

## Лабораторная работа № 4.1

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

#### 4.1.1. Цель работы

Целью лабораторной работы является знакомство с моделированием магнитного поля от различных источников и экспериментальное определение величины магнитной постоянной.

#### 4.1.2. Краткая теория

Магнитное поле (МП) создается проводниками с током, движущимися электрическими заряженными частицами и намагниченными телами.

Силовой характеристикой МП служит вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ .

*Индукция МП* численно равна магнитной силе, которая действует на единичный положительный точечный заряд, помещенный в данную точку пространства и движущийся с единичной скоростью перпендикулярно направлению МП.

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}_M}{q_+ V_{\perp}}. \quad (4.1.1)$$

МП может быть задано графически с помощью линий магнитной индукции.

*Линии магнитной индукции* – линии, в любой точке которых вектор индукции МП направлен по касательной. Эти линии всегда замкнуты и никогда не пересекаются.

Для МП справедлив *принцип суперпозиции*: магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами, равна векторной сумме магнитных индукции полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом в отдельности

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^N \vec{B}_i. \quad (4.1.2)$$

Индукция МП, создаваемого элементарным отрезком  $d\vec{l}$  с током (элементом тока) в вакууме, определяется *законом Био-Савара-Лапласа*:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^2} [I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}]. \quad (4.1.3)$$

С учетом среды:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi r^2} [I \cdot d\vec{l} \times \vec{r}], \quad (4.1.4)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$\mu$  – магнитная проницаемость окружающей среды.

*Магнитная проницаемость окружающей среды* – скалярная безразмерная физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция результирующего магнитного поля в веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме.

$$\mu = \frac{B_{\text{вещц}}}{B_{\text{вак}}}. \quad (4.1.5)$$

Закон Био-Савара-Лапласа и принцип суперпозиции позволяют получить для индукции МП прямого бесконечно длинного проводника с током формулу

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r}, \quad (4.1.6)$$

где  $r$  – кратчайшее расстояние от проводника с током до точки, в которой определяется индукция.

Индукция МП создаваемого круговым витком радиуса  $R$  с током  $I$  в произвольной точке оси витка определяется по формуле:

$$B = \frac{\mu\mu_0 2 p_m}{4\pi(R^2 + r^2)^{3/2}}, \quad (4.1.7)$$

где  $\vec{p}_m = IS\vec{n}$  – магнитный момент витка площадью  $S$ ;

$\vec{n}$  – вектор нормали.

Циркуляция вектора индукции МП, создаваемого в вакууме системой стационарных токов, равна произведению  $\mu_0$  на алгебраическую сумму токов, охватываемых контуром интегрирования.

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i. \quad (4.1.8)$$

Соленоидом называется длинная цилиндрическая катушка с током, состоящая из большого числа витков проволоки, расположенных вплотную друг к другу.

Из теоремы о циркуляции можно получить формулу для индукции МП поля внутри бесконечно длинного соленоида

$$B = \mu\mu_0 nI, \quad (4.1.9)$$

где  $n = N/l$  – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида. Такое поле является однородным.

Формула (4.1.9) справедлива также для соленоида конечных размеров, при выполнении условия  $l \geq 10D$ , где  $l$  – длина соленоида, а  $D$  – его диаметр.

### 4.1.3. Порядок выполнения работы

Запустите программу «Открытая физика 1.1». Выберите «Электричество и магнетизм».

#### 1. Исследование магнитного поля прямого тока

Выберите «Магнитное поле прямого тока». Нажмите сверху внутреннего окна кнопку с изображением страницы. Прочитайте краткие теоретические сведения. Закройте окно теории, нажав кнопку с крестом в правом верхнем углу внутреннего окна.

Рассмотрите внимательно рисунок 4.1.1. Найдите регулятор с движком, задающий силу тока и запишите его в соответствующую таблицу в отчете (см. с. 6).



Рис. 4.1.1. Магнитное поле прямого тока

Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Установите значение тока  $I_1$ , указанное в таблице 4.1.1 для вашей бригады, и запишите его под заголовком табл. 4.1.2. Наблюдайте линии индукции МП прямого провода и зарисуйте их в отчет.

