# МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Факультет биологической и медицинской физики

# Лабораторная работа 3.1.1

Магнитометр

Выполнили:

Фитэль Алёна,

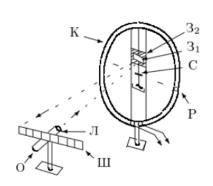
Попеску Полина

группа Б06-103

**Цель работы:** определить горизонтальную составляющую магнитного поля Земли и установить количественное соотношение между единицами электрического тока в системах СИ и СГС.

**Оборудование:** магнитометр, осветитель со шкалой, источник питания, вольтметр, электромагнитный переключатель, конденсатор, намагниченный стержень, прибор для определения периода крутильных колебаний, секундомер, рулетка, штангенциркуль.

## 1. Теоретическая справка



**Рисунок 1.** Схема магнитометра

В нашей установке с помощью электромагнитного магнитометра измеряется горизонтальная составляющая земного магнитного поля и абсолютным образом определяется сила тока по его магнитному действию.

Экспериментальная установка. Магнитометр (рис. 1) состоит из нескольких последовательно соединённых круговых витков K, расположенных вертикально. В центре кольца K на тонкой неупругой вертикальной нити подвешена короткая магнитная стрелка C. Жёстко связанная со стрелкой крыльчатка погружена в масло и служит для демпфирования колебаний.

В отсутствие других магнитных полей стрелка располагается по направлению горизонтальной составляющей земного магнитного поля  ${\bf B_0}$ , т.е. лежит в плоскости магнитного меридиана.

Прибор настраивают с помощью световых зайчиков, отражённых от двух зеркал:  $3_1$ , прикреплённого к стрелке (подвижный зайчик), и  $3_2$ , расположенного в плоскости кольца K и жёстко связанного с ним (неподвижный зайчик). Оба зеркала освещаются одним и тем же осветителем O. Вращением кольца вокруг вертикальной оси можно совместить оба зайчика. При этом плоскость витков совпадает с плоскостью магнитного меридиана.

При появлении дополнительного горизонтального магнитного поля  ${\bf B}_{\perp}$  стрелка  ${\bf C}$  установится по равнодействующей обоих полей  ${\bf B}_{\Sigma}$  (рис. 2). В нашей установке дополнительное поле может быть создано либо ферромагнитным стержнем, расположенным на кольце на его горизонтальном диаметре ( ${\bf B}_1$ ), либо током, проходящим по кольцу ( ${\bf B}_2$ ). В обоих случаях дополнительное поле можно считать однородным, тк. размеры стрелки много меньше радиуса кольца.

Поле намагниченного стержня (точечного диполя) на перпендикуляре к нему:

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathfrak{M}}{R^3},\tag{1}$$

поле в центре кольца с током по закону Био и Савара:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R} N. \tag{2}$$

Здесь  $\mathfrak{M}$  – магнитный момент ферромагнитного стержня, R — радиус кольца, N – число витков в кольце, I – сила тока в единицах СИ (амперах).

Измерив угол отклонения стрелки  $\varphi$ , можно связать поля  $B_0$  и  $B_{\perp}$  ( $B_1$  или  $B_2$ ):

$$B_{\perp} = B_0 \cdot \operatorname{tg} \varphi. \tag{3}$$

-2R

**2.** Cxema

магнитной

OT-

угла

Рисунок

измерения

клонения

стрелки

### I. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Для определения горизонтальной составляющей земного магнитного поля Во тонкий короткий намагниченный стержень устанавливается в отверстие P на горизонтальном диаметре кольца (рис.

1). Измерив тангенс угла отклонения стрелки

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{x_1}{2L},\tag{4}$$

можно с помощью уравнений (1), (3) и (4) рассчитать поле  $B_0$ , если исключить величину  $\mathfrak{M}$  – магнитный момент стержня.

Для исключения магнитного момента измерим период крутильных колебаний стержня в поле Земли. Подвешенный горизонтально за середину на тонкой длинной нити сгержень в положении равновесия усгановится по полю Земли (упругость нити пренебрежимо мала). Если ось стержня отклонить в горизонтальной плоскости от направления  $B_0$  на малый угол а, то под действием возвращающего механического момента

$$M_{\text{Mex}} = \mathfrak{M}B_0 \sin \alpha \approx \mathfrak{M}B_0 \alpha$$

стержень с моментом инерции Ј в соответствии с уравнением

$$J\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \mathfrak{M}B_0\alpha = 0$$

будет совершать крутильные колебания с периодом

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{\mathfrak{M}B_0}}. (5)$$

Момент инерции цилиндрического стержня относительно оси вращения

$$J = m\left(\frac{l^2}{12} + \frac{r^2}{4}\right) = \frac{ml^2}{12} \left[1 + 3\left(\frac{r}{l}\right)^2\right],\tag{6}$$

где m — масса стержня, l — длина, а r — его радиус.

