

Изучение движения заряженной частицы в скрещенных стационарных электрическом и магнитном полях с помощью виртуальных лабораторных работ

Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская

Томский политехнический университет, 634034, Томск, пр. Ленина, 30
e-mail: ogr@tpu.ru

Рассмотрение движения заряженных частиц во внешних полях различной конфигурации имеет большое методическое значение при изучении раздела «Электричество и магнетизм» курса общей физики. В двух случаях движения можно представить в виде суперпозиции поступательного и вращательного движения (трохоида, винтовая линия). В ходе работы у студентов формируются не только предметные знания, но и обобщенные навыки исследования теоретических моделей.

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. Под моделирующей виртуальной работой будем понимать компьютерную реализацию физической модели, которая преследует цель развития навыков изучения известных теоретических моделей.

Под моделью какого-либо явления или объекта понимают, как правило, другое явление или объект, совпадающее с исходным по ряду параметров, признанных существенными (актуальными), и конструируемое с целью изучения исходного объекта или явления [1]. В физике разработано большое количество теоретических моделей, изучение которых способствует формированию целостной физической картины мира.

Методика выполнения представленных в данной публикации виртуальных работ опирается на общую методику изучения физических моделей, которую можно разделить на несколько этапов [2]: 1) постановка задачи; 2) выявление и обоснование существенных параметров изучаемой задачи и принципов их взаимодействия и взаимосвязи - построение физической модели; 3) выбор и обоснование математического описания полученной модели — построение математической модели; 4) решение полученной математической модели; 5) изучение полученной модели, как с математической, так и с физической точки зрения; 6) сравнение полученных результатов с результатами других моделей и

имеющимися экспериментальными данными.

В учебном процессе при постановке задачи рассматривают исторические предпосылки изучения данной физической проблемы, как правило, в рамках лекционного материала. Обоснование существенных параметров, законов их взаимодействия и математического описания осуществляется в методическом описании к лабораторной (натурной или виртуальной) работе. При решении математической модели актуализируются знания, полученные в курсе математического анализа (если математическая модель может быть решена аналитически) или в курсе информатики (если выбран путь численного решения математической модели). Для изучения полученной модели необходимо выявить результирующие характеристики модели и связать их с имеющимися актуальными параметрами. Этот этап является очень важным, подготавливая основу и критерии дальнейшего сравнения полученных результатов с результатами других моделей и экспериментальными данными.

Всякая модель характеризуется как набором начальных (актуальных) параметров (применительно к динамическим процессам они носят название начальных условий), так и рядом результирующих характеристик. В реальных научных исследованиях считается недостаточным выявление только качественных взаимосвязей результирующих характеристик модели с ее актуальными начальными параметрами - необходимо установление количественных зависимостей. При изучении моделей физических процессов и явлений с помощью компьютерных лабораторных работ эта сторона исследования является наиболее слабо разработанной. В течение длительного периода виртуальные работы предоставляли студентам только возможность качественных исследований. Богатый опыт компании Физикон в разработке виртуальных лабораторных работ доказал принципиальную необходимость количественного изучения физических теоретических моделей. Однако, количественные результирующие характеристики предоставляются студентам в готовом виде [3]. Авторы данной статьи считают, что большим развивающим эффектом будут обладать работы, предоставляющие студентам возможность самим путем манипуляции какими-то виртуальными инструментами получить необходимые числовые данные, а по ним затем вычислить необходимые результирующие характеристики. Работы, построенные по такому принципу, не предоставляют готовые знания, а знакомят студентов с принципами их получения, раскрывают пути дальнейшего сравнения полученных результатов с результатами других моделей и экспериментальными данными.

