О применении вычислительных экспериментов при изучении физики

**Человек:** Рассматривается проблема использования учебных вычислительных экспериментов (УВЭ) при изучении физических явлений. Под УВЭ понимается эксперимент над математической моделью объекта, проводимый с помощью ЭВМ с целью обучения. Совокупность упрощенных вариантов научных вычислительных экспериментов, адаптированных к условиям обучения, образуют систему УВЭ. В статье проанализированы примеры использования учебного вычислительного эксперимента для: 1) изучения намагничивания ферромагнетика, получения кривой намагниченности и петли гистерезиса; 2) исследования хаотических колебаний маятника Дафинга, возникновения бифуркации при изменении профиля потенциальной ямы, изучения сечения Пуанкаре и эволюции фазового объема. Применяются методы математического и компьютерного (имитационного) моделирования, предполагающие построение математической модели и создание компьютерной программы, имитирующей изучаемое явление на основе численного решения соответствующей системы уравнений. Новизна работы состоит в том, что в ней предложены четыре простые компьютерные программы на языке Pascal, позволяющие: 1) получить кривую намагниченности и петлю гистерезиса для ферромагнетка в изменяющемся магнитном поле; 2) промоделировать колебания маятника Дафинга; 3) изучить переход осциллятора в хаотический режим при изменении профиля потенциальной ямы; 4) получить сечение Пуанкаре и изучить эволюцию фазового объема для маятника Дафинга.

**Key words:** информационные технологии, компьютерное моделирование, программирование, компьютерные симуляции, физические явления, обучение, намагничивание ферромагнетика, магнитные гистерезис, маятник Дафинга, динамический хаос

=================================

**FastText\_KMeans\_Clean:** Ферромагнитный стержень вставляют в обмотку из n витков, которая подключена к источнику тока. Суть вычислительного эксперимента состоит в плавном увеличении напряженности магнитного поля и пересчете alfa[i,j] у всех атомов с нахождением соответствующих средних значений индукции магнитного поля BSR. Для решения этой задачи также используется программа ПР–1. Для изучения бифуркации промоделируем поведение маятника Дафинга в случае плавного изменения профиля потенциальной ямы, при котором в ее центре растет бугорок и вместо одного углубления получаются два. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 5.

**Key words part:** 0.4444444444444444

=================================

**FastText\_KMeans\_Raw/:** В проекции на ось Ox:. В результате на плоскости B от H получится кривая намагниченности с характерным горизонтальным участком, соответствующим магнитному насыщению, когда магнитные моменты всех атомы ориентированы по полю. Результаты вычислений приведены на рис. 3. Программа ПР-2 представлена ниже. Для изучения бифуркации промоделируем поведение маятника Дафинга в случае плавного изменения профиля потенциальной ямы, при котором в ее центре растет бугорок и вместо одного углубления получаются два. Рассмотренные программы позволяют: 1) получить кривую намагниченности и петлю гистерезиса для ферромагнетка в изменяющемся магнитном поле; 2) промоделировать колебания маятника Дафинга; 3) изучить переход осциллятора в хаотический режим при изменении профиля потенциальной ямы; 4) получить сечение Пуанкаре и изучить эволюцию фазового объема для маятника Дафинга. Рассмотренные компьютерные модели могут быть использованы в качестве лекционных демонстраций, на практических занятиях и лабораторных работах при изучении курса физики и основ компьютерного моделирования. Кроме того, они могут быть частью выпускной квалификационной работы или исследовательского проекта.

**Key words part:** 0.5925925925925926

=================================

**FastText\_PageRank\_Clean/:** где H=nI – напряженность магнитного поля. Шаг по времени должен быть достаточно мал. Для решения этой задачи также используется программа ПР–1. Результат решения задачи представлен на рис. 2. Результаты вычислений приведены на рис. 3. Программа ПР-2 представлена ниже. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 5. Их применение способствует повышению интереса студентов к численным методам, компьютерным моделям и информационным технологиям в целом.

