

УДК 531.35; 53.072; 001.891.57; 372.853

Изучение движения материальной точки в центральном поле с использованием лабораторных работ, моделирующих физические процессы на компьютере

Ольга Геннадьевна Ревинская, Надежда Степановна Кравченко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ),
Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 30; e-mail: ogr@tpu.ru

Центральное взаимодействие является одновременно одним из базовых вопросов курса общей физики и одним из самых трудных для изучения. Поэтому поиск новых подходов к изучению этого вопроса продолжает вызывать интерес у преподавателей. В данной работе рассмотрено развитие методики преподавания вопросов центрального взаимодействия с использованием современных возможностей моделирования физических процессов на компьютере.

Ключевые слова: методика преподавания физики в вузе, движение материальной точки в центральном поле, физическая модель, компьютерные инструменты в образовании.

Введение

В курсе общей физики методологически важно, что взаимодействие двух тел (материальных точек) сводится к задаче о движении одного тела в некотором силовом поле. Одним из широко распространенных считается центральное поле, в котором сила, действующая на тело, зависит только от расстояния до силового центра и направлена радиально. В курсе общей физики центральное взаимодействие изучается на примере кулоновского и гравитационного.

Центральное взаимодействие относится к фундаментальным вопросам, оказывающим влияние на формирование современной физической картины мира обучающихся. Трудности изучения данного вопроса в курсе общей физики связаны со сложным, мало знакомым студентам младших курсов математическим аппаратом представления дифференциальных уравнений и их решений в полярных координатах. Этот аппарат хорошо и подробно изложен в ряде учебников по курсу общей физики [1–3]. Не претендуя на оригинальность трактовки, необходимо все же кратко остановиться на некоторых моментах.

При центральном взаимодействии сила, действующая на тело с приведенной массой M , является консервативной и в общем виде записывается как $\vec{F} = F_r(r) \frac{\vec{r}}{r}$, где $F_r(r) = \frac{\alpha}{r^2}$ (α – константа взаимодействия). Тогда механическое движение тела массой M в этом поле описывается вторым законом Ньютона $M \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = F_r(r) \frac{\vec{r}}{r}$. Система двух взаимодействующих тел является замкнутой, поэтому справедлив закон сохранения

механической энергии $E = \frac{Mv^2}{2} + \frac{\alpha}{r} = const$. Учитывая центральный характер взаимодействия, можно показать, что момент силы равен нулю, движение является плоским, а момент импульса сохраняется $\vec{L} = [\vec{r} \vec{P}] = M[\vec{r} \vec{v}] = const$.

Поэтому для описания центрального взаимодействия удобно выбрать полярную систему координат $(r$ и $\varphi)$. В полярной системе координат второй закон Ньютона и законы сохранения примут вид [2, 3]:

$$M\ddot{r} = \frac{L^2}{Mr^3} + \frac{\alpha}{r^2}, \quad E = \frac{M}{2}\dot{r}^2 + \frac{L^2}{2Mr^2} + \frac{\alpha}{r} = const, \quad L = Mr^2\dot{\varphi} = const.$$

Выбрав замену переменных $r(t) = 1/\xi(\varphi)$, уравнение динамики можно свести к виду

$$M\ddot{r} = \frac{L^2}{Mr^3} + \frac{\alpha}{r^2} \Rightarrow \frac{d^2\xi}{d\varphi^2} + \left(\xi + \frac{\alpha M}{L^2}\right) = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2\chi}{d\varphi^2} + \chi = 0,$$

где $\chi(\varphi) = \xi(\varphi) + \frac{\alpha M}{L^2}$.

Решением данного уравнения является гармоническая зависимость χ от φ с амплитудой A и некоторой начальной фазой φ_{\min} :

$$\chi(\varphi) = A \cos(\varphi_{\min} - \varphi) \quad \text{или} \quad r(\varphi) = \frac{p}{\varepsilon \cos(\varphi_{\min} - \varphi) - 1}.$$

Полученное уравнение $r(\varphi)$ движения тела в полярных координатах представляет собой уравнение конических сечений и имеет три характерных параметра: фокальный параметр $p = \frac{L^2}{\alpha M}$, эксцентриситет $\varepsilon = \sqrt{1 + \frac{2L^2}{\alpha^2 M} E}$ и φ_{\min} – угол в полярных координатах, при котором тело приближается к источнику поля на минимальное расстояние.

