

*МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Общая физика»

## **ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы № 20к  
для студентов направлений 231000.62, 151900.62, 150700.62,  
220700.62, 220400.62, 280700.62, 221700.62, 140400.62, 190600.62,  
190700.62, 090303.65, 190110.65, 190109.65

Курган 2015

Кафедра: «Общая физика»

Дисциплина: «Физика»

(направления 231000.62, 151900.62, 150700.62, 220700.62, 220400.62, 280700.62, 221700.62, 140400.62, 190600.62, 190700.62, специальности 090303.65, 190110.65, 190109.65).

Составили: канд. физ.-мат. наук, доцент Т.Н. Новгородова,  
канд. физ.-мат. наук, доцент В.М. Овсянов.

Утверждены на заседании кафедры «02» февраля 2015 г.

Рекомендованы методическим советом университета «19» декабря 2014 г.

## ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

- 1 «Открытая физика 1.1» – пакет компьютерных моделей.
- 2 Персональный компьютер.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1 Изучение траекторий движения заряженных частиц в магнитном поле.
- 2 Определение удельного заряда электрона.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Опыт показывает, что, подобно тому, как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электростатическое поле, так и в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое **магнитным**. Наличие магнитного поля обнаруживается по силовому действию на внесенные в него проводники с током или постоянные магниты. Название «магнитное поле» связывают с ориентацией магнитной стрелки под действием поля, создаваемого током (это явление впервые обнаружено датским физиком Х. Эрстедом).

Так как магнитное поле является *силовым*, то его, по аналогии с электрическим, изображают с помощью **линий магнитной индукции** – линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

Линии магнитной индукции всегда *замкнуты*. Этим они отличаются от линий напряженности электростатического поля, которые являются *разомкнутыми* (начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных).

На рисунке 1 изображены линии магнитной индукции полосового магнита; они выходят из северного полюса и входят в южный. Вначале казалось, что здесь наблюдается полная аналогия с линиями напряженности электростатического поля двух разноименных зарядов и полюсы магнитов играют роль магнитных «зарядов» (магнитных монополей). Однако опыт показывает, что, разрезая магнит на части, его полюсы разделить нельзя, т.е. в отличие от электрических зарядов свободные магнитные «заряды» не существуют, поэтому линии магнитной индукции не могут обрываться на полюсах. В дальнейшем было установлено, что внутри полосовых магнитов имеется магнитное поле, аналогичное полю внутри соленоида, и линии магнитной индукции этого магнитного поля являются продолжением линий магнитной индукции вне магнита. Таким образом, линии магнитной индукции магнитного поля постоянных магнитов являются также замкнутыми.

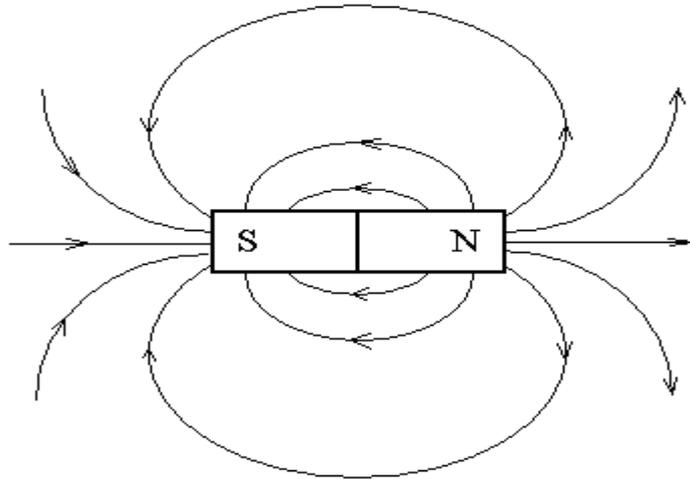


Рисунок 1 – Линии индукции магнитного поля постоянного магнита.

Опыт показывает, что магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные заряды, движущиеся в магнитном поле.

Сила, действующая на электрический заряд  $q$ , движущийся в магнитном поле со скоростью  $\vec{v}$ , называется **силой Лоренца**.

Она равна:

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (1)$$

где  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля, в котором движется заряд.

Для определения направления силы Лоренца можно воспользоваться **правилом левой руки**.

**Правило левой руки:** если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор  $\vec{B}$ , а четыре вытянутых пальца направить вдоль вектора скорости  $\vec{v}$ , то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на *положительный заряд*.

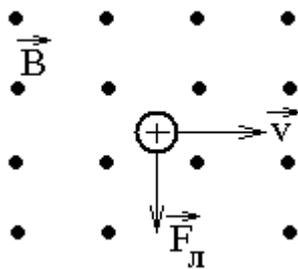


Рисунок 2 – Направление силы Лоренца

На рисунке 2 показана взаимная ориентация векторов  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  (индукция магнитного поля направлена к нам, на рисунке показано точками) и  $\vec{F}_L$  для положительного заряда. На отрицательный заряд сила действует в противоположном направлении.

