.$$

- Записать окончательный результат в виде

$$B = \langle B \rangle \pm \langle \Delta B \rangle.$$

Задание 3. Определение зависимости силы Ампера от длины проводника l , $F_A = f(l)$.

Комплект рамок состоит из трех разных рамок, отличающихся массой m_p и длиной горизонтальной части, т.е. длиной проводника l .

- Установить на весах рамку с $l = 12,5$ мм. Записать значение l для данной рамки в табл. 4.

- Измерить с помощью весов массу рамки m_p и занести результаты измерения в табл. 4.

- Включить блок питания, переключку «Power» выставить на значение, указанное преподавателем, по амперметру 8 определить силу тока $I_{\mathcal{O}}$ в цепи электромагнита. Результат занести в табл. 4.

- Используя регулятор «U» и амперметр 5, установить значение силы тока в проводнике в соответствии с заданием преподавателя

(следует устанавливать значения не менее 3 А).

5. Используя весы, произвести измерение m массы рамки в этом случае.

6. Рассчитать величину $\Delta m = (m - m_p)$. В соответствии с формулой (3) рассчитать $F_A = \Delta m \cdot g$. Полученные результаты занести в табл. 4.

7. Выключить блок питания и заменить исследуемую рамку следующей, с другим значением $l = 25$ мм.

8. Повторить п. 2-6 задания 3 для этой рамки. (Примечание: на амперметрах 5 и 8 сила тока должна быть той же, что и при измерениях с рамкой $l = 12,5$ мм.)

9. Выключить блок питания и заменить исследуемую рамку следующей, с другим значением $l = 50$ мм; повторить п. 2-6 задания.

10. По данным таблицы построить график зависимости $F_A = f(l)$ и сделать вывод о характере этой зависимости.

Таблица 4

		$I_{\text{Э}} =$	A,	$I =$	A
№	$l, \text{ м}$	$m_p, \text{ г}$	$m, \text{ г}$	$\Delta m, \text{ г}$	$F_A, \text{ мН}$
1					
2					
3					

Контрольные вопросы

1. Что называется индукцией магнитного поля? В каких единицах она измеряется?
2. На какие объекты действует магнитное поле?
3. Что называется линией магнитной индукции? Как определяется направление магнитных силовых линий?
4. Как формулируется принцип суперпозиции магнитных полей?
5. Какое магнитное поле называется однородным? Изобразить его графически.
6. Что такое 1 Тл?
7. Сформулируйте закон Ампера.
8. Сформулируйте правило левой руки для определения силы Ампера.
9. Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа.
10. Написать формулу вращательного момента контура.
11. Дать определение магнитного момента контура. Как он направлен?

Список литературы

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2010.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Наука, 2010. – т.2.