



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

## **ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Лабораторная работа № 6-В

Движение заряженных частиц в  
неоднородном магнитном поле

### **«ФИЗИКА»**

Авторы

Жданова Т.П.,

Кудря А.П.

Лемешко Г.Ф.,

Холодова О.М.

Ростов-на-Дону, 2022

## Аннотация

Указания содержат краткое изложение теорий распределения индукции магнитного поля вдоль оси симметрии соленоида и движения в этом поле заряженных частиц. Даны элементарные сведения устройства и принципа действия простейшей магнитной ловушки, используемой для удержания высокотемпературной плазмы. Приводятся основные этапы подготовки к эксперименту и последовательность его выполнения.

Методические указания предназначены для организации самостоятельной работы студентов при подготовке и проведении учебного виртуального эксперимента.

## Авторы

**Жданова Т.П.** - к.ф.-м.н., доцент  
кафедры «Физика»

**Кудря А.П.** - старший преподаватель  
кафедры «Физика»

**Лемешко Г.Ф.** - к.ф.-м.н., доцент  
кафедры «Физика»

**Холодова Ю.М.** – старший  
преподаватель кафедры «Физика»



## Оглавление

<b>Краткая теория.....</b>	<b>4</b>
<b>Подготовка к работе.....</b>	<b>9</b>
<b>Выполнение работы.....</b>	<b>10</b>
Задание 1. Исследование зависимости распределения величины магнитной индукции на оси соленоида от его параметров.....	10
Задание 2. Определение удельного заряда неизвестной частицы.....	10
Задание 3 Исследование влияния магнитного поля соленоида на характер движения заряженной частицы.....	11
<b>Контрольные вопросы.....</b>	<b>12</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>12</b>

Цель работы. Познакомиться: 1) со структурой магнитного поля соленоида; 2) с характером движения заряженных частиц в магнитном поле соленоида.

Оборудование: персональный компьютер с программным обеспечением.

### ***Краткая теория***

Соленоид представляет собой однослойную или многослойную обмотку из проволоки, намотанную на жесткий цилиндрический каркас. С его помощью можно получить магнитное поле, регулируемое по величине и по направлению.

Для простоты рассмотрим соленоид с однослойной обмоткой, витки которой плотно намотаны в одном направлении. На рис.1 изображен продольный разрез соленоида вертикальной плоскостью, проходящей через его ось.

В сечениях витков показано направление тока. Направление вектора магнитной индукции определено правилом правого винта.

Величина магнитной индукции в произвольной точке, расположенной на оси соленоида, определяется формулой

$$B = \mu_0 \frac{IN}{2l} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \quad (1)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная;  $l$  – длина соленоида;  $N$  – число витков;  $I$  – сила тока, текущего по соленоиду;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы между вектором магнитной индукции и радиусом – вектором, проведенным из точки  $O$  в конец и начало соленоида соответственно.

Из распределения  $B(I)$  следует, что величина магнитной индукции в центре реального соленоида максимальна, а на краях быстро уменьшается. Линии магнитной индукции замкнутые. Условились считать, что они выходят из северного магнитного полюса  $N$  и входят в южный  $S$  (см. рис.1).