Модуль силы Лоренца равен

$$F_L = qvB \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол между  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Отметим еще раз, что магнитное поле *не действует на покоящийся электрический заряд*. В этом существенное отличие магнитного поля от электрического. *Магнитное поле действует только на движущиеся в нем заряды*.

Так как по действию силы Лоренца можно найти модуль и направление вектора  $\vec{V}$ , то выражение для силы Лоренца может быть использовано (наравне с другими) для определения вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости движения заряженной частицы, поэтому она изменяет только направление этой скорости, не изменяя ее модуля. Следовательно, сила Лоренца работы не совершает. Иными словами, постоянное магнитное поле не совершает работы над движущейся в нем заряженной частицей и кинетическая энергия этой частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

Направление силы Лоренца и направление вызываемого ею отклонения заряженной частицы в магнитном поле зависит от знака заряда частицы. На этом основано определение знака заряда частиц, движущихся в магнитном поле.

Форма траектории движения заряженной частицы в магнитном поле зависит от угла  $\alpha$ , под которым частица влетает в магнитное поле.

При  $\alpha = 0^\circ$  или  $180^\circ$  скорость частицы параллельна вектору индукции  $\vec{B}$ , сила Лоренца согласно (2) равна нулю, следовательно, траектория движения – прямая.

Если скорость частицы  $\vec{v}$  перпендикулярна вектору индукции, то сила Лоренца будет сообщать частице нормальное (центростремительное) ускорение. Следовательно, частица будет двигаться по окружности, радиус которой определяется из условия:  $F_{л} = ma_n$

или

$$qvB = m \frac{v^2}{R}.$$

Отсюда

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (3)$$

Период обращения частицы  $T = \frac{2\pi R}{v}$  равен

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \quad (4)$$

и не зависит от ее скорости.

Если скорость  $\vec{v}$  заряженной частицы направлена под острым углом  $\alpha$  к вектору  $\vec{B}$ , то движение будет происходить по спирали, ось которой параллельна магнитному полю.

Измеряя радиус кривизны траектории или период обращения частицы в магнитном поле, можно определить удельный заряд частицы.

**Удельным зарядом** частицы называется отношение заряда частицы к её массе.

Из формулы (3) удельный заряд будет равен:

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{RB} \quad (5)$$

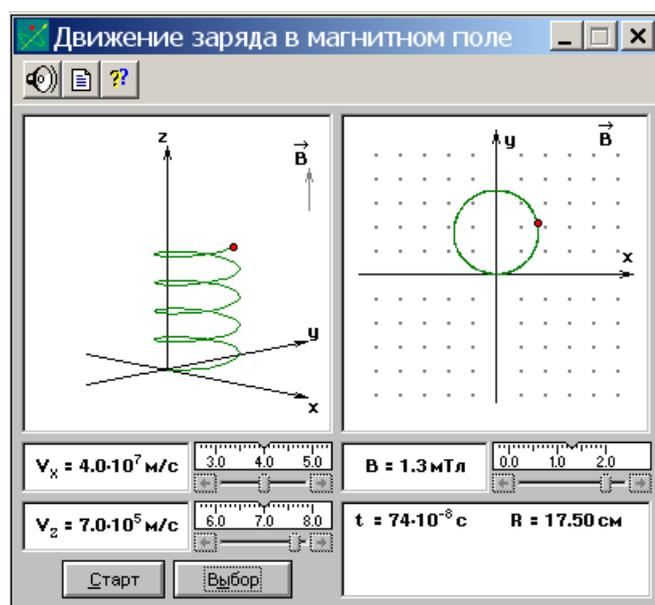
Из формулы (4) также можно выразить удельный заряд

$$\frac{q}{m} = \frac{2\pi}{T \cdot B} \quad (6)$$

### МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ИЗМЕРЕНИЙ:

Запустите программу «Открытая физика». В разделе «Электричество и магнетизм» выберите «**Движение заряда в магнитном поле**».

Вид рабочего поля компьютерной модели показан на рисунке 3.



В нижней части окна имеются три регулятора, позволяющие задавать начальные условия: величину горизонтальной ( $v_x$ ) и вертикальной ( $v_z$ ) составляющих скорости движения частицы, а также индукцию магнитного поля ( $B$ ).

Кнопка «Старт» (она же «Стоп») служит для запуска (остановки) работы модели. Кнопка «Выбор» позволяет изменять начальные параметры, активируя работу регуляторов, а также возвращать частицу в исходное состояние.

