

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**ЗАДАЧА**

**ИЗУЧЕНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.  
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ**

**СПЕЦПРАКТИКУМ КАФЕДРЫ МАГНЕТИЗМА**

**МОСКВА 2017**

Составители: профессор Перов Н.С.  
снс Грановский С.А.  
снс Стрелков Н.В.  
снс Шапаева Т.Б.,  
асп. Макарова Л.А.,  
Шапаев Б.А.

## ИЗУЧЕНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Целью первой части настоящей задачи является численный расчет величин осевой и плоскостной компонент магнитного поля в зависимости от координат вдоль оси витка и в плоскости витка с током. Вычисления выполняются с помощью закона Био-Савара-Лапласа. Во второй части задачи экспериментально определяется постоянная катушки с помощью датчика Холла, экспериментально исследуется зависимость осевой и радиальной компонент магнитного поля от расстояния от центра катушки, а также экспериментально изучается поле катушек Гельмгольца.

### **Магнитное поле. Основные понятия.**

Магнитное поле особый вид материи, который проявляется в действии на магнитную стрелку, на рамку с током и на движущийся заряд. Магнитное поле создается проводником с током, движущимися зарядами, намагниченными телами, а также переменным электрическим полем.

Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции  $B$ . Для наглядного изображения стационарных магнитных полей используют силовые линии. Силовыми линиями магнитного поля называются кривые, проведённые в пространстве так, что в каждой точке поля касательная к такой линии совпадает с направлением вектора  $B$  в этой точке. Эти кривые непрерывны. В отличие от потенциального электрического поля, где силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных, магнитное поле является вихревым: его силовые линии всегда замкнуты и не пересекаются друг с другом. Другими словами, магнитное поле не имеет магнитных зарядов как источников поля.

В отличие от электрического поля силовую характеристику магнитного поля по причинам исторического характера называют не

напряжённостью, а индукцией. Индукция магнитного поля – это векторная величина.

В системе СИ за единицу магнитной индукции тесла (Тл) принята индукция такого поля, в котором на проводник длиной 1 м с током 1 А действует сила 1 Н.

$$Tл = \frac{H}{A \cdot m} \quad (1)$$

В системе СГС за единицу магнитной индукции принят гаусс (Гс)  
 $1 Tл = 10^4 Гс$ .

Как и в случае электрического поля, картину магнитных силовых линий можно сделать «видимой». Для этого используют мелкие железные опилки, которые в магнитном поле намагничиваются и, подобно маленьким магнитным стрелкам, ориентируются вдоль силовых линий. На рисунке 1 приведены получаемые таким образом картины магнитных полей: а) поле постоянных магнитов, б) поле кругового тока и в) поле длинной катушки – соленоида.

Для расчёта магнитных полей, создаваемых заданными токами, нужно учесть, что индукция магнитного поля, создаваемого текущим по проводнику током, определяется совместным действием всех отдельных участков проводника. Магнитное поле удовлетворяет принципу суперпозиций, т.е. принципу независимого действия полей, учитывающему векторный характер магнитной индукции:

$$\vec{B} = \int d\vec{B} \quad (2)$$

где  $d\vec{B}$  – индукция магнитного поля, созданного элементом проводника  $dl$  с током  $I$  (рис. 2).

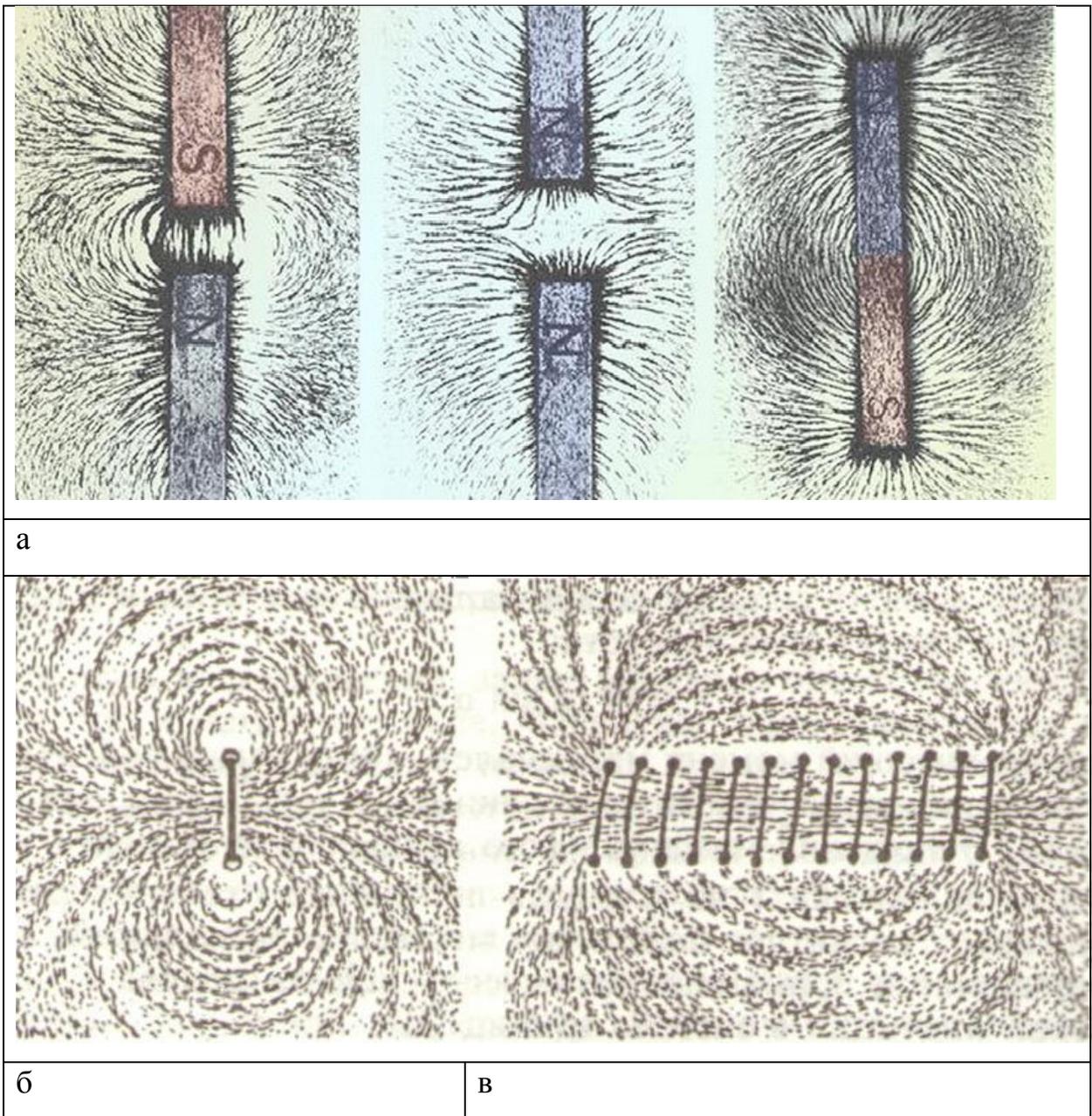


Рис. 1. Примеры визуализации магнитных полей: а – поле постоянных магнитов, б – поле витка с током, в – поле соленоида.

