

## **Виртуальные лабораторные работы «Движение заряженной частицы в параллельных и перпендикулярных электрическом и магнитном полях»**

**Кравченко Н.С., Ревинская О.Г.**

Томский политехнический университет, кафедра теоретической и экспериментальной физики

Изучение движения заряженных частиц во внешних полях различной конфигурации имеет большое методическое значение при изучении раздела «Электричество и магнетизм» курса общей физики. Движение заряженных частиц (протонов, ионов, ядер) во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях является двумерным и описывается в общем случае трохойдой. Движение заряженных частиц в параллельных электрическом и магнитном полях является трехмерным и описывается спиральной линией. Радиус и шаг этих кривых зависят как от напряженности электрического и индукции магнитного полей, так и от начальной скорости частицы. Оба движения можно представить в виде суперпозиции поступательного и вращательного движения. В ходе работы студенты наблюдают движение частицы при различных начальных условиях. По измеренным характеристикам определяют отношение заряда частицы к ее массе.

Для натурального изучения движения заряженных частиц в скрещенных полях необходимо сложное оборудование, как правило, недоступное кафедрам общей физики. Нами разработаны виртуальные лабораторные работы «Движение заряженной частицы в перпендикулярных электрическом и магнитном полях» и «Движение заряженной частицы в параллельных электрическом и магнитном полях», моделирующие данные физические явления на компьютере.

Движение заряженной частицы массой  $m$ , зарядом  $q$  во внешних электрическом и магнитном полях является трехмерным и описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{q}{m}\vec{E} + \frac{q}{m}[\vec{v}, \vec{B}].$$

Характер движения определяется распределением электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{B}$  полей в пространстве и во времени. Если поля стационарные и влиянием движущейся частицы на них можно пренебречь, то характер движения зависит от относительного распределения полей в пространстве. В данной работе рассмотрены два случая: взаимно перпендикулярные и параллельные не меняющиеся со временем поля.

Рассматривая движение заряженной частицы **во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях** можно так выбрать инерциальную систему координат, что движение частицы примет двумерный характер. Для этого необходимо совместить оси координат, например

OY и OZ, с направлениями напряженности электрического  $\vec{E}$  поля и индукции магнитного  $\vec{B}$  поля. Тогда система скалярных уравнений движения частицы распадается на две. Первая описывает движение частицы в плоскости XOY, вторая – равномерное движение в направлении OZ с постоянной скоростью  $v_z(0)$ . Легко перейти в другую инерциальную систему координат, в которой Z-компонента начальной скорости частицы равнялась бы нулю  $v_z(0) = 0$ . В выбранной системе координат движение частицы но-

