

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

**Цель работы:** изучить теорию, методику измерения и определить напряженность горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью тангенс – гальванометра.

**Приборы и принадлежности:** тангенс-гальванометр; амперметр; реостат; источник постоянного тока; переключатель.

#### 1. Необходимые сведения о магнитном поле.

1.1. Согласно современным научным представлениям, магнитное поле есть вид материи, посредством которого взаимодействуют между собой движущиеся электрические заряды. Магнитное поле может быть постоянным и переменным. Стационарное (постоянное по времени) магнитное поле возникает вокруг проводников с постоянным током и зарядов, движущихся с постоянной нерелятивистской скоростью (т.е.  $v \ll c$ ), а также вокруг намагниченных тел (постоянных магнитов).

1.2. Магнитное поле действует только на движущиеся заряды, проводники с током и намагниченные тела.

1.3. Магнитное поле существует во всей области пространства вокруг источника поля и может меняться как от точки к точке поля, так и со временем. Стационарное магнитное поле от времени не зависит.

1.4. Для характеристики магнитного поля используют его силовое действие на проводники с током или движущиеся заряды. Соответствующая векторная величина называется *вектором индукции магнитного поля*  $\vec{B}$  (вектор магнитной индукции или магнитная индукция). У стационарного магнитного поля в каждой точке поля вектор  $\vec{B}$  постоянен, но в разных точках поля различен. Если вектор  $\vec{B}$  во всех точках поля одинаков, то поле называется однородным.

1.5. Чтобы знать  $\vec{B}$  в данной точке поля, надо определить его направление и модуль. Т. к. связь между магнитными и электрическими полями была обнаружена только в прошлом веке, а постоянные магниты были известны с древности, то за направление вектора  $\vec{B}$  в какой-то точке поля, было принято направление силы, действующей на северный полюс стрелки компаса, помещенного в эту точку. Направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в любой точке поля принято изображать с помощью линий магнитной индукции. Их проводят так, чтобы:

-в каждой точке поля направление вектора  $\vec{B}$  совпадало с направлением касательной к линиям индукции в этих точках;

-густота линий была пропорциональна модулю вектора  $\vec{B}$ .

1.6. Наглядное представление о линиях магнитной индукции можно получить, рассыпав множество крошечных магнитных стрелок (например, железных опилок) вокруг источника магнитного поля и дав им возможность расположиться свободно. На рис. 1 (а, б) изображены линии индукции прямого магнита. Через магнит они выходят из северного конца N и входят в южный S. На рис. 2 (а, б) изображены линии индукции прямого проводника с током. Они нигде не начинаются и нигде не заканчиваются. Это замкнутые линии. Поля с замкнутыми силовыми линиями называются *вихревыми*. **Магнитное поле — вихревое поле.** Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля. Оно заключается в том, что магнитное поле не имеет источников, т.е. в природе не существует магнитных зарядов, подобных электрическим зарядам.

Линии индукции прямого проводника с током (рис. 2б) являются концентрическими к проводнику окружностями. Направление вектора  $\vec{B}$  определяется «*правилом правой руки*»: если мысленно обхватить проводник так, чтобы большой палец указывал направление тока (положительных зарядов), тогда остальные пальцы покажут направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  (рис. 2 в). Также направление вектора  $\vec{B}$  можно определить *правилом буравчика* (правило правого винта): если движение острия буравчика с правой резьбой совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением вращения рукоятки буравчика.

Если проводник с током согнуть в виде кольца, то каждый малый участок проводника можно считать прямолинейными. Линии магнитной индукции представляют собой концентрические окружности в плоскостях, перпендикулярных проводнику с током. На рис. 3 изображено магнитное поле кольцевого тока. В центре кольца направление всех векторов магнитной индукции от элементарных участков проводника с током совпадают, и результирующий вектор индукции направлен перпендикулярно плоскости витка. Такой маленький виток представляет собой *магнитный диполь* с дипольным моментом:

$$\mathbf{p}_m = nJS, \quad (1)$$

где  $S$  - площадь витка, а  $n$ - число витков провода, в каждом из которых течет ток  $J$ . Во внешнем магнитном поле на него действует вращающий момент и он ведет себя как магнитная стрелка. На рис. 4 изображено магнитное поле длинной катушки с током (соленоида).



**1.7. Модуль индукции магнитного поля  $\vec{B}$**  определяется на основании одного из трех опытных фактов:

- а) отклонение проводника с током в магнитном поле;
- б) ориентирующее действие магнитного поля на рамку с током;
- в) отклонение пучка электрически заряженных частиц, движущихся в магнитном поле.

