



Чирцов Александр Сергеевич

УДК 530.145

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ КОНСТРУКТОРОВ ВИРТУАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ С ПРОСТЫМ УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ

Аннотация

Рассмотрены концепция и реализация в виде интерактивных Java-апплетов оригинальных конструкторов моделей физических систем. Электронные конструкторы и созданные с их помощью модели допускают простую работу как на персональных компьютерах, так и в сетевом режиме, в том числе – при удаленном доступе через Интернет.

Ключевые слова: физика, компьютерное моделирование, мультимедийный сборник, виртуальный конструктор, Java-апплеты, классическая динамика, релятивистская динамика, электромагнитные поля, оптика, лучепостроитель, дифракция, одноэлектронные волновые функции.

1. ВВЕДЕНИЕ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕПОДАВАНИИ ФИЗИКИ

Наблюдавшийся в конце XX века быстрый прогресс в развитии компьютерных технологий привел к тому, что казавшиеся смелыми в 80-х годах прошлого века прогнозы относительно интеграции компьютеров в систему образования к началу века оказались практически полностью реализованными [1]. На рубеже веков произошел новый качественный скачок в возможностях, предоставляемых современными компьютерными технологиями широкому кругу пользователей, открылись

новые весьма заманчивые перспективы использования компьютеров в преподавании. Как и на первых этапах компьютеризации образования, наиболее удобным и популярным полигоном для апробации новых идей и возможностей остается физика, в преподавании которой информационные, цифровые и мультимедийные технологии могут быть использованы наиболее естественным образом. Количество разработок и публикаций по использованию компьютеров в обучении физике весьма велико (например [2, 3]).

К новым техническим возможностям, представляющим интерес в обучении физике, следует отнести появление доступных портативных компьютеров и мультимедийных проекторов, программ качественного аудио-видео-редактирования, монтажа и

© А.С. Чирцов, 2010

анимации изображений, технологии удаленного доступа и поддержки видеоконференций. В результате внедрения перечисленных технологий в образовательную деятельность возникла необходимость разработки новых подходов к созданию электронной учебной продукции на их базе.

На современном этапе компьютеризации физического образования одной из наиболее интересных и востребованных задач является переход к максимально индивидуализированному обучению, реализация которого в массовом варианте до сих пор не осуществлена. В его рамках обучаемым в соответствии с уровнем подготовки, способностями и мотивацией целесообразно предлагать свои индивидуальные образовательные траектории, различающиеся уровнем сложности, темпом освоения и долей самостоятельной творческой работы при изучении материала. В перспективе возникает возможность предоставления учащимся или их малым группам определенной свободы выбора преподавателя, стиль работы которого наиболее соответствует их личным особенностям и мотивам.

Сформулированная задача сегодня уже не выглядит фантастической, поскольку многие из составляющих ее проблем сегодня имеют свои технические и организационные решения. Большинство уже предлагаемых профессионально разработанных систем электронного сопровождения образовательного процесса [4] изначально ориентировано на массовое индивидуализированное обучение и включает возможности составления индивидуальных расписаний занятий, формулировку персональных заданий и учет их выполнений. Основная трудность в реализации этих возможностей состоит в изменении стиля работы преподавателя и в подготовке больших объемов персонально ориентированных учебных материалов.

Одним из вариантов подхода к решению описанной задачи явилось создание серии мультимедийных сборников материалов для сопровождения курсов общей физики, читаемых в бакалавриате направ-

ления «Прикладная математика и физика» Физического факультета СПбГУ, где осуществляется эксперимент по организации индивидуализированного обучения с широким привлечением современных компьютерных технологий [5].

2. РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ФИЗИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ: ИНТЕРАКТИВНОСТЬ, УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ И ПРОСТОТА

Численное моделирование является, по-видимому, наиболее популярной сферой использования компьютеров в преподавании физики. Этот вид учебных материалов перспективен для развития индивидуальных форм обучения из-за многообразия его вариантов: самостоятельные мини-исследования виртуальных физических систем, разработка новых моделей и демонстраций, анализ сложных систем и их эволюции, дополнение традиционных для обучения физике логических каналов восприятия чувственно-эмоциональными [5–8]. Этот тип электронной учебной продукции не следует рассматривать как альтернативу реальным демонстрационным экспериментам и лабораторным практикам. Компьютерные симуляции, скорее, являются наглядным дополнением к технологиям преподавания теоретической части курса, существенно расширяющим возможности традиционных аналитических методов построения моделей и их анализа.

С точки зрения решения задач индивидуализированного обучения и развития его форм, ориентированных на активное усвоение материала, привлекательна возможность создания интерактивных моделирующих программ. Эта идея была успешно реализована уже в ряде первых отечественных разработок учебной продукции такого типа [9–11]. Интерактивность этих программ состояла в предоставлении возможности изменения физических характеристик объектов, составляющих моде-

лируемую систему, задания начальных условий, определения способов представления результатов моделирования.

Новым естественным шагом на пути развития концепции интерактивности моделирующих программ был переход к предоставлению возможности не только задавать количественные характеристики объектов моделируемой системы, но и изменять ее качественный состав вплоть до самостоятельного конструирования (без использования программирования) новых моделей [12]. Такая возможность привлекательна для реализации важной идеи демонстраций, иллюстрирующих поэтапное («step by step») приближение заведомо упрощенной теоретической модели к реальной физической системе путем последовательного включения в модель дополнительных объектов и взаимодействий. Другим важным преимуществом идеологии создания моделирующих программ в виде «электронных конструкторов» явилась возможность организации для учащихся тренинга по реализации полного цикла научного исследования (постановка задачи, планирование и проведение эксперимента, анализ результатов, уточнение задачи, корректировка эксперимента и т. д.). Наконец, еще одним преимуществом нового подхода явилось существенное сокращение трудозатрат на создание серий моделей.

Первоначальный вариант реализации идеи конструктора физических моделей был осуществлен на языке объектно-ориентированного программирования С++ [13] для демонстраций движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях [14]. Успех апробированной идеи стимулировал аналогичные разработки для других разделов физики. Были разработаны пакеты программ для создания компьютерных моделей по геометрической оптике и динамике твердого тела [15, 16].

Качественный скачок в развитии информационных технологий, произошедший на рубеже XX и XXI веков (бурное развитие сетевых технологий, превращение Интернет в общепризнанную инфор-

мационную сеть) заставил кардинально пересмотреть концепцию использования возможностей компьютеров в преподавании физики [17] и, в частности, требования к программам виртуальных конструкторов. Было признано необходимым их дальнейшее развитие в формате, допускающем удаленное использование и осуществление переноса уже имеющихся разработок на новую языковую платформу. Начиная с 2000 года программы-конструкторы стали создаваться в виде интерактивных Java-апплетов [18].

К настоящему времени среди многочисленных разработок в области обучающих интерактивных моделирующих программ по физике выделяются несколько постоянно развиваемых серий профессиональной электронной продукции. К их числу следует отнести выпускаемые компанией «Физикон» на компакт-дисках и доступные по сетям Интернет интерактивные курсы физики для учащихся средних учебных заведений и младших курсов вузов [19, 20]. Большое количество оригинальных компьютерных моделей-задач для мотивированных и хорошо подготовленных учащихся старших классов собрано в задачнике [21]. Непрерывно развивается коллекция интереснейших интерактивных моделирующих программ и Java – апплетов по углубленному курсу механики [22–24].