Далее описаны две виртуальные лабораторные работы, в которых изучается движение заряженной частицы в скрещенных (параллельных и перпендикулярных)

электрическом и магнитном полях. В обоих случаях движение характеризуется определенной периодичностью. Для измерения координат тела в различные моменты времени в работах предусмотрены виртуальные линейки. Для повышения точности измерений можно изменять масштаб отображения области эксперимента. Измерительные линейки оборудованы ползунками прокрутки, позволяющими более точно соотнести положение тела с делениями линейки. Обработав полученные числовые результаты, студенты получают зависимость характеристик движения от актуальных параметров моделей: напряженности электрического, индукции магнитного поля, направления и величины начальной скорости, а также удельного заряда частицы.

Движение заряженной частицы массой m , зарядом q во внешних электрическом и магнитном полях в общем случае 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 изменением 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 публикации рассмотрены два случая: взаимно перпендикулярные и параллельные не меняющиеся со временем однородные поля.

Рассматривая движение заряженной частицы **во взаимно перпендикулярных электрическом и магнитном полях** можно так выбрать инерциальную систему отсчета, 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 отсчета, в которой Z -компонента начальной скорости частицы равнялась бы нулю $v_z(0) = 0$. В выбранной системе координат движение частицы носит 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 плоскости экрана.

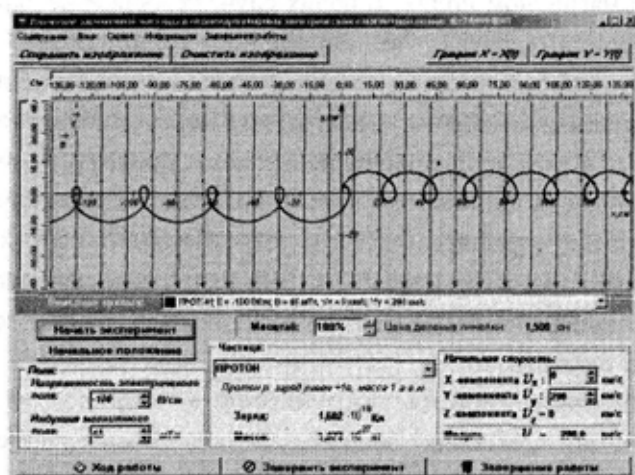


Рисунок 1. Виртуальная лабораторная работа “Движение заряженной частицы в перпендикулярных электрическом и магнитном полях”.

Решая систему из двух дифференциальных уравнений, можно показать [1, 5], 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 $\operatorname{tg} \theta = \frac{v_x(0) - \frac{E}{B}}{v_y(0)}$, θ – 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 троихой. 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.

Так как движение носит периодический характер, в работе предлагается исследовать период и радиус вращательного движения, а также длину витка трохоиды в зависимости от напряженности электрического и индукции магнитного поля. Радиус вращательного движения зависит от модуля начальной скорости частицы. В процессе построения этих зависимостей студенты познакомятся с различными частными случаями изучаемого вида движения. Фиксируя одни и изменяя другие параметры, а затем, анализируя полученные данные, они смогут систематизировать полученные знания. В качестве средства самоконтроля в работе предлагается вычислить отношения заряда частицы к ее массе.

Рассматривая движение заряженной частицы в параллельных электрическом и магнитном полях невозможно выбрать инерциальную систему отсчета 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. При этом система скалярных уравнений движения частицы также 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 отсчета.

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

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 OY с постоянным ускорением. В общем случае такое движение описывается винтовой линией. Когда напряженность электрического поля равна нулю, винтовая линия имеет постоянный шаг. Если напряженность электрического поля отлична от нуля, шаг винтовой линии равномерно растет со временем (рис. 2). В данной работе особый интерес представляет случай, когда направление Y-компоненты начальной скорости противоположно ускорению. Тогда шаг винтовой линии вначале уменьшается до нуля, а затем начинает увеличиваться.

В работе предлагается исследовать зависимость периода и радиуса вращательного движения, а также шага винтовой линии от напряженности электрического и индукции магнитного поля. Что также как и в предыдущей работе стимулирует разностороннее изучение данного явления. Задача вычисления отношения заряда частицы к ее массе по-прежнему носит функцию самоконтроля проведенных исследований.