Ампер (Франция, 1820 г.) установил, что на прямолинейный проводник длиной  $\Delta l$ , находящийся в магнитном поле, со стороны магнитного поля действует сила, пропорциональная величине тока  $J$  в проводнике и его длине  $\Delta l$ , зависящая от расположения проводника в магнитном поле:

$$F \sim J\Delta l \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  - угол между направлениями тока  $J$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . Эта сила максимальна при  $\alpha = \pi/2$ , т.е. когда проводник расположен перпендикулярно линиям индукции:  $F_{max} \sim J\Delta l$

Определим теперь модуль вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  в данной точке поля:

$$B = F_{max} / J\Delta l. \quad (3)$$

Индукция магнитного поля в данной точке поля численно равна силе Ампера, действующей на единичный элемент тока ( $J=1\text{А}$ ,  $\Delta l = 1\text{м}$ ), помещенный в эту точку поля перпендикулярно вектору  $\vec{B}$ .

$$\text{Единица измерения индукции } [B] = \frac{1\text{Н}}{1\text{А} \cdot 1\text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тесла} .$$

**1.8. Силу, действующую на проводник с током в магнитном поле (силу Ампера), можно рассчитать по формуле:**

$$F_A = BJ\Delta l \sin \alpha. \quad (4)$$

Направление силы Ампера определяется по правилу «левой руки»: если расположить левую руку так, чтобы силовые линии входили в ладонь, вытянутые пальцы показывали направление тока, то отставленный большой палец покажет направление силы Ампера (рис. 5 а, б).

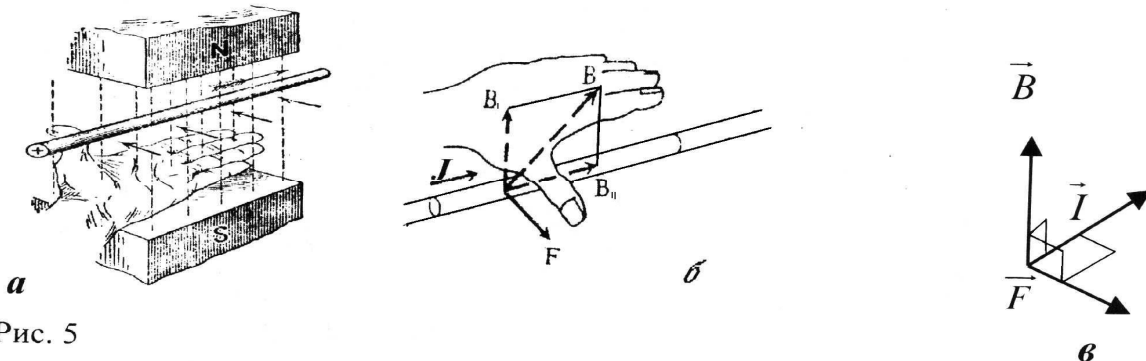


Рис. 5

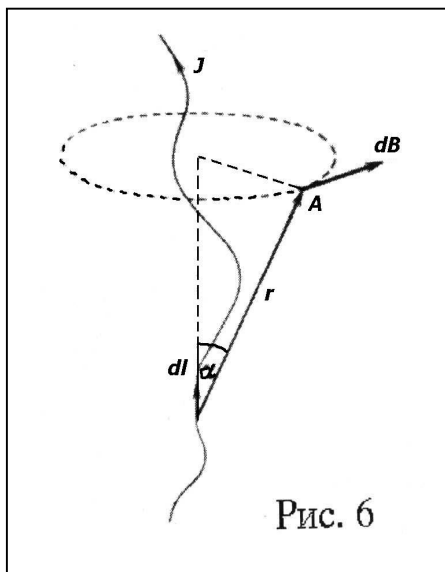
Таким образом векторы  $\vec{J}$ ,  $\vec{F}$  и  $\vec{B}$  всегда взаимно перпендикулярны (рис. 5в).

## 2. Расчет напряженности магнитного поля тока.

2.1. На основании экспериментальных данных Био и Савара (Франция, 1820 г.) Лаплас получил формулу для расчета модуля индукции магнитного поля  $d\vec{B}$ , созданного элементом провода  $dl$  с током  $J$  в точке  $A$ , находящейся на расстоянии  $r$  от элемента (рис.6):

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{J \sin \alpha}{r^2} dl, \quad (5)$$

где  $\alpha$  - угол между вектором тока  $J$  и радиус-вектором  $\vec{r}$  точки  $A$ . Чтобы найти индукцию поля в данной точке от всего проводника, надо



просуммировать векторы  $d\vec{B}$  от всех элементов проводника, участвующих в создании магнитного поля в точке.