В свободном доступе на сайтах размещено заметное количество ориентированных на удаленный доступ коллекций компьютерных моделей-иллюстраций по физике [25–29], полнота, физическое содержание и качество исполнения которых варьируется в весьма широких пределах. На фоне этого мало систематизированного множества ресурсов выигрышное впечатление производят относительно завершенные интерактивные среды для обучения математике, физике и естествознанию, иллюстрированные компьютерными моделями [30, 31]. Уровень интерактивности компьютерных моделей перечисленных сборников лежит пределах от весьма низкого (нажатие кнопок «пуск» и «стоп»)

до среднего (возможность варьирования параметров эксперимента).

Что же касается сформулированной еще в середине 90-х годов идеи создания электронных конструкторов [32], то, помимо ее частичной реализации в [19] (конструктор простейших электрических цепей и систем геометрической оптики) и отдельных разработок, имеющих достаточно узкоспециализированный характер (см., например, обзор [33]), к настоящему времени создано несколько весьма развитых программных продуктов, предоставляющих пользователю значительную свободу в создании его собственных виртуальных физических систем [34–37]. Последние представляют собой программные среды, как правило, распространяемые на коммерческой основе, требующие предварительной установки на компьютере и некоторого обучения пользователя методике работы с ними. Для удобного и быстрого доступа через Интернет оказываются пригодными не эти среды, а только их демонстрационные ролики, не допускающие никакой интерактивности. Выполненные на платформе этих сред конкретные обучающие программы представляют собой, как правило, уже достаточно самостоятельные электронные продукты, создаваемые коллективами профессионалов [38–41]. Уровень интерактивности таких разработок оказывается несравненно более низким по сравнению с материнской средой.

Отличительной чертой рассматриваемого в настоящей статье подхода к созданию конструкторов виртуальных физических моделей являются:

- 1) обеспечение максимальной простоты работы с конструкторами;
- 2) обеспечение возможности построения, моделирования и визуализации его результатов для существенно трехмерных систем;
- 3) возможности доступа ко всем функциям апплетов-конструкторов в реальном времени сразу же после их загрузки, которая может быть осуществлена либо с компакт-диска, либо с удаленного сервера.

3. РЕАЛИЗАЦИИ БАЗОВЫХ КОНСТРУКТОРОВ ВИРТУАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ВИДЕ ИНТЕРАКТИВНЫХ JAVA-АППЛЕТОВ

Поскольку современные Java-версии использованных в мультимедийных сборниках электронных конструкторов основаны на идеологии первой разработки, выполненной для операционной системы DOS, представляется целесообразным кратко остановиться на использованных в ней основных идеях и технических решениях, впоследствии перенесенных на более современные платформы.

В связи с тем, что в период создания первой версии конструктора привычный многооконный стандарт WINDOWS еще не существовал, в DOS-варианте программы конструктора для моделирования движения частиц в постоянных полях был реализован собственный многооконный интерфейс (рис. 1 а, б). Он обеспечивал доступ к пакету из 50 готовых моделей, допускал возможность создания собственных компьютерных симуляций и имел развитый сервис по конфигурированию рабочего экрана в соответствии со спецификой задачи.

Иерархия объектов созданной программы (рис. 2) базировалась на классе `_something`, представлявшем собой подвижную область рабочего поля экрана, содержащего определенный графический образ и сохраняющий информацию об изображении на закрываемой объектом части экрана. На его базе были построены основные дочерние классы виртуального конструктора: `_particle`, `_field` и `_window`.

На базе класса `_window` построены многочисленные дочерние классы текстовых и диалоговых окон, выполняющие весьма разнообразные сервисные функции: вывод обучающих гипертекстов (`_phys_text`) и поясняющих их рисунков (`_picture`), предоставление контекстно-зависимой справочной информации по физике и интерфейсу программы (`_help`),

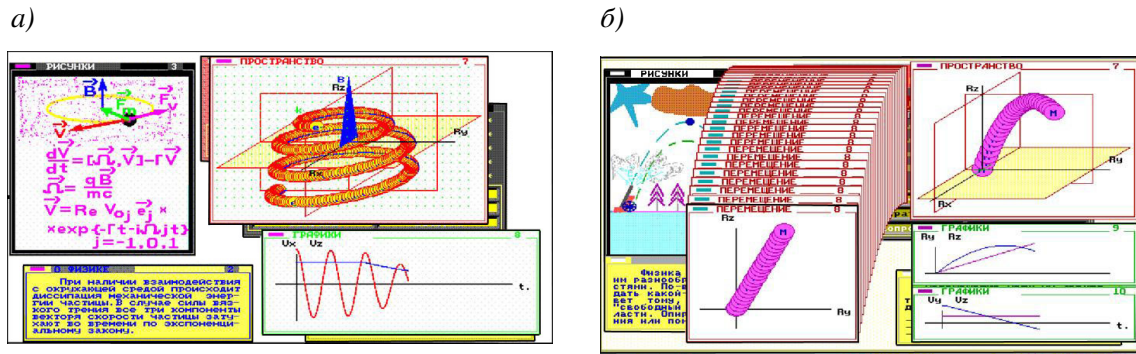


Рис. 1. Интерфейс первого варианта интерактивной программы-конструктора моделей движения частиц в силовых полях. Среди окон различного назначения имеется нетрадиционный объект, предназначенный для иллюстрации эффектов, возникающих при переходах в движущиеся системы отсчета

организация диалогов с пользователем (_menu) и т. д.

Для визуализации результатов численного моделирования на базе _window созданы классы интерактивно настраиваемых окон с трехмерной графикой _space3 (отображение моделируемой системы в трехмерном пространстве координат, скоростей, ускорений и т. д.) и окон с двумерной графикой _space2 (построение

всевозможных графиков зависимостей разнообразных кинематических и динамических характеристик от времени и друг от друга).

Класс _particle служил для описания частиц с редактируемым набором исходных свойств (масса, заряд, начальное состояние, графический образ) и меняющимися кинематическими характеристиками. В методах класса была предусмотрена

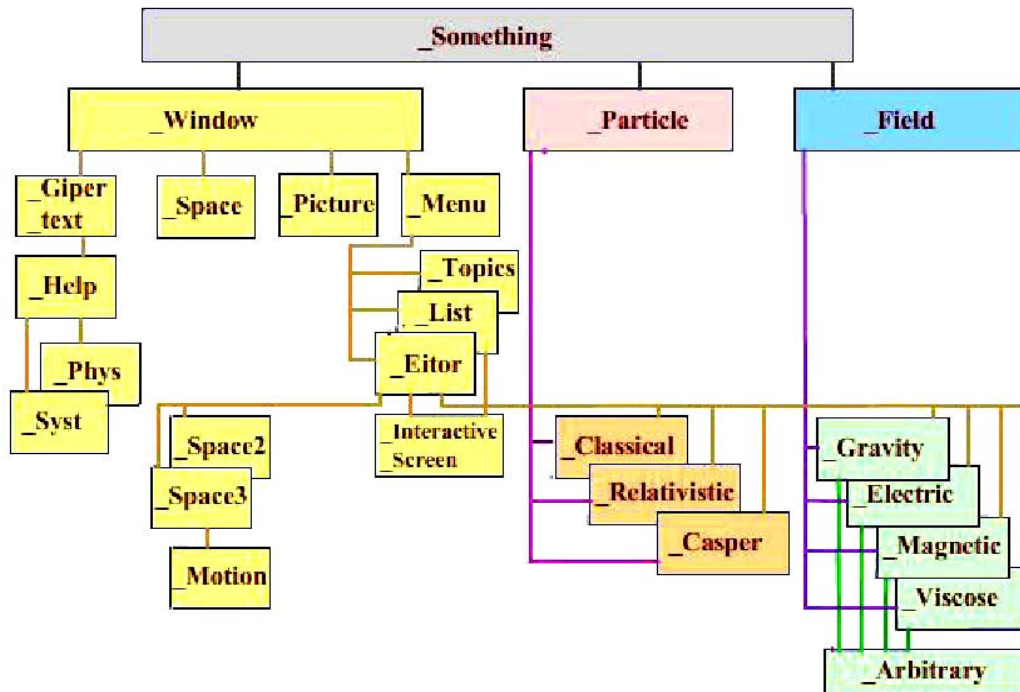


Рис. 2. Иерархия классов первой версии программы-конструктора «Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях»

возможность получения данных от полей (объектов класса `_field`) о состоянии последних и передачи собственных кинематических характеристик окнам анимации по их запросам.