Таким образом, рассчитав момент инерции J и измерив тангенс угла. отклонения стрелки  $\varphi_1$  и период малых крутильных колебаний стержня T, можно с помощью формул (1), (3), (4) и (5) определить горизонтальную составляющую магнитного поля Земли:

$$B_0 = \frac{2\pi}{TR} \sqrt{\frac{\mu_0 JL}{2\pi R x_1}}. (7)$$

#### II. Определение электродинамической постоянной

Источник К виткам магнитометра Ключ С Реле

Для определения электродинамической постоянной с необходимо провести независимые измерения одного и того же тока в разных системах: в СИ –  $I_{\rm CN}$  и в СГС –  $I_{\rm C\Gamma C}$ :

$$c = 10 \frac{\{I\}_{\text{CPC}}}{\{I\}_{\text{CM}}} \tag{8}$$

Пропуская ток через витки магнитометра, измеряют тангенс угла от клонения стрелки (tg  $\varphi_2=\frac{x_2}{2L}$ ) и по формулам (2) и (3) рассчитывают величину

$$I_{\text{CM}} = \frac{2B_0 R}{\mu_0 N} \operatorname{tg} \varphi_2 = A \operatorname{tg} \varphi_2. \tag{9}$$

Величина А является постоянной прибора в данном месте земной поверхности.

Одновременно тот же ток измеряется в системе СГС (рис. 3). Если разрядить конденсатор ёмкости C, заря женный до напряжения U, через витки, то через них протечёт заряд q=CU. Если n раз в секунду после- довательно заряжать конденсатор от источника и разряжать через витки, то через них за секунду протечёт заряд CUn. Средний ток, прошедший через витки, равен при этом

$$I_{\rm C\Gamma C} = CUn. \tag{10}$$

### 2. Обработка результатов

# 2.1. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

### Параметры установки:

- Отклонение  $x_1 = 3.5 \pm 0.1$  см,  $\tilde{x}_1 = 2.8 \pm 0.1$  см
- Расстояние от шкалы до зеркала  $L = 111 \pm 1$  см.
- Радиус кольца  $R = 20.0 \pm 0.1$  см

### Параметры стержня:

- $m = 4.350 \pm 0.001$  г;
- $d = 4.00 \pm 0.01 \text{ mm} \Rightarrow r = 2.000 \pm 0.005 \text{ mm};$
- $l = 45,00 \pm 0,01$  mm.

За 132.1 секунд произошло 10 колебаний, следовательно, период  $T=13.2\pm0.3$  секунд.

По формуле

$$J = \frac{ml^2}{12} \left[ 1 + 3 \left( \frac{r}{l} \right)^2 \right]$$

найдём момент инерции стержня,  $J=7{,}38\cdot 10^{-7}~{\rm kr\cdot m^2}.$  Погрешность  $\sigma_J=4{,}6\cdot 10^{-9}~{\rm kr\cdot m^2}.$ 

Найдём величину  $B_0$  горизонтальной составляющей магнитного поля Земли по формуле:

$$B_0 = \frac{2\pi}{TR} \sqrt{\frac{\mu_0 JL}{2\pi Rx_1}} = (115 \pm 4) \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$$

### 2.2. Определение электродинамической постоянной

### Параметры установки:

Расстояние от шкалы до зеркала  $L=111\pm 1$  см.

- Рабочее напряжение U = 98 B;
- Электроёмкость конденсатора  $C = 9 \cdot 10^5$  см  $\pm 2\% = 1{,}896$  мк $\Phi$ ;
- N = 44 витка;
- Радиус кольца  $R = 20.0 \pm 0.1 \; \mathrm{cm}$
- Частота n = 50 Гц.

При включении электровибратора отклонение «зайчика» вправо:  $A_1 = 3.5$  см, отклонение влево:  $A_2 = 2.8$  см  $\Rightarrow$  среднее отклонение  $x_2 = (A_1 + A_2)/2 = 3.2$  см. Тогда по формуле (9):

$$I_{\text{CM}} = \frac{2B_0R}{\mu_0 N} \frac{x_2}{2L} = 1.2 \cdot 10^{-3} A; \quad \sigma I_{\text{CM}} = 0.3 \cdot 10^{-3} A.$$

 $I_{\rm C\Gamma C}$  найдём по формуле (10):

$$I_{\rm C\Gamma C} = CUn = 147 \cdot 10^5$$
 ед. СГСЭ;  $\sigma I_{\rm C\Gamma C} = 3 \cdot 10^5$ ед. СГСЭ.

Тогда найдём c:

$$c = 10 \frac{\{I\}_{\text{СГС}}}{\{I\}_{\text{СИ}}} = (11 \pm 3) \cdot 10^{10} \frac{\text{ед. СГСЭ}}{A};$$

# 3. Вывод

В ходе работы была определенна горизонтальная составляющая магнитного поля Земли ( $B_0=(115\pm4)\cdot10^{-7}$  Тл) и было установлено количественное соотношение между единицами электрического тока в системах СИ и СГС,  $c=(11\pm3)\cdot10^{10}\frac{\text{ед. СГСЭ}}{A}$ . Несовпадение полученной величины с табличым значением константы  $c=3\cdot10^{10}\frac{\text{ед. СГСЭ}}{A}$ , может быть связано с отличием значения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, полученной в первой части работы, с той, которая была во второй части, вследствие влияния соседних установок и электронных устройств на итоговое горизонтальное поле.