

Работа 3.1.3

Измерение магнитного поля Земли

Шарапов Денис, Б05-005

Содержание

1	Аннотация	2
2	Теоретические сведения	2
2.1	Точечный магнитный диполь	2
2.2	Неодимовые магнитные шары	2
2.3	Экспериментальное определение величины магнитного момента магнитных шариков	3
2.4	Измерение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли	3
2.5	Измерение вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли	3
3	Результаты измерений и обработка данных	4
3.1	Определение магнитного момента	4
3.2	Определение горизонтальной составляющей	4
3.3	Определение вертикальной составляющей	5
3.4	Подсчёт индукции магнитного поля Земли	6
4	Вывод	6
5	Контрольные вопросы	6

1 Аннотация

Цель работы: определить характеристики шарообразных неодимовых магнитов и, используя законы взаимодействия магнитных моментов с полем, измерить горизонтальную и вертикальную составляющие индукции магнитного поля Земли и магнитное наклонение.

В работе используются: 12 одинаковых неодимовых магнитных шариков, тонкая нить для изготовления крутильного маятника, медная проволока диаметром $(0,5 \div 0,6)$ мм, электронные весы, секундомер, измеритель магнитной индукции АТЕ-8702, штангенциркуль, брусок из немагнитного материала $(25 \times 30 \times 60 \text{ мм}^3)$, деревянная линейка, штатив из немагнитного материала; дополнительные неодимовые магнитные шарики (~ 20 шт.) и неодимовые магниты в форме параллелепипедов (2 шт.), набор гирь и разновесов

2 Теоретические сведения

2.1 Точечный магнитный диполь

Простейший магнитный диполь может быть образован витком с током или постоянным магнитом. По определению, магнитный момент \vec{P}_m тонкого витка площадью S с током I равен:

$$\vec{P}_m = \frac{I}{c} \vec{S} = \frac{I}{c} S \vec{n},$$

где c — скорость света в вакууме, $\vec{S} = S \vec{n}$ — вектор площади контура, образующий направлением тока правовинтовую систему, \vec{n} — единичный вектор нормали к площадке S (это же направление \vec{P}_m принимается за направление $S \rightarrow N$ от южного к северному полюсу).

Магнитное поле точечного диполя определяется по формуле, аналогичной формуле для поля элементарного электрического диполя:

$$\vec{B} = 3 \frac{(\vec{P}_m, \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{P}_m}{r^3}.$$

В магнитном поле с индукцией \vec{B} на точечный магнитный диполь \vec{P}_m действует механический момент сил:

$$\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}.$$

Магнитный диполь в магнитном поле обладает энергией:

$$W = -(\vec{P}_m, \vec{B}).$$

Зная магнитные моменты P_1 и P_2 двух небольших постоянных магнитов, можно рассчитать силу их взаимодействия. Если магнитные моменты $P_1 = P_2 = P_m$ двух одинаковых небольших магнитов направлены вдоль соединяющей их прямой, а расстояние между ними равно r , то магниты взаимодействуют с силой:

$$F = P_m \frac{\partial B}{\partial r} = P_m \frac{\partial (2P_m/r^3)}{\partial r} = -6 \frac{P_m^2}{r^4}.$$

2.2 Неодимовые магнитные шары

Магнитное поле однородно намагниченного шара радиуса R на расстояниях $r \geq R$ от центра шара совпадает с полем точечного магнитного диполя \vec{P}_m , равного полному магнитному моменту шара и расположенного в его центре.

По определению намагниченность — это магнитный момент единицы объёма. Для однородно намагниченного шара намагниченность, очевидно, равна:

$$\vec{p}_m = \frac{\vec{P}_m}{V},$$

где V — объем шара.