Класс `_particle` являлся родительским для двух классов `_classic` и `_relativistic`, моделирующих поведение макроскопических частиц в приближениях классической и релятивистской физики соответственно. По существу эти объекты осуществляли интегрирование уравнения собственного движения, даваемое системой равенств

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t), \quad \mathbf{v} = \mathbf{p} \left(m^2 + \frac{\mathbf{p}^2}{c^2} \right)^{-1/2}, \quad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v},$$

методом Рунге-Кутты четвертого порядка с учетом классической или релятивистской связи между импульсом и скоростью частицы. Первоначальный вариант конструктора допускал моделирование движения только в постоянных электрических и магнитных полях. В последующих версиях были добавлены силы тяготения и вязкого трения, создана возможность включения в систему полей, изменяющихся в пространстве и времени по степенному, гармоническому или экспоненциальному закону. Этот класс имел методы, обеспечивающие передачу частицам по их запросам значения полей в окрестности точек их нахождения. Дочерними классами являлись `_gravity`, `_electric`, `_magnetic` и `_viscose`, служащие для задания соответствующих силовых полей.

Моделирующая программа была организована как цикл, в ходе выполнения которого все объекты класса `_particle` поочередно вычисляли свои новые положения и скорости, после чего открытые пользователем окна отображали рассчитанную для очередного момента времени ситуацию.

Важным элементом концепции создаваемого конструктора было решение об отказе использования каких-либо готовых оболочек для создания учебных компьютерных анимаций. Ориентация на одни лишь базовые языки программирования в сочетании с использованием объектно-

ориентированного подхода обеспечили возможность реализации трудно планируемых при разработке конструктора новых идей, возникающих на этапе его использования.

Примером расширения возможности конструктора явилось создание нового несколько экзотического класса окон, предназначенных для иллюстраций эффектов, возникающих при переходах в движущиеся системы отсчета (рис. 1 б). В ходе моделирования окна перемещались по экрану в соответствии с законом, определяемым пользователем. Отображаемая в движущемся окне картина развития системы во времени совпадала с восприятием неподвижного наблюдателя. После завершения демонстрации в остановившемся окне сохранялись траектории объектов, регистрируемые движущимся вместе с окном наблюдателем.

При создании новой Java-версии виртуального конструктора моделей физических систем, моделирующих движение частиц в силовых полях [42], была сохранена описанная выше логика организации программы, но ее возможности были существенно расширены с учетом опыта использования предшествующей версии. Иерархия используемых классов строилась на базе стандартных Java-библиотек [43] и была значительно усложнена по сравнению с первоначальной.

Интерфейс и дизайн окон Java-версии конструктора был приближен к установившемуся в среде Windows стандарту (рис. 3). Функции окон 3D-анимации были дополнены возможностями трехмерных вращений и наложения графического фона из внешнего файла. Объектам типа `_particle` была добавлена возможность назначения любых графических образов, в том числе – анимированных.

Наиболее существенным дополнением к возможностям предшествующих версий явилось введение возможности учета взаимодействий между объектами класса `_particle`, что потребовало расширения списка их свойств. Частицам были приспаны конечные размеры (радиусы) и

свойства «прозрачности», определяющие их поведение при столкновениях.

В программе предусмотрено два варианта механизмов включения взаимодействия между частицами. Первый в большей степени соответствует традиционной для физики логике описания. В его рамках один шаг цикла интегрирования уравнения движения содержит процедуры:

- 1) опроса объектом класса `_total_field` всех составляющих модель частиц и получение данных об их положениях, скоростях, массах и зарядах;
- 2) внесения поправок в конфигурацию поля;
- 3) последовательного опроса всеми объектами класса `_particle` состояния поля `_total_field` в прилегающей к ним области пространства и принятие решения об изменении собственных скоростей и положений;
- 4) получения окнами визуализации данных о новых состояниях всех входящих в моделируемую систему объектов и их отображения.

Второй вариант учета взаимодействий между частицами в меньшей степени соответствует традициям физического опи-

сания, но весьма удобен для создания наглядных последовательностей моделей, поэтапно усложняющихся и приближающихся к реальной системе. В ходе его реализации у каждой частицы создается список объектов, во взаимодействиях с которыми она принимает участие. В этот список для каждого объекта – партнера заносится тип взаимодействий и их количественные характеристики. Диалог между частицами и полем дополняется обменом информацией между взаимодействующими частицами об их состояниях, в результате чего вычисляются поправки к значениям действующих на частицы сил. Возникающие при втором подходе «дополнительные степени свободы» часто оказываются полезными при создании многих учебных демонстраций. Например, возможность создания непарных взаимодействий, нарушающих третий закон Ньютона, может быть использована для создания моделей, учитывающих запаздывание распространения полей или иллюстрирующих взаимодействия, нарушающие принцип суперпозиции.

Возможность переопределения законов взаимодействия между объектами модели-

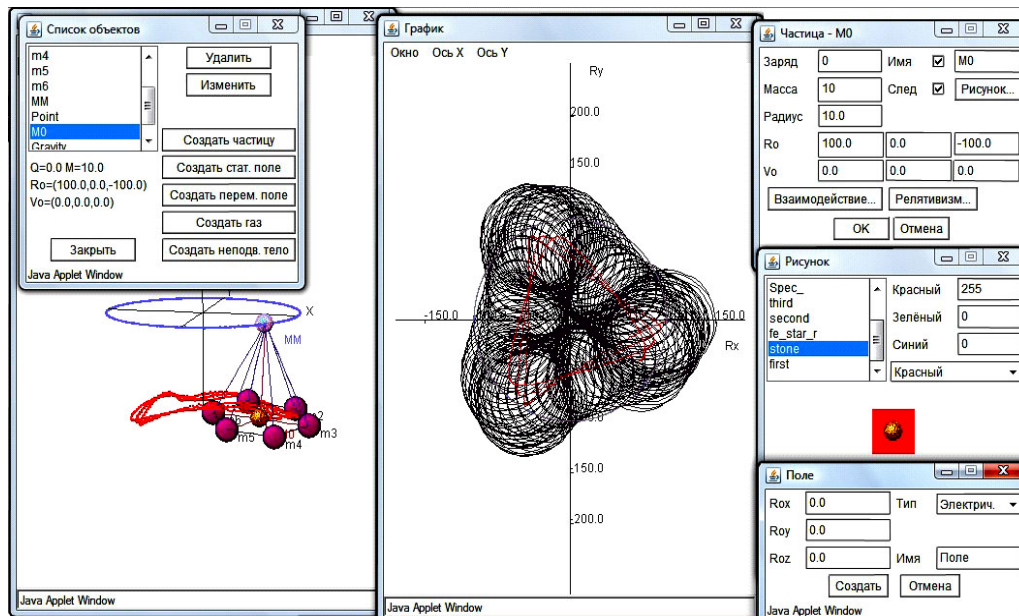


Рис. 3. Интерфейс и дизайн окон анимаций и диалогов базового конструктора, реализованного в форме Java-апплета

руемой системы реализована путем введения дополнительного класса `_algebra`, методы которого обеспечивают обработку и передачу объектам апплета создаваемые пользователем символьные строки с математическими выражениями. Формат последних максимально приближен к традиционно используемому в математике и не требует дополнительного изучения. Описанная возможность позволяет кардинально расширить область использования физического конструктора (рис. 4). Методы класса `_algebra` также используются для организации диалогов по определению внешних полей, изменяющихся в пространстве и во времени по произвольно задаваемым пользователем законам.