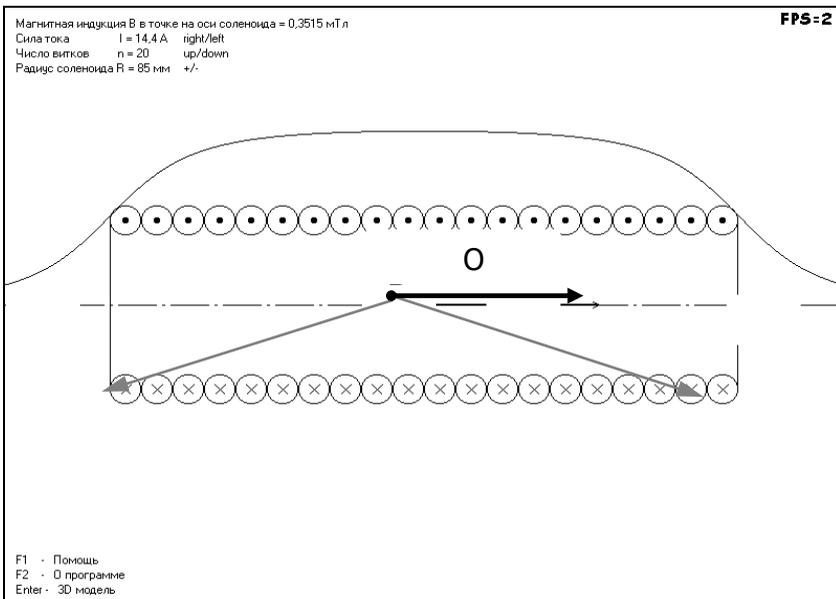


Рис.1

У достаточно длинного соленоида  $\alpha_1 \rightarrow 0$ ,  $\alpha_2 \rightarrow 180^\circ$ .

В этом случае формула (1) примет вид:

$$B = \mu_0 \frac{I \cdot N}{l} = \mu_0 I \cdot n, \quad (2)$$

где  $n = \frac{N}{l}$  - число витков, приходящееся на единицу длины.

Таким образом, внутри достаточно длинного соленоида магнитное поле однородное.

Аналогичное поле получают на оси тороида. Тороид можно рассматривать как свернутое кольцо достаточно длинный соленоид.

Увеличить магнитную индукцию на оси соленоида или тороида можно путем заполнения их объема ферромагнитным материалом с магнитной проницаемостью  $\mu$  (в этом случае формулы (1) – (2) умножают на  $\mu$ ). Такой принцип лежит в основе изготовления разнообразных катушек индуктивности, дросселей, трансформаторов, которые широко используются в электротехнике, радиоэлектронной промышленности, в средствах автоматики и телемеханики.

Движение заряженных частиц в магнитном поле

Предположим, что с помощью длинного соленоида создано в вакууме магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ . В область однородного поля влетает заряженная частица со скоростью  $v$ , под углом  $\alpha$  к линиям магнитной индукции. Со стороны магнитного поля на частицу действует сила Лоренца:

$$F = qBv \cdot \sin \alpha = qBv_y, \quad (3)$$

где  $v \cdot \sin \alpha = v_y$  – вертикальная составляющая вектора скорости частицы,  $q$  – ее заряд.

Под действием силы Лоренца частица движется с нормальным ускорением  $a_n = \frac{v_y^2}{R}$ , а 2-й закон Ньютона, описывающий это движение, имеет вид:

$$qBv_y = \frac{mv_y^2}{R}, \quad (4)$$

где  $m$  – масса частицы.

Из (4) можно определить радиус окружности, описываемой частицей в магнитном поле:

$$R = \frac{mv_y}{qB}. \quad (5)$$

Из связи между линейной и угловой скоростями ( $v_y = \omega R$ ) определим период обращения частицы:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (6)$$

За счет горизонтальной составляющей скорости  $v_x = v \cdot \cos \alpha$  частица движется равномерно вдоль линий индукции поля. Наложение вращательного движения частицы на ее поступательное движение приводит к движению по винтовой линии. Шаг винтовой линии равен (рис.2):