Таблица 4.1.1

**Значения величины тока**

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_1, A$	5	-5	-15	-20	10	-15	5	-10
$I_2, A$	15	-10	-10	5	20	-20	10	5

Удерживая нажатой левую кнопку мыши, перемещайте указатель мыши, который имеет форму руки, вблизи провода в горизонтальном направлении, останавливаясь на расстояниях  $r$  от оси провода, указанных в табл. 4.1.2. Значения индукции  $B_1$  в этих точках запишите в эту же таблицу.

Повторите измерения для другого значения тока  $I_2$  (см. табл. 4.1.1) и запишите  $B_2$  в табл. 4.1.2.

**Результаты измерений**

$I_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ А,}$

$I_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ А}$

$r, \text{ см}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$1/r, \text{ м}^{-1}$									
$B_1, \text{ мкТл}$									
$B_2, \text{ мкТл}$									

**2. Исследование магнитного поля витка с током**

Закройте окно эксперимента 1, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите, дважды щелкнув мышью, следующий эксперимент «Магнитное поле кругового витка с током» (рис. 4.1.2). Прочитайте краткие теоретические сведения.

Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Установите величину тока  $I_1$ , указанную в таблице 4.1.1 для вашей бригады, и запишите его под заголовком «табл. 4.1.3». Наблюдайте линии индукции МП кругового витка (контура) и зарисуйте их в конспект.

Удерживая нажатой левую кнопку мыши, перемещайте указатель мыши («руку») вдоль оси витка, останавливаясь на расстояниях  $r$  от его центра, указанных в таблице 4.1.2. Значения индукции  $B_1$  в этих точках запишите в табл. 4.1.3.

Повторите измерения для тока  $I_2$  (см. табл. 4.1.1) и запишите  $B_2$  в табл. 4.1.3. Значение радиуса витка  $R$  из окна эксперимента запишите под заголовком «табл. 4.1.3».

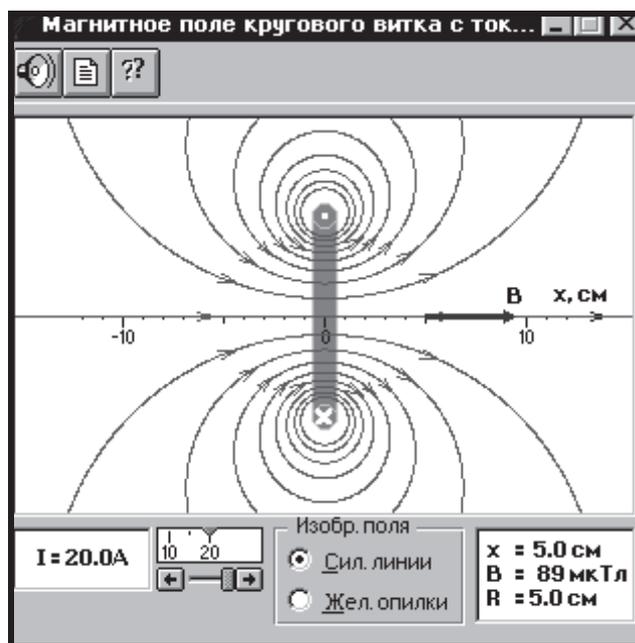


Рис. 4.1.2. Магнитное поле кругового витка с током

Таблица 4.1.3

### Результаты измерений

$$I_1 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A,}$$

$$I_2 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$$

$$R = \underline{\hspace{2cm}} \text{ см}$$

$r, \text{ см}$	2	3	4	5	6	7	8	9	9,9
$1/(R^2+r^2)^{3/2}, \text{ м}^{-3}$									
$B_1, \text{ мкТл}$									
$B_2, \text{ мкТл}$									

### 3. Исследование магнитного поля соленоида

Закройте окно эксперимента 2, нажав кнопку в правом верхнем углу внутреннего окна. Запустите, дважды щелкнув мышью, следующий эксперимент: «Магнитное поле соленоида» (рис. 4.1.3).

Зацепив мышью, перемещайте движок регулятора тока. Зафиксируйте величину тока  $I_1$ , указанную в табл. 4.1.1 для вашей бригады. Наблюдайте линии индукции МП соленоида и зарисуйте их в конспект.

Удерживая нажатой левую кнопку мыши, перемещайте указатель мыши («руку») по оси соленоида, останавливаясь на расстояниях  $x$  от центра соленоида, указанных в табл. 4.1.4. Значения индукции  $B_1$  в этих точках запишите в эту же таблицу.