## Закон Био-Савара-Лапласа

Элемент проводника  $dl$  с током  $I$  создает в некоторой точке магнитное поле с индукцией

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3} \quad (3)$$

Где  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0=1,257 \cdot 10^{-6}$  Гн/м),  $r$  – радиус-вектор, проведенный из элемента  $dl$  проводника в данную точку пространства. На опыте невозможно осуществить отдельный участок тока, так что нельзя непосредственно измерить и создаваемое им поле. Измерить можно только суммарную индукцию магнитного поля, создаваемого всеми элементами замкнутого тока. Применяя закон Био-Савара-Лапласа к участкам проводника произвольной формы, можно рассчитать значение результирующей индукции магнитного поля. Следует заметить, что расчёт результирующей индукции магнитного поля с помощью закона Био-Савара-Лапласа выполняется наиболее просто, если поле, созданное проводником с током, обладает определённым типом симметрии. В отсутствие симметрии расчёт тоже возможен, но уже с использованием численных методов.

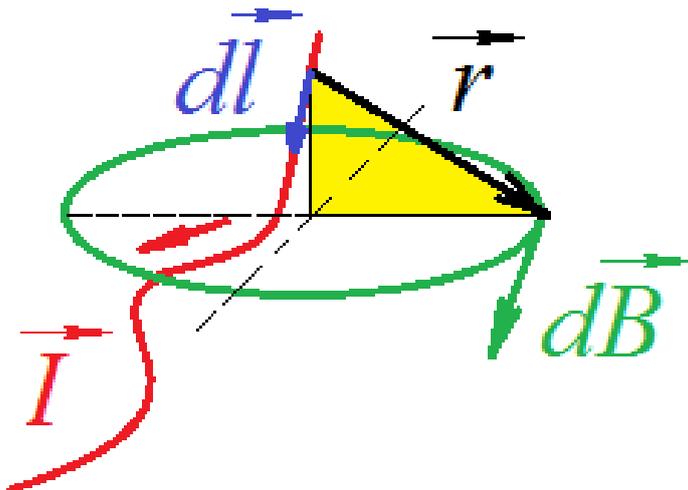


Рис.2. Элемент проводника  $dl$  с током  $I$  создает в точке, расположенной на расстоянии  $r$  от проводника, магнитное поле с индукцией  $dB$ .

### Магнитное поле прямого проводника с током

Используя закон Био-Савара-Лапласа (3) вычислим индукцию магнитного поля, создаваемого тонким бесконечным проводником, по которому протекает ток  $I$  (рис.3). Для этого найдём координаты векторов  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$  и подставим в выражение (3).

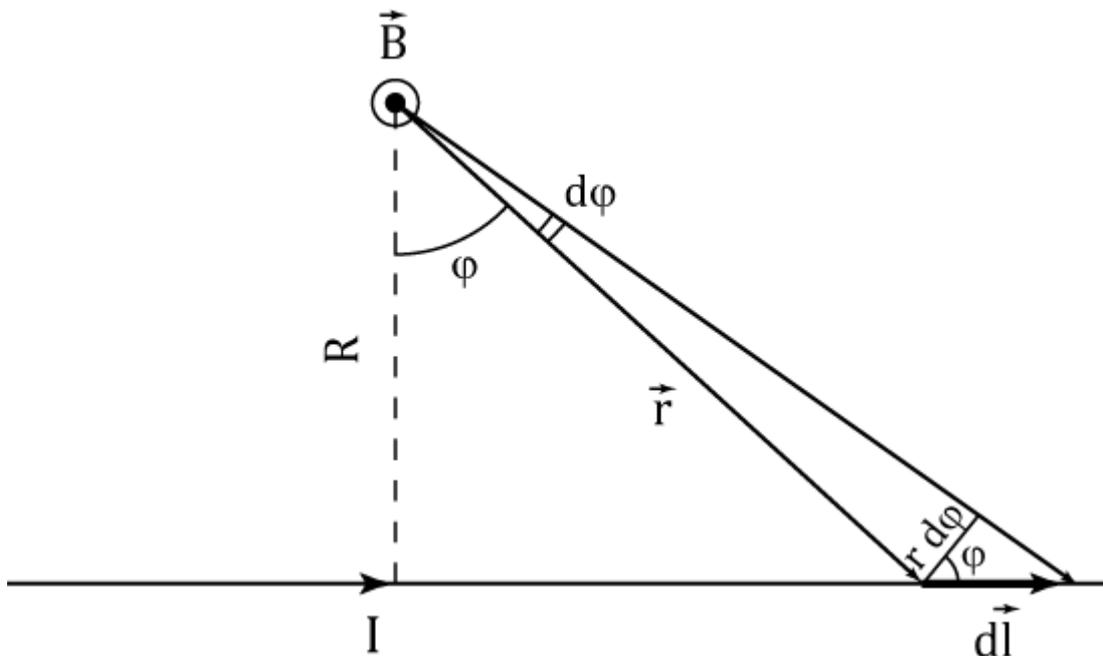


Рис. 3. Магнитное поле, создаваемое бесконечным проводником с током.

Имеем:

$$dl = \frac{R}{\cos^2 \varphi} d\varphi \text{ и } r = \frac{R}{\cos \varphi}. \quad (4)$$

После подстановки компонента вектора индукции магнитного поля, направленная перпендикулярно плоскости рисунка, имеет вид:

$$dB = \frac{\mu_0 I \cos \varphi}{4\pi R} d\varphi \quad (5)$$

Проинтегрировав  $dB$  по углу  $\varphi$  от  $-\frac{\pi}{2}$  до  $\frac{\pi}{2}$ , получим известное выражение для индукции, создаваемой проводником с током, на расстоянии  $R$  от него.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi d\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (6)$$