Индукция магнитного поля \vec{B}_p на полюсах однородно намагниченного шара связана с величиной намагниченности \vec{p}_m и с остаточной магнитной индукцией \vec{B}_r , формулой:

$$\vec{B}_p = (8\pi/3)\vec{p}_m = (2/3)\vec{B}_r.$$

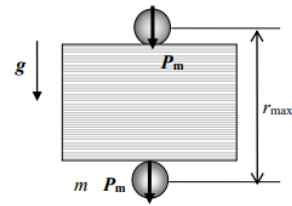
2.3 Экспериментальное определение величины магнитного момента магнитных шариков

При максимальном расстоянии сила тяжести шариков равна силе их магнитного притяжения:

$$\frac{6P_m^2}{r_{max}^4} = mg, \quad P_m = \sqrt{\frac{mgr_{max}^4}{6}}.$$

Максимальная величина индукции наблюдается на полюсах:

$$\vec{B}_p = \frac{2\vec{P}_m}{R^3}.$$



2.4 Измерение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли

Магнитное поле Земли в настоящей работе определяется по периоду крутильных колебаний магнитной стрелки вокруг вертикальной оси.

Период крутильных колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_n}{P_0 B_h}} = 2\pi\sqrt{\frac{I_n}{nP_m B_h}},$$

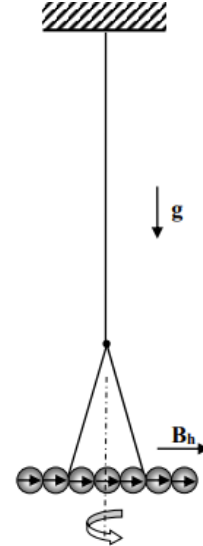
где $P_0 = nP_m$ — полный магнитный момент магнитной стрелки, составленной из n шариков.

Момент инерции стрелки, состоящей из n шариков:

$$I_n = \frac{1}{12}n^3 md^2.$$

В приближении период колебаний маятника оказывается пропорциональным числу шаров n , составляющих стрелку:

$$T(n) = \pi n \sqrt{\frac{md^2}{3P_m B_h}}.$$



2.5 Измерение вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли

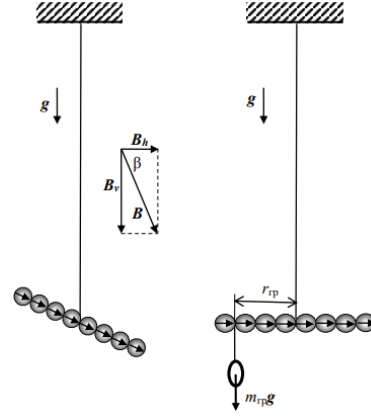
С помощью небольшого дополнительного грузика стрелку можно выровнять, расположив её горизонтально: в этом случае момент силы тяжести груза относительно точки подвеса будет равен моменту сил, действующих на стрелку со стороны магнитного поля Земли. Если масса уравнивающего груза равна $m_{гр}$, плечо силы тяжести $r_{гр}$, а полный магнитный момент стрелки $P_0 = nP_m$, то в равновесии:

$$m_{гр}gr_{гр} = P_0B_v = nP_mB_v,$$

где B_v — вертикальная составляющая поля Земли. Видно, что момент $M(n)$ силы тяжести уравнивающего груза пропорционален числу n шариков, образующих магнитную стрелку:

$$M(n) = An,$$

где $A = P_mB_v$.



3 Результаты измерений и обработка данных

3.1 Определение магнитного момента

Взвесим шарики на весах и определим их диаметр. Затем выясним, на каком максимальном расстоянии r_{max} шарики удерживают друг друга в поле тяжести Земли. Результаты измерений занесём в таблицу 1.

m , г	d , мм	r_{max} , мм
$0.850 \pm 0,001$	$6,10 \pm 0,01$	$19,00 \pm 0,01$

Таблица 1: Геометрические размеры шариков

Рассчитаем величину магнитного момента магнетика P_m , величину намагниченности материала шариков p_m , величину магнитного поля B_p на полюсах шарика, величину остаточной магнитной индукции B_r :

P_m , эрг/Гс	p_m , Гс	B_p , кГс	B_r , кГс
$42,600 \pm 0,001$	$358,4 \pm 10$	$3,00 \pm 0,09$	$4,50 \pm 0,14$

Измерим величину поля B_p на полюсах шарика датчиком:

