

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.1.1

Магнитометр

Пилюгин Л. С.  
Б02-212

Победин Н. К.  
Б02-212

4 октября 2023 г.

# 1 Аннотация

**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.

## 2 Теоритические сведения

Магнитометром называют прибор для магнитных измерений, например: компас, теодолит, веберметр и пр. С помощью магнитометров измеряют намагниченность ферромагнетиков, напряжённость магнитных полей, исследуют магнитные аномалии. Разработаны магнитометры различных конструкций: магнитостатические, электромагнитные, магнито-динамические, индукционные, резонансные. Эталонные магнитометры позволяют измерять горизонтальную и вертикальную составляющие напряжённости магнитного поля Земли с точностью  $10^{-6}$  Э.

## 3 Оборудование

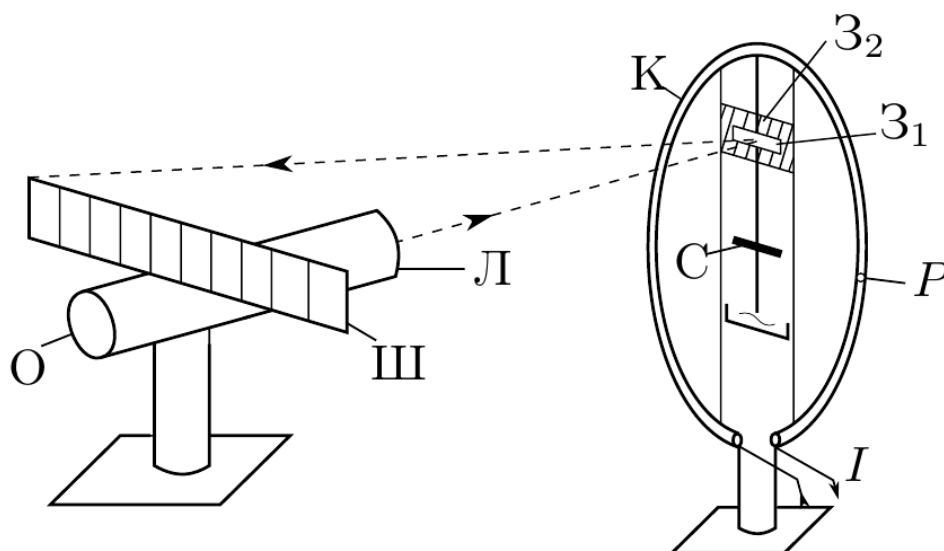


Рис. 1. Схема магнитометра

Магнитометр состоит из нескольких последовательно соединённых круговых витков К, расположенных вертикально. В центре кольца К радиусом  $R$  на тонкой неупругой вертикальной нити подвешена короткая магнитная стрелка С. 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  $\vec{B}_0$ .

Прибор настраивают с помощью световых зайчиков, отражённых от двух зеркал:  $Z_1$ , прикреплённого к стрелке (подвижный зайчик), и  $Z_2$ , расположенного в плоскости кольца

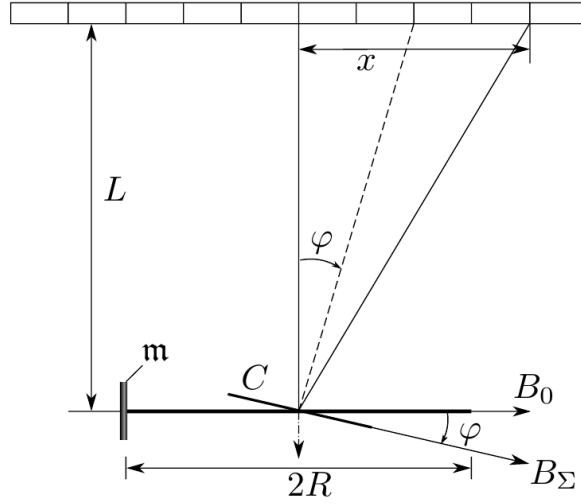


Рис. 2. Схема измерения угла отклонения магнитной стрелки

К и жёстко связанного с ним (неподвижный зайчик). Оба зеркала освещаются одним и тем же осветителем О. Вращением кольца вокруг вертикальной оси можно совместить оба зайчика. При этом плоскость витков совпадает с плоскостью магнитного меридиана. При появлении дополнительного горизонтального магнитного поля  $\vec{B}_\perp$  стрелка С установится по равнодействующей обоих полей  $\vec{B}_\Sigma$ . В нашей установке дополнительное поле может быть создано либо малым ферромагнитным стержнем, расположенным на кольце на его горизонтальном диаметре, либо током, проходящим по кольцу. В обоих случаях дополнительное поле можно считать однородным, так как размеры стрелки много меньше радиуса кольца.

Поле намагниченного стержня вдали от него может быть приближённо вычислено как поле точечного диполя:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left( 3 \frac{(\vec{m} \cdot \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right)$$

На оси, перпендикулярной стержню

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m}{R^3}$$

$R$  — радиус кольца.

Магнитное поле в центре кольца с током  $I$

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

$$B_\perp = B_0 \operatorname{tg} \varphi$$

Для определения горизонтальной составляющей земного магнитного поля  $B_0$  тонкий короткий намагниченный стержень устанавливается в отверстие Р на горизонтальном диаметре кольца. Измерив тангенс угла отклонения стрелки

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

можно рассчитать  $B_0$ .

