

Цели и структура дисциплины «Компьютерный практикум по решению физических задач»

Лужков А.А., Тюканов А.С.
РГПУ им. А.И. Герцена
yandexbox@mail.ru

Учебные дисциплины с компьютерно-ориентированным решением физических задач стали появляться автоматически после создания в вузах первых компьютерных классов. Под различными названиями («Решение физических задач на компьютере», «Компьютерный практикум по решению физических задач» и т.д.) они входили сначала в состав образовательных программ подготовки учителей физики и информатики, а затем – бакалавров по направлению «Физика» на факультете физики РГПУ им. А.И. Герцена.

В содержание этих дисциплин вначале включались любые физические задачи, для решения которых можно было хоть как-то использовать компьютер. Параллельно с развитием вычислительной техники, ростом её мощности, быстродействия и качества графики, а также появлением все более развитого программного обеспечения расширялся и класс задач, включаемых в такие дисциплины. В результате получались довольно аморфные, плохо структурированные компьютерные практикумы, ограниченные только объемом выделяемой учебной нагрузки. Это хорошо прослеживается в первой волне соответствующих учебных пособий [1-6].

В дальнейшем, при составлении программ дисциплины «Решение физических задач на компьютере», стали использовать три основных системообразующих подхода:

- группировка задач по темам стандартного курса общей физики;
- распределение задач по группам базовых численных методов;
- отбор задач, ориентированных на программные приложения определенного типа.

Помимо упомянутой дисциплины, в ходе модернизации образовательных программах подготовки бакалавров по направлению «Физика» на факультете физики РГПУ им. А.И. Герцена, на разных её этапах стали появляться такие дисциплины как «Математическое моделирование и численные методы», «Компьютерное моделирование», «Моделирование и вычислительный эксперимент», которые по своему содержанию часто оказывались конкурирующими.

Ниже приводится тематический обзор «конкурирующих» компьютерных дисциплин, соответствующих текущим рабочим программам на факультете физики РГПУ им. А.И. Герцена.

Численные методы	Компьютерный практикум по решению физических задач	Моделирование и вычислительный эксперимент
<ul style="list-style-type: none"> – численные методы и особенности их применения для решения физических задач; – основные разделы математики, используемые при создании типовых моделей физических явлений; – набор стандартных методов для реализации алгоритмов решения типовых задач вычислительной физики; – реализация алгоритмов численных методов на языках программирования и применение компьютерных математических пакетов для решения физических задач; 	<ul style="list-style-type: none"> – основные алгоритмы, используемые при решении физических задач на компьютере; – типовые физические задачи, ориентированные на решение с помощью компьютеров; – основы программирования для решения типовых физических задач; – возможности универсальных математических пакетов прикладных программ для решения физических задач; – реализация и представление решения физических задач с помощью различных компьютерных приложений; 	<ul style="list-style-type: none"> – основные разделы математики, используемые при создании типовых моделей физических явлений; методы формулировки физических задач на языке математики для разработки моделей физических явлений; – возможности современных компьютерных технологий, предназначенные для моделирования физических явлений и обработки экспериментальных данных; – основные законы, закономерности и методы физики при интерпретации результатов решения физических задач на компьютере;

Последнее существенное изменение образовательных программ было связано с переходом на их модульное построение. Одновременно с этим пришло осознание необходимости выстроить содержание упомянутых выше дисциплин в логике изучения основ вычислительной физики, как одного из современных направлений физической науки. Модульная структура построения учебных планов образовательных программ диктовала необходимость дробление многих больших дисциплин на более мелкие части, что не всегда оказывалось оправданным. Но в данном случае модульное построение оказалось удачным способом распределения достаточно объемного материала по разным дисциплинам, подчиненным одной общей большой цели, но решающим различные задачи и направленные на формирование различных компетенций. Так в учебном плане появились два модуля: «Компьютерное моделирование в физике» и «Основы вычислительной физики».

В состав модуля «Компьютерное моделирование в физике» вошли три дисциплины: «Программирование» (изучается на 1-м курсе), «Моделирование и вычислительный эксперимент» и «Компьютерный практикум по решению физических задач» (изучаются на 2-м курсе). В составе модуля «Основы вычислительной физики» – две дисциплины: «Численные методы в физике» (изучается

на 3-м курсе) и «Практикум по вычислительной физике» (проводится на 4-м, завершающем курсе).