**Key words part:** 0.5185185185185185

=================================

**FastText\_PageRank\_Raw/:** где H=nI – напряженность магнитного поля. В проекции на ось Ox:. Шаг по времени должен быть достаточно мал. Потенциальное поле создает возвращающую силу F'(t). Результат решения задачи представлен на рис. 2. Результаты вычислений приведены на рис. 3. Программа ПР-2 представлена ниже. Кроме того, они могут быть частью выпускной квалификационной работы или исследовательского проекта.

**Key words part:** 0.3703703703703704

=================================

**Mixed\_ML\_TR/:** Если ось Ox сонаправлена с силовой линией магнитного поля, то среднее значение индукции:. При уменьшении амплитуды колебаний напряженности поля H получается петля гистерезиса, изображенная на рис. 1.2. Аналогичным образом можно промоделировать поляризацию сегнетоэлектриков в изменяющемся электрическом поле. С помощью компьютерной модели исследуйте зависимость формы петли гистерезиса от величины магнитного момента p атомов ферромагнетика. Промоделируйте вынужденные колебания маятника Дафинга, на который действует внешняя гармонически изменяющаяся сила. Профиль потенциальной ямы, уравнение вынуждающей и возвращающей сил, а также дифференциальное уравнение колебаний маятника Дафинга представлены ниже:. В результате получается бифуркация типа вил (рис. 4.2). Промоделируйте перемешивание фазового объема в случае свободных незатухающих колебаний маятника Дафинга. Предлагаемая программа рассчитывает состояние каждого маятника в момент времени t1, и ставит соответствующую точку на фазовой плоскости. Рассмотренные программы позволяют: 1) получить кривую намагниченности и петлю гистерезиса для ферромагнетка в изменяющемся магнитном поле; 2) промоделировать колебания маятника Дафинга; 3) изучить переход осциллятора в хаотический режим при изменении профиля потенциальной ямы; 4) получить сечение Пуанкаре и изучить эволюцию фазового объема для маятника Дафинга. Рассмотренные компьютерные модели могут быть использованы в качестве лекционных демонстраций, на практических занятиях и лабораторных работах при изучении курса физики и основ компьютерного моделирования.

**Key words part:** 0.6296296296296297

=================================

**MultiLingual\_KMeans/:** Если ось Ox сонаправлена с силовой линией магнитного поля, то среднее значение индукции:. При уменьшении амплитуды колебаний напряженности поля H получается петля гистерезиса, изображенная на рис. 1.2. Аналогичным образом можно промоделировать поляризацию сегнетоэлектриков в изменяющемся электрическом поле. С помощью компьютерной модели исследуйте зависимость формы петли гистерезиса от величины магнитного момента p атомов ферромагнетика. В результате получается бифуркация типа вил (рис. 4.2). Промоделируйте перемешивание фазового объема в случае свободных незатухающих колебаний маятника Дафинга. Предлагаемая программа рассчитывает состояние каждого маятника в момент времени t1, и ставит соответствующую точку на фазовой плоскости. Рассмотренные компьютерные модели могут быть использованы в качестве лекционных демонстраций, на практических занятиях и лабораторных работах при изучении курса физики и основ компьютерного моделирования.

**Key words part:** 0.6296296296296297

=================================

**Multilingual\_PageRank/:** В проекции на ось Ox:. Шаг по времени должен быть достаточно мал. Результаты вычислений приведены на рис. 3. На экране ставится точка, показывающая координату x в заданный момент t, и все повторяется снова. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 5. Рассмотренные компьютерные модели могут быть использованы в качестве лекционных демонстраций, на практических занятиях и лабораторных работах при изучении курса физики и основ компьютерного моделирования. Кроме того, они могут быть частью выпускной квалификационной работы или исследовательского проекта. Их применение способствует повышению интереса студентов к численным методам, компьютерным моделям и информационным технологиям в целом.

**Key words part:** 0.5185185185185185

=================================

**RuBERT\_KMeans\_Without\_ST/:** Выясните, как изменятся ее форма при уменьшении амплитуды колебаний тока через обмотку. После ее запуска на экране рисуется петля гистерезиса (рис. 1.1). Из графиков x(t) и v(t) и фазовой кривой видно, что система совершает нерегулярные стохастические колебания относительно двух положений равновесия. Необходимо многократно (1000 раз) моделировать вынужденные колебания маятника Дафинга при случайной начальной фазе вынуждающей силы, а на экран компьютера выводить координаты x через заданное время после начала колебаний, когда они уже установились.