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

$$M_{\text{мех}} = mB_0 \sin \alpha \approx mB_0 \alpha$$

Стержень с моментом инерции  $J$  будет совершать крутильные колебания с периодом

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mB_0}}$$

Момент инерции цилиндрического стержня относительно оси вращения

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

$m$  — масса стержня,  $l$  — длина,  $r$  — радиус.

Тогда

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

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 измерять непосредственно вблизи магнитометра. Кроме того, для обеспечения максимальной однородности магнитного поля в области измерений следует устранить (удалить на максимальное расстояние) возможные источники сильного магнитного поля: источники питания, токонесущие провода, сотовые телефоны, металлические предметы и т. п.

Ток в цепи кольца можно измерить двумя независимыми способами: по магнитному действию тока на стрелку магнитометра и по заряду, протекающему через цепь в единицу времени. Первый способ измерения соответствует тому, как эталон тока определён в системе СИ, а второй в гауссовой системе (СГС). По отношению результатов этих измерений можно определить электродинамическую постоянную  $c$ .

Пропуская некоторый ток через витки магнитометра, измерим тангенс угла отклонения стрелки  $\text{tg } \varphi_2 = x_2/2L$  и

$$I = \frac{2B_0 R}{\mu_0 N} \text{tg } \varphi_2$$

Величина  $A = 2B_0 R/\mu_0 N$  является постоянной прибора в данном месте земной поверхности (точнее, в данном месте комнаты — с учётом многочисленных сторонних источников магнитного поля).

Тот же ток можно измерить абсолютным образом по прошедшему в единицу времени заряду, что соответствует определению эталона тока в гауссовой системе (СГС). Если разрядить конденсатор известной ёмкости  $C$ , заряженный до напряжения  $U$ , через витки, то через них протечёт заряд  $q = CU$ . Если  $\nu$  раз в секунду последовательно заряжать конденсатор от источника и разряжать через витки, то через них за секунду протечёт заряд  $CU\nu$ , Средний ток. Средний ток, прошедший через витки, равен при этом

$$I = CU\nu$$

Таким образом, абсолютное измерение тока сводится к нахождению величин  $C$  и  $U$ , которые тоже могут быть определены абсолютным образом. Так, ёмкость плоского конденсатора можно вычислить из его размеров, то есть опираясь только на единицу длины. Разность потенциалов также может быть определена абсолютным образом, например, через силу, действующую на пластину заряженного конденсатора, как это делается в абсолютном вольтметре. Мы, однако, не будем полностью проводить эту программу, а ограничимся только указанием на возможность её выполнения.

Итак, для вычисления абсолютного значения тока необходимо измерить напряжение  $U$  на конденсаторе известной ёмкости  $C$ . Напряжение необходимо выразить в единицах СГС (  $1 \text{ В} \approx \frac{1}{300} \text{ ед. СГС}$  ). Ёмкость конденсатора должна быть выражена в сантиметрах (  $1 \text{ Ф} \approx 9 \cdot 10^{11} \text{ см}$  ).

По отношению численных значений одного и того же тока, выраженных в единицах СИ и СГС (гауссовой) , можно определить значение электродинамической постоянной:

$$c \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right] = \frac{1}{10} \frac{I_{[\text{СГС}]}}{I_{[\text{СИ}]}}$$

## 4 Результаты измерений

$$m = (58800 \pm 5) \cdot 10^{-4} \text{ г}$$

$$L = 122,0 \pm 0,5 \text{ см}$$

$$T = 11,4 \pm 0,5 \text{ с}$$

$$l = 4,000 \pm 0,010 \text{ см}$$

$$r = 2,50 \pm 0,10 \text{ мм}$$

$$R = 20,0 \pm 0,5 \text{ см}$$

$$x_1 = 14,5 \pm 1,0 \text{ см}$$

$$x_2 = (95 \pm 7) \cdot 10^{-4} \text{ А}$$

$$B_0 = (71 \pm 5) \cdot 10^{-7} \text{ Тл}$$

$$C = 9,00 \pm 0,18 \cdot 10^5 \text{ см}$$

$$U = 0,3 \text{ ед СГС}$$

$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

$$I_{[\text{СГС}]} = (135 \pm 3) \cdot 10^5 \text{ ед СГС}$$

$$I_1 = (95 \pm 7) \cdot 10^{-4} \text{ А}$$

$$I_2 = (110 \pm 8) \cdot 10^{-4} \text{ А}$$

$$c = 0,2 \frac{I_{[\text{СГС}]}}{I_1 + I_2} = (132 \pm 9) \cdot 10^8 \text{ см/с} = 0,44c_0$$

Значение совпало по порядку, но все же отличается от  $c$ . Это может быть связано с изменением поля в момент измерения части 2 и тем, что луч, формирующий зайчик не перпендикулярен линейке.

## 5 Вывод

Были измерены горизонтальная составляющая магнитного поля  $B_0$  и постоянная  $c$ .  $B_0$  хорошо согласуется со справочными данными, а  $c$  получилась меньше более, чем в 2 раза. Это может быть связано с несовершенством установки и изменением поля во время измерений.