

## Измерение осевого магнитного поля наэлектризованного соленоида

### Цель работы

Целью работы является изучение магнитного поля соленоида

### Метод экспериментального исследования явления

В работе с помощью датчика магнитного поля измеряется осевое магнитное поле наэлектризованного соленоида.

### Теория

Особый интерес представляет магнитное поле внутри соленоида, длина которого значительно превосходит его диаметр. Внутри такого соленоида магнитная индукция имеет повсюду одно и то же направление, параллельное оси соленоида, и значит, линии поля параллельны между собой.

Применим теорему о циркуляции вектора  $\vec{B}$  ( $\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 \sum I_i$ ) для вычисления простейшего магнитного поля – бесконечно длинного соленоида, представляющего собой тонкий провод, намотанный плотно виток к витку на цилиндрический каркас (рис. 1).

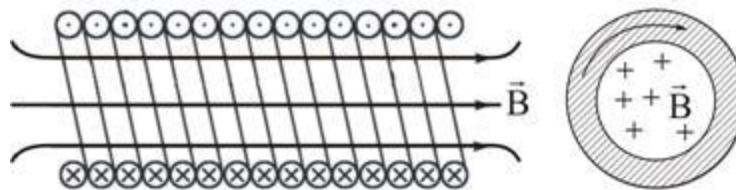


Рис. 1

*Соленоид можно представить в виде системы одинаковых круговых токов с общей прямой осью.*

Бесконечно длинный соленоид симметричен любой, перпендикулярной к его оси плоскости. Взятые попарно (рис. 2), симметричные относительно такой плоскости витки создают поле, в котором вектор  $\vec{B}$  перпендикулярен плоскости витка, т.е. линии магнитной индукции имеют направление параллельное оси соленоида внутри и вне его.

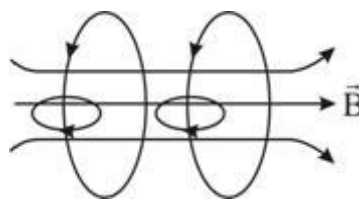


Рис. 2

Из параллельности вектора  $\vec{B}$  оси соленоида вытекает, что поле как внутри, так и вне соленоида должно быть однородным.

Возьмём воображаемый прямоугольный контур 1–2–3–4–1 и разместим его в соленоиде, как показано на рисунке 3.

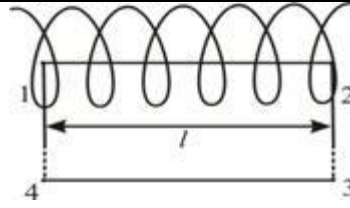


Рис. 3

$$\oint_{\mathcal{L}} B_i dl = \int_1^2 B_i dl + \int_2^3 B_i dl + \int_3^4 B_i dl + \int_4^1 B_i dl.$$

Второй и четвёртый интегралы равны нулю, т.к. вектор  $\vec{B}$  перпендикулярен направлению обхода, т.е.  $B_i = 0$ .

Возьмём участок 3–4 – на большом расстоянии от соленоида, где поле стремится к нулю; и пренебрежём третьим интегралом, тогда

$$\oint B_i dl = \int_1^2 B_i dl = \mu\mu_0 \sum I_i,$$

где  $B_i = B$  – магнитная индукция на участке 1–2 – внутри соленоида,  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества.

Если отрезок 1–2 внутри соленоида, контур охватывает ток:

$$nlI = \sum I_i,$$

где  $n$  – число витков на единицу длины,  $I$  – ток в соленоиде (в проводнике).

Тогда магнитная индукция **внутри соленоида**:

$$B = \mu\mu_0 nI. \quad (1)$$

**Вне соленоида:**

$$\sum I_i = 0 \quad \text{и} \quad \oint B_i dl = Bl = 0, \quad \text{т.е.} \quad B = 0.$$

Бесконечно длинный соленоид аналогичен плоскому конденсатору – и тут, и там поле однородно и сосредоточено внутри.

