



**А.Ю. Бункин, А.Н. Филанович,  
С.М. Подгорных**

# ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА

## Текстовый электронный образовательный ресурс

Для студентов технических направлений подготовки и специальностей.  
Уровень подготовки – бакалавриат, специалитет.

В ресурсе представлены методические рекомендации для подготовки студентов к лабораторному практикуму по изучению зависимости магнитной индукции в центре соленоида от силы тока в его витках, а также зависимости магнитной индукции на оси соленоида от расстояния до его центра (лабораторная работа № 18б). Ресурс содержит необходимые сведения по теории и практике выполнения лабораторной работы. Приведены контрольные вопросы для проверки знаний студентов по теории и порядку выполнения лабораторной работы.

Подготовлено кафедрой физики ИнФО

Екатеринбург

2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Теоретическая часть .....	4
1.1. Магнитное поле соленоида. Вывод расчетных формул .....	4
1.2. Метод измерения магнитной индукции с использованием датчика Холла .....	7
2. Установка для изучения магнитных полей .....	9
3. Экспериментальная часть .....	11
3.1. Получение зависимости индукции магнитного поля .....	11
соленоида от силы тока .....	11
3.2. Получение зависимости индукции поля .....	12
от расстояния вдоль оси соленоида .....	12
3.3. Обработка результатов измерений .....	12
4. Вопросы для самоконтроля .....	13
Список рекомендованной литературы .....	14
Приложение 1. Рекомендуемая форма отчета .....	15
Приложение 2. Зависимость магнитной индукции $B(x)$ при разных отношениях длины соленоида $L$ к его диаметру $d$ .....	18

## **ВВЕДЕНИЕ**

Целью данных методических указаний является помощь студенту в подготовке к практическому выполнению лабораторной работы по исследованию магнитного поля соленоида. При изучении ресурса необходимо ознакомиться с конфигурацией линий индукции магнитного поля соленоида, с эффектом Холла в проводящих материалах, с методом измерения величины индукции на основе этого явления и с конструкцией экспериментальной установки, а также получить четкое представление о порядке выполнения лабораторной работы. Это позволит получить достоверные экспериментальные результаты и провести их интерпретацию.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1. Магнитное поле соленоида. Вывод расчетных формул

Как известно, магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами, в частности, электрическим током, текущим по проводнику. Интенсивность и пространственное распределение магнитного поля зависят от силы тока и от конфигурации проводника. Широкое применение в технике имеют устройства (различного типа реле, преобразователи тока и напряжения и т.п.), в состав которых входят соленоиды.

Соленоидом называется катушка, намотанная на длинный цилиндрический каркас. Типичная картина линий магнитной индукции поля, создаваемого постоянным током, текущим по катушке, приведена на рис. 1а.

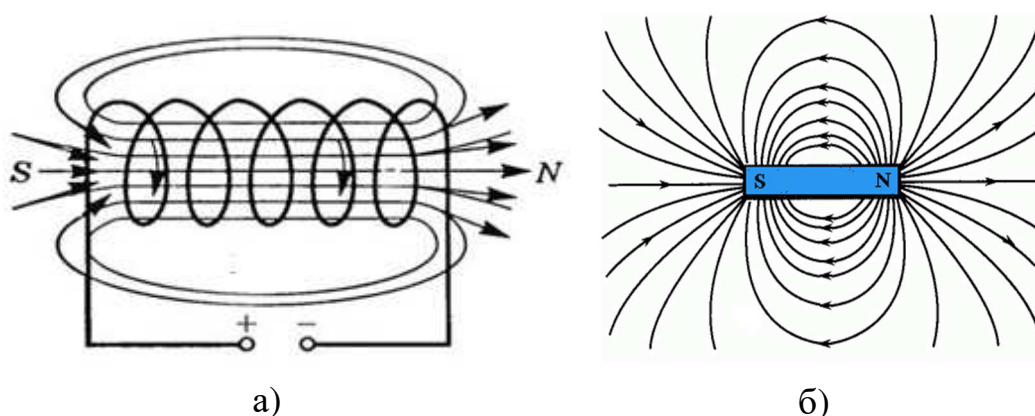


Рис. 1. Магнитное поле: а) соленоида, б) полосового магнита.