Рисунок 3 – Вид рабочего поля

### Задание 1. Изучение траекторий движения заряженных частиц в магнитном поле

1 Нажмите кнопку «Выбор». С помощью регулятора величины магнитной индукции установите числовое значение  $B$ , взятое из таблицы 1 для вашей бригады.

Таблица 1 – Значения магнитной индукции В

Номер бригады	1, 7	2, 8	3, 9	4, 10	5, 11	6, 12
В, мТл	-2	-1,5	-1	2	1,5	1

2 Установите минимальное значение горизонтальной составляющей скорости  $v_x = 0$ .

3 Установите максимальное значение вертикальной составляющей скорости  $v_z = 8 \cdot 10^5$  м/с.

4 Нажмите кнопку «Старт» и наблюдайте за движением частицы.

5 Зарисуйте форму траектории движения частицы. На рисунке укажите направления векторов магнитной индукции, скорости частицы и силы Лоренца, действующей на заряженную частицу.

6 Повторите пп. 4 и 5 для случаев  $v_x = 5 \cdot 10^7$  м/с,  $v_z = 8 \cdot 10^5$  м/с;  
 $v_x = 5 \cdot 10^7$  м/с,  $v_z = 0$ .

7 Пользуясь «правилом левой руки», определите знак заряда частицы.

### Задание 2. Определение удельного заряда частицы

1 Нажмите кнопку «Выбор». Установите минимальное значение вертикальной составляющей скорости  $v_z = 0$ .

2 Установите  $v_x = 3 \cdot 10^7$  м/с.

3 Измерьте время  $t$  пяти полных оборотов частицы.

Для этого: нажмите кнопку «СТАРТ», следите за движением частицы и в момент, когда она совершит 5 полных оборотов, нажмите кнопку «СТОП». Запишите полученное значение времени  $t$  в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты измерений

Бригада №

В = мТл

$v_x \cdot 10^7$ , м/с	R, см	t, с	T, с	$\frac{q}{m}$ , Кл/кг по формуле (5)	$\frac{q}{m}$ , Кл/кг по формуле (6)
3					
4					
5					
6					
7					
8					

4 Запишите в таблицу 2 значение радиуса окружности, по которой двигалась частица.

5 Последовательно увеличивая скорость частицы на  $10^7$  м/с, проделайте п.п.3-4 ещё 5 раз и заполните таблицу 2.

6 Рассчитайте период обращения частицы  $T = \frac{t}{2\pi N}^*$ , где  $N=5$  – число оборотов.

7 По формулам (5) и (6) рассчитайте удельный заряд частицы. Результаты занесите в таблицу 2.

8 Найдите среднее значение удельного заряда.

9 Пользуясь справочными материалами, рассчитайте удельный заряд электрона. Сравните это значение с результатом, полученным в п. 8. Оцените погрешность проведенных измерений по формуле

$$\gamma = \frac{|(q/m)_{\text{таб}} - (q/m)_{\text{эксп}}|}{(q/m)_{\text{таб}}} \cdot 100\% .$$

10 Сделайте вывод о работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Что такое сила Лоренца? Чему она равна?

2 Сформулируйте правило левой руки для определения направления силы Лоренца.

3 По каким траекториям может двигаться заряженная частица в однородном магнитном поле? От чего зависит форма траектории?

4 Почему сила Лоренца не совершает работы?

5 Выведите расчетные формулы удельного заряда частицы, использовавшиеся в данной работе.

6 Приведите примеры проявления и использования силы Лоренца в природе и технике.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Источники магнитного поля. Способы обнаружения магнитного поля.

2 Как определяется величина и направление вектора  $\vec{B}$ ? Единицы измерения.

3 Что такое линии индукции? Сформулируйте «правило правой руки» для определения направления линий индукции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Трофимова, Т. И. Курс физики [Текст] / Т. И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 2003.

2 Детлаф, А. А. Курс физики [Текст] / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Академия, 2003.

3 Савельев, И. В. Курс физики [Текст] / И. В. Савельев. – Т. 1-5. – М. : АКТ, 2005.

---

\* Введение множителя  $2\pi$  в знаменателе данной формулы связано с ошибкой в программе компьютерной модели.

Новгородова Татьяна Назаровна  
Овсянов Виктор Михайлович

## **ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы № 20к  
для студентов направлений 231000.62, 151900.62, 150700.62,  
220700.62, 220400.62, 280700.62, 221700.62, 140400.62, 190600.62,  
190700.62, 090303.65, 190110.65, 190109.65

Редактор Е.А. Могутова

---

Подписано в печать 30.06.15	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ. л. 0,75	Уч.-изд. л. 0,75
Заказ 141	Тираж 100	Не для продажи

---

РИЦ Курганского государственного университета.  
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.