В обеих работах студент в интерактивном режиме может изменять напряженность электрического поля и индукцию магнитного поля, что приводит к немедленному изменению плотности силовых линий поля в области эксперимента. При

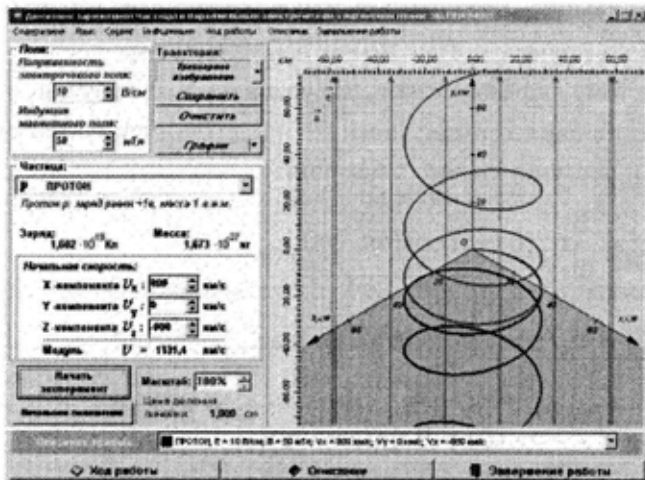


Рисунок 2. Виртуальная лабораторная работа "Движение заряженной частицы в параллельных электрическом и магнитном полях".

фронтальном выполнении данных работ целесообразно предложить студентам провести эксперимент для различных частиц с последующим сравнением и обсуждением результатов. Организовав запланированный обмен данными, можно полученные результаты дополнить исследованием зависимости длины витка трохоиды и шага винтовой линии от величины заряда частицы.

Обе работы предоставляют возможность не только увидеть и исследовать пространственное движение частицы (траекторию), но и соответствующие зависимости координат от времени. Сопоставление аналитического решения с наблюдением за динамическим движением, траектории с зависимостями координат от времени, изменения актуальных параметров с измерениями координат частицы, выявление и анализ результирующих характеристик изучаемой физической модели способствуют развитию навыков физического анализа результатов, пространственного и инженерного воображения. Описанная программная реализация позволяет сохранять изображение траектории и графики зависимости координат тела от времени в виде графических bmp-файлов, способствуя сокращению рутинной работы и большему проникновению в физическую суть изучаемых явлений.

Таким образом, в описанных работах сопоставляется аналитическая зависимость длины витка трохоиды или шага винтовой линии от исходных данных физической задачи с соответствующими числовыми зависимостями, полученными путем измерения координат тела в определенные моменты времени с помощью виртуальных приборов. На примере выполнения данных работ студенты расширяют свои представления о разнообразии физических явлений, которые можно изучать с помощью компьютерного моделирования, и развивают обобщенные навыки изучения физических моделей.

Включение виртуальных лабораторных работ в учебный процесс повышает заинтересованность студентов в изучении курса физики, активизирует их познавательные способности, расширяет круг изучаемых в лабораторном практикуме явлений. Повышение эффективности преподавания физики также наблюдается и при включении в учебный процесс виртуальных работ по другим разделам (например, механике, колебаниям) [6-8].

Литература

1. *Борисенок С.В.* Современный подход к моделированию в курсе теоретической физики в педагогических университетах // Физическое образование в вузах. - 2004. - Т. 10, № 3. - С. 6-18.
2. *Попов С.Е.* Исследование объектов в вычислительной физике // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 22. - М.: ИСМО РАО, 2005. - С. 115-117.
3. Виртуальный практикум по физике для вузов // http://www.physicon.ru/education.php?sec-products&pg-vp_lab
4. *Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю.* Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1972, 224 с.
5. *Ирошвль Е.* Основные законы электромагнетизма. — М.: Высш. шк., 1083. — 270 с.
6. 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.
7. *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.
8. 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, 25-30 июня 2004 г., с. 86-87.