Для сравнения на рис.1б приведена картина линий магнитной индукции, создаваемой полосовым магнитом. Как видно из рисунка, в соленоиде конечной длины линии магнитной индукции параллельны оси катушки в центральной ее части, магнитное поле однородно. Направление вектора индукции  $\vec{B}$  связано с направлением тока  $I$  правилом правого винта: если вращать винт по направлению тока в витках соленоида, направление поступательного движения винта укажет направление вектора  $\vec{B}$ . К торцам соленоида интенсивность поля убывает, вне соленоида магнитное поле неоднородное и слабое. Протяженность зоны однородного магнитного поля в соленоиде зависит от соотношения между

его длиной и диаметром. Схематически вид зависимости индукции поля от расстояния вдоль оси соленоида приведен на рис. 2.

Для вывода формулы, позволяющей рассчитать индукцию поля в соленоиде, можно воспользоваться результатом решения задачи об определении индукции на оси кругового тока радиуса  $R$  (рис. 3), полученном с

использованием закона Био-Савара-Лапласа и принципа суперпозиции (см., например, [1]). Согласно этому результату, индукция поля определяется формулой

$$dB = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $I$  – сила тока,  $h$  – расстояние от центра витка до какой-либо точки на его оси. Результирующий вектор  $d\vec{B}$  направлен вдоль оси витка.

Пусть катушка имеет  $n$  витков на единицу длины. Возьмем элемент соленоида длиной  $dh$ , содержащий  $ndh$  витков. Этот элемент можно рассматривать как кольцевой ток, создающий магнитное поле

$$dB = ndh \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}}.$$

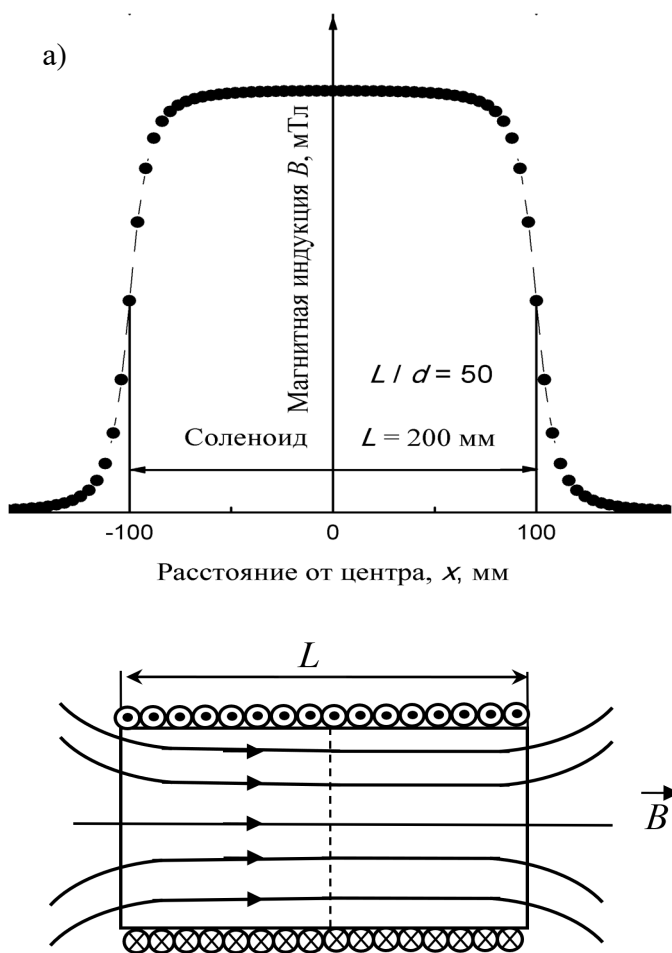


Рис. 2. Схематическое изображение линий магнитной индукции (а) и ее зависимости от расстояния, отсчитываемого от центра соленоида (б)

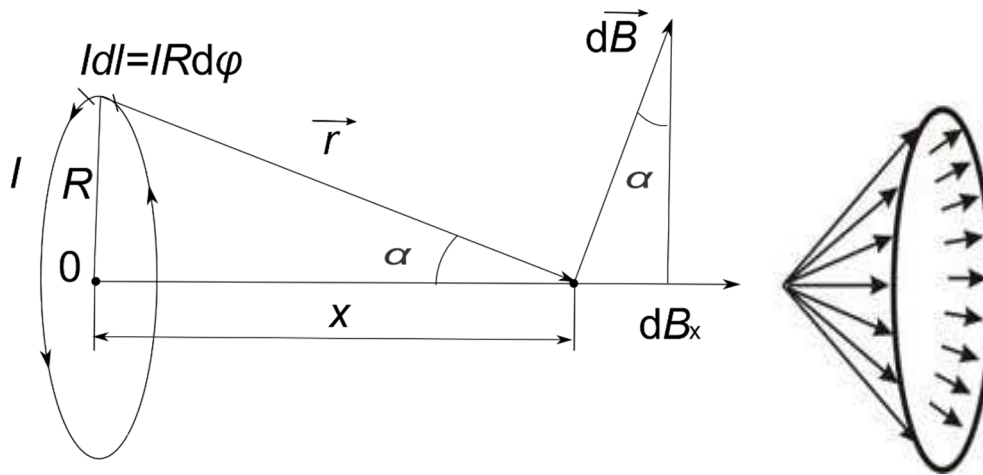


Рис. 3. Иллюстрация к расчету индукции магнитного поля

на оси кругового тока. Справа изображены возможные конфигурации вектора  $d\vec{B}$  для элементов кругового тока, расположенных в различных его точках.