### Магнитное поле контура с током

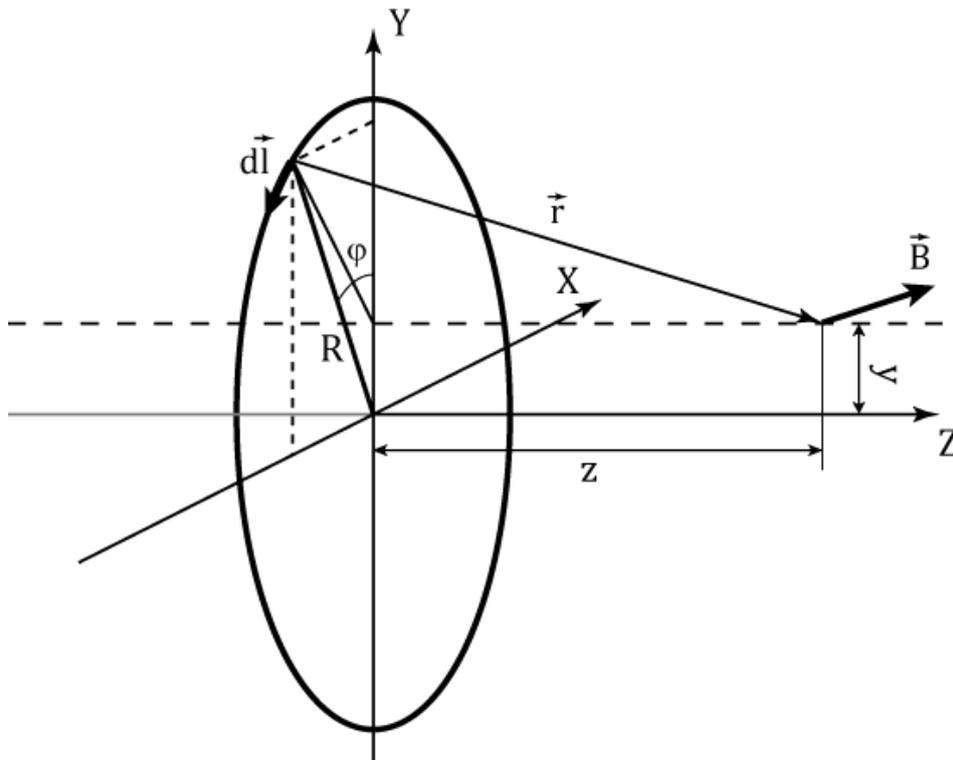


Рис. 4: Магнитное поле, создаваемое круговым током

Воспользуемся теперь законом Био-Савара-Лапласа для нахождения индукции магнитного поля, создаваемого круговым током на расстоянии  $z$  от плоскости кольца и расстоянии  $y$  от оси. На рис. 4 начало координат находится в центре кольца. Выражения для  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$  будут иметь вид:

$$d\vec{l} = \begin{pmatrix} -R \cos \varphi \\ -R \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix} d\varphi, \quad \vec{r} = \begin{pmatrix} R \sin \varphi \\ -(R \cos \varphi - y) \\ z \end{pmatrix} \quad (7)$$

Получим их векторное произведение:

$$[d\vec{l} \times \vec{r}] = \begin{pmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ -R \cos \varphi & -R \sin \varphi & 0 \\ R \sin \varphi & -(R \cos \varphi - y) & z \end{pmatrix} d\varphi = \begin{pmatrix} -Rz \sin \varphi \\ Rz \cos \varphi \\ R(R - y \cos \varphi) \end{pmatrix} d\varphi \quad (8)$$

Тогда компоненты вектора магнитной индукции имеют вид:

$$B_x(y, z) = -\frac{\mu_o IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin \varphi}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cos \varphi)^{3/2}} d\varphi \quad (9)$$

$$B_y(y, z) = \frac{\mu_o IRz}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cos \varphi)^{3/2}} d\varphi \quad (10)$$

$$B_z(y, z) = \frac{\mu_o IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R - y \cos \varphi}{(R^2 + y^2 + z^2 - 2Ry \cos \varphi)^{3/2}} d\varphi \quad (11)$$

Наиболее простые и наглядные результаты получаются для случая  $x=y=0$ ,  $z$  – произвольное число. В этом случае

$$B_x(0, z) = B_y(0, z) = 0,$$

$$B_z(0, z) = \frac{\mu_o IR^2}{4\pi(R^2 + z^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi} d\varphi = \frac{\mu_o IR^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (12)$$

На рис. 5 показаны зависимости компонент магнитной индукции  $B_y$  и  $B_z$  от координаты  $y$  для  $R=1$  м,  $z=2$  м,  $I=1$  А. Полученные значения рассчитаны по формулам (9 – 11) и нормированы на  $B = \frac{\mu_o I}{2\pi R}$  – величину  $B_z$  в точке  $(0,0,0)$ .

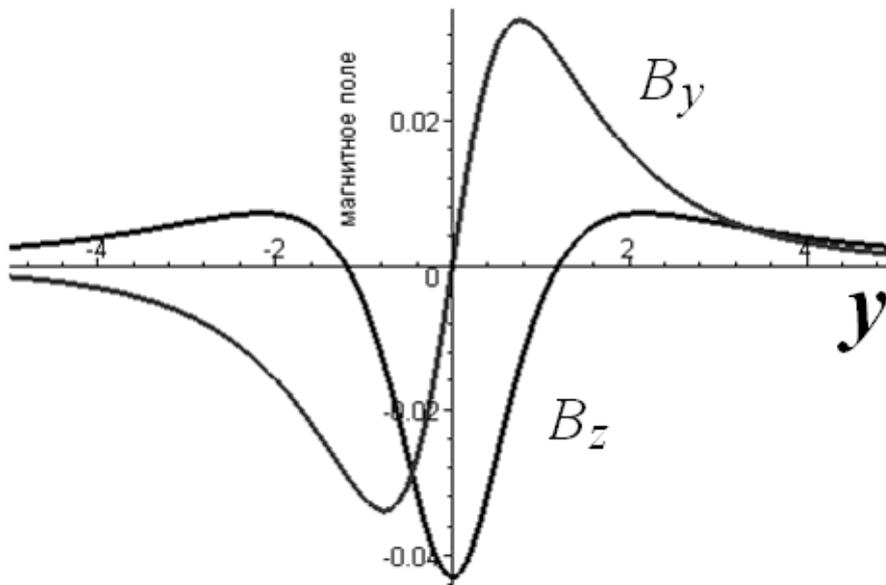


Рис.5. Магнитное поле кругового тока. Нормированные зависимости проекций магнитного поля  $B_y(y)$  и  $B_z(y)$ .

## Магнитное поле соленоида.

**Соленоид** – это цилиндрическая обмотка из провода, по которой протекает постоянный или переменный электрический ток. Обмотка может наноситься в один или несколько слоёв виток к витку. Если длина соленоида значительно превышает его диаметр, то поле, создаваемое постоянным током, сосредоточено внутри него и практически однородно.

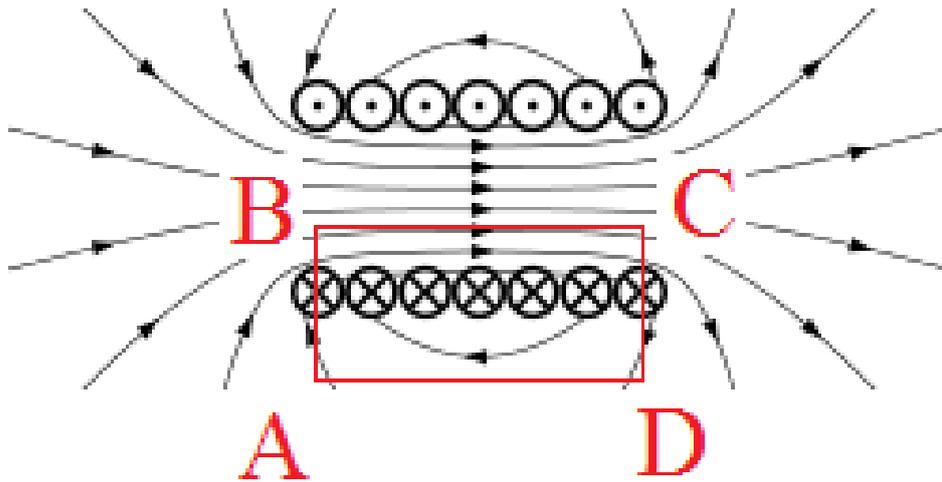


Рис. 6: Магнитное поле, создаваемое серией кольцевых токов

Для вычисления индукции магнитного поля  $\vec{B}$  внутри однослойного соленоида представим его в виде суперпозиции кольцевых токов лежащих на одной оси – оси соленоида (Рис. 6) и воспользуемся теоремой о циркуляции:

$$\oint_{ABCD} B_l dl = \int_{AB} B_l dl + \int_{BC} B_l dl + \int_{CD} B_l dl + \int_{DA} B_l dl = \mu_0 \sum_{i=1}^N I_i \quad (13)$$