**Key words part:** 0.4444444444444444

=================================

**RuBERT\_KMeans\_With\_ST/:** Для более глубокого понимания физической сущности этого явление можно решить следующую задачу. Рассмотрим двумерную модель ферромагнетика, состоящую из прямоугольной сетки N x M (кристаллической решетки), в узлах которой находятся атомы с магнитным моментом p. Необходимо многократно (1000 раз) моделировать вынужденные колебания маятника Дафинга при случайной начальной фазе вынуждающей силы, а на экран компьютера выводить координаты x через заданное время после начала колебаний, когда они уже установились. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 5. Рассмотренные программы позволяют: 1) получить кривую намагниченности и петлю гистерезиса для ферромагнетка в изменяющемся магнитном поле; 2) промоделировать колебания маятника Дафинга; 3) изучить переход осциллятора в хаотический режим при изменении профиля потенциальной ямы; 4) получить сечение Пуанкаре и изучить эволюцию фазового объема для маятника Дафинга.

**Key words part:** 0.5925925925925926

=================================

**RUBERT\_page\_rank\_Without\_ST/:** В проекции на ось Ox:. При повороте атома возникает момент “упругих сил”, препятствующий повороту. Шаг по времени должен быть достаточно мал. После ее запуска на экране рисуется петля гистерезиса (рис. 1.1). Программа ПР-2 представлена ниже.

**Key words part:** 0.3703703703703704

=================================

**RUBERT\_page\_rank\_With\_ST/:** Шаг по времени должен быть достаточно мал. Результат решения задачи представлен на рис. 2. Программа ПР-2 представлена ниже. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 5. Их применение способствует повышению интереса студентов к численным методам, компьютерным моделям и информационным технологиям в целом.

**Key words part:** 0.4814814814814815

=================================

**RUSBERT\_KMeans\_Without\_ST/:** Результат решения задачи представлен на рис. 2. Видно, что при увеличении b в центре ямы растет бугорок и образуются два симметричных углубления. Так как колебания незатухающие, то в соответствии с теоремой Лиувилля величина фазового объема остается постоянной. Рассмотренные программы позволяют: 1) получить кривую намагниченности и петлю гистерезиса для ферромагнетка в изменяющемся магнитном поле; 2) промоделировать колебания маятника Дафинга; 3) изучить переход осциллятора в хаотический режим при изменении профиля потенциальной ямы; 4) получить сечение Пуанкаре и изучить эволюцию фазового объема для маятника Дафинга.

**Key words part:** 0.4814814814814815

=================================

**RUSBERT\_KMeans\_With\_ST/:** Индукция магнитного поля Bij в данном узле сетки (i, j) обусловлена внешним полем обмотки H и магнитным полем, создаваемым соседними атомами. Промоделируйте переход к хаосу в случае, когда на маятник Дафинга действует гармоническая сила при изменяющемся профиле потенциальной ямы. Предлагаемая программа рассчитывает состояние каждого маятника в момент времени t1, и ставит соответствующую точку на фазовой плоскости. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 5.

**Key words part:** 0.4814814814814815

=================================

**RUSBERT\_page\_rank\_Without\_ST/:** где H=nI – напряженность магнитного поля. В проекции на ось Ox:. Шаг по времени должен быть достаточно мал. Программа ПР-2 представлена ниже. Кроме того, они могут быть частью выпускной квалификационной работы или исследовательского проекта.

**Key words part:** 0.3703703703703704

=================================

**RUSBERT\_page\_rank\_With\_ST/:** Шаг по времени должен быть достаточно мал. Результат решения задачи представлен на рис. 2. Результаты вычислений приведены на рис. 3. Программа ПР-2 представлена ниже. Кроме того, они могут быть частью выпускной квалификационной работы или исследовательского проекта.