Повторите измерения для тока  $I_2$  (см. табл. 4.1.1) и запишите  $B_2$ . Запишите под заголовком табл. 4.1.4 значения радиуса соленоида  $R$  и концентрации витков  $n$ .

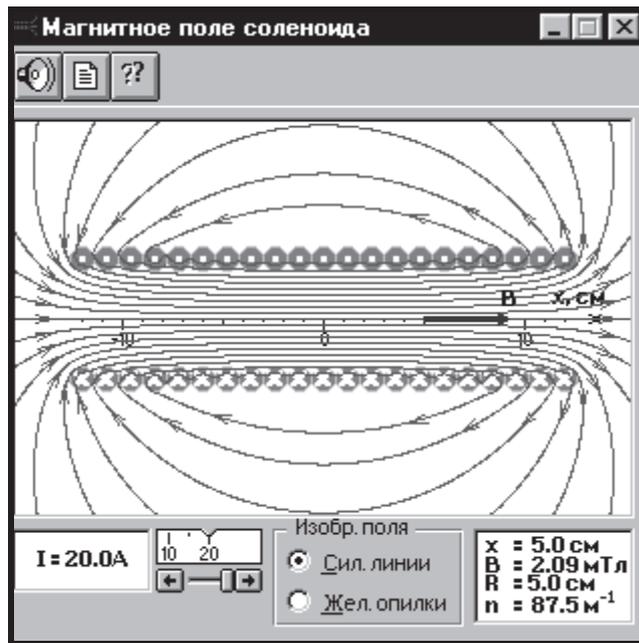


Рис. 4.1.3. Магнитное поле соленоида

Таблица 4.1.4

**Результаты измерений**

$R = \underline{\hspace{2cm}}$  см;  $n = \underline{\hspace{2cm}}$  м<sup>-1</sup>

$x$ , см	2	3	4	5	6	7	8	9	9,9
$B_1$ , мТл									
$B_2$ , мТл									

**4.1.4. Обработка результатов измерений**

1. Вычислите и запишите в таблицы 4.1.2, 4.1.3 значения для второй строки.
2. Постройте на одном листе графики зависимости индукции МП ( $B_1$  и  $B_2$ ) прямого провода с током от величины  $(1/r)$ .
3. По тангенсу угла наклона графиков (см. с. 7) рассчитайте два значения магнитной постоянной по формуле

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{I} \frac{\Delta(B)}{\Delta(1/r)} \quad (4.1.10)$$

4. Постройте на втором листе графики зависимости индукции МП ( $B_1$  и  $B_2$ ) на оси витка с током от величины  $[1/(R^2+r^2)^{3/2}]$ .

5. По тангенсу угла наклона графиков (см. с. 7) рассчитайте два значения магнитной постоянной по формуле

$$\mu_0 = \frac{2\pi}{IS} \frac{\Delta(B)}{\Delta\left(1/(R^2 + r^2)^{3/2}\right)}, \quad (4.1.11)$$

где  $S = \pi R^2$  – площадь витка.

6. Вычислите для каждого эксперимента среднее значение магнитной постоянной и сравните с табличным значением, равным  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

7. Рассчитайте среднюю абсолютную и относительную погрешности для обоих экспериментов и запишите ответы (см. с. 7–8).

8. На третьем листе постройте графики зависимости индукции МП ( $B_1$  и  $B_2$ ) на оси соленоида от расстояния  $x$  до его центра.

9. Для магнитного поля соленоида при каждом токе определите протяженность  $\Delta r$  области однородности, в которой индукция меняется не более, чем на 10 % от максимальной  $B_{\max}$ . Для этого вычислите  $0,9 \cdot B_{\max}$  и определите, какому интервалу значений  $x$  оно соответствует. Это и будет  $\Delta r$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите источники МП.
2. Что называется индукцией МП?
3. Как определяется направление вектора  $\vec{B}$  в данной точке пространства?
4. Сформулируйте принцип суперпозиции для вектора индукции.
5. Запишите закон Био-Савара-Лапласа.
6. Запишите и поясните теорему о циркуляции индукции МП.
7. Запишите формулу для индукции МП прямого бесконечно длинного проводника с током.
8. Как выглядят линии МП прямого проводника с током?
9. Запишите формулу для индукции МП на оси кругового витка с током.
10. Как направлен вектор индукции в центре витка с током?
11. Что такое соленоид и чему равна индукция МП внутри бесконечно длинного соленоида?
12. Является ли МП внутри соленоида однородным?