Если пренебречь краевыми эффектами, то первое и третье слагаемые в формуле (13) будут равны нулю, так как магнитное поле перпендикулярно контуру и  $B_l=0$ . Если контур выбрать так, что  $AD$  будет лежать на большом расстоянии от соленоида, где поле стремится к нулю, то и четвёртое слагаемое в (13) также обратится в нуль. Тогда, учитывая приближение однородности поля, получим:

$$B_l L = \mu_0 NI \quad (14)$$

где  $L$  – длина соленоида,  $N$  – количество витков. Если ввести понятие плотности витков (число витков на единицу длины)  $n=N/L$ , то индукцию магнитного поля внутри соленоида (14) можно записать в виде:

$$B = \mu_0 nI \quad (15)$$

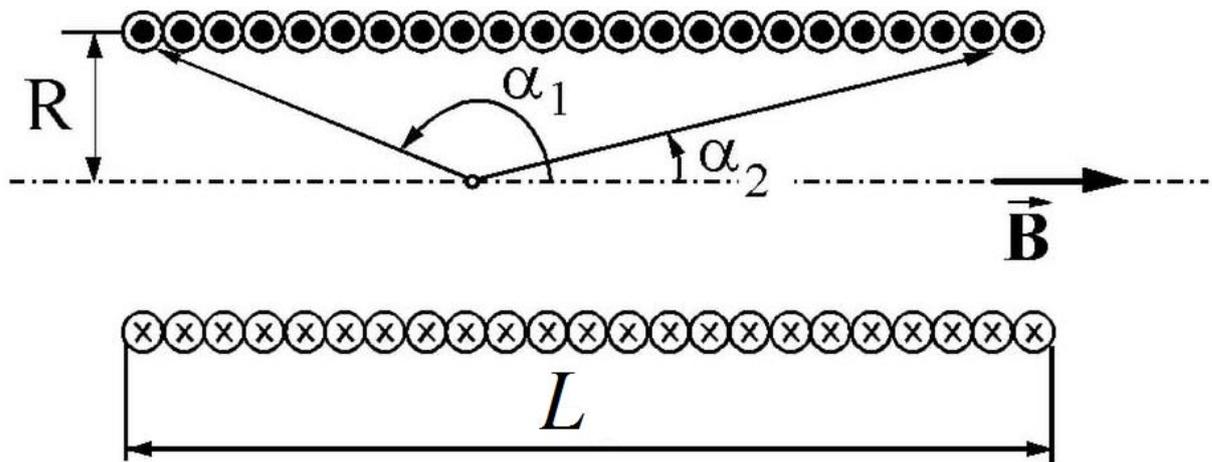


Рис. 7: Соленоид с произвольными размерами  $L$  и  $R$ .

Чтобы получить точное выражение для индукции магнитного поля в любой точке на оси конечного соленоида необходимо воспользоваться законом Био-Савара-Лапласа (Рис. 7), который приводит к следующему выражению:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 nI (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (16)$$

В частном случае, в середине соленоида, где магнитное поле максимально выражение для индукции будет иметь вид:

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 nIL}{\sqrt{4R^2 + L^2}} \quad (17)$$

где  $R$  – радиус соленоида. А на краю полубесконечного соленоида:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 nI \quad (18)$$

## Упражнение 1. Расчет компонент вектора магнитной индукции витка с током.

Войдите в программу для расчета индукции магнитного поля, расположенную по адресу: <http://magn.ru/prakt/online/coil.html>

1. Для заданного значения силы тока ( $I=1\text{A}$ ) и расстояния от прямолинейного проводника ( $R$ ), рассчитайте индукцию магнитного поля ( $B$ ). Величину  $R$  изменяем от 1 до 20 см с шагом 1 см. Постройте зависимость  $B(R)$ .
2. Для заданного значения силы тока ( $I=1\text{A}$ ), радиуса кольца ( $R=7,5\text{ см}$ ) и расстояния от центра кольца ( $z$ ), рассчитайте индукцию магнитного поля и постройте зависимость  $B(z)$  (12). Величину  $z$  изменяем от 0 до 10 см с шагом 1 см.
3. Для заданного значения силы тока ( $I=1\text{ A}$ ), радиуса кольца ( $R=7,5\text{ см}$ ) и расстояния от центра кольца ( $z$ ), постройте зависимости компонент магнитной индукции ( $B_z$  и  $B_y$ ) от расстояния от центра катушки ( $y$ ). Расчеты выполняем при  $z=0; 1; 2; 3; 4; 5$  и  $10\text{ см}$ .

## Упражнение 2. «Поле соленоида».

Войдите в программу для расчета индукции магнитного поля, расположенную по адресу: <http://magn.ru/prakt/online/solenoid.html>.

### 1. Поле бесконечного соленоида.

Для  $I=1\text{A}$  рассчитайте индукцию магнитного поля бесконечного соленоида для следующих величин:

А)  $n=1000\text{ м}^{-1}$ ; Б)  $n=500\text{ м}^{-1}$ ; В)  $n=2000\text{ м}^{-1}$ ; Г)  $n=4000\text{ м}^{-1}$ .

### 2. Расчет поля конечного соленоида.

Цель расчетов показать, как конфигурация соленоида влияет на поле внутри него. Моделируем поле соленоида с внутренним радиусом  $R=1\text{ см}$ , который содержит 120 витков, намотанных проводом толщиной 1 мм. Ток в соленоиде при всех конфигурациях  $I=1\text{A}$ . На рис. 8 показаны виды намотки, используемые для дальнейших расчетов.

Для конфигураций, описанных в пунктах А, Б, В1, Г1, Д и Е, получите распределение индукции магнитного поля внутри соленооида. Для всех случаев оцените однородность поля. Магнитное поле будем считать однородным в той области, где его индукция отличается менее чем на 10 % от максимального значения. Область однородности разных конфигураций сравниваем, сопоставляя отношение длины соленооида к длине области однородности.