Характер конического сечения (траектории) зависит от значения эксцентриситета: круг ($\varepsilon = 0$), эллипс ($\varepsilon < 1$), парабола ($\varepsilon = 1$) или гипербола ($\varepsilon > 1$).

Поскольку студенты младших курсов не имеют опыта записи и анализа траектории в полярных координатах, и не могут проанализировать ее характер, в учебниках, как правило, этому анализу уделяется значительное внимание. Однако это не всегда дает желаемые результаты, так как студенты не могут представить описываемое движение.

Изучение нового для студентов материала происходит на умозрительном уровне без опоры на действия с внешними материальными объектами. Согласно теории поэтапного формирования умственных действий [11] освоение действий без опоры на взаимодействие с соответствующими внешними материальными или материализованными объектами вызывает затруднения не только у обучающихся, но и у преподавателей, так как лишает последних возможности контролировать и корректировать процесс умозрительного усвоения студентами нового материала. Для

осознанного овладения новым для студентов младших курсов материалом не достаточно предъявления им графиков функциональных зависимостей между различными параметрами изучаемой системы, которое практикуется в большинстве учебников. Для этого необходимо произвольное со стороны студентов взаимодействие с материализованной во внешней предметной деятельности физической моделью движения тела в поле центральных сил (динамической визуализацией физической сущности изучаемого процесса) [8]. Поэтому традиционную методику изучения центрального взаимодействия на лекциях и по учебникам необходимо дополнить другими формами организации занятий по данной теме, построенными на личном взаимодействии студентов с внешними материализованными объектами, например, лабораторными работами. Но натурные лабораторные работы, посвященные центральному взаимодействию, отсутствуют. Помощь в развитии навыков представления и анализа движения в процессе центрального взаимодействия может оказать выполнение лабораторных работ по изучению моделей физических процессов и явлений на компьютере. Эти работы позволяют сопоставить физическое и математическое описание системы взаимодействующих тел с ее материализацией и визуализацией в виде компьютерной модели.

На кафедре теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского Томского политехнического университета с 2002 г. ведется разработка и внедрение в учебный процесс лабораторных работ по изучению моделей физических процессов и явлений на компьютере [4–7, 9] на базе созданных авторами программных продуктов. Целью выполнения таких работ является не построение моделей, адекватно описывающих какую-либо физическую ситуацию, а изучение стандартных для курса общей физики моделей, уяснение их особенностей и физического смысла. Каждая работа сопровождается методическим пособием, в котором подробно изложена физическая сторона изучаемого вопроса, введены все необходимые понятия и термины. Для изучения центрального взаимодействия студентам предлагается выполнить две лабораторные работы: «Движение инертного тела в гравитационном поле» и «Движение заряженной частицы в кулоновском поле».

Поскольку параметры траектории p , ϵ существенно зависят от константы взаимодействия α , различные виды центрального взаимодействия имеют индивидуальные пространственные, энергетические и пр. физические характеристики. Так, например, при взаимодействии двух протонов сила кулоновского взаимодействия зависит от расстояния между ними как $\sim 10^{-28}/r^2$ Н, а сила гравитационного взаимодействия – как $\sim 10^{-64}/r^2$ Н (r – в метрах) [1, 10]. Для ядер, ионов, элементарных частиц гравитационное взаимодействие пренебрежимо мало по сравнению с кулоновским. Кулоновское взаимодействие ядер и ионов на расстояниях порядка 10 \AA

характеризуется энергиями порядка 10^{-17} Дж. Гравитационное взаимодействие тел макроскопических размеров можно трактовать как взаимодействие материальных точек только на расстояниях значительно превышающих их линейные размеры. При движении искусственных спутников вокруг одной из планет Солнечной системы рассматриваемые тела являются электронейтральными и обладают энергиями порядка 10^{10} Дж. Кроме того, при гравитационном взаимодействии наблюдается только притяжение, а при кулоновском – возможно как притяжение, так и отталкивание. Поэтому, несмотря на общность теоретического описания, детальное практическое (включающее количественное определение геометрических параметров p, ϵ траектории и физических характеристик E, L, α системы) изучение этих двух видов физического взаимодействия необходимо проводить отдельно.

