

Работа 3.1.1

Магнитометр

Гаврилин Илья Дмитриевич
Б01-101

18 октября 2022 г.

1 Аннотация

В данной работе определили горизонтальную составляющую магнитного поля Земли (если точнее значение данного поля в окрестности установки с учетом поправок окружающей среды). Установили качественное соотношение между единицами электрического тока в системах СИ и СГС.

2 Теоретические сведения

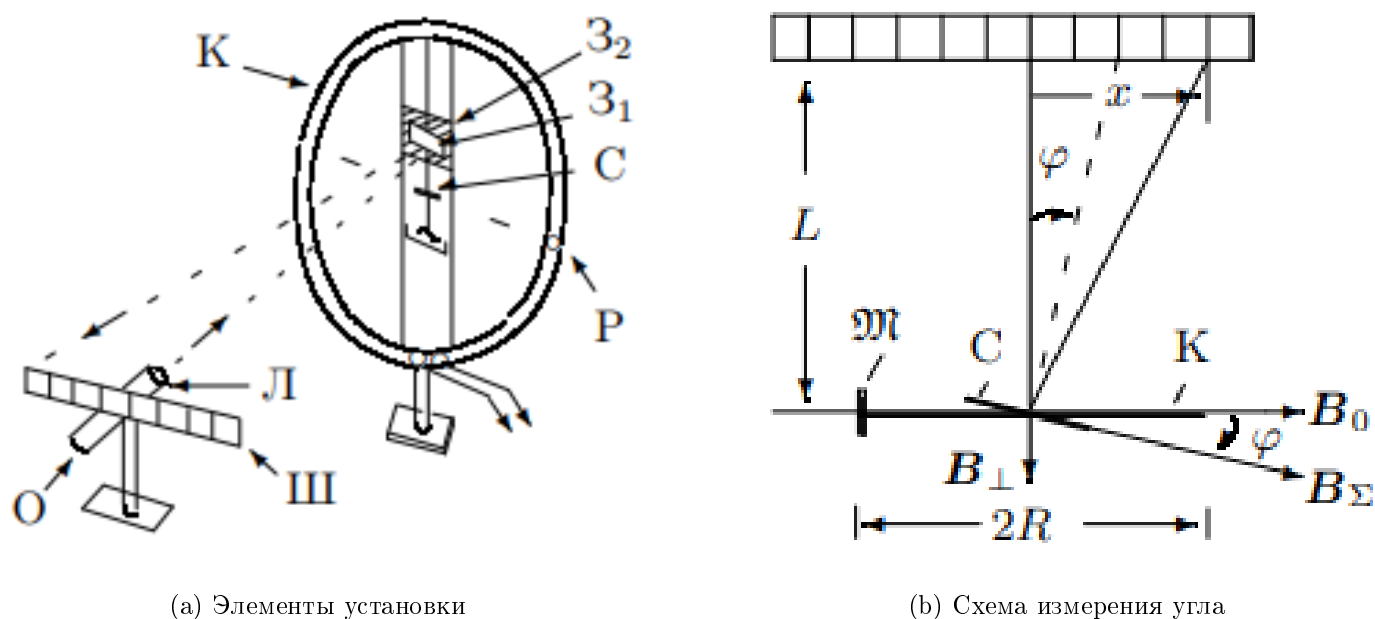


Рис. 1: Оборудование для проведения эксперимента

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

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R^3} \quad (1)$$

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

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R} N \quad (2)$$

Здесь M — магнитный момент ферромагнитного стержня, R — радиус кольца, N — число витков в кольце, I — сила тока в единицах СИ (амперах). Измерив угол отклонения стрелки ϕ , можно связать поля B_0 и B_\perp (B_1 или B_2):

$$B_\perp = B_0 \cdot \operatorname{tg}(\phi) \quad (3)$$

I. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Для определения горизонтального земного поля B_0 тонкий и не очень длинный намагниченный стержень устанавливается в отверстие Р на горизонтальном диаметре кольца (рис. 1). Измерив угол отклонения стрелки ϕ_1

$$\operatorname{tg}(\phi_1) = \frac{x_1}{2L} \quad (4)$$

можно с помощью уравнений (1), (3) и (4) рассчитать поле B_0 , если исключить величину M — магнитный момент стержня. Исключить магнитный момент можно, измерив период крутильных колебаний стержня в поле Земли. Подвешенный горизонтально за середину на тонкой длинной нити стержень в положении равновесия установится по полю Земли (упругостью нити можно пренебречь). Если ось стержня отклонить в горизонтальной плоскости от направления B_0 на малый угол α , то под действием возвращающего механического момента

$$M_{\text{мех}} = MB_0 \sin(\alpha) \approx MB_0 \alpha$$

стержень с моментом инерции J в соответствии с уравнением

$$J\ddot{\alpha} + MB_0 \alpha = 0$$

будет совершать крутильные колебания с периодом

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{MB_0}} \quad (5)$$

Момент инерции цилиндрического стержня относительно оси вращения

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

где m — масса стержня, l — длина, а r — его радиус. Таким образом, рассчитав момент инерции и измерив угол отклонения стрелки ϕ_1 и период малых крутильных колебаний стержня T , можно с помощью формул (1), (3), (4) и (5) определить горизонтальное поле:

$$B_0 = \frac{2\pi}{TR} \sqrt{\frac{\mu_0 J L}{2\pi R x_1}} \quad (7)$$

Поскольку магнитометр установлен в железобетонном здании, магнитное поле в нём может не только сильно отличаться от поля Земли, но и заметно меняться от места к месту, поэтому период колебаний следует определять вблизи магнитометра. Для устранения случайных помех стержень подвешивается в специальном стеклянном сосуде.