2.2. Рассчитаем индукцию магнитного поля в центре кругового тока радиуса  $R$ . Элемент окружности  $dl$  создает в центре кругового тока магнитное поле с индукцией:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Jdl}{R^2}$$

$\sin \alpha = 1$ , т.к.  $\alpha = 90^\circ$  (каждый элемент  $dl \perp R$ ).

Т. к. направление векторов  $d\vec{B}$  от всех элементов  $dl$  кругового проводника совпадает по направлению, индукция магнитного поля в центре кругового тока равна:

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0 J}{2R}, \quad (6)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Размерность и значение  $\mu_0$  зависят от выбора системы единиц. В СИ  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, в СГС  $\mu_0 = 1$  (величина безразмерная).

2.3. Если вместо одного витка взять катушку того же радиуса с числом витков  $n$ , то индукция магнитного поля в центре такой катушки будет в  $n$  раз больше:

$$B = \frac{\mu\mu_0 Jn}{2R} \quad (7).$$

2.4. Значения магнитной индукции  $\vec{B}$  зависят от среды, в которой существует магнитное поле. В общем случае, магнитное поле вокруг

проводника с током складывается из магнитного поля, образованного током (в вакууме) и магнитного поля, образованного намагниченной средой. Так как влияние среды не всегда можно предсказать, для удобства расчетов вводят дополнительные величины.

2.4.1. Магнитная проницаемость среды  $\mu$  характеризует магнитные свойства среды и численно

$$\text{равна: } \mu = \frac{\text{магнитная индукция поля в данной среде}}{\text{магнитная индукция этого же поля в вакууме}} = \frac{B}{B_0} \quad (8)$$

Магнитная проницаемость воздуха  $\mu = 1,00$ .

2.4.2. Напряженностью магнитного поля  $\mathbf{H}$  в вакууме называют величину, равную отношению магнитной индукции  $\mathbf{B}$  к магнитной постоянной  $\mu_0$ :

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 \quad (9)$$

а напряженностью магнитного поля в любой среде:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / (\mu_0 \mu) \quad (10)$$

где  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость среды. В изотропной среде  $\mathbf{H}$  есть вектор, имеющий то же направление, что и вектор  $\mathbf{B}$ , но в  $\mu_0 \mu$  раз меньший по модулю.

### 3. Элементы земного магнетизма.

3.1. Земля в целом представляет собой огромный шаровой магнит. В любой точке пространства вокруг Земли, и на её поверхности обнаруживается действие магнитных сил. Иными словами, Земля обладает магнитным полем, существование которого можно установить с помощью магнитной стрелки, и полюса которого лежат вблизи (~300 км) географических полюсов. Поскольку по определению северный полюс магнитной стрелки указывает на север, а разноименные полюса магнитов притягиваются, то соответствующий магнитный полюс Земли оказывается южным магнитным  $S$ , и наоборот,

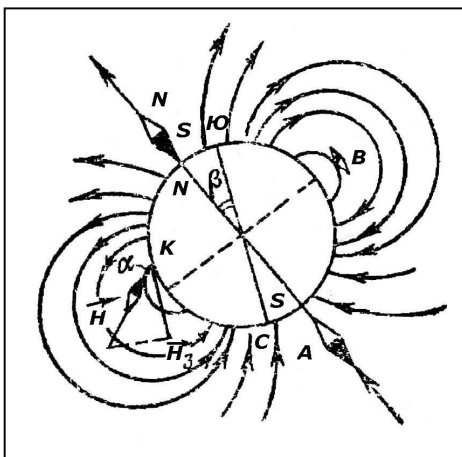


Рис. 7

магнитный полюс вблизи южного географического полюса является северным магнитным  $N$  (рис. 7).

Магнитное поле Земли на экваторе направлено горизонтально (точка  $B$ ), а у магнитных полюсов — вертикально (точка  $A$ ). В остальных точках земной поверхности магнитное поле Земли направлено под некоторым углом (точка  $K$ ).