Реализация класса `_algebra` обеспечила возможность включения в конструктор нового класса заведомо «нефизических» объектов (`_Casper`), поведение которых определяется аналитическим выражением, задаваемым пользователем. Такие объекты весьма удобны для задания внешнего воздействия на моделируемую систему и при разработке компьютерных задач, при

решении которых обучаемый может сравнить полученное им аналитическое описание движения с «реальным» движением «реальных» частиц, получающихся в результате численного моделирования.

Для создания иллюстраций по статистической физике в конструктор был введен объект `_gas`, осуществляющий ввод в моделируемую систему ансамбля одинаковых частиц с определяемыми свойствами.

Оболочки разрабатываемых на базе моделирующих программ электронных учебников создавались в виде Web-страниц с помощью стандартных редакторов. В результате новая версия конструктора представляет собой набор приложений, запускаемых с html-страниц или из иных стандартных сред, поддерживающих html. Передача данных о заранее сконструированной авторами модели системы от среды электронного учебника к моделирующей программе осуществляется с помощью специального конфигурационного файла, имеющего текстовый формат. Простота и логичность правил построения этого файла позволяет не подготовленному и

не знакомому с элементарными приемами программирования пользователю за 10–15 минут создать вызываемую со страниц html свою оригинальную демонстрацию по аналогии с имеющимися. Несмотря на максимальную простоту создания конфигурационных файлов, в программе конструктора предусмотрен сервис автоматического дополнения файла записями сценариев новых разработанных и отлаженных в конструкторе моделей.

Описанный электронный конструктор был использован при создании серии электронных сборников «Физика: модель – эксперимент – реальность»

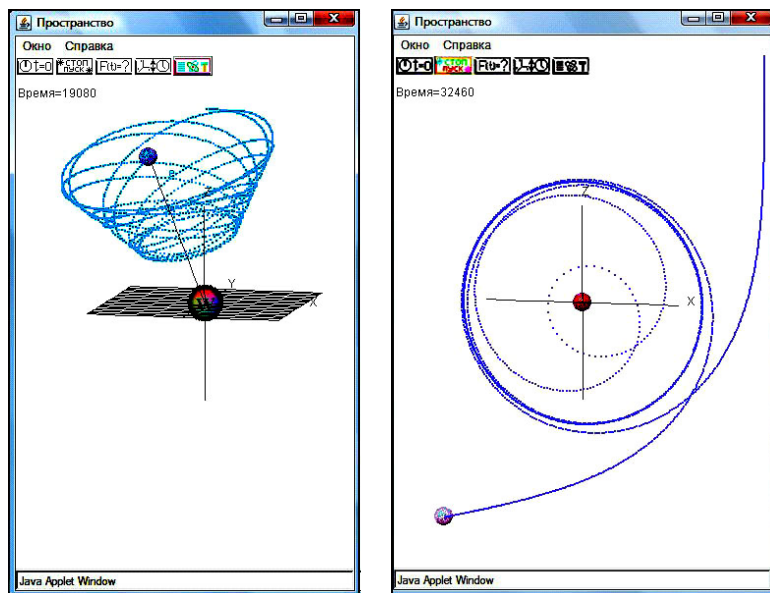


Рис. 4. Примеры использования возможности переопределения законов взаимодействия между объектами – моделирование движения электрона в поле электрически заряженного магнитного монополя и демонстрация одного из возможных типов инфинитного движения частицы в потенциале Юкавы

[44–46], ориентированных на учащихся старших классов.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКТОРОВ ВИРТУАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ВИДЕ ИНТЕРАКТИВНЫХ JAVA-АППЛЕТОВ

Базовый для серии сборников электронный конструктор физических моделей оказался достаточно универсальным и позволил создать широкий набор компьютерных демонстраций и задач при выполнении проекта по созданию серии мультимедийных сборников ресурсов для сопровождения курса общей физики для студентов физико-математических факультетов [47]. Однако в рамках каждого из упомянутых курсов возникали свои специфические задачи, не сводящиеся к описанию движения частиц. В результате возникла потребность в создании набора ориентированных на более узкие области применения специализированных виртуальных конструкторов.

Электронный виртуальный конструктор электростатических и магнитостатических систем предназначен для визуализации конфигураций полей, создаваемых сложными пространственными распределениями электрических зарядов и токов [48]. Программа осуществляет построение картин линий электростатического (\mathbf{E}) и магнитостатического (\mathbf{B}) полей, векторного потенциала (\mathbf{A}) и поверхностей постоянных значений скалярного потенциала (ϕ). Источниками перечисленных полей и потенциалов в виртуальном конструкторе могут выступать произвольные конфигурации, собираемые из графических примитивов: точечных частиц, отрезков прямых и дуг окружностей.

Построение в окнах класса `_field_configuration` линий векторных полей \mathbf{K} трех перечисленных типов осуществляется методами класса `_field_lines` в ходе интегрирования методом Рунге-Куты четвертого порядка уравнения

$$\frac{d\mathbf{R}}{dl} = \frac{\mathbf{K}(\mathbf{R})}{|\mathbf{K}|}.$$

Класс `_potential_surface` осуществляет визуализацию поверхностей постоянных значений скалярного поля $\phi(\mathbf{R}) = \text{const}$. Расчет векторных и скалярных полей от произвольно задаваемых пространственных распределений источников осуществляется методами класса `_field_configuration` в соответствии с известными из электростатики и магнитостатики соотношениями:

$$\mathbf{E}(\mathbf{R}) = \sum_j q_j \frac{\mathbf{R} - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}_j|^3} + \int dl(\mathbf{r}) \lambda(\mathbf{r}) \frac{\mathbf{R} - \mathbf{r}}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|^3},$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{R}) = \int \left[d\mathbf{l}(\mathbf{r}), \frac{\mathbf{R} - \mathbf{r}}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|^3} \right] \frac{I(\mathbf{r})}{c},$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{R}) = \int d\mathbf{l}(\mathbf{r}) \frac{I(\mathbf{r})}{c} \frac{1}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|},$$

$$\phi(\mathbf{R}) = \sum_j \frac{q_j}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}_j|} + \int \frac{dl(\mathbf{r})\lambda(\mathbf{r})}{|\mathbf{R} - \mathbf{r}|},$$

где \mathbf{R} и \mathbf{r} – текущие точки линий полей и их протяженных источников, $\lambda(\mathbf{r})$ и $I(\mathbf{r})$ – линейные плотности зарядов нитей и силы протекающих по ним токов, q_j и \mathbf{r}_j – величины зарядов точечных частиц и радиусы-векторы точек их нахождения.

В отличие от подавляющего большинства аналогов, созданный конструктор предназначен для визуализации существенно трехмерных конфигураций полей, создаваемых существенно трехмерными источниками (рис. 5). Для улучшения восприятия проекций на плоскость трехмерных распределений в программе предусмотрена возможность вращений генерируемого конструктором изображения вокруг любой из координатных осей.