II. Определение электродинамической постоянной

Для определения электродинамической постоянной с необходимо провести независимые измерения одного и того же тока в разных системах: в СИ — $I_{\text{СИ}}$ и в абсолютной гауссовой — $I_{\text{абс}}$:

$$c = 10 \frac{[I]_{\text{абс}}}{[I]_{\text{СИ}}} \quad (8)$$

Пропуская ток через витки магнитометра, измеряют тангенс угла отклонения стрелки и по формулам (2) и (3) рассчитывают величину

$$I_{\text{СИ}} = \frac{2B_0 R}{\mu_0 N} \operatorname{tg}(\phi_2) = A \operatorname{tg}(\phi_2) \quad (9)$$

Величина A является постоянной прибора в данном месте земной поверхности. Заметим, что если B_0 известно, то определение силы тока не требует сравнения с какими-либо эталонами тока или напряжения и является абсолютным, т.е. непосредственно связывает ток с основными единицами системы СИ. При этом магнитометр может служить для изготовления эталонов и градуировки амперметров в системе СИ.

$$I_{\text{абс}} = CUn \quad (10)$$

3 Ход работы

1. Включили осветитель, настроили схождение двух световых зайчиков на линейке, настроили их четкость путем фокусировки.
2. Установили магнит разными полюсами и замерыли отклонение луча:
 $x_0 = +7.5 \pm 0.1$ см, $x_1 = -5 \pm 0.1$ см, $x_2 = +20.5 \pm 0.1$ см, тогда для отклонения в разные стороны получаем: $\Delta x_+ = 13 \pm 0.1$ см, $\Delta x_- = 12.5 \pm 0.1$ см. Отклонение составляет $<5\%$ значит можно продолжать опыт.
3. Замерили расстояние от линзы для измерительной линейки: $L = 93 \pm 0.2$ см.
4. Замерим период малых вращательных колебаний магнитного стержня:
 $t = 61.4 \pm 1$ сек., $N = 37$, значит $T = 1.66 \pm 0.03$ сек.
5. Замерим линейные размеры магнитного стержня: $d = 4.5 \pm 0.1$ мм, $l = 24.0 \pm 0.1$ мм, $m = 2.87 \pm 0.01$ гр.
6. Рассчитаем момент инерции магнита (по ф-ле 6):

$$J = \frac{ml^2}{12} \left(1 + 3\left(\frac{r}{l}\right)^2\right) = (1.41 \pm 0.05) \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (11)$$

7. Рассчитаем B_0 по формуле (7):

$$\varepsilon_{B_0} = \sqrt{\varepsilon_T^2 + \frac{9}{4}\varepsilon_R^2 + \frac{1}{4}\varepsilon_J^2 + \frac{1}{4}\varepsilon_L^2 + \frac{1}{4}\varepsilon_x^2}$$

$$B_0 = \frac{2\pi}{TR} \sqrt{\frac{\mu_0 J L}{2\pi R \Delta x_+}} = (1.47 \pm 0.08) \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$$

7.Собрали электрическую схему для сравнения значений токов.

- 8.Рассмотрим отклонение зайчика при разной полярности источника:

$x_0 = +7.5 \pm 0.1$ см, $x_1 = -5 \pm 0.1$ см, $x_2 = +20.5 \pm 0.1$ см, тогда для среднее отклонение зайчика: $\Delta x = 12.75 \pm 0.25$ см.

При этом напряжение на конденсаторе было равным: $U_c = 96$ В

Параметры установки: $R_{\text{резистор}} = 1.2$ кОм, $C = 9 \cdot 10^5$ м, $N = 34$ витка.

9. Замерим x_2 и U на вольтметре подсчитаем токи по формулам (9) и (10).

$$I_{\text{СИ}} = \frac{2B_0 R}{\mu_0 N} \text{tg}(\phi_2) = (0.023 \pm 0.004) \text{ А}$$

$$I_{\text{абс}} = CUn = (28.8 \pm 0.16) \cdot 10^6 \text{ ед.СГС}$$

$$c = 10 \frac{[I]_{\text{абс}}}{[I]_{\text{СИ}}} = (2.6 \pm 0.6) \cdot 10^{10} \text{ см/с} \quad (12)$$

4 Выводы

1. Измерили горизонтальную составляющую магнитного поля Земли: $B_0 = (1.47 \pm 0.08) \cdot 10^{-5}$ Тл. Для Москвы горизонтальную составляющую можно принять за $2 \cdot 10^{-5}$ Тл, однако на это значение влияет множество побочных факторов: экранирование металлоконструкциями, наводимые проводкой поля. Поэтому, полученное значение можно назвать значением магнитного поля в окрестности

лабораторной установки.

2. Определили связь между единицами тока в СГС и СИ, получили значение скорости света в СГС. Наше значение: $c = (2.6 \pm 0.6) \cdot 10^{10}$ см/с, а эталонное: $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с. Получили значение совпадающее с теоретическим в пределах погрешности.