Чтобы найти индукцию поля в середине соленоида конечной длины  $l$ , достаточно проинтегрировать это выражение в пределах от  $h = -l/2$  до  $h = l/2$ :

$$B = \frac{n\mu_0 I R^2}{2} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dh}{(R^2 + h^2)^{3/2}} = \frac{n\mu_0 I R^2}{2} \frac{h}{R^2 \sqrt{R^2 + h^2}} \Big|_{-l/2}^{l/2} = n\mu_0 I \frac{l}{\sqrt{4R^2 + l^2}}$$

При известных параметрах соленоида – числе витков  $N$  ( $N=nl$ ), длине  $L$  и диаметре  $d$  получаем формулу для расчета индукции поля в центре

$$B_{\text{ц}} = \frac{\mu_0 N I}{\sqrt{d^2 + L^2}}. \quad (1)$$

Аналогичный расчет показывает, что отношение индукции в крайней торцевой точке к индукции в центре определяется формулой

$$\frac{B_{\text{кр}}}{B_{\text{ц}}} = \sqrt{\frac{d^2 + L^2}{d^2 + 4L^2}} \quad (2)$$

и при  $L \gg d$  составляет 0,5, т.е. для достаточно длинного соленоида поле вблизи торца в два раза слабее, чем в центре.

Строгий расчет индукции магнитного поля в произвольной точке внутри соленоида показывает, что ее значение зависит от соотношения длины  $L$  соленоида к его диаметру ( $d = 2R$ ). Для иллюстрации в Приложении 2 приведены графики зависимостей  $B(x)$  с различным  $L/d = 50; 20; 10; 5$ . Обязательно обратите

внимание на тот факт, что поле внутри любого конечного соленоида всегда будет неоднородным: величина индукции изменяется с расстоянием. Мы можем его считать «однородным» только с некоторой погрешностью.

## 1.2. Метод измерения магнитной индукции с использованием датчика Холла

Магнитная индукция  $B$  в данной работе измеряется с помощью метода, основанного на эффекте Холла. В основе этого метода лежит действие магнитного поля на движущиеся электрические заряды.

В проводнике с током, помещенном в поперечное к току магнитное поле, возникает дополнительное электрическое поле, направленное перпендикулярно и к току, и к вектору магнитной индукции. Это явление получило название эффекта Холла.

Рассмотрим проводник, имеющий форму прямоугольной пластины (датчик Холла), по которому течет электрический ток, направленный вправо (рис. 4).

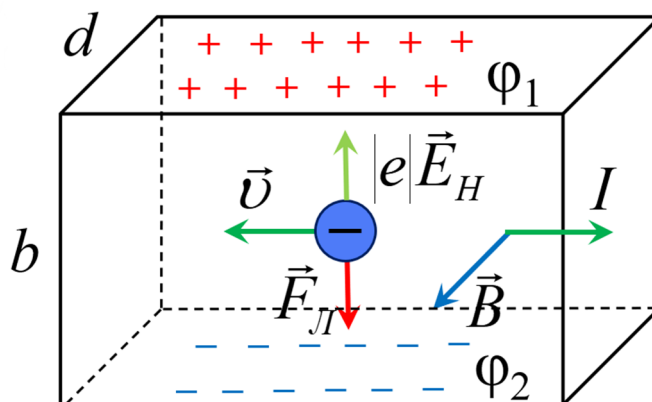


Рис. 4. Перераспределение движущихся зарядов в проводнике под действием магнитного поля.