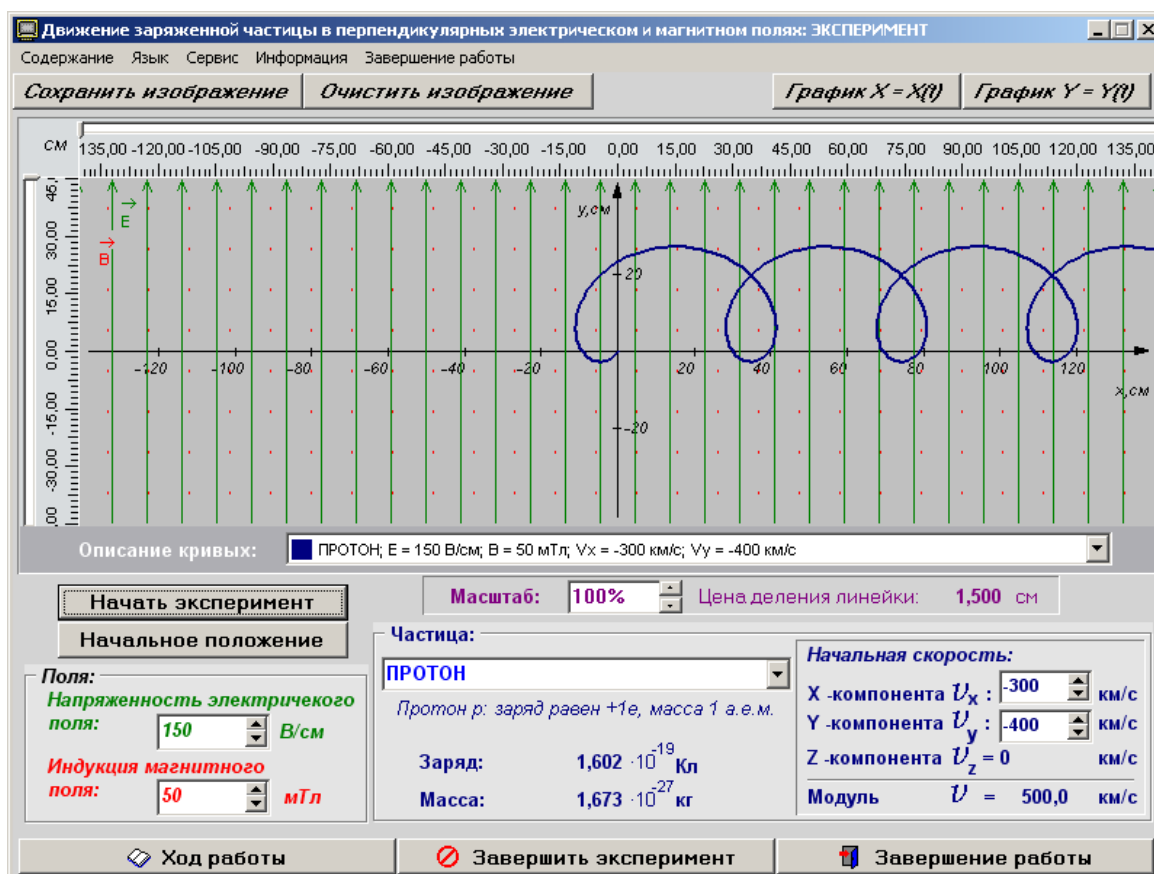


Рис. 1. Виртуальная лабораторная работа «Движение заряженной частицы в перпендикулярных электрическом и магнитном полях»

сит двумерный характер. Эта система координат и используется для выполнения экспериментов в компьютерной лабораторной работе «Движение заряженной частицы в перпендикулярных электрическом и магнитном полях» (рис. 1). Ось OZ направлена перпендикулярно поверхности экрана.

Решая систему из двух дифференциальных уравнений, можно показать [1, 2], что движение заряженной частицы представляет собой суперпозицию вращательного и поступательного движения.

$$x = \frac{1}{\omega} v_y(0) - R \cos(\omega t + \theta) + \frac{E}{B} t,$$

$$y = \frac{1}{\omega} \left( \frac{E}{B} - v_x(0) \right) + R \sin(\omega t + \theta),$$

где  $\operatorname{tg}\theta = \frac{v_x(0) - \frac{E}{B}}{v_y(0)}$ ,  $\theta$  – начальная фаза вращения.

Вращение происходит в плоскости XOY с постоянной частотой  $\omega = \frac{q}{m} B$ . Радиус вращательного движения  $R$  зависит от начальной скорости частицы, а также от напряженности электрического поля и индукции

магнитного поля  $R = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(v_x(0) - \frac{E}{B}\right)^2 + \left(v_y(0)\right)^2}$ . Поступательное движение

происходит вдоль оси OX с постоянной скоростью  $v_{\text{пост}} = \frac{E}{B}$ . В общем случае такое движение описывается трохоидой. Когда скорость вращательного движения больше скорости поступательного движения, трохоида образует петли (рис. 1). Когда начальная скорость частицы равна нулю, скорость вращательного и поступательного движения равны, трохоида вырождается в циклоиду.

Движение носит периодический характер, поэтому в работе предлагается исследовать зависимость периода вращения от напряженности электрического поля и индукции магнитного поля. Радиус вращательного движения зависит от модуля начальной скорости частицы. Поэтому зависимости  $R = R(v_x(0))$  и  $R = R(v_y(0))$  носят кусочно-линейный характер. Построив эти зависимости студенты получают достаточно данных для вычисления отношения заряда частицы к ее массе.