Произведение  $nI$  – называется *число ампер витков на метр*.

**У конца полубесконечного соленоида**, на его оси магнитная индукция равна:

$$B = \frac{1}{2} \mu\mu_0 nI. \quad (2)$$

Практически, если длина соленоида много больше, чем его диаметр, формула (1) справедлива для точек вблизи середины, формула (2) для точек около конца.

Если же катушка короткая, что обычно и бывает на практике, то магнитная индукция в любой точке  $A$ , лежащей на оси соленоида, направлена вдоль оси (по правилу буравчика) и численно равна алгебраической сумме индукций магнитных полей создаваемых в точке  $A$  всеми витками. В этом случае имеем:

- В точке, лежащей на середине оси соленоида магнитное поле будет максимальным:

$$B_{\max} = \mu_0 \mu_m I \frac{L}{\sqrt{4R^2 + L^2}}, \quad (3)$$

где  $L$  – длина соленоида,  $R$  – радиус витков.

- В произвольной точке конечного соленоида (рис. 4) магнитную индукцию можно найти по формуле

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_m I (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (4)$$

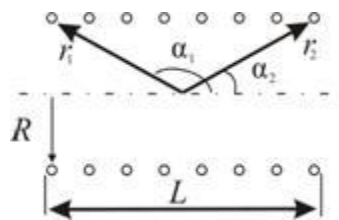


Рис. 4

На рисунке 5 изображены силовые линии магнитного поля  $\vec{B}$ : а) металлического стержня; б) соленоида; в) железные опилки, рассыпанные на листе бумаги, помещенной над магнитом, стремятся вытянуться вдоль силовых линий; г) магнитные полюсы соленоида.

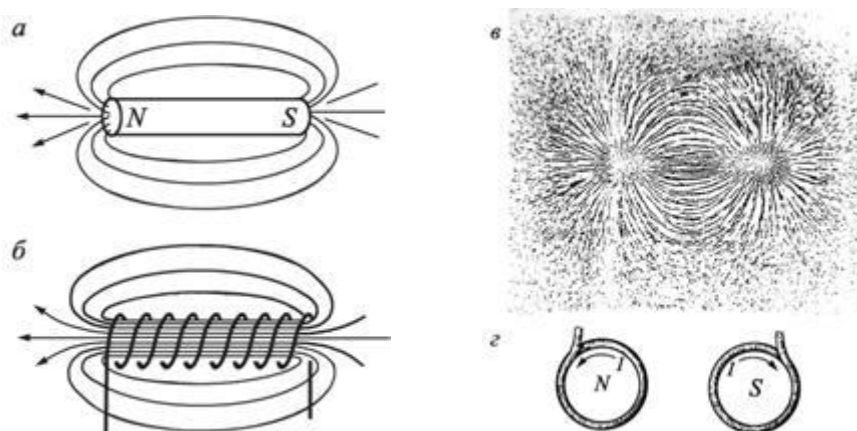


Рис. 5

### Контрольные вопросы

1. Как формируется магнитное поле вокруг соленоида?
2. Как изменяется магнитное поле соленоида от расстояния?

### Оборудование экспериментальной установки

Датчик магнитного поля:  
Соленоид.  
Линейка измерительная.



### Параметры экспериментальной установки

Длительность проведения эксперимента

Весь цикл измерений может быть проведен за 5–10 мин.

На обсуждение содержания эксперимента и его результатов, ответы на вопросы во время выполнения измерений и после их окончания отводится 10–15 мин.

Точность измерений

При строгом следовании рекомендациям разделов «Монтаж и настройка», «Подготовка приборов» и «Методика выполнения эксперимента» данный эксперимент позволяет измерить величину индукции магнитного поля постоянного магнита с точностью до 0,01 мкТл.