Запуск конструктора осуществляется аналогично базовой разработке из HTML-страниц путем передачи Java-апплету конфигурационного файла, содержащего список формирующих источник поля графических примитивов и набора начальных точек для построения линий полей. Для обеспечения большей компактности конфигурационных файлов и удобства построения моделей признана целесообразной

их организация в виде ссылок на отдельные короткие и часто повторяющиеся файлы, содержащие описание графических примитивов.

Для сопровождения курса оптики разработаны два специализированных виртуальных конструктора: «Оптический конструктор» (лучепостроитель) [49] и программа для расчета дифракции света на системе отверстий произвольной формы [50].

Предназначенная для моделирования оптических систем в рамках приближения геометрической оптики программа «Оптический конструктор» существенно отличается от ее многочисленных аналогов – Java-апплетов, представляющих возможность визуализации (как правило, двумерной) хода лучей в простейших оптических системах. Рассматриваемый вариант программы позволяет конструировать трехмерные системы из оптических элементов, представляющих собой комбинации произвольных отражающих и преломляющих поверхностей второго порядка, оптически однородных промежутков и сред с переменным показателем преломления (рис. 6).

Для указанного типа оптических систем осуществляется максимально точная (в рамках геометрической оптики) трассировка хода лучей (в том числе и непараксиальных). При моделировании могут быть учтены дополнительные (по отношению к традиционному приближению гео-

метрической оптики) эффекты: дисперсия показателя преломления, поляризация, дифракция и интерференция. С целью облегчения процедуры создания сложных систем предусмотрены возможности объединения объектов в группы. Группировка объектов используется при создании библиотек сложных составных объектов (линзы, объективы, световые пучки конечных размеров, белое излучение и т.д.).

В основу программы положены два принципа: объектно-ориентированный подход и принцип модульности. Моделируемая ситуация рассматривается как набор объектов – элементов оптической системы (объекты `_optics_surface`) и источников света с создаваемыми ими наборами исходных отрезков лучей «нулевого поколения» – объектов класса `_beam_step`. Отрезки лучей следующих поколений строятся внутри оптических промежутков, ограниченных двумя поверхностями оптических элементов системы. В результате взаимодействия отрезков лучей и оптических поверхностей возникают отрезки лучей новых поколений (отраженные и преломленные пучки), характеристики которых определяются свойствам объектов оптической системы.

Сформулированный алгоритм позволяет свести моделирование произвольной сколь угодно сложной оптической системы к обработке весьма абстрактной схе-

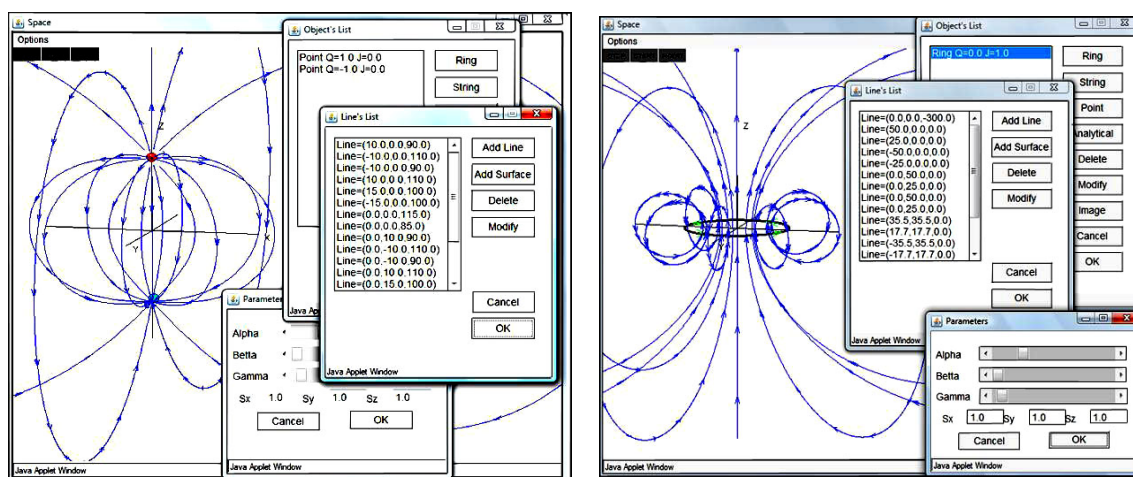


Рис. 5. Интерфейс и дизайн виртуального конструктора конфигурации электромагнитных полей (примеры: поля электрического и магнитного диполей)

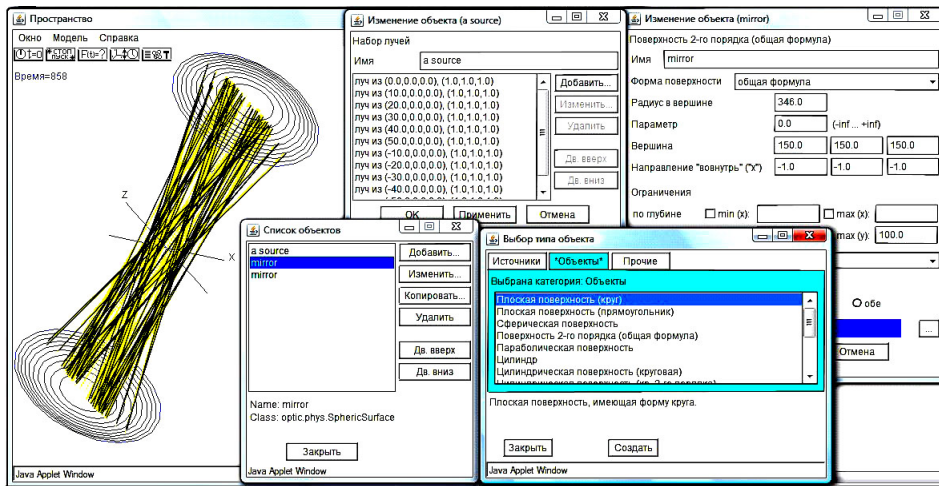


Рис. 6. Интерфейс и дизайн виртуального конструктора по геометрической оптике (пример: расчет хода лучей в устойчивом резонаторе лазера)

мы эксперимента, которая, используя технологию полиморфизма, во время расчёта конкретизируется, в зависимости от конкретных свойств отдельных моделируемых объектов. В результате расчётный цикл программы не оказывается связанным непосредственно с используемыми в эксперименте объектами, а оперирует некоторыми базовыми понятиями, конкретная реализация которых полностью заключена уже в конкретных объектах эксперимента. Такой подход позволяет разделить программу на несколько независимых модулей – библиотек, что позволяет адаптировать её для использования различными категориями пользователей, предоставляя им различные уровни возможностей интерактивного моделирования. Работа на разных уровнях требует различной степени подготовленности не только в области физической оптики, но и в освоении навыков конструирования виртуальных систем.

Наличие информации о набеге фазы вдоль траектории луча открывает возможность учета эффектов интерференции света. Для моделирования этих эффектов создан специальный класс объектов – экранов, способных строить на своей поверхности распределения фаз излучения, приносимого пучками лучей каждого их поколений в отдельности. В результате оказывается возможным построение интер-

ференционных картин типа колец Ньютона, полос равной толщины на клине и т. д. (рис. 7 а).