Рассматривая движение заряженной частицы **в параллельных электрическом и магнитном полях** невозможно выбрать инерциальную систему координат так, чтобы движение частицы было двумерным. Для того, чтобы обеспечить лучшую возможность сравнения результатов двух работ, совместим ось OY с направлениями напряженности электрического  $\vec{E}$  поля и индукции магнитного  $\vec{B}$  поля. Тогда система скалярных уравнений движения частицы распадается на две. Первая описывает вращательное движение частицы в плоскости XOZ, вторая – равнопеременное движение в направлении OY с постоянным ускорением  $\frac{q}{m} E$ . В компьютерной лабораторной работе «Движение заряженной частицы в параллельных

электрическом и магнитном полях» (рис. 2) используется описанная система координат.

Решая систему дифференциальных уравнений, аналогично можно показать [1], что движение заряженной частицы представляет собой суперпозицию вращательного и поступательного движения.

$$x = \frac{1}{\omega} v_z(0) - R \cos(\omega t - \varphi),$$

$$y = v_y(0) + \frac{1}{2} \frac{q}{m} E t^2,$$

$$z = -\frac{1}{\omega} v_x(0) + R \sin(\omega t - \varphi),$$

где  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{v_x(0)}{v_z(0)}$ ,  $\varphi$  – начальная фаза вращения.