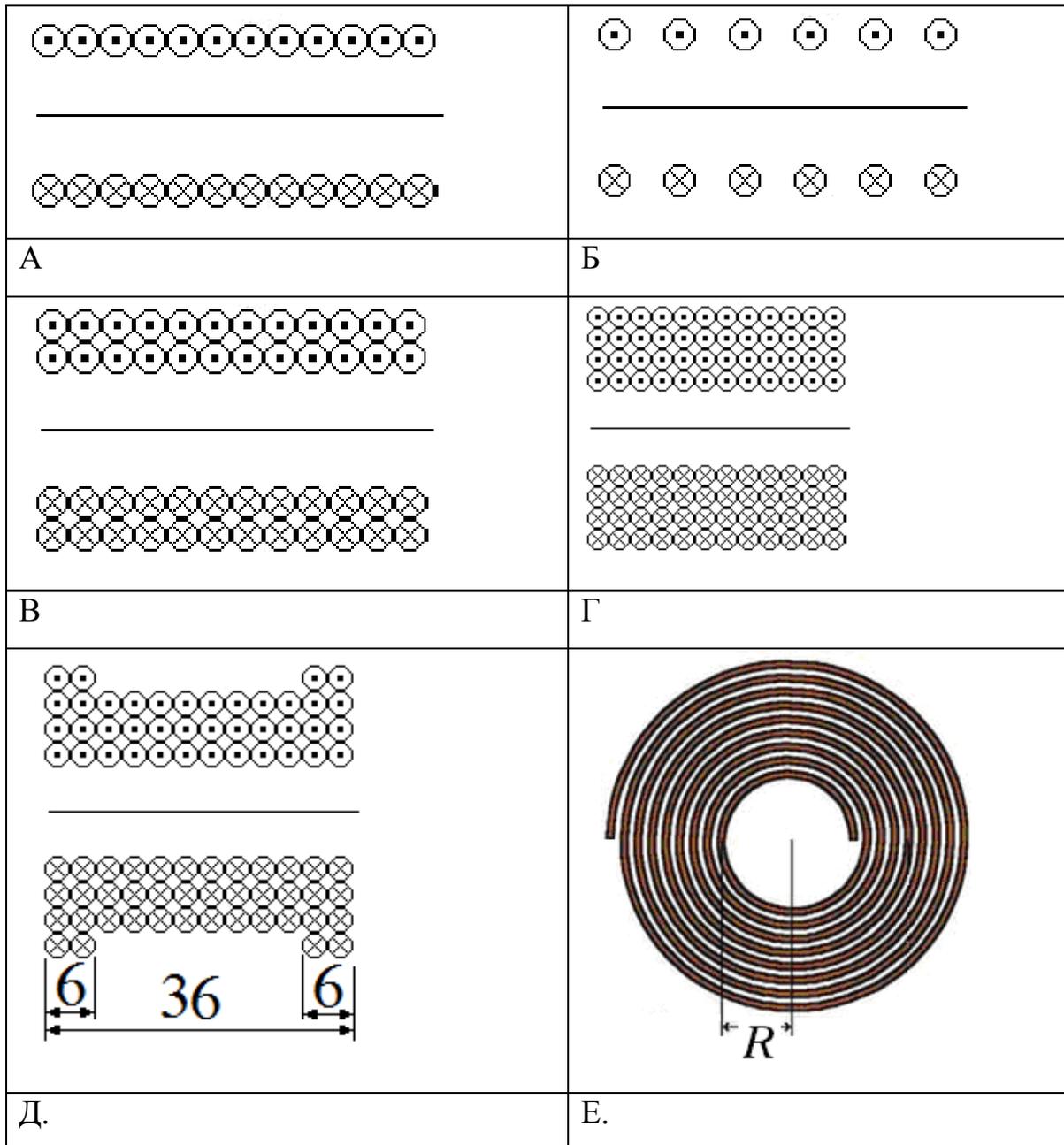


Рис.8. Схемы намотки, используемые для расчетов в пунктах А, Б, В, Г, Д и Е.

**А.** Рассчитайте поле в центре соленоида. Намотка «виток к витку» (рис. 8А): плотность намотки  $n=1000 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R=1 \text{ см}$ , его длина  $L=12 \text{ см}$ . Результаты вычислений сравните с результатами, полученными в п. 1А.

**Б.** Рассчитайте поле в центре соленоида. Разреженная намотка (рис. 8Б): плотность намотки  $n=500 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R=1 \text{ см}$ , его длина  $L=24 \text{ см}$ . Результаты вычислений сравните с результатами, полученными в п. 1Б.

**В1.** Рассчитайте поле в центре соленоида. Намотка «виток к витку» в два слоя (рис. 8В): плотность намотки  $n=2000 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R=1 \text{ см}$ , а его длина  $L=6 \text{ см}$ .

**В2.** Рассчитайте поле в центре такого же соленоида при условии, что плотность намотки  $n=2000 \text{ м}^{-1}$ , средний радиус соленоида  $R=1,1 \text{ см}$ , а его длина  $L=6 \text{ см}$ .

**В3.** Выполните расчеты для двухслойного соленоида (рис.8В), вычислив поля, создаваемые каждым слоем, и сложите полученные результаты. Используйте следующие параметры:

плотность намотки первого слоя  $n_1=1000 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R_1=1 \text{ см}$ ;  
плотность намотки второго слоя  $n_2=1000 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R_2=1,1 \text{ см}$ ;  
Сравните результаты, полученные в пунктах В1, В2 и В3, с результатами расчетов из п.1В.

**Г1.** Рассчитайте поле в центре соленоида. Намотка «виток к витку» в четыре слоя (рис. 8Г): плотность намотки  $n=4000 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R=1 \text{ см}$ , а его длина  $L=3 \text{ см}$ .

**Г2.** Рассчитайте поле в центре такого же соленоида при условии, что плотность намотки  $n=4000 \text{ м}^{-1}$ , средний радиус соленоида  $R=1,2 \text{ см}$ , а его длина  $L=3 \text{ см}$ .

**Г3.** Выполните расчеты для четырехслойного соленоида (рис. 8Г), вычислив поля, создаваемые каждым слоем, и сложите полученные результаты. Используйте следующие параметры:

плотность намотки первого слоя  $n_1=1000 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R_1=1 \text{ см}$ ;  
плотность намотки второго слоя  $n_2=1000 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R_2=1,1 \text{ см}$ ;  
плотность намотки третьего слоя  $n_3=1000 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R_3=1,2 \text{ см}$ ;  
плотность намотки четвертого слоя  $n_4=1000 \text{ м}^{-1}$ , радиус соленоида  $R_4=1,3 \text{ см}$ .

Сравните результаты, полученные в пунктах Г1, Г2 и Г3, с результатами расчетов из п. 1Г этого упражнения.

**Д.** Используя программу, размещенную на сайте, формулу (12) и принцип суперпозиций, определите распределение индукции магнитного поля на оси соленоида, представленного на рис. 8Д. Этот соленоид намотан «виток к витку» и состоит из трех слоев по 36 витков, на концах намотано по 6 витков в один слой. Для расчетов используйте  $I=1 \text{ А}$ ,  $R_1=1 \text{ см}$ ,  $R_2=1,1 \text{ см}$ ,  $R_3=1,2 \text{ см}$  и  $R_4=1,3 \text{ см}$ . В отчете на одном графике приведите распределение поля внутри соленоида ( $B(z)$  с шагом 1 мм) для катушки, состоящей из трех слоев по 36 витков, для двух дополнительных катушек по 6 витков и суммарное поле для катушки, схема которой показана на рис. 8Д. Для первой и последней конфигурации приведите в отчете размер области однородности.

**Е.** Определите длину провода, необходимого для создания катушки состоящей из 120 витков радиуса  $R=1 \text{ см}$ . Вычислите (примерно) сколько витков будет содержать спиральная катушка (рис. 8Е), сделанная из провода такой длины, радиус первого витка которой  $R=1 \text{ см}$ . Используя формулу (12) и принцип суперпозиций, рассчитайте распределение поля на оси этой катушки в зависимости от расстояния до ее центра. Величину  $z$  изменяйте в интервале от 0 до 1 см с шагом 1 мм.

В отчете о выполнении этого упражнения систематизируйте полученные результаты и представьте их в виде таблицы.