Никакая учебная дисциплина, разумеется, не может включать всего того многообразия сведений, которые составляют содержание активно развивающейся науки. В то же время, учебная дисциплина (или модуль), выполняя общеобразовательные функции, должна отражать в себе наиболее значимые, фундаментальные понятия и сведения, раскрывающие существо данного направления науки и его методологию. Она также должна формировать практические навыки применения своих методов и владения своими инструментами для решения практически значимых (профессиональных) задач.

Целью изучения дисциплины «Программирование» является освоение базовых конструкций языка программирования высокого уровня (потенциально ориентированного на решение задач вычислительной физики), основных типов данных и простейших вычислительных алгоритмов. В качестве конкретного языка выбран универсальный современный язык Python.

Целью изучения дисциплины «Моделирование и вычислительный эксперимент» входит, прежде всего, знакомство студентов с методом математического моделирования и его применения, как физике, так и в других науках. Также ключевым моментом данной дисциплины является знакомство студентов с методологией вычислительного эксперимента. Дополнительно, студентами осваиваются некоторые базовые инструменты вычислительной математики и средства визуализации данных, реализованные в таких библиотеках как `numpy`, `scipy` и `matplotlib`.

Цель изучения дисциплины «Компьютерный практикум по решению физических задач» заключается, прежде всего, в применении и развитии полученных ранее знаний по программированию и математическому моделированию к решению широкого спектра вычислительных задач по самым разнообразным разделам физики. Также в рамках данной дисциплины студенты знакомятся с некоторыми новыми для них методами вычислительной математики и физики.

По этой причине возникает практическая необходимость пересмотреть подходы к структуре и целям дисциплины «Решение физических задач на компьютере» и, в первую очередь, уточнить принципы отбора и структурирования учебного материала исходя из специфики учебного плана педагогического вуза.

Содержание дисциплины «Компьютерный практикум по решению физических задач» в рамках текущего ФГОС должно быть направлено на формирование следующих компетенций:

- ОПК-2: способности использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей;

- ОПК-5: способности использовать основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации и навыки работы с компьютером как со средством управления информацией.

При таком широком спектре возможного содержания в дисциплину автоматически включаются следующие основные элементы:

- основные разделы математики, используемые при создании типовых моделей физических явлений;
- основные численные методы и алгоритмы их реализации, используемые при решении физических задач на компьютере;
- набор стандартных алгоритмов и методов для реализации алгоритмов решения типовых задач вычислительной физики;
- основы программирования для решения типовых физических задач;
- современные компьютерные технологии, предназначенные для моделирования физических явлений и обработки экспериментальных данных;
- набор универсальных математических пакетов прикладных программ для решения физических задач.

Дисциплина «Решение физических задач на компьютере» имеет свою специфику и содержит ограниченное число лекционных занятий, а на лабораторные занятия отводится почти 80% аудиторных часов. При этом, на практических занятиях в компьютерном классе большая часть времени отводится на разбор демонстрационных программ (по темам лекций) и на аудиторную самостоятельную работу. Таким образом, необходимо выделить минимальный набор стандартных теоретических тем – инвариантное ядро дисциплины, – которые составят основу лекционного курса.

Используя опыт преподавания компьютерных дисциплин группой преподавателей различных кафедр факультета физики (отраженный в наборе учебников и учебно-методических пособий [7-12]) нами проанализированы различные подходы к отбору и структурированию учебного материала по данной дисциплине.

При формировании программы «Решение физических задач на компьютере» мы предлагаем ориентироваться на две системообразующие компоненты: инвариантное ядро дисциплины и вариативную авторскую часть. Общепринятым подходом формирования инвариантной части является структурирование разделов по темам курса общей физики. Для формирования вариативной части дисциплины, с нашей точки зрения, весьма эффективным выглядит подход, основанный на индивидуальных предпочтениях преподавателя, ориентированный на его личный опыт работы, предпочитаемый им тип программного обеспечения и вдохновленный интересными особенностями определенного класса задач. Фактически этот подход уже нашел свое отражение в соответствующих

авторских учебных курсах и закреплён в соответствующих учебно-методических пособиях [7-12].

В первую очередь «Компьютерный практикум по решению физических задач» ориентирована на применение численных методов к таким физическим задачам, решение которых не удаётся найти аналитически. При этом во многих случаях приходится комбинировать различные численные методы, а оптимизация путей решения задачи требует её удачной математической формулировки и разработки специфических алгоритмических схем.