Дочерними по отношению к классу `_beams_step` являются разрабатываемые в настоящее время классы `_paraxial_step` и `_gauss_step`, предназначенные для моделирования распространения световых пучков в парааксиальном и гауссовом приближениях соответственно. Первый из дополнительных классов введен из методических соображений с целью возможности демонстрации изучаемых в курсах геометрической оптики различных типов оптических aberrаций. Введение гауссовых пучков позволяет производить расчеты с учетом эффектов дифракции, что представляет интерес не только для обучения, но и при использовании лучепостроителя для профессиональных расчетов реальных оптических систем.

Еще одним существенным расширением возможности программы-конструктора явилось введение дополнительного класса объектов, моделирующих среды с непрерывно изменяющимся показателем преломления. Наличие описанных объектов позволяет моделировать эффекты самофокусировки, самоканализации и распространение света в градиентных волноводах, а также создавать компьютерные иллюстрации к теоретическому материа-

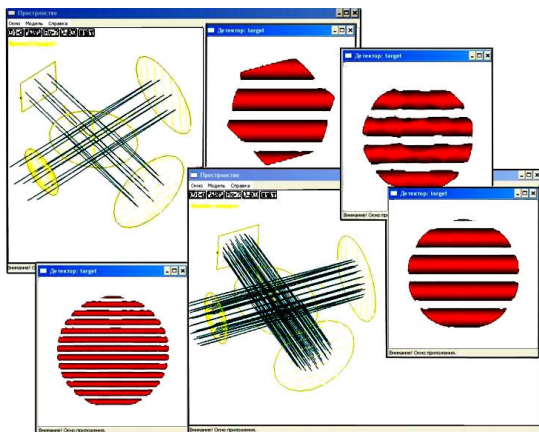
ду по темам «Уравнение эйконала» и «Принцип Ферма» (рис. 7 б).

Программа «Лучепостроитель» обеспечивает возможность моделирования лишь простейших интерференционных картин, получаемых методами деления волнового фронта или деления амплитуды. Ее возможности мало пригодны для демонстрации явлений дифракции. Для разработки указанного блока демонстраций был создан специализированный Java-апплет, позволяющий рассчитывать дифракционные картины, возникающие при прохождении света через экраны с произвольно определяемой функцией пропускания [50]. Результирующая картина распределения интенсивности света $I(x, y)$ от монохроматического источника на экране наблюдения может вычисляться в одном из двух приближений: Гюйгенса-Френеля и Фраунгофера.

При вычислении поля дифрагировавшего излучения в приближении Гюйгенса-Френеля использовано комплексное представление для напряженности поля дифрагировавшей волны $I(x, y)$:

$$\left| \iint dX dY t(X, Y) E_0(X, Y) \frac{\exp(ikr)}{r} (\cos \alpha_0 + \cos \alpha_1) \right|^2$$

а)



где $t(X, Y)$ – определяемая пользователем комплексная функция пропускания вызывающего дифракцию экрана, $E_0(X, Y)$ – распределение комплексной амплитуды поля падающего излучения на этом экране, r – расстояние от текущей точки первого экрана до точки наблюдения, α_0 и α_1 – углы между нормалью к экрану и волновыми векторами падающего на экран и дифрагировавшего на нем излучения. Суммирование полей от вторичных источников на экране $t(X, Y)$ осуществляется методом зон Френеля, разбиваемых на подзоны, количество которых определяется пользователем. При моделировании дифракции в приближении Фраунгофера использовался алгоритм быстрого двумерного преобразования Фурье.

Интерфейс программы предоставляет пользователю возможность произвольного определения функции пропускания экрана, задаваемой либо с помощью аналитических выражений, либо – перечислением графических примитивов, либо – непосредственным рисованием. Результаты расчетов представляются в виде трехмерного графика зависимости интенсивности

б)

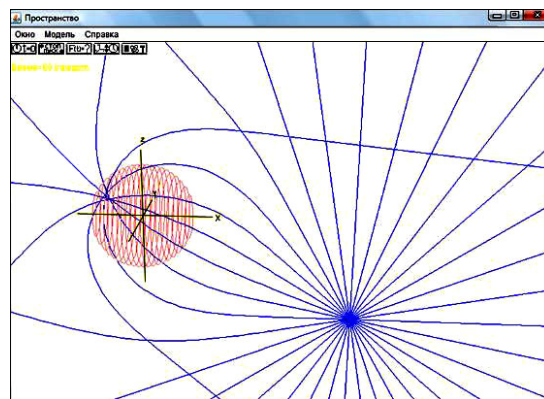


Рис. 7. Расширение возможностей программы «Лучепостроитель»:

а) пример получения интерференционных картин (модель интерферометра Майкельсона с незначительно повернутым зеркалом, в верхнем правом углу – последовательность изображений, демонстрирующая улучшение качества расчета интерференционной картины при увеличении числа рассматриваемых световых пучков, в левом нижнем углу – интерференционная картина, возникающая при увеличении угла поворота зеркала в 3 раза);

б) пример моделирования распространения света в среде с переменным показателем преломления (искривление солнечных лучей в атмосферах планет)

света от положения точки на плоскости наблюдения и непосредственно картиной распределения интенсивности света на плоскости экрана. В обоих случаях предусмотрена возможность корректировки получаемой картины, учитывающей нелинейность зависимости чувствительности глаза от интенсивности света. Пример интерфейса интерактивной программы и результата расчета дифракционной картины приведен на рис. 8.

Для создаваемого нового сборника по материалам курсов атомной физики, квантовой механики и спектроскопии разрабатывается Java-апплет, осуществляющий численное интегрирование стационарного уравнения Шредингера для радиальной части одноэлектронных волновых функций многоэлектронных атомов [51].

Для расчета полуэмпирических одноэлектронных волновых функций использована предложенная в [52] идея, позволяющая существенно упростить расчеты многоэлектронных атомов, традиционно выполняемые весьма ресурсоемким методом Хартри-Фока. Искомая радиальная часть волновой функции $R_{nl}(r)$ оптического (возбужденного) электрона в определенном квантовом состоянии строится путем интегрирования дифференциального уравнения второго порядка

$$\frac{d^2}{dr^2}(rR_{nl}(r)) + \left(\frac{l(l+1)}{r^2} - 2V\left(\frac{r}{\omega}\right) + 2W_{nl} \right) R_{nl}(r) = 0,$$

$$R_{nl}(r \rightarrow 0) \sim r^l, \quad R_{nl}(r \rightarrow \infty) \sim \exp\left(\frac{-r}{a_0 n}\right),$$

где энергия W_{nl} определяется не стандартным для задач квантовой механики образом (как собственное значение оператора Гамильтона), а берется из эксперимента. Варьированию же подвергается масштабный множитель ω в выражении для эффективного потенциала атомного остатка $V(r/\omega)$. Последний строится приближенно с использованием аналитически задаваемых приближений для волновых функций внутренних невозбужденных электронов

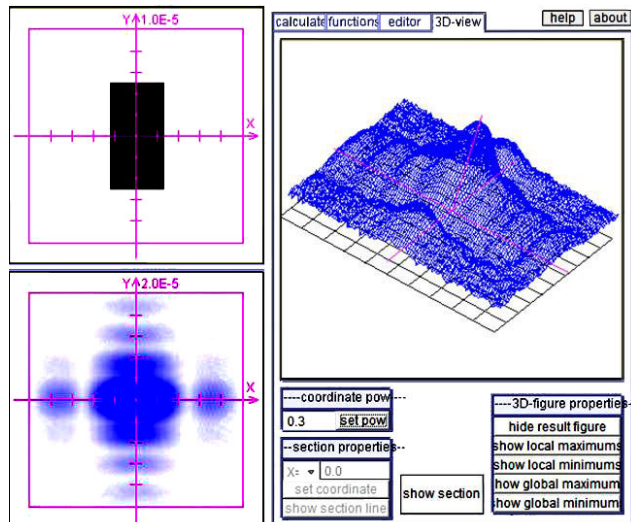


Рис. 8. Интерфейс и дизайн программы – виртуального конструктора демонстраций по волновой оптике (пример: дифракция плоской монохроматической волны на прямоугольном отверстии)

или в результате численного интегрирования уравнения Томаса-Ферми. Величина ω подбирается так, чтобы волновая функция $R_{nl}(r)$ имела правильное число нулей $(n - l - 1)$ и после совершения нужного числа осцилляций монотонно стремилась к нулевому значению на возможно большем интервале возрастания аргумента.