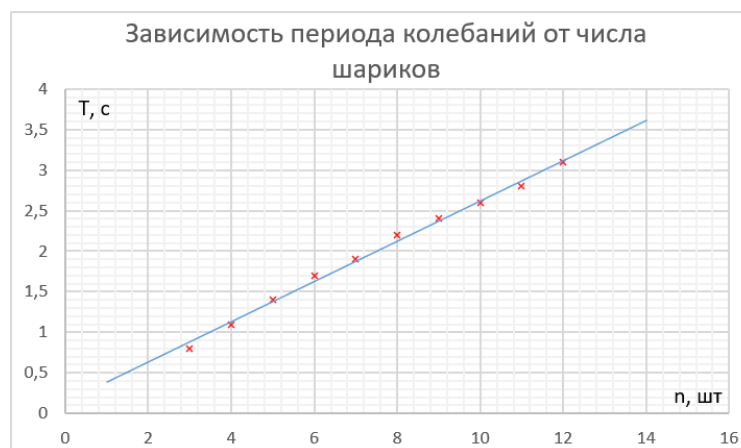
$$B_p = 2,87 \pm 0,01 \text{ кГс.}$$

3.2 Определение горизонтальной составляющей

Соберём крутильный маятник и исследуем зависимость периода T крутильных колебаний стрелки от количества магнитных шариков n , составляющих стрелку. Измерения представлены в таблице 2.

n , шт	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
T , с	3,1	2,8	2,6	2,4	2,2	1,9	1,7	1,4	1,1	0,8

Таблица 2: Зависимость периода колебаний от количества шариков



Из МНК определяем коэффициент наклона k :

$$k = 0,249 \pm 0,006 \text{ с.}$$

По значению углового коэффициента рассчитаем величину горизонтальной составляющей B_h магнитного поля Земли:

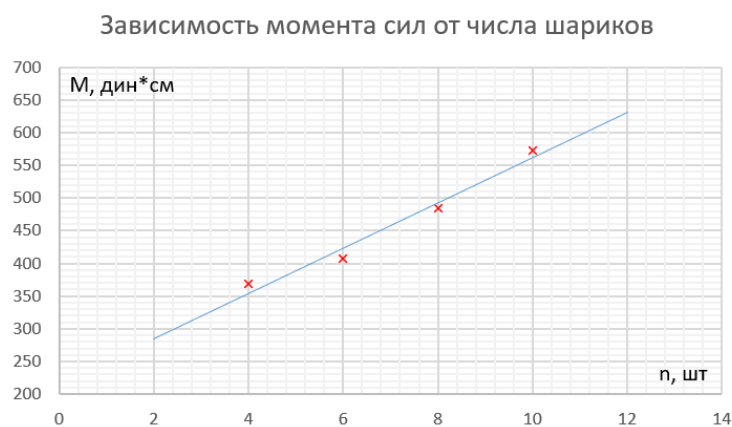
$$B_h = 0,396 \pm 0,024 \text{ Гс.}$$

3.3 Определение вертикальной составляющей

Определим механический момент сил, действующих со стороны магнитного поля Земли на горизонтально расположенную магнитную стрелку. Для этого с помощью проволоки уравновесим стрелку. С помощью весов определим массу уравновешивающего груза $m_{гр}$. Результаты измерений приведены в таблице 3.

n , шт	$m_{гр}$, г	M , дин·см
10	$0,195 \pm 0,001$	$573,300 \pm 0,003$
8	$0,206 \pm 0,001$	$484,500 \pm 0,004$
6	$0,231 \pm 0,001$	$407,400 \pm 0,005$
4	$0,313 \pm 0,001$	$368,100 \pm 0,005$

Таблица 3: Результаты измерения механического момента



Из МНК определяем угловой коэффициент k :

$$k = 34,6 \pm 4,0 \text{ дин} \cdot \text{см}.$$

Откуда рассчитаем величину вертикальной составляющей B_v магнитного поля Земли:

$$B_v = 0,81 \pm 0,01 \text{ Гс}.$$

3.4 Подсчёт индукции магнитного поля Земли

Полная величина индукции B :

$$B = \sqrt{B_v^2 + B_h^2} \approx 0,90 \pm 0,06 \text{ Гс}.$$

Магнитное наклонение β :

$$\beta = \arctan \frac{B_v}{B_h} \approx 63^\circ.$$

4 Вывод

5 Контрольные вопросы