**Key words part:** 0.3333333333333333

=================================

**Simple\_PageRank/:** Движение шарика является трудно предсказуемым, бесконечно малые изменения параметров системы, начальных условий и внешней силы приводят к тому, что система эволюционирует по иному пути. Промоделируйте переход к хаосу в случае, когда на маятник Дафинга действует гармоническая сила при изменяющемся профиле потенциальной ямы. Под бифуркацией (bifurcus – раздвоенный) понимают качественное изменение характера движения динамической системы в результате малого изменения ее параметров, после прохождения которого система может эволюционировать по двум различным путям. При удачном подборе параметров модели когда параметр b начинает превышать критическое значение bk=0, вместо одной потенциальной ямы получается две, и система начинает совершать колебания относительно одного из двух положений равновесия. Рассмотренные программы позволяют: 1) получить кривую намагниченности и петлю гистерезиса для ферромагнетка в изменяющемся магнитном поле; 2) промоделировать колебания маятника Дафинга; 3) изучить переход осциллятора в хаотический режим при изменении профиля потенциальной ямы; 4) получить сечение Пуанкаре и изучить эволюцию фазового объема для маятника Дафинга. Рассмотренные компьютерные модели могут быть использованы в качестве лекционных демонстраций, на практических занятиях и лабораторных работах при изучении курса физики и основ компьютерного моделирования.

**Key words part:** 0.6666666666666666

=================================

**TextRank/:** Промоделируйте вынужденные колебания маятника Дафинга, на который действует внешняя гармонически изменяющаяся сила. Рассмотрим колебания шарика внутри потенциальной ямы с двумя углублениями под действием внешней периодически изменяющейся силы F(t). Профиль потенциальной ямы, уравнение вынуждающей и возвращающей сил, а также дифференциальное уравнение колебаний маятника Дафинга представлены ниже:. Сечения Пуанкаре для маятника Дафинга получены так: на ЭВМ моделируются колебания системы и определяются ее состояния в моменты времени, когда фаза вынуждающей силы равна 0, 3,14/4, 3,14/2, 3\*3,14/4, 3,14. Для изучения бифуркации промоделируем поведение маятника Дафинга в случае плавного изменения профиля потенциальной ямы, при котором в ее центре растет бугорок и вместо одного углубления получаются два. Рассмотренные программы позволяют: 1) получить кривую намагниченности и петлю гистерезиса для ферромагнетка в изменяющемся магнитном поле; 2) промоделировать колебания маятника Дафинга; 3) изучить переход осциллятора в хаотический режим при изменении профиля потенциальной ямы; 4) получить сечение Пуанкаре и изучить эволюцию фазового объема для маятника Дафинга.

**Key words part:** 0.4814814814814815

=================================

**TF-IDF\_KMeans/:** Ферромагнитный стержень находится внутри обмотки, через которую пропускают переменный ток. Методами компьютерного моделирования изучите процесс намагничивания ферромагнетика, получите кривую намагниченности и петлю гистерезиса. Индукция магнитного поля Bij в данном узле сетки (i, j) обусловлена внешним полем обмотки H и магнитным полем, создаваемым соседними атомами. Промоделируйте вынужденные колебания маятника Дафинга, на который действует внешняя гармонически изменяющаяся сила. Программа ПР-2 представлена ниже. При удачном подборе параметров модели когда параметр b начинает превышать критическое значение bk=0, вместо одной потенциальной ямы получается две, и система начинает совершать колебания относительно одного из двух положений равновесия. Промоделируйте перемешивание фазового объема в случае свободных незатухающих колебаний маятника Дафинга. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 5.