Неточность вычисления эффективного потенциала и ограниченное число итераций при подборе ω приводят к невозможности получения решения, асимптотически стремящегося к нулю при удалении от ядра на большие расстояния. В указанной области осуществляется отбрасывание заведомо неудовлетворительного «хвоста» расходящегося решения и его замена на известное асимптотическое решение для больших расстояний, гладко «сшиваемое» с построенной частью.

На базе полуэмпирических волновых функций строятся модули для расчетов вероятностей радиационных переходов, сечений и констант скоростей реакций. Эти разработки будут использоваться не только как отдельные учебно-научные ресурсы, но и для расширения возможностей базового конструктора моделей систем, состоящих из полей и частиц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе описанной серии реализованных в виде Java-апплетов конструкторов моделей физических систем было разработано более 400 оригинальных интерактивных демонстраций и компьютерных задач, которые вместе с разработками других авторов составили существенную часть материалов четырехтомного сборника мультимедийных ресурсов, предназначенных для сопровождения курсов общей

физики. Помимо этих материалов сборник содержит значительный объем иных мультимедийных ресурсов, создаваемых на базе стандартных оболочек и сред для разработки. Особенности технических решений, использованных при создании этих оригинальных ресурсов, описания иллюстрируемых с их помощью физических идей и методических аспектов их использования будут рассмотрены в последующих публикациях.

Литература

1. Бобович А.В., Космачев В.М., Чирцов А.С. Интеграция информационных технологий в образование // Компьютерные учебные программы и инновации. М., 2001. № 3. С. 39–56.
2. Рейтинг популярности ресурсов. Физика. [Электронный ресурс] / Российское образование. Федеральный портал: [сайт]. [2010]. URL: http://www.edu.ru/ed/modules.php?op=modload&name=Web_Links&file=index&op=rate_resources&n=50&days=31&page_num=1&category_id=2578 (дата обращения: 18.02.2010).
3. Физика в Интернете. Аннотированный тематический каталог Интернет ресурсов в физике. [Электронный ресурс] / Физика.WWW.PHYSICS.RU: [сайт]. [2010]. URL: http://www.physics.ru/modules.php?name=main_menu&op=show_page&page=appl.inc (дата обращения: 18.02.2010).
4. Марек В.П., Микушев В.М., Чирцов А.С. Использование информационных технологий при создании инновационной образовательной среды на физическом факультете классического университета. // Международный журнал экспериментального образования, 2009. № 6. С. 23–26.
5. Бутиков Е.И. Роль моделирования в обучении физике // Компьютерные инструменты в образовании, 2002. № 5. С. 3–20.
6. Кравченко Н.С. Комплекс компьютерных моделирующих лабораторных работ по физике: принципы разработки и опыт применения в учебном процессе // Физическое образование в ВУЗах, 2008. Т. 12. № 2. С. 85–88.
7. Кондратьев А.С., Ларченкова Л.А., Ляпцев А.В. Качественные методы при изучении физики // Компьютерные инструменты в образовании, 2007. № 5. С. 147–154.
8. Князев М.В., Колинько К.П., Чирцов А.С. Информационные технологии в обучении // Компьютерные инструменты в образовании, 1999. № 2. С. 3–22.
9. Козел С.М., Соболева М.М. Учебный курс «Физика на компьютере» в Московском Физико-техническом институте // Физическое образование в ВУЗах, 1996. Т. 2. № 1. С. 26–30.
10. Бутиков Е.И. Лаборатория компьютерного моделирования по физике колебаний // Компьютерные инструменты в образовании, 1999. № 5. С. 24 – 39.
11. Бутиков Е.И. Движения космических тел в компьютерных моделях. II. Задача многих тел // Компьютерные инструменты в образовании, 2001. № 5. С. 4–23.
12. Колинько К.П., Чирцов А.С. Использование реальных возможностей мультимедиа и численного моделирования при создании электронного учебника по фундаментальному курсу физики // В сб. V Межд. конф. «Физика в системе современного образования (ФССО 1999)» 21–24 июня 1999, СПб. Т. 3. С. 106–107.
13. Чирцов А.С. Многоцелевой компьютерный учебник по фундаментальному курсу физики. Раздел: «Движение частиц в однородных силовых полях» // Вестник С.Петербургского ун-та. Сер. 4 (физ., хим.). 1997. Вып. 1, № 4. С. 103–106.
14. Intel Compilers. Compilers, Libraries and more. [Электронный ресурс] / Intel Software Network: [сайт]. [2010]. URL: <http://software.intel.com/en-us/articles/intel-compilers/>. (дата обращения: 04.12.2010).
15. Колинько К.П., Никольский Д.Ю., Чирцов А.С. Многофункциональный компьютерный учебник по фундаментальному курсу физики. Разделы: «Движение частиц в силовых полях», «Релятивистская динамика», «Геометрическая оптика». // В сб. Тр. IV Межд. конф. «Физика в системе современного образования». Волгоград, 15–19 сент. 1997. Т. 2. С. 87–89.