Техника безопасности

Во время проведения эксперимента необходимо соблюдать все правила техники безопасности, указанные для персонального компьютера как электрического оборудования.

Используемое измерительное оборудование (система сбора данных и датчик магнитного поля) экспериментальной установки рассчитано на питание от низковольтного напряжения, не представляющего опасности для человека.

Данный прибор не подходит для очень маленьких магнитных полей, как например, заряд геомагнитного поля

Не будет эффекта магнетизма в области магнитного поля, т.к. существование этих материалов изменит распределение магнитного поля

Соленоид должен быть постоянно подключен к источнику тока.

Данный прибор не имеет защиты от влаги. Будьте внимательны.

Обеспечение наглядности результатов эксперимента

Измерительную линейку, соленоид и датчик магнитного поля следует располагать на демонстрационном столе в месте, позволяющем обеспечить хороший обзор проведения эксперимента для каждого ученика.

Для обеспечения удобства управления демонстрацией эксперимента компьютер необходимо располагать достаточно близко от установки (на расстоянии не более 1,5 м).

Экран компьютера рекомендуется продублировать с помощью проектора

### Монтаж и настройка

Соедините экспериментальную установку, как представлено на картинке

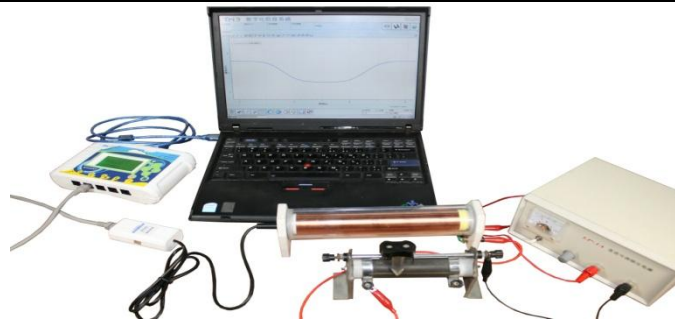


Рисунок экспериментальной установки

Измерительная линейка располагается на демонстрационном столе так, чтобы ее шкала была обращена к учащимся. Перед линейкой вдоль нее устанавливаются соленоид и датчик магнитного поля. Для удобства измерения расстояния край соленоида совмещается с одним из делений шкалы линейки. Датчик перемещается вдоль линейки.

### Подготовка приборов

Перед началом проведения эксперимента необходимо выполнить следующее:

Внимательно прочитайте инструкции, подготовьте необходимое оборудование, соберите установку в соответствии с разделом «Монтаж и настройка».

Запустите программу **SensorLab ПО**.

Подключите датчик магнитного поля к аналоговому входу системы сбора данных.

Установите чувствительность датчика магнитного поля 6,4 мТл. Поместите датчик на расстоянии 0,5 см от края полюса магнита, определите значение магнитной индукции. Если ее величина не превышает 0,3 мТл, переключите датчик на более чувствительную шкалу 0,3 мТл.

### Методика выполнения эксперимента

#### Проведение измерений

Соедините экспериментальную установку, как представлено на картинке

Откройте экспериментальное программное обеспечение и создайте новый эксперимент

Создайте новую папку

Нажмите кнопку «Добавить линию » и добавьте график соотношения магнитного поля и разницы расстояния.

Подайте электрический ток к соленоиду и положите измерительную головку датчика магнитного поля на оси на расстоянии 5 см. от одной стороны соленоида