Методика изучения кулоновского взаимодействия

При кулоновском взаимодействии $\alpha = kq_1q_2$. Константа α может быть как положительной, так и отрицательной в соответствии со знаками зарядов q_1 и q_2 взаимодействующих тел (частиц). Следовательно, потенциальная энергия системы α/r также может быть положительной или отрицательной. Однако если движение начинается издалека, где кинетическая энергия $Mv^2/2$ по модулю превышает потенциальную $|\alpha/r|$, полная энергия E будет положительной. Из выражения для эксцентриситета видно, что при положительных энергиях E эксцентриситет ϵ всегда больше единицы, и траекторией движения тела является гипербола.

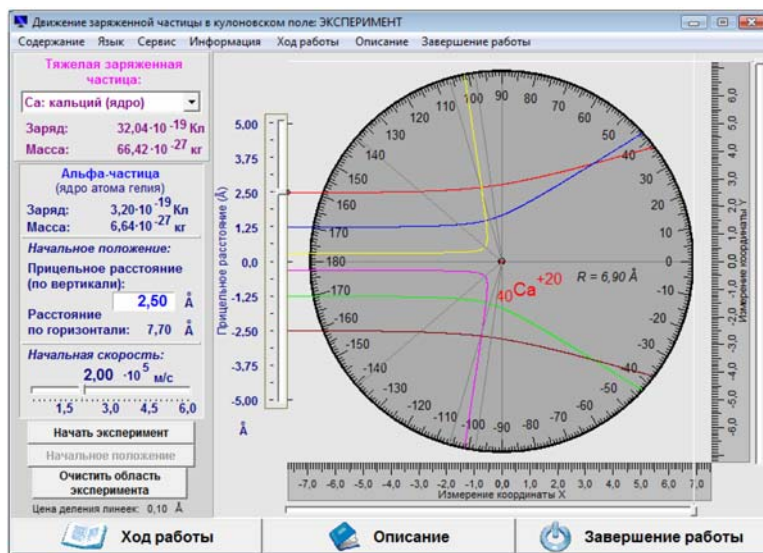


Рисунок 1. Компьютерная лабораторная работа «Движение заряженной частицы в кулоновском поле».

Таким образом, если кулоновское взаимодействие изучается в условиях, когда заряженное тело приближается к силовому центру извне, с большого расстояния (например, одна заряженная частица бомбардируется другими), как в случае притяжения, так и в случае отталкивания траектория тела будет представлять из себя гиперболу. Эта ситуация хорошо подходит для описания опыта Резерфорда, когда тяжелые ядра бомбардировались легкими альфа-частицами. Эта же ситуация воспроизведена нами в компьютерной лабораторной работе «Движение заряженной частицы в кулоновском поле» (рис. 1).

В этой работе студенты могут изменять начальное положение (прицельное расстояние b) и начальную скорость v_0 альфа-частицы, а затем наблюдать, по каким траекториям она движется. Кроме совокупности точек, через которые проходит частица в процессе своего движения вблизи рассеивающего центра, (траектории) в работе также фиксируется точка $(r_{\min}, \varphi_{\min})$, в которой расстояние между частицей и рассеивающим центром было минимальным. Наблюдения за траекториями частицы сопровождаются измерениями, для проведения которых в работе предусмотрены линейки и транспортир.

Измеряя положение (x, y, φ) налетающей альфа-частицы в различные моменты времени, студенты вычисляют геометрические параметры $\varepsilon = \frac{R - r_{\min}}{R \cos(\varphi_{\min} - \varphi_2) - r_{\min}}$ и $p = r_{\min}(\varepsilon - 1)$ (R, φ_2 – полярные координаты некоторой точки траектории, отличающейся от точки минимального приближения к рассеивающему центру с координатами r_{\min}, φ_{\min}) траектории и физические характеристики $\alpha = Mv_0^2 b^2 / p$, $E = \alpha(\varepsilon^2 - 1)/(2p)$, $L = \pm \sqrt{\alpha M p}$ взаимодействия при различных прицельных параметрах b и начальных скоростях v_0 налетающей частицы. Эти исследования позволяют изучить зависимость параметров траектории от начального состояния частицы, а также от физических интегралов движения. Кроме того, так как все траектории в экспериментах являются незамкнутыми, можно ввести понятие угла рассеяния θ и изучить его связь с перечисленными выше параметрами (рис. 4).