16. Золотухин Ю.В., Филоненко Ф.И., Чирцов А.С. Электронный мультимедиа сборник «Увлекательная физика». Ядро моделирующей программы к разделу «Механические системы со связями» // В сб. Тр. Всероссийской объединенной конф. «Интернет технологии и современное информационное общество» 20–24 ноября 2000. СПб. С. 125–127.
17. Бобович А.В., Чирцов А.С. и др. Использование современных компьютерных технологий для информационной поддержки квалифицированного преподавания физики // Компьютерные учебные программы. М., 1999. Т. 3. № 18. С. 8–16.
18. Григорьев И.М., Чирцов А.С. и др. Информационные технологии в обучении физике. Использование сетевых технологий // Компьютерные инструменты в образовании, 1999. № 6. С. 23–27.
19. Козел С. М., Орлов В. А. и др. Открытая физика. Версия 2.6 [Электронный ресурс] / Физикон: [сайт]. [2008]. URL: <http://www.college.ru/laboratory> (последнее обращение: 04.12.2010).
20. Кавтрев А.В. Компьютерные модели в школьном курсе физики // Компьютерные инструменты в образовании, 1998. № 2. С. 41–47.
21. Кондратьев А.С., Ляпцев А.В. Физика. Задачи на компьютере. Физматлит, 2008. 400 с.
22. Бутиков Е.И. Океанские приливы в компьютерных моделях // Компьютерные инструменты в образовании. СПб. 2004. № 1. С. 12–24.
23. Бутиков Е.И. Вынужденная прецессия гироскопа // Компьютерные инструменты в образовании, 2007. № 1. С. 30–38.
24. Бутиков Е.И. Параметрический резонанс // Компьютерные инструменты в образовании, 2007. № 3. С. 22–40.
25. Физика в анимациях. [Электронный ресурс] / Анимация физических процессов: [сайт] [2009]. URL: <http://physics.nad.ru/physics.htm> (дата обращения: 10.12.2010).
26. Physik und ihre Didaktik. [Электронный ресурс] / Анимация физических процессов: [сайт]. [2010]. URL: http://www.physik.uni-wuerzburg.de/institute_einrichtungen/_physikalisches_institut/physik_und_ihre_didaktik (дата обращения: 10.12.2010).
27. NTNUJAVA Virtual Physics Laboratory. Physics Simulations to help you enjoy the fun of physics. [Электронный ресурс] / CoLoS: [сайт]. [2010]. URL: <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/> (дата обращения: 10.12.2010).
28. Physics 2000. [Электронный ресурс] / University of Colorado: [сайт]. [2010]. URL: <http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl> (дата обращения: 10.12.2010).
29. Пигалицын Л.В. Виртуальный физический эксперимент. [Электронный ресурс] / Педагогический университет Первое сентября : [сайт]. [2010]. URL: <http://edu.1september.ru/courses/16/010/01.pdf> (дата обращения: 10.12.2010).
30. Уроки физики Кирилла и Мефодия. 11 класс. М.: Кирилл и Мефодий. 1 электрон. опт. диск (DVD – ROM).
31. Experience Math and Science with Gizmos [Электронный ресурс] / ExplorLearning: [сайт]. [2009]. URL: <http://explorescience.com/> (дата обращения: 10.12.2010).
32. Чирцов А.С. Пакет обучающих программ по теме: «Движение заряженных частиц в силовых полях»: конструирование физических систем и моделирование процессов на компьютере. // В сб.: Труды Международной конференции «Физика в системе современного образования». 20–25 июня 1995 г. Петрозаводск. С. 244.
33. Пигалицын Л.В. Компьютер как физический прибор // Физика. Первое сентября, 2008. № 16. С. 9–12.
34. Interactive Physics. [Электронный ресурс] / INT – Институт Новых Технологий: [сайт]. [2010]. URL: <http://interactivephysics.design-simulation.com/IP/index.php> (дата обращения: 10.12.2010).
35. LabView. [Электронный ресурс] / National Instruments: [сайт]. [2010]. URL: <http://www.labview.ru/> (дата обращения: 10.12.2010).
36. Живая физика. [Электронный ресурс] / Design Simulation. Technologies: [сайт]. [2010]. URL: <http://www.int-edu.ru/> (дата обращения: 10.12.2010).
37. Бандин Д.В., Мухин О.И. Виртуальная физика. [Электронный ресурс] / STRATUM: [сайт]. [2010]. URL: <http://stratum.ac.ru/rus/products/vphysics/page8.html> (дата обращения: 10.12.2010).
38. Баяндин Д.В., Мухин О.И. Модельный практикум и интерактивный задачник по физике на основе системы STRATUM 2000. // Компьютерные учебные программы, 2002. № 3. С. 28–37.
39. Электричество и магнетизм. Оптика и волны. Виртуальные лаборатории ЕНКА. [Электронный ресурс] / INT- Институт Новых Технологий: [сайт]. [2010]. URL: <http://www.int-edu.ru/object.php?m1=1033&m2=2&id=1030> (дата обращения: 10.12.2010).
40. Девятая научно-практическая конференция «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments – 2010»: сб. науч. тр. / М.: РУДН, 2010. 400 с.

41. Попов Г.В., Тихонов А.И. Компьютерная система имитации динамических процессов в силовых трансформаторах. // Электро, 2004. Т. 2. С. 22–25.
42. Колинко К.П., Никольский Д.Ю., Чирцов А.С. Образовательный сервер «Физика для школ через Интернет» – мультимедиа демонстрации и Java-апплеты по курсу физики. // В сб. Технологии информационного общества. – Интернет и современное общество: материалы Всероссийской объединенной конференции. Санкт-Петербург, 20–24 ноября 2000 г. СПб. С. 208–209.
43. JAVA и Вы: загрузите сейчас. [Электронный ресурс] / Java: [сайт]. [2010]. URL: <http://www.java.com/ru/> (дата обращения: 10.12.2010).
44. Абутин М.В., Чирцов А.С. и др. Мультимедиа сборник «Увлекательная физика»: электронный конспект лекции «Гравитация: развитие взглядов от И. Ньютона до А. Эйнштейна» // В сб. Материалы 6-й Межд. Конф. «Современные технологии обучения». СПб., 2000. Т. 1. С. 184–185.
45. Абутин М.В., Чирцов А.С. и др. Мультимедиа сборник «Физика: модель, эксперимент, реальность»: электронный конспект лекции «Электрические и магнитные поля: удобная теоретическая модель или физическая реальность?» // В сб. «Физика в системе современного образования (ФССО-03)» Тр. 7 межд. конф. 14–18 окт. 2003 г. СПб. Т. 3. С. 218–219.
46. Абутин М.В., Колинко К.П., Чирцов А.С. Мультимедиа сборник «Физика: модель, эксперимент, реальность»: т. 3 «Развитие взглядов на природу света» // В сб. «Физика в системе современного образования» (ФССО-05). Матер. VIII Межд. конф. 29 мая – 3 июня 2005. СПб.: Изд. РГПУ им. А.И. Герцена. 2005. С. 500–501.
47. Микушев В.М., Чирцов А.С. Опыт реализации на физическом факультете СПбГУ национального проекта «Инновационная образовательная среда в классическом университете» // Успехи современного естествознания, 2008. № 2. С. 82–84.
48. Колинко К.П., Чирцов А.С. и др. Серия мультимедиа сборников «Физика: модель, эксперимент, реальность»: новые образовательные ресурсы для поддержки преподавания механики, электродинамики и оптики // В сб. «Тр. XI Всероссийской научно-методической конф. Телематика'2004». СПб., 2004. Т. 1. С. 328–330.
49. Абутин М.В., Колинко К.П., Чирцов А.С. Мультимедийные ресурсы к электронному сборнику «Развитие взглядов на природу света» (Серия «Физика: модель–эксперимент–реальность») // В сб. Матер. XI Межд. конф. «Совр. технологии обучения: междунар. опыт и российские традиции СТО-2005». СПб., 2005. Т. 2. С. 134–136.
50. Колинко К.П., А.С.Чирцов и др. Серия мультимедиа сборников «Физика: модель, эксперимент, реальность»: мультимедиа ресурсы для сопровождения преподавания курса оптики // В сб. «Матер. X Межд. конф. «Современные технологии обучения (СТО-2004)». СПб., 2004. Т. 2. С. 100–102.
51. Никольский Д.Ю., Чирцов А.С. Электронная поддержка курса «Теория атомных и молекулярных спектров»: программа удаленных расчетов многоэлектронных атомов и элементарных радиационных и столкновительных процессов с их участием // В сб. трудов VI Межд. конф. «Физика в системе современного образования» (ФССО-01): тезисы докладов. Ярославль, 2001. Т. 3. С. 84–85.
52. Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: Наука, 1973. 142 с.

Abstract

Approach and program implementation of the high interactive Java-applets intended for generation of the different types of models in physics are discussed. Virtual models and their generators can be simply used on personal computers and in the remote access via Internet.

Keywords: physics, computer modeling, multimedia digest, virtual constructor, Java-applets, classical dynamics, relativistic dynamics, electromagnetic fields, optics, diffraction, one-electron wave function.



Наши авторы, 2010.
Our authors, 2010.

*Чирцов Александр Сергеевич,
декан физического факультета
СПбГУ,
alex_chirtsov@mail.ru*