$$h = v_x T = v \cos \alpha \frac{2\pi m}{qB}. \quad (7)$$

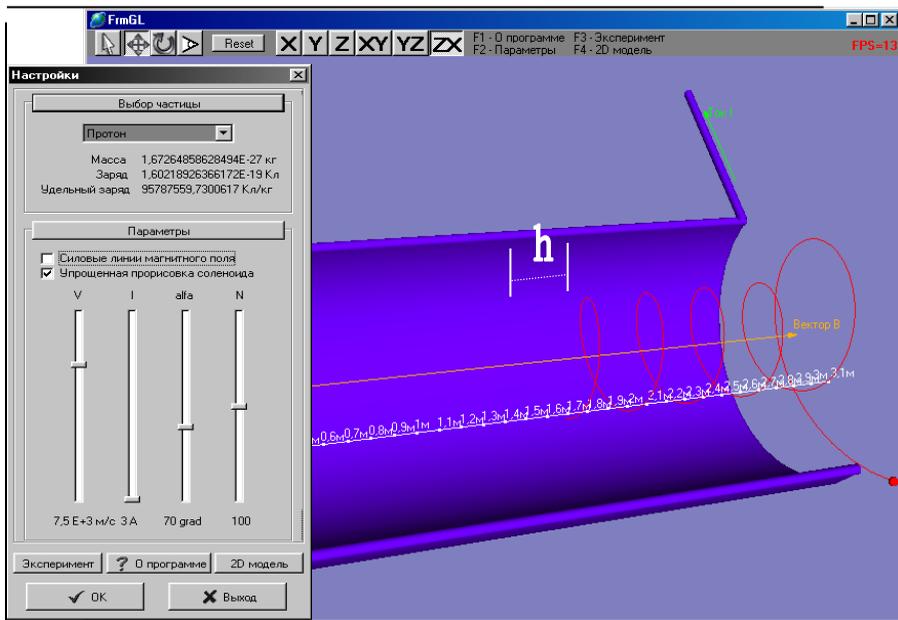


Рис.2

Ток вращающегося заряда создает магнитное поле, обратное основному, и тем самым ослабляет его. То есть вращающаяся частица представляет собой как бы маленький диамагнитный диполь, магнитный момент которого  $P_m = I \cdot S = qv\pi R^2$  ( $v$  – частота вращения частицы в поле).

В неоднородном магнитном поле (например, на выходе из соленоида) на такой диамагнитный диполь вдоль координаты  $Ox$  действует сила:

$$F = p_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha, \quad (8)$$

где  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial x}$  – градиент индукции магнитного поля, а  $\alpha$  – угол между

векторами  $\vec{p}_m$  и  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial x}$ .

Под действием силы  $\vec{F}$  диамагнитный диполь выталкивается из области более сильного магнитного поля в область более слабого. Указанный эффект учитывается при проектировании магнитных ловушек

(магнитных бутылок), с помощью которых удерживают высокотемпературную плазму в магнитном поле специальной конфигурации. На рис. 3 изображена линейная магнитная ловушка, в которой два коротких соленоида (изображены в виде круговых витков) расположены в параллельных плоскостях на определенном расстоянии друг от друга.

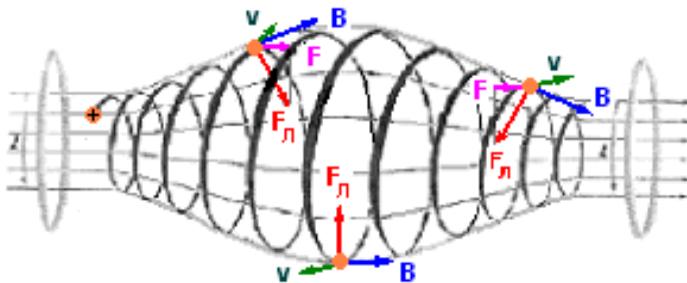


Рис.3

При определенных значениях одинаково направленных токов в соленоидах, заряженная частица как бы запирается между «пробками» (магнитными зеркалами) - областями сильного магнитного поля на торцах ловушки (центры соленоидов). На самом деле из уравнений (5) и (7) следует, что при очень больших значениях магнитной индукции в центре соленоида  $R$  и  $h$  стремятся к нулю. Это возможно при углах между векторами  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ , превышающих величину критического, т.е.  $\alpha \geq \alpha_{кр}$ , в противном случае частица просачивается через магнитные зеркала. В пространстве между магнитными зеркалами траектория частицы представляет собой спираль переменного шага и радиуса. Так как магнитная индукция посредине ловушки наименьшая, то согласно уравнениям (5) – (7) величины радиуса, шага спирали и период обращения частицы в этом месте наибольшие. Ориентация векторов скорости частицы  $\vec{v}$ , магнитной индукции  $\vec{B}$ , силы Лоренца  $\vec{F}_L$  и ее проекция на  $OX$  в различных точках траектории показаны на рисунке 3.