№	Схема намотки	Зависимость В(х)	Максимальное значение В, мТл	Размер области однородности, %
1	А			
2	Б			
3	В1			
	В2			
	В3			
4	Г1			
	Г2			
	Г3			
5	Д			
6	Е			

### Упражнение 3. Градуировка катушки с помощью датчика Холла.

Целью упражнения является получение зависимости индукции магнитного поля, создаваемого в центре катушки, от тока, протекающего в ней. Для этого необходимо получить градуировочную прямую и определить постоянную катушки. Постоянная катушки – это коэффициент пропорциональности между током, текущим в катушке, и индукцией поля, создаваемого катушкой при данном токе. Общий вид установки представлен на рис. 9, а электрическая схема на рис. 10. Перед началом измерений нужно установить такое напряжение питания датчика Холла, чтобы вольтметр показывал напряжение 2,500 В (питание датчика при этом будет около 4,9 В). Только в этом случае можно правильно использовать градуировку датчика:

$$H(Gs) = 666,7 \cdot U_{\text{Холла}}(В) - 1666,7 \quad (19)$$

где  $H(Gs)$  – поле, измеренное датчиком Холла, в гауссах,  $U_{Холла}(B)$  – напряжение на вольтметре в вольтах.

Изменяя напряжение питания катушки, получите зависимость силы тока в катушке от напряжения на вольтметре датчика Холла  $U_{Холла}(B)$  (напряжение, подаваемое на катушку изменяется дискретно от 0 до 5 В с шагом 1 В). Поменяйте направление тока через катушку на противоположное (не забудьте при этом изменить полярность подключения амперметра) и измерьте зависимость силы тока в катушке от напряжения на вольтметре датчика Холла. Используя формулу (19) рассчитайте поле, создаваемое катушкой, постройте градуировочную прямую в интервале величин силы тока  $[-I_{max}; I_{max}]$ , определите погрешность измерений и постоянную катушки. Можно ли по результатам этих измерений определить величину магнитного поля Земли?

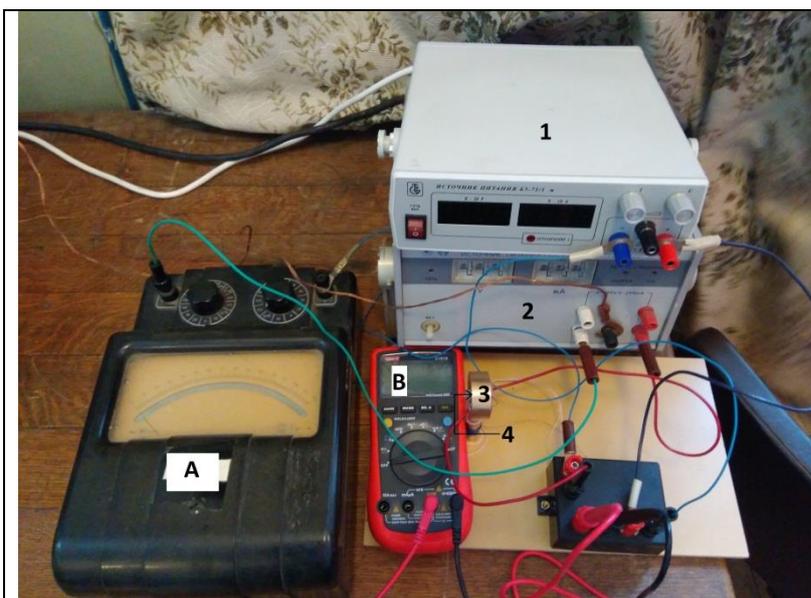
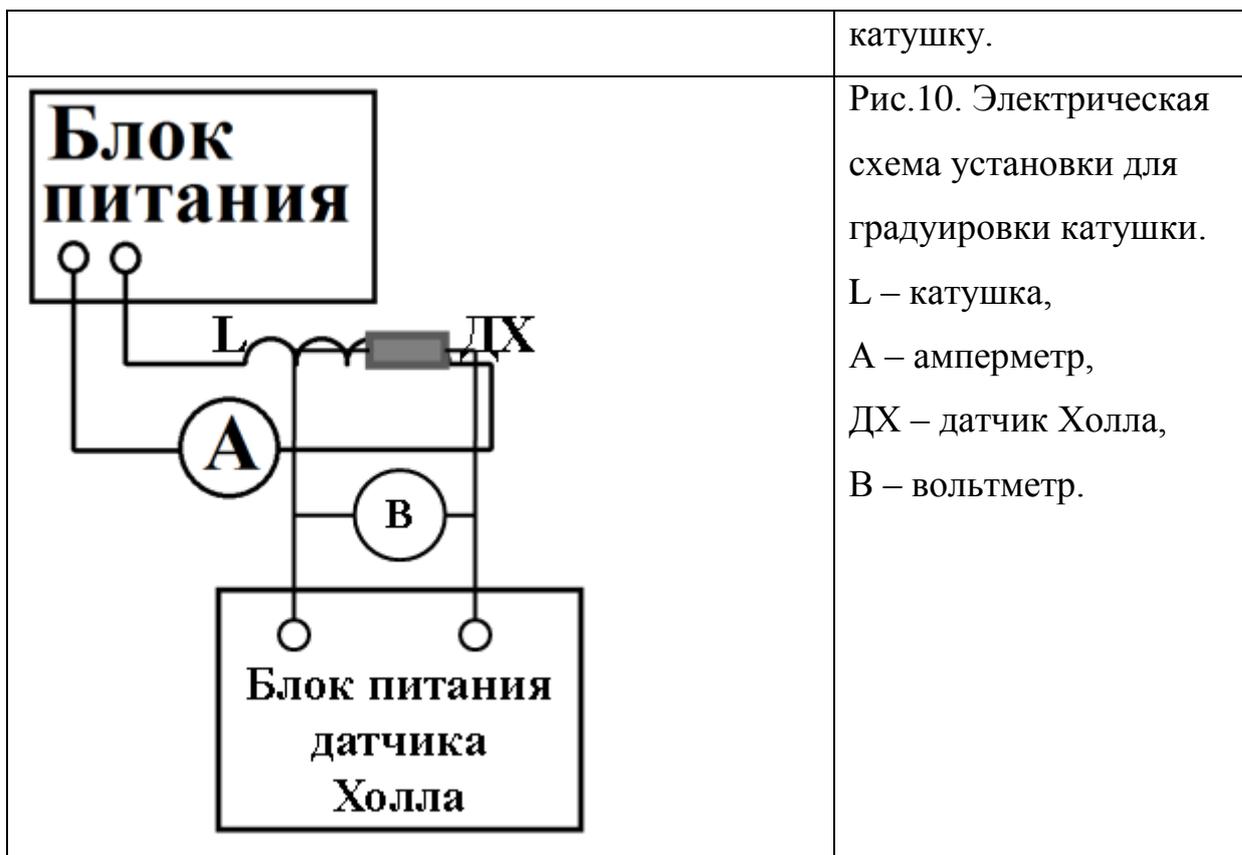


Рис. 9. Общий вид установки.

1 – источник питания датчика Холла,  
2 – источник питания катушки,  
3 – катушка с закрепленным на ее оси датчиком Холла 4,  
B – вольтметр, измеряющий напряжение датчика Холла,  
A – амперметр, измеряющий ток через



#### Упражнение 4. Экспериментальное исследование поля соленоида с помощью тесламетра.

Целью упражнения является получение экспериментальной зависимости осевой ( $B_z$ ) и радиальной ( $B_y$ ) компонент магнитного поля соленоида от расстояния до центра катушки ( $y$ ).