**Key words part:** 0.6666666666666666

=================================

**Текст:** При изучении явления намагничивания ферромагнетика обычно рассматривают следующий опыт. Ферромагнитный стержень вставляют в обмотку из n витков, которая подключена к источнику тока. Увеличивают силу тока I в обмотке, измеряют индукцию B магнитного поля. Затем уменьшают силу тока, пропускают ток в противоположном направлении, увеличивая и затем уменьшая его до нуля. Используя результаты измерения H и B, строят кривую намагничивания B(H). Для более глубокого понимания физической сущности этого явление можно решить следующую задачу.. Задача 1. Ферромагнитный стержень находится внутри обмотки, через которую пропускают переменный ток. Методами компьютерного моделирования изучите процесс намагничивания ферромагнетика, получите кривую намагниченности и петлю гистерезиса. Выясните, как изменятся ее форма при уменьшении амплитуды колебаний тока через обмотку.. Рассмотрим двумерную модель ферромагнетика, состоящую из прямоугольной сетки N x M (кристаллической решетки), в узлах которой находятся атомы с магнитным моментом p. Сначала магнитное поле отсутствует, ферромагнетик полностью размагничен, магнитные моменты атомов ориентированы произвольно, образуя с осью Ox случайные углы alfa[i,j]. Если ось Ox сонаправлена с силовой линией магнитного поля, то среднее значение индукции:. . где H=nI – напряженность магнитного поля. Индукция магнитного поля Bij в данном узле сетки (i, j) обусловлена внешним полем обмотки H и магнитным полем, создаваемым соседними атомами. В проекции на ось Ox:. Со стороны магнитного поля на атом, находящийся в узле (i, j), действует вращающий момент MВР=Bij\*p\*sin(alfa[i,j]). При повороте атома возникает момент “упругих сил”, препятствующий повороту. В результате действия этих моментов, а также сил внутреннего трения, атом поворачивается на k\*MВР, и угол alfa[i,j] становится равным alfa[i,j]+k\*MВР+x. Здесь x – небольшая случайная величина в интервале [–0,1; 0,1], учитывающая хаотические колебания атомов в узлах кристаллической решетки. Давая случайное приращение x углу alfa[i,j], мы как бы “встряхиваем” нашу модель, предоставляем возможность найти более “удачные” значения alfa[i,j]. Это важно еще и потому, что в анализируемой модели число атомов существенно меньше, чем в реальном ферромагнитном стержне.. Суть вычислительного эксперимента состоит в плавном увеличении напряженности магнитного поля и пересчете alfa[i,j] у всех атомов с нахождением соответствующих средних значений индукции магнитного поля BSR. В результате на плоскости B от H получится кривая намагниченности с характерным горизонтальным участком, соответствующим магнитному насыщению, когда магнитные моменты всех атомы ориентированы по полю. Для получения петли гистерезиса необходимо, чтобы напряженность поля H совершила одно гармоническое колебание.. . Представленная ниже программа ПР–1 содержит цикл по времени t, в котором пересчитываются H, alfa[i,j], BSR и строится зависимость B(H). Шаг по времени должен быть достаточно мал. После ее запуска на экране рисуется петля гистерезиса (рис. 1.1). При уменьшении амплитуды колебаний напряженности поля H получается петля гистерезиса, изображенная на рис. 1.2. Аналогичным образом можно промоделировать поляризацию сегнетоэлектриков в изменяющемся электрическом поле.. . . Задача 2. С помощью компьютерной модели исследуйте зависимость формы петли гистерезиса от величины магнитного момента p атомов ферромагнетика.. Для решения этой задачи также используется программа ПР–1. Если уменьшить магнитный момент атомов p в 2 - 3 раза (от 0,15 до 0,05), то уменьшится индукция магнитного поля, соответствующая насыщению, петля гистерезиса сожмется по вертикали (рис. 1.3).. Примером простой механической системы, обнаруживающей способность к хаотическому движению, является осциллятор Дафинга. Он представляет собой частицу, движущуюся в потенциальной яме с двумя углублениями. Рассмотрим несколько задач, которые могут быть решены при изучении хаотического движения маятника Дафинга.