В данной работе предлагается набор лекционных тем, образующих инвариантное ядро дисциплины, реализующих принцип тематического соответствия «параллельно идущему» курсу общей физики. Она включает в себя следующие основные разделы:

Тема (раздел курса общей физики)	Типовые задачи	Методы
Механика	Моделирование движения одной или нескольких частиц. Численное решение уравнений движения.	1, 2, 3, 6
Молекулярная физика	Моделирование статистических систем. Использование генераторов псевдослучайных чисел.	1, 5
Электричество	Решение систем уравнений Кирхгофа. Расчеты цепей переменного тока методом комплексных амплитуд.	1, 2, 4
Оптика	Распространение световых лучей в оптических системах и средах. Задачи интерференции и дифракции.	1, 3, 4
Смешанные задачи	Динамические модели. Построение фракталов.	1 - 6
Данная дисциплина входит в программу 2 курса, поэтому в ней не рассматриваются задачи квантовой механики.		

1. Прямые расчеты по готовым формулам с использованием табличных процессоров или математических пакетов
2. Решение алгебраических уравнений и систем уравнений с использованием табличных процессоров или математических пакетов;
3. Решение задач, сводящихся к системам обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) и численные методы их решения;
4. Решение задач, использующих методы на основе преобразований Фурье;

5. Основы применения генератора случайных чисел при моделировании физических систем и метод Монте-Карло;
6. Задачи на собственные значения линейных операторов (матричная алгебра).

Среди основных структурных элементов, традиционно входящих в дисциплину «Компьютерный практикум по решению физических задач», выделяют следующие:

1. Математическую формулировку основных физических задач в виде, наиболее подходящем для дальнейшего численного решения. Это требует знакомства с определённым набором математических методов, используемых в физике.
2. Численные методы, используемые при решении основных физических задач в наиболее общей формулировке, обеспечивающие максимальную точность и устойчивость вычислений, Их отбор определяется спецификой дисциплины, с учетом знаний, полученных при изучении смежных дисциплин.
3. Компьютерно-ориентированные алгоритмические схемы, оптимально подходящие к решению задач, а также использующие индивидуальные особенности задачи. Эти схемы должны рассматриваться вместе с определенной вычислительной средой или языком программирования.

Задачи, входящие в инвариантное ядро дисциплины, должны иметь четкое соответствие основным темами курса общей физики. В наибольшей степени этому отвечают задачи, сводящиеся к численному решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Явный вид уравнений и типичные формы представления решений для различных случаев отражены ниже.

В первую очередь сюда относятся задачи, основанные на решении уравнений движения классической механики. Другим примером являются уравнения для переменных токов и напряжений в электрических цепях. Задачи на распространение волн также можно переформулировать в терминах дискретной среды с распределёнными параметрами, описываемой системой ОДУ. Примеры типовых уравнений:

Механика (плюс алгоритмы обработки граничных условий):

$$m \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \vec{F}_i.$$

Переменный ток:

$$\sum_{i=1}^N (\alpha_{ij} \frac{d^2}{dt^2} I_i + \beta_{ij} \frac{d}{dt} I_i + \gamma_{ij} I_i) = f_j(t)$$

Распространение волн с типовым уравнением

$$m(\vec{r}) \frac{\partial^2 u(\vec{r})}{\partial t^2} - \Delta u(\vec{r}, t) = F(\vec{r}, t),$$

и эквивалентная система ОДУ

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} u_i(t) = -k \cdot (2u_i - u_{i+1} - u_{i-1}) + F_i(t).$$

Геометрическая оптика (уравнение траектории луча в среде с градиентом показателя преломления)

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{n} [\vec{\nabla} n - \vec{v}(\vec{\nabla} n \cdot \vec{v})]$$

К системам дифференциальных уравнений также можно привести задачи на построение силовых линий электрических и магнитных полей:

$$\frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \frac{\vec{E}(x(t), y(t), z(t))}{E}$$

Умение решать задачи, сводящиеся к применению численных методов решения ОДУ можно использовать и при рассмотрении динамических моделей, которые возникают в различных разделах естествознания (пример из математической экологии – модель «хищник-жертва»):

$$\frac{dA}{dt} = A \cdot (q_1 - q_2 \cdot L), \quad \frac{dL}{dt} = L \cdot (q_3 \cdot A - q_4).$$

К другим численным методам, обязательно входящим в инвариантное ядро дисциплины «Компьютерный практикум по решению физических задач», следует отнести методы, основанные на применении рядов Фурье, которые используются как при исследовании распространения сигналов в линейных электрических цепях, так и при анализе любых временных или координатных зависимостей экспериментальных данных.