Разновидности магнитных «ловушек» и их различные комбинации широко используются в экспериментальных установках типа «Токомак», создаваемых для изучения управляемых термоядерных реакций.

Магнитной ловушкой в природных условиях является магнитное поле Земли, которое является защитой для всего живого от потоков заряженных частиц высоких энергий из космического пространства. Заряженные частицы «захватываются» магнитным полем Земли и образуют так называемые радиационные пояса, в которых частицы, как в магнитных ловушках, перемещаются туда и обратно по спиралеобразным траекториям между северным и южным магнитными полюсами.

Лишь в полярных областях некоторая часть частиц вторгается в верхние слои атмосферы, вызывая полярные сияния. Радиационные пояса Земли простираются от расстояний порядка 500 км до десятков земных радиусов.

### О программе

Программа позволят демонстрировать: 1) распределение величины магнитной индукции на оси соленоида; 2) движение заряженных частиц как в области однородного, так и в области неоднородного магнитного поля соленоида.

### **Подготовка к работе**

#### 1. Открыть файл «Solenoid.exe».

Зависимость величины магнитной индукции на оси соленоида от силы тока, числа и радиуса витков демонстрируется на 2D модели. Соленоид с однослойной обмоткой рассечен по диаметру, где схематично показано направление тока в его витках (см.рис.1).

С помощью горячих клавиш (указаны в левом верхнем углу) можно изменять величину и направление тока, число и радиус витков соленоида. Распределение величины и направления вектора магнитной индукции по длине соленоида представлены в виде графика и вектора  $\vec{B}$ , который перемещают с помощью мыши вдоль оси соленоида. В левом верхнем углу выводятся текущие значения физических величин, изменяемых и измеряемых в ходе работы программы.

Более подробная информация о 2D модели, ее функциональных возможностях, приведена в справке (F1). Возможен переход на 3D модель (Enter) или возвращение в папку (Esc).

2. Движение заряженных частиц в магнитном поле соленоида демонстрируется на 3D модели. Для этого необходимо открыть файл «SolenoidGL.exe». Вызовите справку (F1) и познакомьтесь с элементами управления главной панели.

*Нажать на кнопку «угол поля зрения» и удалить мышкой соленоид до размеров, соответствующих FPS 20. С помощью кнопок «ограничение модификации по одной или по двум осям», «поворот» и «перемещение» расположить соленоид на главной панели так, чтобы было удобно наблюдать за движением частицы (см. рис..2). Вызвать панель настройки (F2) и нажать на клавиши «Выбор частицы» и «Параметры».*

Программой предусмотрены два режима: 1) демонстрационный режим; 2) режим виртуального эксперимента.

**Выполнение работы**

**Задание 1** *Исследование зависимости распределения величины магнитной индукции на оси соленоида от его параметров.*

1. Перейти на 2D модель (См. «Подготовка к работе», пункт1).
2. Установить определенное значение числа витков, приходящихся на единицу длины  $n$  (клавиши  $\uparrow\downarrow$ ) и радиус  $R$  (клавиши  $+/-$ ) соленоида. Изменяя силу тока в интервале от  $-10A$  до  $10A$  (клавиши  $\leftarrow \rightarrow$ ), определить индукцию магнитного поля  $B$ . Занести в таблицу 1.

Таблица 1

$n=20$	$R=200$ мм				
$I, A$	-10	-5	0	5	10
$B, мТл$					

3. Установить силу тока в  $10A$  и число витков  $15$ . Изменяя радиус соленоида через  $10$  мм, определить индукцию магнитного поля. Занести в таблицу 2.

Таблица 2

$I=10$ А	$n=15$				
$R, мм$					
$B, мТл$					

4. Установить силу тока в  $10A$  и радиус соленоида  $30$ мм. Изменяя число витков в интервале от  $1$  до  $20$ , определить индукцию магнитного поля. Занести в таблицу 3.