Задача 3. Промоделируйте вынужденные колебания маятника Дафинга, на который действует внешняя гармонически изменяющаяся сила.. Рассмотрим колебания шарика внутри потенциальной ямы с двумя углублениями под действием внешней периодически изменяющейся силы F(t). Пусть потенциальная энергия внутри ямы задается функцией U(x). Потенциальное поле создает возвращающую силу F'(t). Профиль потенциальной ямы, уравнение вынуждающей и возвращающей сил, а также дифференциальное уравнение колебаний маятника Дафинга представлены ниже:. Результат решения задачи представлен на рис. 2. Из графиков x(t) и v(t) и фазовой кривой видно, что система совершает нерегулярные стохастические колебания относительно двух положений равновесия. Движение шарика является трудно предсказуемым, бесконечно малые изменения параметров системы, начальных условий и внешней силы приводят к тому, что система эволюционирует по иному пути.. . Задача 4. Получите сечения Пуанкаре для вынужденных колебаний маятника Дафинга, происходящих под действием внешней периодически изменяющейся силы. Для этого рассмотрите фазовую кривую в пространстве, образованном осями x, p и F, и получите множество точек ее пересечения с плоскостью F=const.. Результаты вычислений приведены на рис. 3. Сечения Пуанкаре для маятника Дафинга получены так: на ЭВМ моделируются колебания системы и определяются ее состояния в моменты времени, когда фаза вынуждающей силы равна 0, 3,14/4, 3,14/2, 3\*3,14/4, 3,14. Так как режим хаотический, точки сечения имеют фрактальную структуру. Программа ПР-2 представлена ниже.. . . . Задача 5. Промоделируйте переход к хаосу в случае, когда на маятник Дафинга действует гармоническая сила при изменяющемся профиле потенциальной ямы. Получите точку бифуркации, в которой происходит раздвоение пути эволюции системы.. Под бифуркацией (bifurcus – раздвоенный) понимают качественное изменение характера движения динамической системы в результате малого изменения ее параметров, после прохождения которого система может эволюционировать по двум различным путям. Для изучения бифуркации промоделируем поведение маятника Дафинга в случае плавного изменения профиля потенциальной ямы, при котором в ее центре растет бугорок и вместо одного углубления получаются два.. На рис. 4.1 изображен профиль потенциальной ямы U(x)=0,25\*x4-b\*x2 при различных значениях параметра b1=0,1, b2=0,5, b3=1. Видно, что при увеличении b в центре ямы растет бугорок и образуются два симметричных углубления.. . Необходимо многократно (1000 раз) моделировать вынужденные колебания маятника Дафинга при случайной начальной фазе вынуждающей силы, а на экран компьютера выводить координаты x через заданное время после начала колебаний, когда они уже установились. Одновременно с этим должен изменяться бифуркационный параметр b, определяющий профиль потенциальной ямы (рис. 4.1). При удачном подборе параметров модели когда параметр b начинает превышать критическое значение bk=0, вместо одной потенциальной ямы получается две, и система начинает совершать колебания относительно одного из двух положений равновесия. На экране ставится точка, показывающая координату x в заданный момент t, и все повторяется снова. Начальная фаза силы изменяется случайным образом, поэтому шарик оказывается то в левом, то в правом углублении. В результате получается бифуркация типа вил (рис. 4.2).. . Задача 6. Промоделируйте перемешивание фазового объема в случае свободных незатухающих колебаний маятника Дафинга.. Представим себе совокупность из 160 одинаковых маятников Дафинга, совершающих свободные незатухающие колебания (r=0), отличающиеся только начальными условиями x, p. Пусть в момент t=0 фазовые точки, характеризующие начальное состояние маятников, находятся внутри прямоугольника [x, x+dx, p, p+dp]. Предлагаемая программа рассчитывает состояние каждого маятника в момент времени t1, и ставит соответствующую точку на фазовой плоскости. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 5. Видно, что происходит расползание фазового объема, его перемешивание в фазовом пространстве, что свидетельствует о хаотичности колебаний. Так как колебания незатухающие, то в соответствии с теоремой Лиувилля величина фазового объема остается постоянной.. . . . . . . . . . В настоящей статье предложены примеры использования учебного вычислительного эксперимента для изучения намагничивания ферромагнетика и хаотических колебаний маятника Дафинга. Рассмотренные программы позволяют: 1) получить кривую намагниченности и петлю гистерезиса для ферромагнетка в изменяющемся магнитном поле; 2) промоделировать колебания маятника Дафинга; 3) изучить переход осциллятора в хаотический режим при изменении профиля потенциальной ямы; 4) получить сечение Пуанкаре и изучить эволюцию фазового объема для маятника Дафинга. Рассмотренные компьютерные модели могут быть использованы в качестве лекционных демонстраций, на практических занятиях и лабораторных работах при изучении курса физики и основ компьютерного моделирования. Кроме того, они могут быть частью выпускной квалификационной работы или исследовательского проекта. Их применение способствует повышению интереса студентов к численным методам, компьютерным моделям и информационным технологиям в целом.