Если подвесить магнитную стрелку  $NS$  на нити  $L$  так, чтобы точка подвеса совпадала с центром тяжести стрелки, то стрелка установится по направлению касательной к силовой линии магнитного поля Земли (рис. 7,8 а). В северном полушарии, её южный конец будет наклонен к Земле и стрелка составит с горизонтом *угол наклона*  $\alpha$  (на экваторе  $\alpha = 0$ ). Вертикальная плоскость, в которой расположится стрелка, называется *плоскостью магнитного меридиана*. Вследствие несовпадения магнитных полюсов с географическими, стрелка будет отклонена от географического меридиана. При этом угол  $\beta$ , который образуется между вертикальной плоскостью стрелки (т. е. магнитным меридианом) и географическим меридианом называют *углом склонения* (*магнитное склонение*). Вектор  $\mathbf{H}$  полной напряженности магнитного поля Земли можно разложить на две составляющие: горизонтальную  $H_3$  и вертикальную  $H_0$  (рис. 8 б).

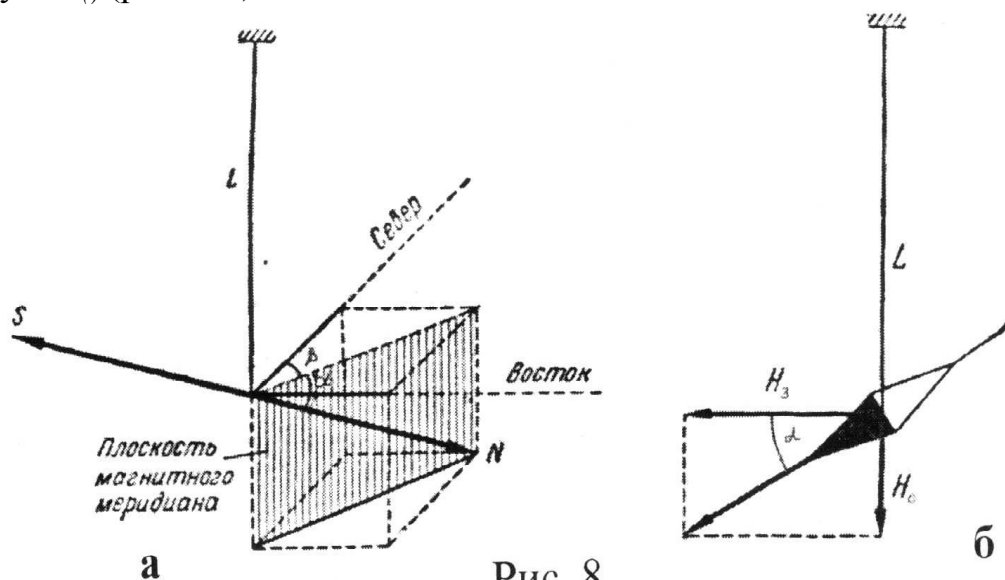


Рис. 8

Значения углов склонения и наклона, а также горизонтальной составляющей  $H_3$  даст возможность определить величину и направление полной напряженности магнитного поля Земли в данной точке. Горизонтальная составляющая  $H_3$ , магнитное склонение  $\alpha$  и наклонение  $\beta$  называются элементами земного магнетизма.

По последним гипотезам наличие магнитного поля у Земли связано с токами, циркулирующими в жидком ядре Земли, а также отчасти с намагниченностью горных пород и токами в радиационных поясах.

#### 4. Методика измерения напряженности магнитного поля Земли.

Один из методов измерения напряженности магнитного поля Земли, основан на взаимодействии поля с магнитной стрелкой. Этот метод называется **магнитометрическим**. В основе метода лежит тот факт, что магнитная стрелка, которая может вращаться только лишь около вертикальной оси, будет

отклоняться в горизонтальной плоскости только под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли  $H_3$ . Это свойство магнитной стрелки используется в **тангенс – гальванометре** для определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Тангенс – гальванометр представляет собой плоскую вертикальную катушку радиуса  $R$  с некоторым числом витков  $n$ . Величина радиуса катушки и число витков указаны на тангенс – гальванометре. Витки катушки располагаются в вертикальной плоскости.