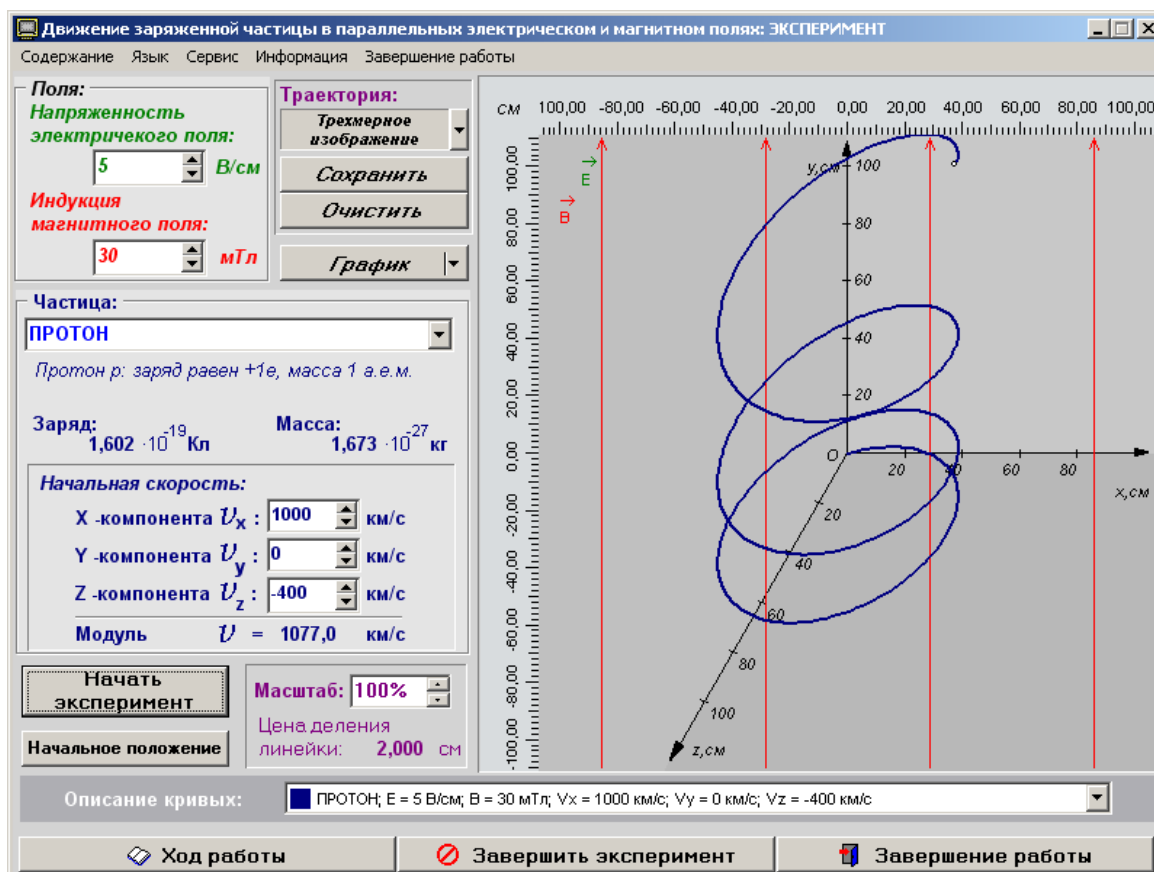


Рис. 2. Виртуальная лабораторная работа «Движение заряженной частицы в параллельных электрическом и магнитном полях»

Вращение происходит в плоскости  $XOZ$  с постоянной частотой  $\omega = \frac{q}{m} B$ . Радиус вращательного движения  $R$  зависит от  $X$ - и  $Z$ -компонент

начальной скорости частицы  $R = \frac{1}{\omega} \sqrt{(v_x(0))^2 + (v_z(0))^2}$ . Поступательное движение происходит вдоль оси ОУ с постоянным ускорением. В общем случае такое движение описывается спиральной линией. Когда напряженность электрического поля равна нулю, спираль имеет постоянный шаг. Если напряженность электрического поля отлична от нуля, шаг спирали равномерно растет со временем (рис. 2) – спираль раскручивается. В данной работе особый интерес представляет случай, когда направление Y-компоненты начальной скорости противоположно ускорению. Тогда спираль вначале скручивается, а затем начинает раскручиваться.

В работе предлагается исследовать зависимость изменения шага спирали от напряженности электрического поля и индукции магнитного поля. Радиус вращательного движения зависит от X- и Z-компонент начальной скорости частицы. Поэтому зависимость  $R = R(\sqrt{(v_x(0))^2 + (v_z(0))^2})$  носит линейный характер. Построив эти зависимости студенты также могут вычислить отношения заряда частицы к ее массе.

В обеих работах студент в интерактивном режиме может изменять напряженность электрического поля и индукцию магнитного поля, а также значения проекций начальной скорости частицы. При фронтальном выполнении данных работ целесообразно предложить студентам провести эксперимент для различных частиц с последующим сравнением и обсуждением результатов. Истинный заряд и масса частицы приводятся для обеспечения возможности сравнения полученных результатов с теоретическими.

Исходя из особенностей физического процесса выполнение экспериментов воспроизводится в замедленном времени.

Для повышения точности измерения в работах эмитируется эффект микроскопа, который реализуется путем изменения масштаба области эксперимента.

Для повышения учебной эффективности выполнения работ предусмотрена возможность построения графиков зависимости каждой координаты движущейся частицы от времени. Поскольку движение в параллельных полях носит трехмерный характер, в этой работе предусмотрена также возможность представления траектории движения в проекциях на плоскости XOY, XOZ, YOZ. Весь предлагаемый в работах сервис способствует развитию навыков физического анализа результатов, пространственного и инженерного воображения. Возможность сохранения результатов эксперимента в виде bmp-файлов способствует сокращению рутинной работы и большему проникновению в физическую суть изучаемых явлений.

Включение виртуальных лабораторных работ в учебный процесс повышает его эффективность. Что также наблюдалось и при включении в учебный процесс виртуальных работ по механике и колебаниям [3-5].

1. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1972, 224 с.
2. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высш. шк., 1983. – 279 с.
3. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Компьютерный лабораторный практикум. Цикл работ по разделу «Колебания» курса общей физики. // VIII конференция стран Содружества «Современный физический практикум». Москва, 22-24 июня 2004 г., с. 104-105.
4. Богданов О.В., Ревинская О.Г., Филимонов С.С. Компьютерные лабораторные работы как один из способов развития интереса к изучению физики. // X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные процессы в высшей школе» Краснодар, 23-26 сентября 2004 г., с. 98-99.
5. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г. Изучение основных законов механики с помощью моделирующих лабораторных работ на компьютере. // XV Международная конференция «Применение новых технологий в образовании», Троицк, 29-30 июня 2004 г., с. 86-87.