Поскольку направление тока связывают с направлением движения положительных зарядов, отрицательные заряды при этом движутся в обратную сторону. Как видно из рисунка, при включении магнитного поля  $\vec{B}$ , перпендикулярного к току, под действием сил Лоренца отрицательные заряды

смещаются к нижней, а положительные – к верхней грани пластины. Силы электростатического поля уравнивают магнитные, и между гранями возникает «холловская» разность потенциалов  $U_x$ , прямо пропорциональная величине индукции магнитного поля:

$$U_x = \alpha \cdot B,$$

где  $B$  – индукция поля;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических размеров и материала датчика. Таким образом, измерив разность потенциалов  $U_x$  (ЭДС Холла) и введя коэффициент  $C = 1/\alpha$  (задается в характеристиках установки), можно рассчитать значение индукции магнитного поля  $B$  по формуле

$$B = CU_x. \tag{3}$$



## 2. УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

На рис. 5 приведен внешний вид универсальной лабораторной установки для изучения магнитных полей, предназначенной в том числе и для исследования свойств ферромагнитных материалов. Установка смонтирована в пластиковом корпусе с прозрачной верхней панелью. В корпусе размещены ферромагнитный тороид (1), соленоид (2), блок аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (3), преобразующего получаемые аналоговые электрические сигналы в цифровой формат для с целью их измерения и обработки на компьютере. На лицевой панели корпуса размещены органы управления установкой: переключатель вида работы – «соленоид/тороид» (4), переключатель направления тока – «+» / «-» (5) и регулятор силы тока (6). Электрическая схема установки приведена на рис. 6.

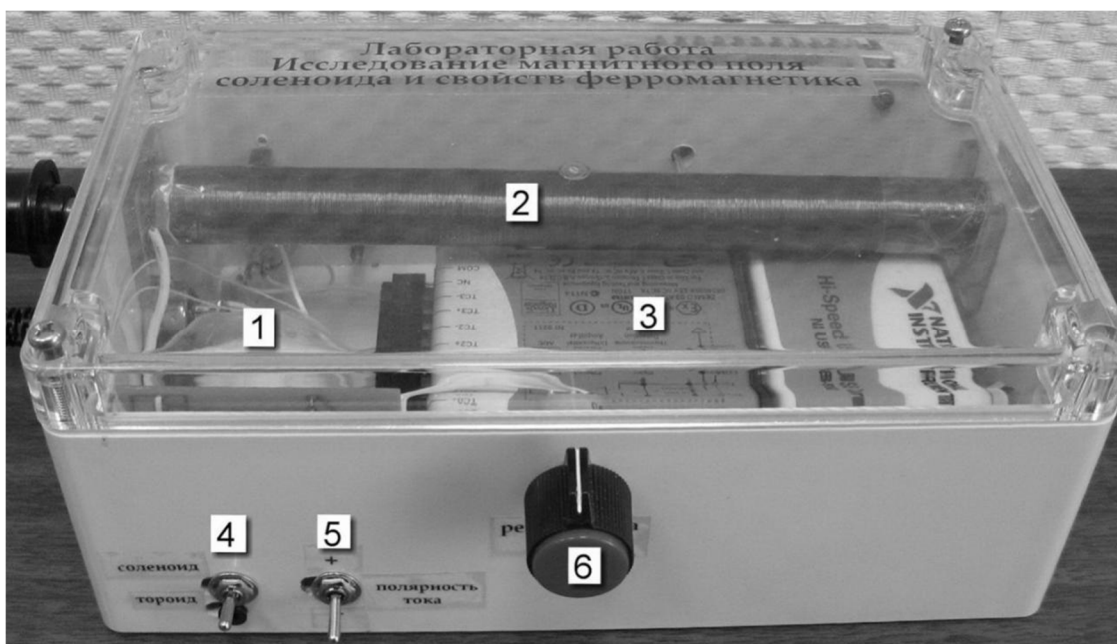


Рис. 5. Внешний вид установки по изучению магнитных полей (авторская фотография): 1 – ферромагнитный тороид, 2 – соленоид, 3 – блок АЦП, 4 – переключатель вида работ, 5 – переключатель направления тока, 6 – регулятор силы тока.