Анализ кулоновского взаимодействия в данной работе завершается сравнением полной энергии системы E с эффективной потенциальной энергией $\Phi(r) = \frac{L^2}{2Mr^2} + \frac{\alpha}{r}$ [2]. Используя рассчитанные в процессе выполнения работы значения L, α, M студенты строят график зависимости $\Phi(r)$, на котором откладывают значение полной энергии E (рис. 2а). На собственном опыте студенты могут убедиться, что в проведенных исследованиях полная E и эффективная $\Phi(r)$ энергии пересекаются только в одной точке, соответствующей точке r_{\min} минимального приближения альфа-частицы к источнику поля. Выполнение лабораторной работы позволяет сравнить полученное из пересечения графиков E и $\Phi(r)$ значение r_{\min} с его значением, вычисленным на основе измерений координат альфа-частицы в соответствующем месте траектории $r_{\min} = \sqrt{x_{\min}^2 + y_{\min}^2}$ при исследовании компьютерной модели, сопоставить теоретический материал с личным

опытом взаимодействия студента с материализованной во внешней предметной деятельности моделью.

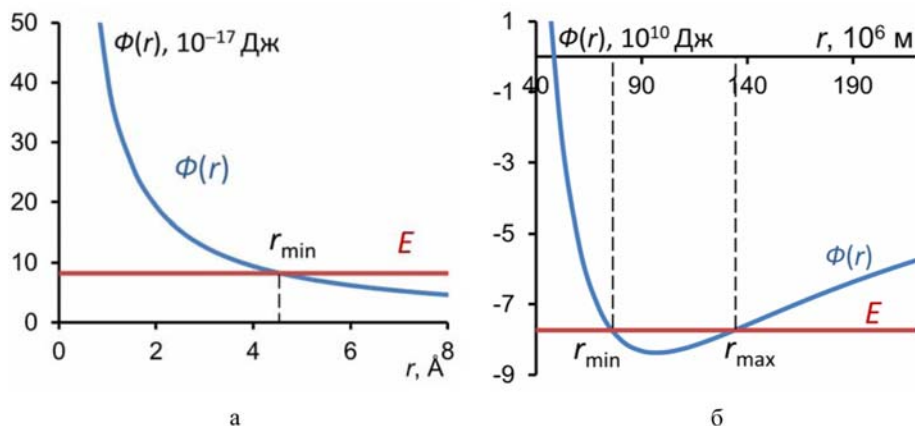


Рисунок 2. Зависимость эффективной потенциальной энергии от расстояния до центра рассеяния: а) кулоновское взаимодействие; б) гравитационное взаимодействие.

Методика изучения гравитационного взаимодействия

При гравитационном взаимодействии $\alpha = -GMm$, константа α всегда отрицательна (m – масса тела, выступающего в качестве источника поля; $m \gg M$).

Если тело массой M начинает движение вблизи источника поля, то его кинетическая энергия $Mv^2/2$ может оказаться меньше модуля потенциальной $|\alpha/r|$. Тогда полная механическая энергия системы E будет отрицательной. Следовательно, возможно движение по кругу ($\epsilon = 0$) или эллипсу ($\epsilon < 1$) – движение по замкнутым траекториям. Кроме того, возможны и движения по незамкнутым траекториям при больших значениях полной энергии – гиперболам, параболам.

Закономерности движения тела в гравитационном поле изложены в законах Кеплера. Изучению этих законов на компьютере посвящена лабораторная работа «Движение инертного тела в гравитационном поле» (рис. 3). В этой работе студенты также могут изменять начальное состояние (положение и скорость) движущегося вокруг некоторой планеты тела, и далее наблюдать за его траекторией. Для определения координат (x, y, φ) тела в какой-либо точке траектории в этой работе также предусмотрены линейки и транспортир.