В центре катушки в горизонтальной плоскости расположен компас. Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке будет расположена по магнитному меридиану земли  $NS$ . Поворотом катушки около вертикальной оси можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если после такой установки катушки по ней пропустить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол  $\theta$ . Объясняется это тем, что на магнитную стрелку будут действовать два поля: горизонтальная составляющая поля Земли и поле, созданное током катушки. Под действием этих полей магнитная стрелка займет положение, соответствующее

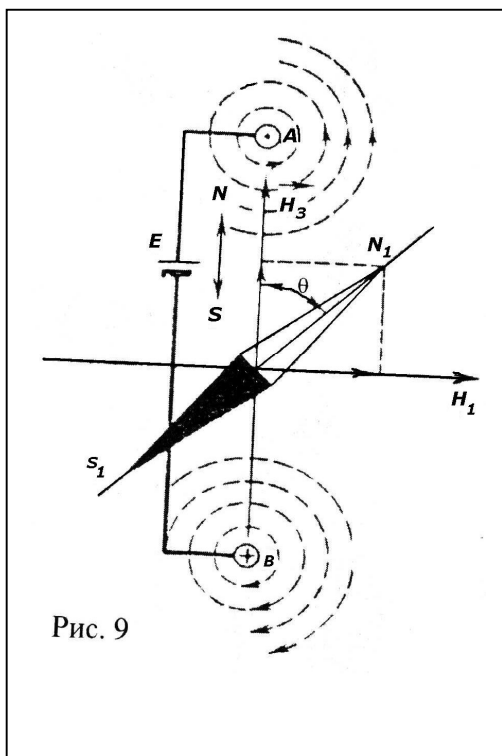


Рис. 9

направлению равнодействующей двух полей.

На рис. 9  $NS$  - направление магнитного меридиана Земли,  $A$  и  $B$  – сечение витка катушки горизонтальной плоскостью,  $N_1S_1$  — магнитная стрелка компаса, помещенная в центре катушки,  $H_3$  – вектор горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли,  $H_1$  – вектор напряженности магнитного поля, созданного током в катушке (определяется по правилу правой руки).

Обратите внимание на расположение магнитных силовых линий вокруг проводника с током; в точке  $A$  ток идет на нас (показан точкой), в точке  $B$  ток идет от нас (показан крестиком). Магнитное поле тока направлено перпендикулярно к плоскости витков. Из рисунка видно, что  $tg\theta = H_1 / H_3$  и, тогда отсюда:

$$H_3 = H_1 / tg\theta \quad (11)$$

Величина напряженности поля  $H_1$ , созданного током в центре катушки, будет  $H_1 = B / (\mu_0\mu)$ , где  $B$  вычисляется по закону Био - Савара - Лапласа для случая кругового тока (7) и тогда получим:

$$H_1 = \frac{Jn}{2R}, \text{ где } J - \text{ток, текущий в витке, в } a;$$



$R$  – радиус витка катушки в м;  $n$  – число витков.

Подставляя значение  $H_I$  в формулу (11), получим:

$$H_3 = \frac{Jn}{2R \operatorname{tg} \theta} \quad (12)$$

Этой формулой и пользуются для опытного определения  $H$ . В системе СГСМ напряженность магнитного поля измеряется в эрстедах, в системе СИ в а/м.

### Схема экспериментальной установки.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 8, где:

TG - тангенс -гальванометр;

A - амперметр;

R- реостат; если в работе используется источник с регулируемым напряжением, то реостат можно не использовать.

K - ключ. Ключ имеет два положения. Меняя положение ключа, можно менять направление тока в тангенс — гальванометре.

Количество витков в катушке тангенс -гальванометра:  $n = 10$ .

Радиус катушки:  $R = 100$  мм.