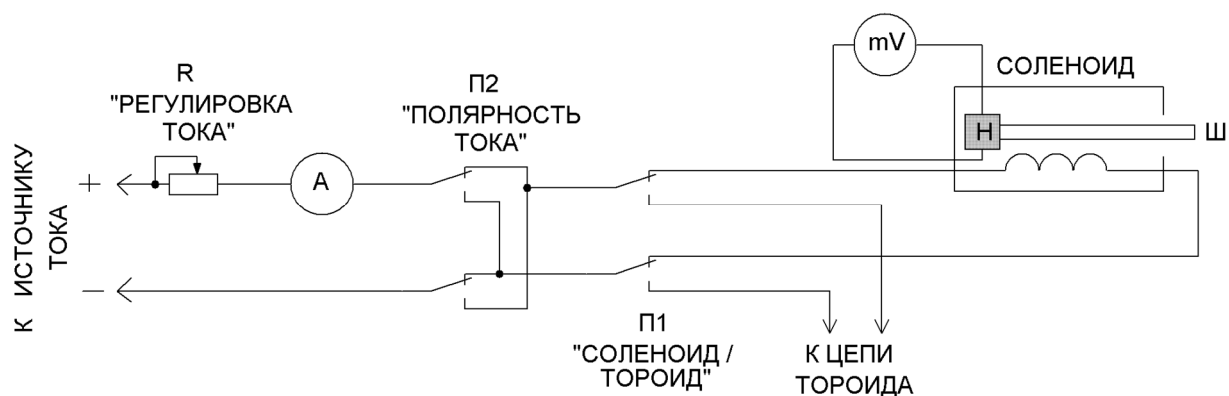


Рис. 6. Электрическая схема установки:  $R$  – регулятор тока соленоида;  $A$  – амперметр;  $П_1$  – переключатель режимов работы «соленоид» – «тороид»;  $П_2$  – переключатель направления тока;  $Ш$  – подвижный шток соленоида с датчиком Холла;  $H$  – датчик Холла;  $mV$  – милливольтметр. Амперметр и милливольтметр в данной работе выполнены в виде виртуальных приборов в программе LabVIEW и выведены на экран монитора компьютера.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Работа с соленоидом включает в себя два задания, первым из которых является проверка линейной зависимости индукции магнитного поля в центре соленоида от силы тока в его обмотке (формула (1)), а вторым – изучение распределения индукции поля в зависимости от расстояния от центра соленоида до его торца.

#### 3.1. Получение зависимости индукции магнитного поля соленоида от силы тока

- 1) Включите питание установки (тумблер на задней стороне) и поставьте переключатель (4) вида работы в положение СОЛЕНОИД.
- 2) Перейдите на вкладку программы «**Зависимость поля от силы тока в соленоиде**».
- 3) Заполните таблицу приборов в отчете (Приложение 1) в соответствии с приборами на экране.
- 4) Установите минимальную силу тока в соленоиде при помощи регулятора  $R$ .
- 5) Установите шток датчика в положение «0». В этом положении датчик Холла находится в центре соленоида.
- 6) Нажимая кнопку **УСТАНОВКА НУЛЯ ДАТЧИКА**, добейтесь минимальных (близких к нулю) показаний прибора «ЭДС датчика Холла, мВ».
- 7) Нажмите кнопку **ИЗМЕРЕНИЕ** – на графике появится экспериментальная точка. Меняйте силу тока в соленоиде через 0,05А до 0,45А, каждый раз нажимая клавишу **ИЗМЕРЕНИЕ**.
- 8) Уменьшите ток до нуля, нажмите кнопку **СТОП** и перепишите результаты измерений в свой отчёт.

### 3.2. Получение зависимости индукции поля от расстояния вдоль оси соленоида

- 1) Включите работу программы, нажав кнопку Run  $\Rightarrow$  , и перейдите на вкладку «Зависимость поля от расстояния до центра соленоида».
- 2) Проверьте, чтобы шток датчика находился в положении «0». Установите силу тока в соленоиде 0,45А и нажмите кнопку ИЗМЕРЕНИЕ.
- 3) Устанавливайте шток в положения **1;2;3;4;5;6;7;8;8,5;9;9,5;10** см, вводите каждый раз на панели программы соответствующие значения X и нажимайте кнопку ИЗМЕРЕНИЕ.
- 4) Уменьшите ток до нуля, нажмите кнопку СТОП, выключите установку и перепишите результаты измерений в отчёт.
- 5) Не забудьте записать в отчет (Приложение 1) постоянные установки – они необходимы для выполнения вычислений в отчете.

### 3.3. Обработка результатов измерений

Значения индукции магнитного поля в соленоиде  $B_{\text{изм}}$ , измеренные в эксперименте, рассчитываются по формуле (3). В первой задаче следует рассчитать теоретическое значение индукции магнитного поля в центре соленоида по формуле (1) для тока  $I = 0,45$  А и сравнить полученное значение  $B_{\text{расч}}$  с  $B_{\text{изм}}$  для этой же силы тока. Во второй задаче необходимо рассчитать соотношение между индукцией поля на краю и в центре соленоида по формуле (2) и сравнить полученное значение с экспериментальным, взяв в качестве  $B_{\text{кр}}$  и  $B_{\text{ц}}$  последнее и первое значения  $B_{\text{изм}}$  из табл. 2, соответственно. Кроме того, следует построить графики зависимостей индукции магнитного поля в центре соленоида от силы тока в его витках (задача 1) и от расстояния от центра соленоида при постоянной силе тока (задача 2). Проанализируйте полученные зависимости на соответствие теории и сделайте соответствующие выводы.