В соответствии с количеством законов Кеплера выполнение работы разделено на три этапа. На первом этапе студентам необходимо убедиться, что тела в гравита-

ционном поле движутся по коническим сечениям, в одном из фокусов которого находится планета – источник поля (первый закон Кеплера). Изменяя начальное состояние (положение и скорость), студенты должны определить, при каких условиях тело будет двигаться вокруг планеты по замкнутым траекториям, не сталкиваясь с ней.

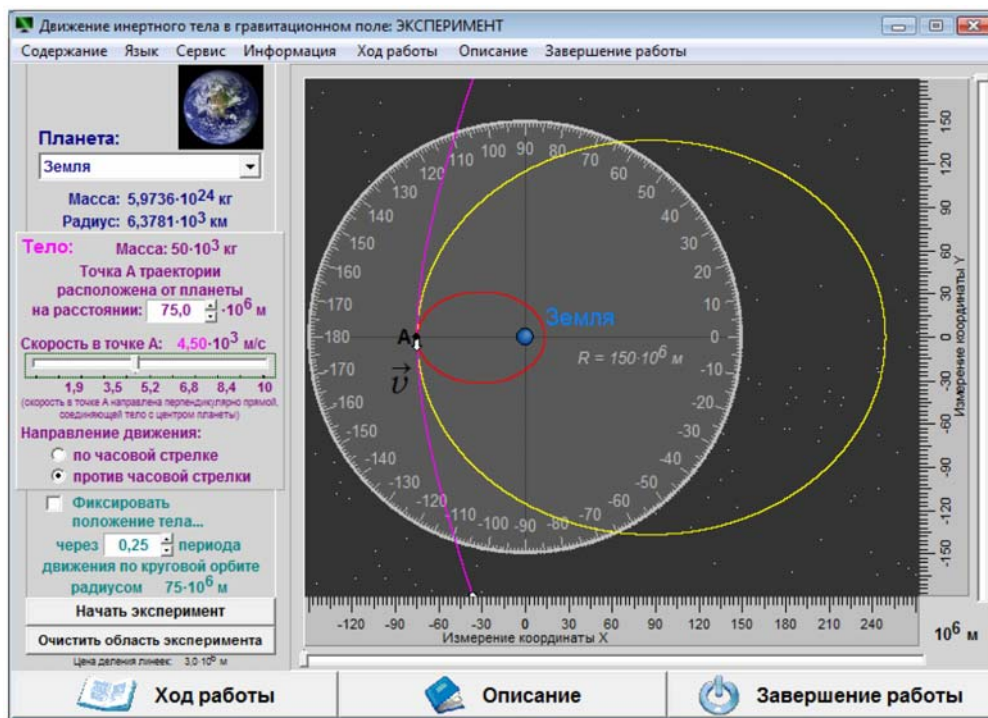


Рисунок 3. Компьютерная лабораторная работа «Движение инертного тела в гравитационном поле».

Второй закон Кеплера иллюстрирует изменение угловой скорости тела при центральном взаимодействии: при движении вокруг планеты радиус-вектор тела замечает за равные промежутки времени равные площади. На этом этапе, фиксируя (с помощью перехода в специальный режим отображения траектории) положение тела через равные промежутки времени, можно рассчитать соответствующие площади и убедиться, что чем ближе тело к источнику поля, тем большей тангенциальной скоростью оно обладает (в соответствии с законом сохранения момента импульса). Для вычисления площади сектора, заключенного между точками траектории с координатами (r_1, φ_1) и (r_2, φ_2) , студентам предложено использовать следующие формулы: $S_{сек} = I(r_2) - I(r_1)$, где

$$I(r) = \int \frac{1}{2} r^2 d\varphi = ab \left[\arctg \sqrt{\frac{r - r_{\min}}{r_{\max} - r}} - \frac{1}{2a} \sqrt{(r - r_{\min})(r_{\max} - r)} \right],$$

a, b – большая и малая полуоси эллипса.

Третий закон Кеплера устанавливает связь между большой полуосью эллипса, по которому движется тело, и периодом его вращения. Этот закон в свою очередь иллюстрирует сохранение полной механической энергии замкнутой системы, величина которой и определяет размер эллипса. Поэтому третий этап работы посвящен экспериментальному выявлению взаимосвязи длины большой полуоси a эллиптической траектории тела с полной энергией изучаемой системы $E = -|\alpha|/(2a)$.