Использование генератора случайных чисел является популярным методом моделирования случайных систем, начиная с броуновского движения. При этом, для получения количественных результатов учащимся требуется знакомство с методом Монте-Карло.

С точки зрения компетенции ОПК-5 необходимо также обеспечить вариативность использования программного обеспечения. Поэтому при решении физических задач и компьютерном моделировании физических процессов в рам-

ках данной дисциплины используются самые разнообразные прикладные программы и программные среды, начиная с MS Excel, Visual Basic for Application (VBA) в Excel [12], языки высокого уровня (см., например [13, 15, 17]) и специализированные математические пакеты прикладных программ [14, 16].

Следует отметить, что именно отработку и проверку навыков освоения этих базовых тем следует, в обязательном порядке, положить также и в основу инвариантной самостоятельной работы, которая реализуется через набор индивидуально-вариантов «домашних» заданий по всем темам дисциплины.

Литература

1. Э.В. Бурсиан. Физика : 100 задач для решения на компьютере : Учеб. пособие, –СПб. : ИД "МиМ", 1997. – 252 с.
2. Х. Гулд, Я. Тобочник. Компьютерное моделирование в физике : [В 2 ч.] / Х. Гулд, Я. Тобочник ; Перевод с англ. А. Н. Полюдова, В. А. Панченко. - М. : Мир, 1990. -. Ч. 1. - М. : Мир. - 349 с.
3. А. А. Белоусов, А.С. Кондратьев, А.И. Ходанович. Компьютерное моделирование в примерах и задачах. Динамика. – СПб.: РГПУ, 1997.
4. Г.А. Бордовский, И.Б. Горбунова, А.С. Кондратьев. Персональный компьютер на занятиях по физике. – СПб.: РГПУ, 1999. – 116 с.
5. Е.И. Бутиков, А.С. Кондратьев, В.В. Лаптев. Использование персонального компьютера при изучении основ физики колебаний. – СПб.: РГПУ, 1994. – 157 с.
6. Горяев М. А. Решение физических задач на компьютере : учеб. пособие / Горяев М. А. С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т "ЛЭТИ". - СПб. : Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2008. - 63 с.
7. Кондратьев А.С., Ляпцев А.В. Физика. Задачи на компьютере: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений/ - М. : Физматлит, 2008. - 397 с.
8. Ходанович А.И. Компьютерное моделирование в задачах естествознания. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2006
9. А. А. Лужков, В. И. Сельдяев. Основы вычислительной физики: учебно-методическое пособие / – Санкт-Петербург: Изд. РГПУ им. А. И. Герцена, 2014. – 103 с.: ил.
10. Лужков А. А., А. С. Тюканов Компьютерный практикум по информатике и вычислительной физике: учебно-методическое пособие / РГПУ им. А. И. Герцена / А. А Лужков, А. С. Тюканов. – Санкт-Петербург: Изд. «Фора-Принт», 2016. – 51 с.: ил.
11. Ходанович А.И. Математическое моделирование на компьютере: Сборник задач и упражнений. – СПб.: Изд-во СПбГУКиТ, 2009. – 118 с
12. Лужков А. А. Решение физических задач на VBA в Excel : учебно-методическое пособие для студентов высших учебных заведений . РГПУ им. А. И. Герцена. - Санкт-Петербург : Фора-Принт, 2019. - 39 с.
13. Сысоева М.В., Сысоев И.В. Программирование для «нормальных»: с нуля на языке Python: Учебник. В двух частях. Часть 1 / М.: Базальт СПО; МАКС Пресс, 2018. 176 с.
14. А. В. Воробьева, А. С. Тюканов. Использование математических пакетов на уроках физики / // «Физика в школе и вузе»: международный сборник научных статей. РГПУ им. А. И. Герцена. – Санкт-Петербург: Изд. «Фора-Принт»,– 2016. – С. 216-225
15. Колдаев В. Д. Численные методы и программирование: учебное пособие / В. Д. Колдаев. – М.: Изд. "ФОРУМ", 2013. – 336 с.: ил.

16. Поршнеv С. В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB: учебное пособие. / 2-е, изд., испр. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 726 с.: ил.
17. Ращиков В. И. Численные методы. Компьютерный практикум: учебно-методическое пособие / В. И. Ращиков. – М НИЯУ МИФИ, 2010. – 132 с.: ил.
18. Г.А. Бордовский, А.С. Кондратьев, А.Д.Р. Чоудери Физические основы математического моделирования : учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры— 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 319 с.