#### 4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 1) Что представляет собой соленоид?
- 2) Как определить направление вектора магнитной индукции в центре кругового витка с током?
- 3) От чего зависит модуль индукции поля на оси кругового витка с током?
- 4) От каких величин зависит индукция магнитного поля в центре соленоида конечной длины?
- 5) На каком физическом эффекте основан метод измерения индукции поля в данной лабораторной работе?
- 6) Какие измерительные приборы используются в экспериментальной установке?
- 7) Пользуясь Приложением 2, укажите область внутри соленоида с неоднородностью поля менее 10 % на рис. П1 – рис. П6.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повзнер, А. А. Физика. Базовый курс: учебное пособие / А. А. Повзнер, А. Г. Андреева, К. А. Шумихина. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – Ч. 1. – 168 с. – ISBN 978-5-7996-1700-4. – ISBN 978-5-7996-1701-1.

2. Карпов Ю. Г., Изучение магнитных полей и свойств ферромагнетика: методические указания к лабораторной работе № 18 по физике / Ю. Г. Карпов, А. Н. Филанович, А. Ю. Бункин. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 23 с. – URL: [https://kf-info.urfu.ru/fileadmin/user\\_upload/site\\_62\\_6389/pdf/new/18.pdf](https://kf-info.urfu.ru/fileadmin/user_upload/site_62_6389/pdf/new/18.pdf) (дата обращения: 01.02.2022).

3. Валишев, М. Г. Физика: учебное пособие для вузов / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. – СПб.: Лань, 2010. – 576 с. – ISBN: 978-5-8114-0820-7.

4. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 8-е изд., стер. – М.: Академия, 2009. – 720 с. – ISBN 978-5-7695-6478-9.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1.**

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ФОРМА ОТЧЕТА  
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра физики**

**О Т Ч Е Т**

**по лабораторной работе № 186**

**«ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА»**

Студент(ка)\_\_\_\_\_

Группа\_\_\_\_\_

Преподаватель\_\_\_\_\_

Дата\_\_\_\_\_

1. Расчетные формулы:

$$B_{\text{расч.}} = \frac{\mu_0 N_1 I_1}{\sqrt{d^2 + L^2}},$$

где  $N_1$  – \_\_\_\_\_

$I_1$  – \_\_\_\_\_

$d$  – \_\_\_\_\_

$L$  – \_\_\_\_\_

$$B_{\text{изм.}} = c U_x,$$

где  $c$  – \_\_\_\_\_

$U_x$  – \_\_\_\_\_

2. Средства измерений и их характеристики:

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления шкалы	Предел основной погрешности
Амперметр			
Милливольтметр			

Соленоид:  $d =$  \_\_\_\_\_,  $L =$  \_\_\_\_\_,  $N_1 =$  \_\_\_\_\_ .

Постоянная установки  $c =$  \_\_\_\_\_ .

3. Результаты измерений и расчетов.

Таблица П. 1

**Зависимость магнитной индукции в центре соленоида  
от силы тока в его витках**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_1, A$										
$U_x, мВ$										
$B_{\text{изм.}}, мТл$										

Сравнение экспериментальных и расчетных значений индукции в центре

при  $I_1 =$  \_\_\_\_\_ :



$B_{\text{расч.}} = \underline{\hspace{2cm}}$

$$\gamma = \frac{|B_{\text{расч.}} - B_{\text{изм.}}|}{B_{\text{расч.}}} = \dots$$

Таблица П. 2

**Зависимость магнитной индукции на оси соленоида  
от расстояния до его центра (при  $I = \dots\dots\dots$  А)**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$x$ , см												
$U_x$ , мВ												
$B_{\text{изм.}}$ , мТл												

Соотношение индукции в крайней торцевой точке и в центре соленоида

- теоретическое значение  $B_{\text{кр.}}/B_{\text{ц}} =$
- экспериментальное значение  $B_{\text{кр.}}/B_{\text{ц}} =$

4. Графики зависимостей  $B(I)$  и  $B(x)$  (на отдельных листах)

5. Выводы по работе:

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2.**

**ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ  $B(x)$  ПРИ РАЗНЫХ  
ОТНОШЕНИЯХ ДЛИНЫ СОЛЕНОИДА  $L$  К ЕГО ДИАМЕТРУ  $D$**

Расчеты произведены при значениях  $B = 10$  мТл,  $L = 200$  мм.