В результате в работе не только изучается взаимосвязь геометрических параметров (p, ϵ) с физическими характеристиками (E, L, α) системы, но и иллюстрируются проявления законов сохранения в природе.

Согласно рекомендуемой авторами последовательности выполнения работы изучение гравитационного (также как и кулоновского) взаимодействия завершается построением графика эффективной потенциальной энергии для случая, когда тело движется вокруг планеты по замкнутой траектории. В этом случае график $\Phi(r)$ пересекается с прямой, соответствующей значению полной механической энергии E , дважды, в точках, соответствующих минимальному и максимальному удалению тела от планеты (рис. 2б). Как и в предыдущей работе, эти расстояния также измеряются студентами в процессе непосредственного взаимодействия с компьютерной моделью. Сравнение результатов, полученных разными способами (из графика эффективной энергии и из измерений) создает материализованную основу для овладения сложным для студентов младших курсов теоретическим материалом.

Результаты выполнения студентами лабораторных работ

Обе лабораторные работы позволяют выполнять исследование модели центрального взаимодействия для рассеивающих центров с различными характеристиками: кулоновского поля при взаимодействии альфа-частицы с различными ядрами, положительными и отрицательными ионами; гравитационного поля при взаимодействии тела фиксированной массы с различными планетами Солнечной системы.

В обеих работах студенты обеспечены виртуальными инструментами для выполнения измерений «естественных» для лабораторного практикума величин (координат и углов). Для успешного выполнения измерений они вынуждены приводить в движение эти инструменты (ползунки прокрутки измерительных линеек). Фокальный параметр p и эксцентриситет ϵ , и далее полная энергия E , момент импульса L и константа взаимодействия α рассчитываются на основе измеренных координат и углов. В соответствии с разработанной авторами методикой исследования физических моделей

на компьютере взаимодействие с моделью и последующее измерение координат студенты осуществляют неоднократно так, чтобы в результате вычислений получить достаточное количество данных для анализа следующих характерных для физической модели зависимостей: $p(v_0)$, $\varepsilon(v_0)$, $\theta(v_0)$, $r_{\min}(v_0)$, $\theta(E)$, $\theta(L)$, $r_{\min}(\theta)$ – для кулоновского взаимодействия; $r_{\min}(v_0)$, $S_{\text{сек}}$, большой $a(v_0)$, малой $b(v_0)$ полуосей эллипса, периода $T(v_0)$, $T(E)$ обращения тела по эллиптической орбите, площади эллипса $S(L/E^{3/2})$ – для гравитационного взаимодействия. На рисунках 4 и 5 приведены примеры некоторых зависимостей, которые студенты получают при выполнении данных лабораторных работ.

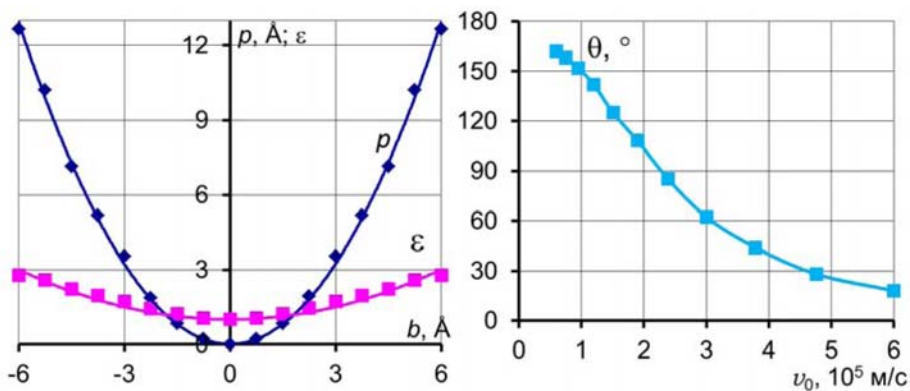


Рисунок 4. Пример графических зависимостей, получаемых при выполнении лабораторной работы «Движение заряженной частицы в кулоновском поле» для ядра золота.