Общий вид установки показан на рисунке 11 (вид сбоку и вид сверху). Электрическая схема установки показана на рис.12. Последовательность выполнения упражнения:

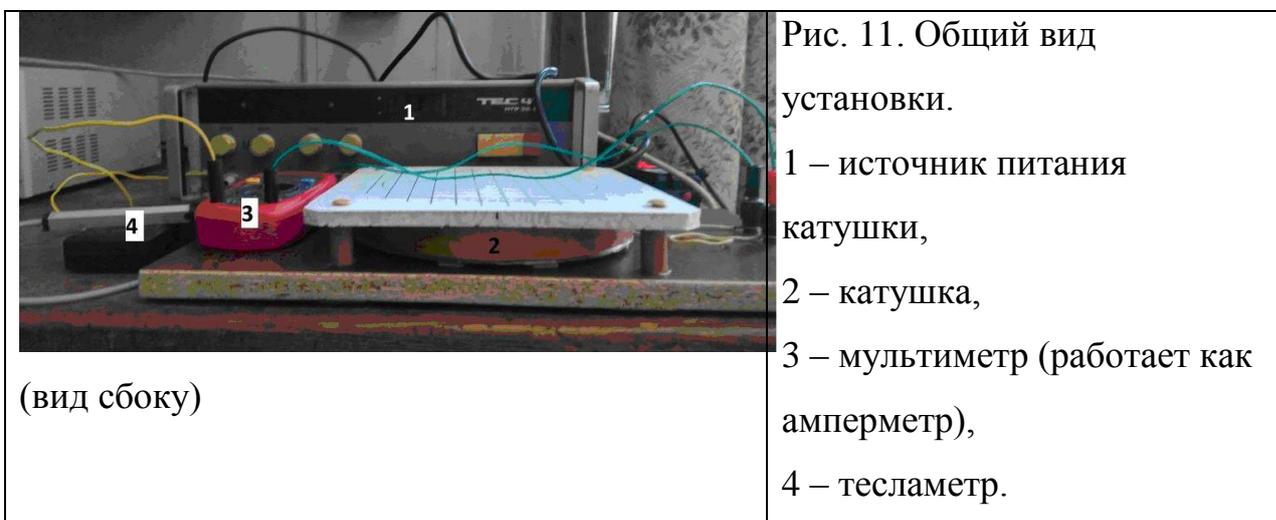
А) Установите на блоке питания напряжение, соответствующее току через соленоид 100 мА. Для измерений осевой компоненты магнитного поля датчик тесламетра ориентируйте на размеченном столике так, как показано на рис. 13а (датчик Холла тесламетра расположен перпендикулярно оси соленоида и лежит непосредственно на столике) и, помещая его в центр каждого квадрата, запишите показания прибора. Определите зависимость осевой компоненты магнитного поля соленоида от расстояния до центра катушки ( $B_z(y)$ ). Увеличьте силу тока в 2 раза и

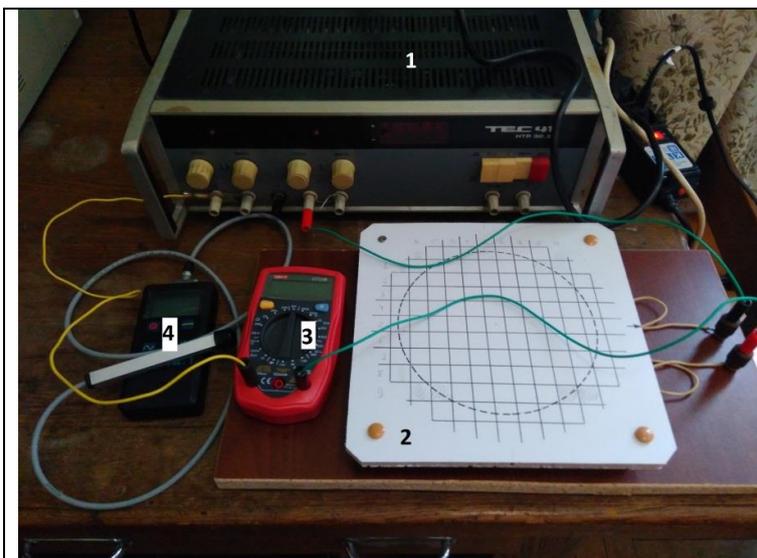
проведите аналогичные измерения осевой компоненты. Увеличьте силу тока в 3 раза по сравнению с первоначальным значением и повторите описанные выше измерения  $B_z$  в третий раз.

Б) Аналогичные измерения проведите при другой ориентации датчика (рис. 13б) и получить зависимость радиальной компоненты соленоида ( $B_r(y)$ ). Измерения проводить только в столбце «Д» и в строке «5» ориентируя датчик Холла параллельно оси катушки перпендикулярно ее радиусу.

В) Поменяйте направление тока и проведите измерения компоненты  $B_z$  (см. пункт А) в точке Д5 для тока 100, 200 и 300 мА.

После проведения измерений постройте зависимость  $B_z(y)$  (пункт А) на одном графике при всех значениях тока и  $B_z(y)$  (пункт Б) аналогично. По результатам измерений, описанных в пунктах А и В в точке Д5 постройте зависимость  $B_z(I)$  и определите постоянную катушки.





(вид сверху)

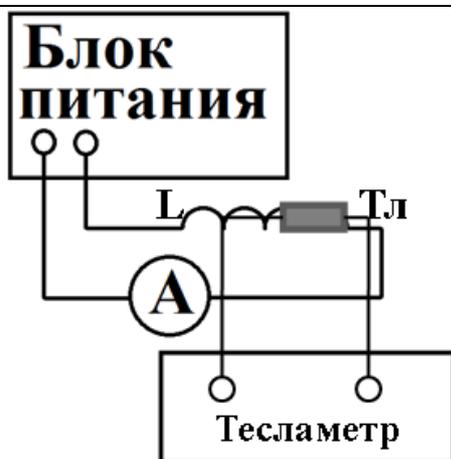
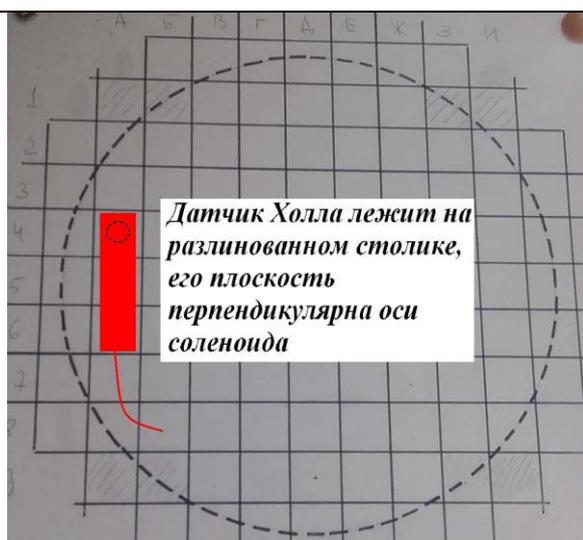
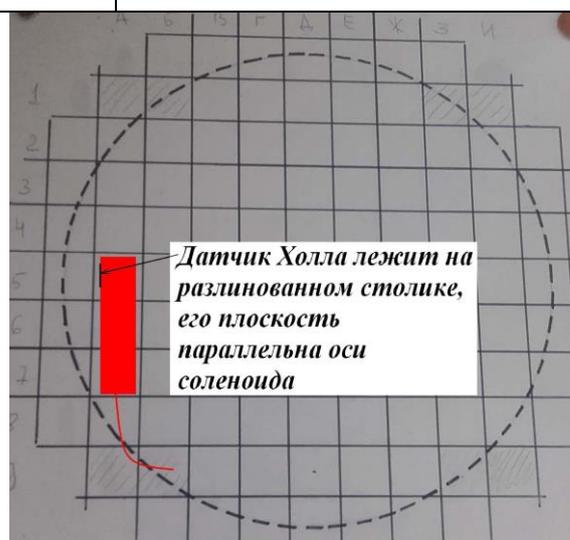


Рис.12. Электрическая схема установки для исследования поля соленоида:

L – катушка,  
A – мультиметр,  
Тл – тесламетр.