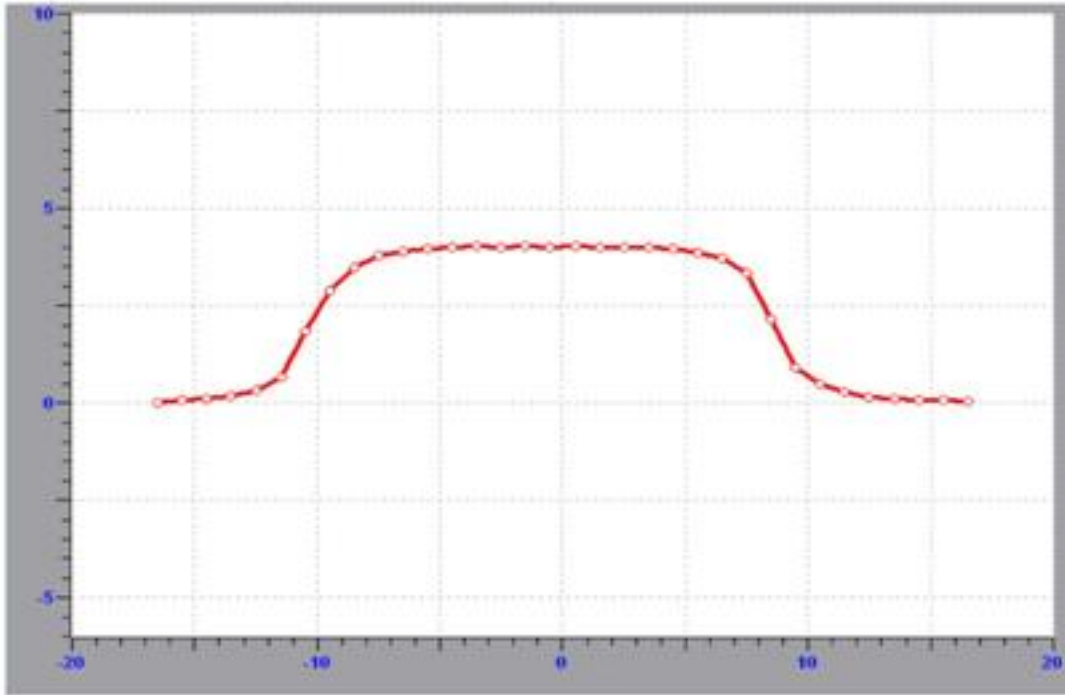
Нажмите клавишу «Ручной сбор» для начала сбора информации

Передвиньте датчик на 1 см от источника света

Повторяйте этапы 6 и 7 до тех пор, пока головка не будет на расстоянии 5 см от другой стороны соленоида

#### Анализ результатов

После завершения измерений на графике будет отображена экспериментальная зависимость индукции магнитного поля от расстояния до полюса постоянного магнита, а также аппроксимация измеренных данных степенной функцией. Никаких дополнительных действий для вывода результатов анализа не требуется.



Распределение магнитного поля в соленоиде

## Справка

### Принцип работы датчика магнитного поля

Принцип действия датчика магнитного поля, используемого в данной работе, основывается на эффекте Холла. Если на проводник с постоянным током воздействовать магнитным полем, перпендикулярным направлению тока, то в этом проводнике возникает в поперечном направлении разность потенциалов (ЭДС Холла). Это происходит в результате воздействия силы Лоренца на движущиеся в магнитном поле электроны. Возникающее при этом электрическое поле вектора  $\vec{E}$  прямо пропорционально векторному произведению силы тока вектора  $\vec{I}$  в проводнике на величину магнитной индукции вектора  $\vec{B}$ :

$$\vec{E} = R_H [\vec{I} \vec{B}]$$

где  $R_H$  — коэффициент Холла.

Аналоговые датчики Холла широко используются в промышленности для определения градаций магнитного поля, а также для измерения любой физической величины, однозначно связанной с магнитным полем. Так, например, с их помощью можно бесконтактно измерять силу тока в проводнике по формирующемуся вокруг него магнитному полю.

Цифровые датчики Холла реагируют на превышение определенного уровня индукции магнитного поля и на выходе дают цифровой сигнал TRUE/FALSE. Они используются также в качестве бесконтактных датчиков положения.

Необходимо отметить, что работа датчиков Холла зависит от их ориентации относительно линий магнитного поля.