Таблица 3

$I=10$ А	$R=30$ мм									
$n$	1	3	5	7	10	12	14	16	18	20
$B, мТл$										

5. По проделанной работе сделать вывод. В выводе указать, как влияют параметры соленоида и величина тока в нем на величину магнитной индукции и на область однородного магнитного поля.

**Задание 2** *Определение удельного заряда неизвестной частицы.*

1. Установить режим эксперимента (F3 или на панели «Настройка» нажать клавишу «Эксперимент»).
2. Выбрать способ измерения: **по радиусу**.
3. Вызвать панель «Параметры» и с помощью регуляторов « $V$ », « $I$ » и « $N$ » подобрать радиус траектории, удобный для измерений (**в данном случае  $N$  - это число витков на единице длины**).

По умолчанию регулятор «alfa» установлен на  $90^\circ$ , а частица находится в центре соленоида.

4. Записать значения радиуса траектории и всех величин, указанных на панели «Параметры».

5. Вычислить значение удельного заряда частицы по формуле, которую получают совместным решением уравнений (2) и (5) с учётом того, что  $\alpha = 90^\circ$ :

$$\frac{q}{m} = \frac{v_y}{R \cdot B} = \frac{v}{R \cdot \mu_0 I \cdot n},$$

где  $n$  соответствует  $N$  на панели.

6. Определить тип частицы, нажав на панели «Выбор частицы».

Сравнить полученное значение  $\frac{q}{m}$  с табличным значением удельного

заряда  $\left(\frac{q}{m}\right)_{\text{ТАБЛ.}}$  частицы, участвующей в эксперименте. Вычислить

погрешность измерения по формуле

$$\delta = \frac{|q/m - (q/m)_{\text{ТАБЛ.}}|}{q/m}.$$

7. Выбрать способ измерения: **по шагу винтовой линии** (рис.2). Регулятором «alfa» установить  $\alpha \approx 80^\circ$ ,  $N = 150$ , а регуляторами «V» и «I» подобрать шаг винтовой линии, удобный для измерений. Для точности определения шага винтовой линии нажать клавишу паузы.

8. Записать значение шага винтовой траектории и всех величин, указанных на панели «Параметры».

9. Вычислить значение удельного заряда частицы по формуле, которую получают совместным решением уравнений (2) и (7):

$$\frac{q}{m} = \frac{2\pi v \cos \alpha}{h \cdot \mu_0 I \cdot n}.$$

10. Повторить пункт 6.

11. По проделанному заданию сделать вывод.

*Программой предусмотрена электронная проверка результатов эксперимента. Для этого на панели «Эксперимент» укажите тип частицы и введите ее удельный заряд (измеренный).*

**Задание 3** Исследование влияния магнитного поля соленоида на характер движения заряженной частицы.

1. Перейти на 3D модель (См. «Подготовка к работе», пункт 2).

2. Выбрать для эксперимента заряженную частицу. С помощью

регуляторов поочередно устанавливать: различное количество витков соленоида; минимальное (максимальное) значение тока в соленоиде; максимальную и минимальную скорости частицы; угол наклона вектора скорости  $v$  частицы к вектору магнитной индукции.

3. Повторить пункт 2 для другой частицы.
4. По проделанному заданию сделать вывод.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что называется соленоидом?
2. Как определить величину магнитной индукции на оси реального соленоида?
3. Как определить величину магнитной индукции на оси бесконечно длинного соленоида?
4. Как определяется величина и направление силы Лоренца?
5. По какой траектории движутся частицы, влетающие в магнитное поле под углом к направлению поля:  $\alpha = 0^0$ ,  $\alpha = 90^0$ ,  $0^0 < \alpha < 90^0$ ?
6. Приведите краткую теорию движения заряженных частиц по винтовой траектории в однородном магнитном поле.
7. Каков характер движения заряженных частиц в неоднородном магнитном поле? Объясните принцип действия магнитных ловушек.

### ***Список литературы***

1. Трофимова Т. И. Курс физики.- М.: Высш. шк., 2016
2. Грабовский Р.И. Курс физики - СПб.: Лань, 2012