*Датчик Холла лежит на разливном столике, его плоскость перпендикулярна оси соленоида*



*Датчик Холла лежит на разливном столике, его плоскость параллельна оси соленоида*

а

б

Рис.13 Взаимное расположение датчика Холла (ДХ) и катушки при измерении компонент магнитного поля  $B_z$  (а) и  $B_y$  (б).

## Упражнение 5. Экспериментальное исследование поля катушек

### Гельмгольца.

Целью упражнения является определение области однородности магнитного поля, создаваемого катушками Гельмгольца. При фиксированной величине тока измеряют зависимости осевой компоненты магнитного поля  $B_z$  от координаты вдоль оси катушек ( $z$ ) и расстояния от оси катушек ( $y$ ). Общий вид установки представлен на рис. 14, электрическая схема показана на Рис. 15. Измерения магнитного поля проводят с помощью датчика Холла. Перед началом измерений нужно установить такое напряжение питания датчика, чтобы вольтметр показывал напряжение 2,500 В (питание датчика при этом будет около 4,9 В). Только в этом случае можно правильно использовать градуировку этого датчика:

$$H(Gs) = 666,7 \cdot U_{\text{Холла}}(B) - 1666,7 \quad (20)$$

где  $H(Gs)$  – поле, измеренное датчиком Холла, в гауссах,  $U_{\text{Холла}}(B)$  – напряжение на вольтметре в вольтах.

Последовательность выполнения упражнений:

А) Установите ток через катушки Гельмгольца 50 мА. Зафиксируйте координату  $y$ , получите зависимость  $B_z(z)$ , при этом величину  $z$  меняйте от –30 мм до 30 мм с шагом 5 мм. Для каждого значения  $z$  записывайте показания вольтметра датчика Холла. Используя формулу (20) определите величину осевой компоненты магнитного поля катушек.

Б) Проведите аналогичные измерения для всех значений координаты  $y$  от –10 мм до 10 мм с шагом 5 мм.

В) На одном графике постройте зависимости  $B_z(z)$  для разных значений  $y$ . Оцените погрешность измерений. Определите постоянную катушки, размер области, где величина поля отличается менее, чем на 10 % от максимального значения.

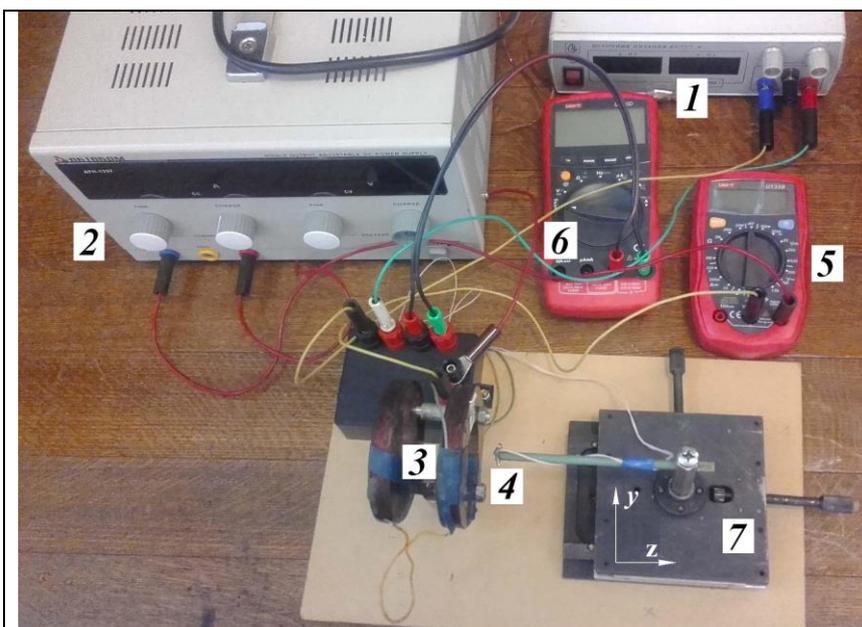


Рис.14. Общий вид установки.

1 – источник питания датчика Холла,  
 2 – источник питания катушек Гельмгольца,  
 3 – катушки Гельмгольца,  
 4 – датчик Холла,  
 5 – амперметр, измеряющий ток через катушки Гельмгольца,  
 6 – вольтметр, измеряющий напряжение датчика Холла,  
 7 – механизм перемещения датчика Холла вдоль двух осей.

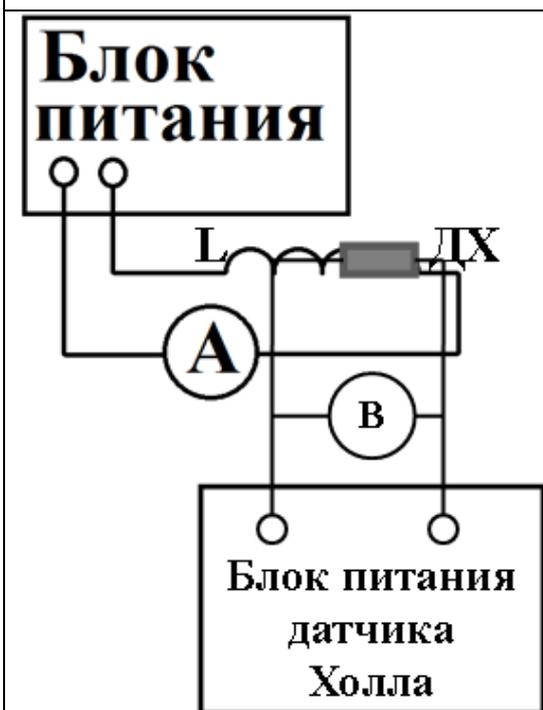


Рис.15. Электрическая схема установки для исследования магнитного поля катушек Гельмгольца.  
 L – катушки,  
 А – амперметр,  
 ДХ – датчик Холла,  
 В – вольтметр.

## Литература

1. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Т. 2. Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. М.: Лань, 2007.
2. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 3. Электричество. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

## Контрольные вопросы

1. Что такое индукция магнитного поля?
2. Единица измерения индукции магнитного поля в системе СИ и ее связь с другими единицами СИ.
3. Единица измерения индукции магнитного поля в системе СГС единиц и ее связь с аналогичной единицей СИ.
4. Что такое силовые линии магнитного поля.
5. Принцип суперпозиций
6. Закон Био-Савара-Лапласа.
7. Поле прямого провода, поле в центре витка с током, поле соленоида
8. Что такое область однородности магнитного поля?
9. Что такое постоянная катушки?
10. Катушки Гельмгольца