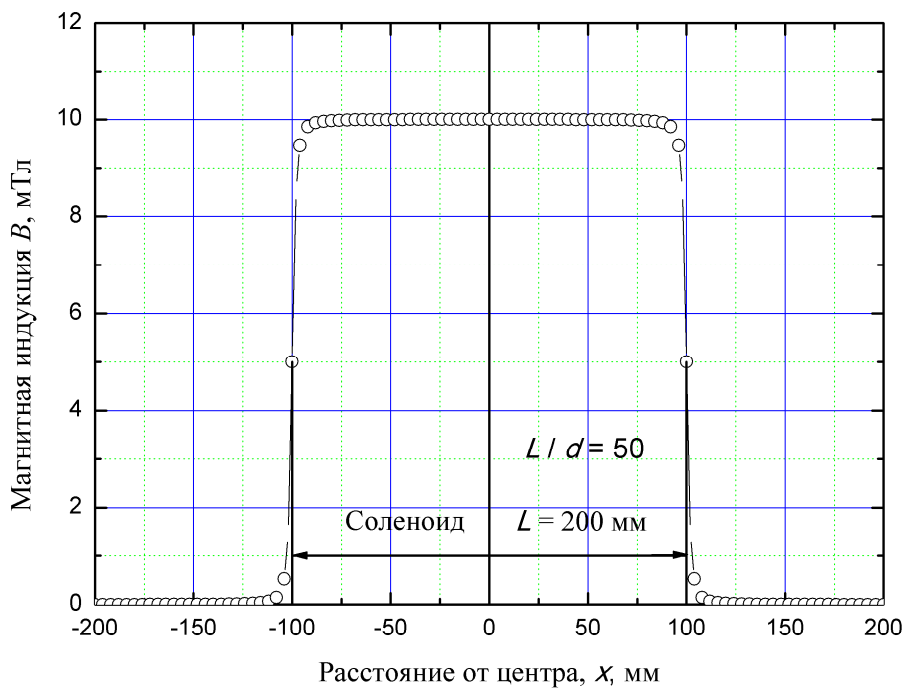


Рис. П1.  $L/d = 50$

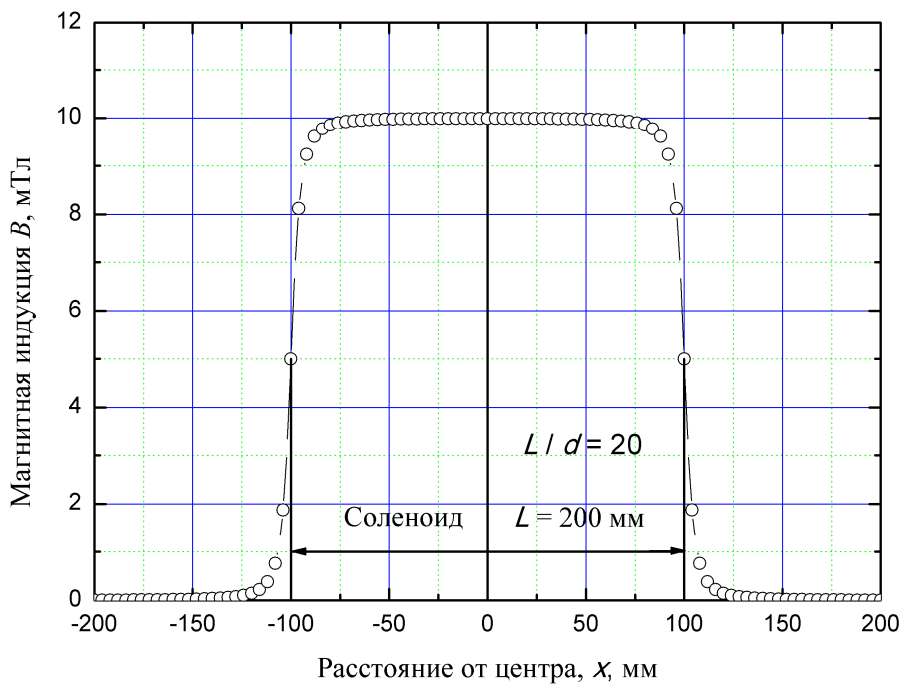


Рис. П2.  $L/d = 20$

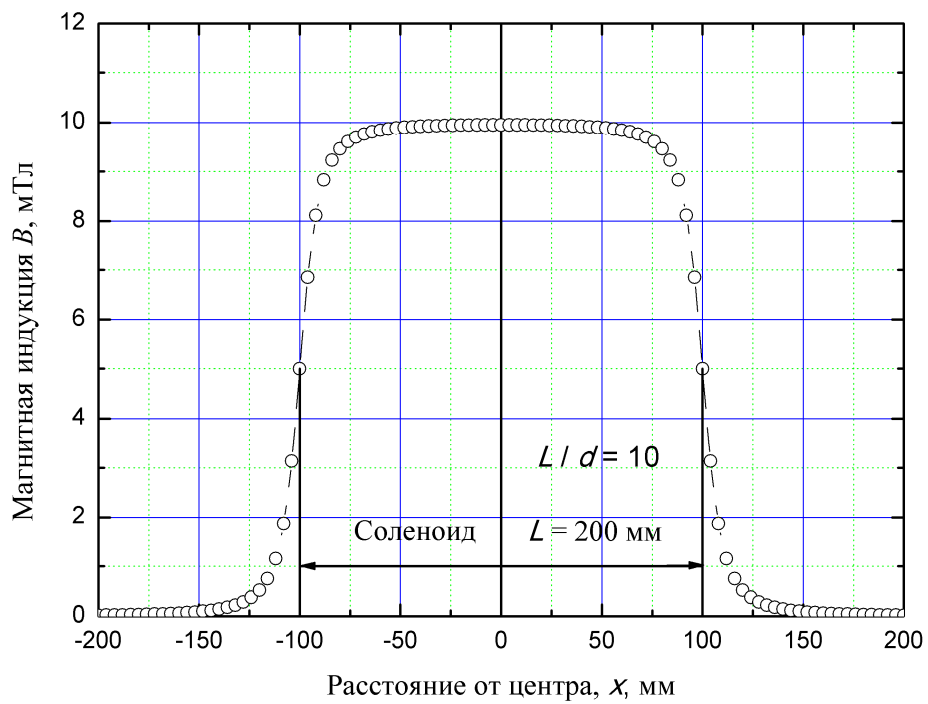


Рис. П3.  $L/d = 10$

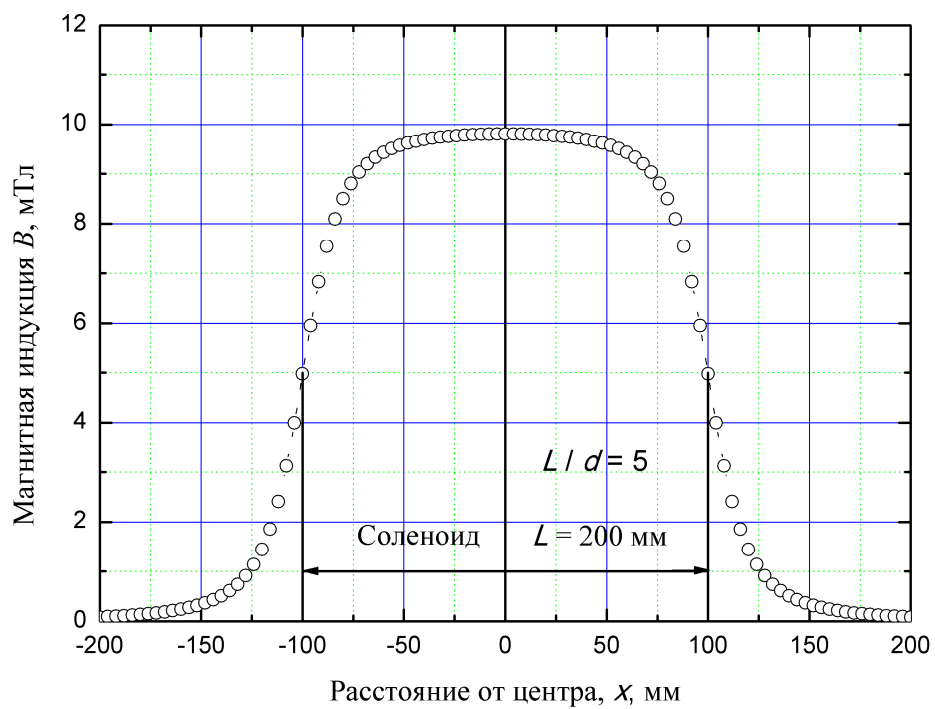


Рис. П4.  $L/d = 5$

Текстовый электронный образовательный ресурс

Бункин Александр Юрьевич  
Филанович Антон Николаевич  
Подгорных Сергей Михайлович

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА**

Методическая разработка

Компьютерная верстка *А. Ю. Бункин, А. Н. Филанович*

Рекомендовано Методическим советом УрФУ  
протокол № 1 от 28.01.2022  
Электронный формат – pdf



<https://study.urfu.ru>