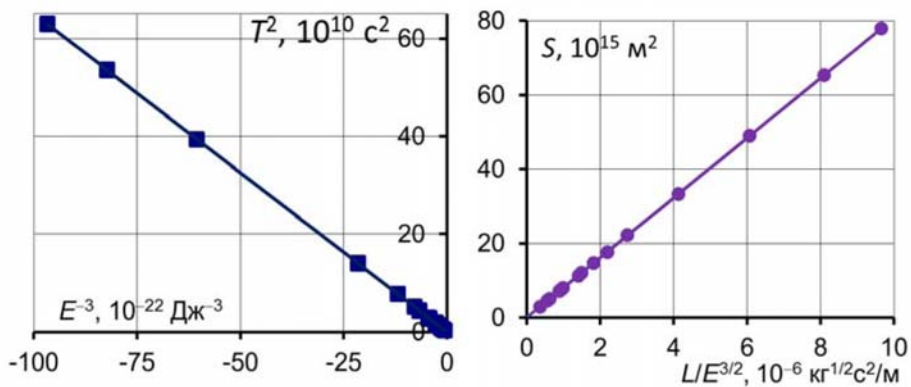


Рисунок 5. Пример графических зависимостей, получаемых при выполнении лабораторной работы «Движение инертного тела в гравитационном поле» для Венеры.

Важно, что все физические и геометрические параметры системы изучаются опосредовано через эти измерения, а не предоставляются в виде готовых числовых значений. Необходимость проведения расчетов актуализирует в сознании студента связь между измеряемыми величинами, описанием положения материальной точки через полярные координаты и изучаемыми физическими и геометрическими характеристиками. Учитывая многообразие изучаемых в работах функциональных зависимостей, аналогичные расчеты студентам приходится выполнять многократно. Это позволяет закрепить постепенно устанавливающуюся в ходе выполнения лабораторной работы взаимосвязь между теоретическим описанием центрального взаимодействия в полярных координатах и практическим опытом студентов.

В результате уменьшается доля бездумного зазубривания материала студентами в курсе общей физики. При этом основной целью выполнения работ остается изучение физики. Поэтому авторский программный продукт, выступающий в качестве дидактического средства, реализован таким образом, чтобы особенности компьютерного моделирования не оказывали влияния на физическое содержание работы. По мнению авторов [8], акцентировать внимание на особенностях компьютерного моделирования следует не в рамках изучения курса общей физики, а в курсе математического моделирования, который, как правило, изучается на более старших курсах и опирается на знания студентов по общей физике.

Заключение

Дополнение теоретического рассмотрения вопросов центрального взаимодействия выполнением лабораторных работ по изучению моделей кулоновского и гравитационного взаимодействия на компьютере, позволяет наполнить образным содержанием абстрактные физические и математические понятия. Предложенная авторами методика изучения этих моделей направлена на выявление и анализ характерных для системы, но в силу отсутствия у студентов опыта недоступных для чисто теоретического анализа, функциональных зависимостей ее физических и геометрических параметров, и стимулирует планомерное наблюдение за особенностями поведения модели в различных условиях. Разработанные авторами программные продукты, используемые как дидактические средства для проведения лабораторных работ, полностью обеспечивают возможность реализации разработанной авторами методики исследования как кулоновского, так и гравитационного взаимодействия. Это позволяет студентам детально разобраться в вопросах центрального взаимодействия, а также научиться пользоваться полярной системой координат.

Обе работы построены на основе одной и той же модели центрального взаимодействия, а выполняются при изучении разных разделов курса общей физики

(«Механика», «Электричество и магнетизм»). За счет этого появляется возможность повторного обобщения материала после выполнения обеих работ.

Включение описанных лабораторных работ в физический практикум позволило с одной стороны расширить его содержательное наполнение, а с другой разнообразить доступные студентам методы изучения трудной и мировоззренчески важной темы. С демонстрационными роликами и методическими пособиями к описанным в статье лабораторным работам можно познакомиться на сайте автора (<http://OGRevinskaya.narod.ru>).