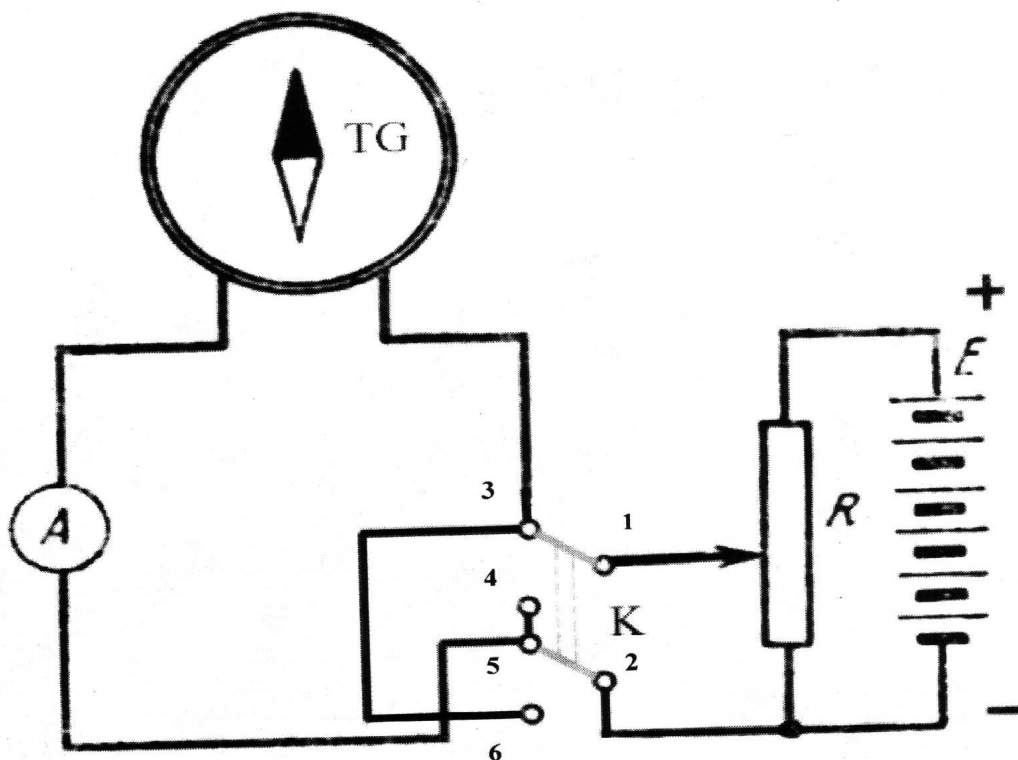


Рис.8

### Порядок выполнения измерений.

1. Собрать схему согласно рис. 8 и проверить ее у преподавателя или лаборанта.
2. Поворачивая тангенс – гальванометр вокруг своей оси, установить стрелку компаса в плоскости катушки тангенс—гальванометра. В этом случае плоскость катушки тангенс - гальванометра совпадает с плоскостью магнитного меридиана Земли.
3. Проверить «нулевое» показание стрелки компаса.
4. Включить ток и подобрать такое его значение, при котором отклонение стрелки составит 40°-50°. Записать его значение.
5. Поворотом ключа, изменить направление тока в тангенс – гальванометре и записать значение угла - отклонение стрелки в другую сторону от «нулевого» значения.
6. Угол отклонения стрелки от нулевого положения определяется как среднее значение:

$$\theta = \frac{\theta_{\text{ЛЕВ}} + \theta_{\text{ПРАВ}}}{2}.$$

7. Вычислить  $H_3$  по формуле (12). Данные занести в таблицу 1.
8. Определить погрешность измерения:

$$\Delta H_3 = H_3 \left( \frac{\Delta J}{J} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{2\Delta\theta}{\sin 2\theta} \right).$$

9. Повторить измерения два раза, изменяя значение тока на  $\pm (0,1 \div 0,2) A$
10. Записать  $H$ , как среднее значение  $H_3$  и  $\Delta H_3$ :  $H_{3 \text{ ист.}} = H_3 \pm \Delta H_3$

Таблица 1.

$J, A$	$\theta^0_{\text{прав}}$	$\theta^0_{\text{лев.}}$	$\theta^0$	$tg \theta^0$	$H_3, A/m$	$\Delta H_3, A/m$

### Контрольные вопросы.

1. Что такое магнитное поле? Когда оно возникает?
2. Как обнаруживается магнитное поле?
3. Что такое индукция магнитного поля?
4. Как определить направление индукции магнитного поля? Как определить ее модуль?
5. Как рассчитать силу Ампера? Какое действие она характеризует? Как найти ее направление?
6. Как выглядит магнитное поле кругового тока?
7. В каких случаях можно применять формулу Био – Савара – Лапласа?

8. Напишите формулу для расчета модуля индукции поля в центре кругового тока. Объясните значения всех величин, входящих в формулу.
9. Что такое магнитная проницаемость среды и как она связана с напряженностью магнитного поля.
10. Изобразите с помощью силовых линий магнитное поле Земли. Где находятся магнитные полюса Земли?
11. Как ведет себя свободная магнитная стрелка в поле Земли?
12. Что такое тангенс – гальванометр? Как он устроен?
13. Почему магнитная стрелка поворачивается при включении электрического тока?
14. От чего зависит угол поворота магнитной стрелки?
15. По какой формуле можно рассчитать напряженность магнитного поля Земли?

### **Литература**

1. Трофимова Г.И. Курс физики, стр. 164-168.
2. Савельев И.В. Курс общей физики т.2.
3. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики.
4. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н. Практикум по физике.