Литература

1. Астахов А.В. Курс физики. Т. 1. М.: Наука, 1977. 384 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики. В 3 кн. Кн.1. Механика. М.: Высш. шк., 2003, 352 с.
3. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Механика. М.: Наука, 1971, 480 с.
4. Кравченко Н.С., Ревинская О.Г., Стародубцев В.А. Комплекс компьютерных моделирующих лабораторных работ по физике: принципы разработки и опыт применения в учебном процессе // Физическое образование в вузах, 2006, Т. 12, № 2, с. 85-95.
5. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Изучение распределения Максвелла с помощью компьютерной модели и в натурном эксперименте // Открытое образование, 2014, № 1, С. 12-18.
6. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Методика изучения динамики реактивного движения в курсе общей физики с использованием компьютерных моделей // Инновации в образовании. 2011, № 3, С. 116-127.
7. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Методика экспериментального изучения затухающих колебаний пружинного маятника на наклонной плоскости // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013, № 5(87), С. 165-170.
8. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Проблемы визуализации физических теоретических моделей на компьютере // Сборник трудов XIII Международной учебно-методической конференции «Современный физический практикум» (Новосибирск, 23-25 сентября 2014 г.) М.: Изд. дом МФО, 2014, С. 113-115.
9. Ревинская О.Г., Стародубцев В.А. Эмпирическое изучение теоретических моделей в физическом образовании // Открытое образование, 2006, № 5, С. 12-21.
10. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. Механика. М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2005, 560 с.
11. Талызина Н.Ф. Управление процессом усвоения знаний (психологические основы). М.: МГУ, 1984, 345 с.

Study of the Material Point Motion in the Central Field using the Laboratory Works Simulated Physical Processes on Computer

Olga G. Revinskaya, Nadegda S. Kravchenko

*National research Tomsk Polytechnic University,
Russia, 634034, Tomsk, av. Lenin, 30; e-mail: ogr@tpu.ru*

Received March 3, 2015

PACS: 01.55.+b; 01.50.Qb; 07.05.Tp; 01.50.H-

Central interaction is both one of the basic questions of general physics and one of the most difficult to learn. Therefore the search for new approaches to the study of this question continues to be of interest among teachers. In this paper we consider the development of methods of central interaction questions teaching with the use of modern capabilities of simulation of physical processes on the computer

Keywords: methods of teaching physics in high school, movement of material point in a central field, the physical model, computer tools in education.

References

1. *Astakhov A.V.* Physics course. T. 1. M.: Nauka, 1977, 384 pp. [in Russian].
2. *Bondarev B.V., Kalashnikov N.P., Spirin G.G.* General physics course. In 3 books. Book 1. Mechanics. M.: Higher. shk., 2003, 352 pp. [in russian].
3. *Kittel C., Knight, W., Ruderman M.* Mechanics. M.: Nauka, 1971, 480 pp. [in Russian].
4. *Kravchenko N.S., Revinskaya O.G., Starodubtsev V.A.* Complex computer simulation laboratory work in physics: principles for the development and application experience in the educational process // Physics in Higher Education. 2006, T. 12, № 2, P. 85-95 [in Russian].
5. *Revinskaya O.G., Kravchenko N.S.* Studying of distribution of Maxwell by means of computer model and in natural experiment // Open Education, 2014, № 1, P. 12-18 [in Russian].
6. *Revinskaya O.G., Kravchenko N.S.* The technique of jet movement dynamics studying in the course of the general physics with use of computer models // Innovations in Education, 2011, № 3, P. 116-127 [in Russian].
7. *Revinskaya O.G., Kravchenko N.S.* Methods of experimental study of damped oscillations of a spring pendulum on an inclined plane // Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics, 2013, № 5 (87), P. 165-170 [in Russian].

8. *Revinskaya O.G., Kravchenko N.S.* Visualization of physical problems of theoretical models on the computer // Proceedings of the XIII International educational conference “Modern Physics practicum” (Novosibirsk, 23-25 September 2014) M.: Publishing. House MPhS, 2014, P. 113-115 [in Russian].
9. *Revinskaya O.G., Starodubtsev V.A.* An empirical study of theoretical models in physical education // Open Education, 2006, № 5, P. 12-21 [in Russian].
10. *Sivukhin D.V.* The general course of physics. T. 1. Mechanics. M.: FIZMATLIT; Publ MIPT, 2005, 560 pp. [in Russian].
11. *Talyzina N.F.* Managing the process of learning (psychological basis). M.: MSU, 1984, 345 pp. [in Russian].