

# Лабораторная работа № 2

## ***Собственные колебания пружинного осциллятора с сухим и вязким трением***

Методические рекомендации

### **Цели работы:**

- Изучить закономерности затухания колебаний механического осциллятора, подверженного действию сухого трения.
- Сравнить особенности затухания колебаний при сухом трении и вязком трении.
- Исследовать превращения энергии при затухании собственных колебаний осциллятора с сухим трением.
- Понять физические причины случайных погрешностей стрелочных измерительных приборов.

### **При подготовке к лабораторной работе следует:**

1. Повторить соответствующий теоретический материал (тема 2, см. ниже), пользуясь конспектом лекций и рекомендованным Вам учебником физики.
2. Изучить Главу 2 «Осциллятор с сухим и вязким трением» учебного пособия «Основы физики колебаний». Рекомендуется проделать на черновике вывод всех формул, особенно тех, что в пособии приведены без вывода.
3. Подготовить письменно краткие ответы на предлагаемые Вам «Вопросы для самоконтроля» (см. ниже).
4. Решить некоторые теоретические задачи из учебного пособия «Основы физики колебаний» (по индивидуальному заданию преподавателя).
5. Познакомиться с «Требованиями к оформлению отчета» о выполненной работе.

### **Теоретический материал (тема 2)**

Собственные колебания в диссипативных физических системах с нелинейным трением. Механическая модель — пружинный осциллятор с сухим (кулоновским) трением. Идеализированная  $Z$ -характеристика сухого трения. Зона застоя. Кусочно-линейное дифференциальное уравнение и метод его поэтапного интегрирования («сшивания», «припасовывания» решений для соседних временных интервалов). Особенности затухания колебаний при сухом трении. Фазовые траектории осциллятора с сухим трением. Энергетические превращения и диссипация энергии. Относительная роль вязкого трения. Затухание колебаний при одновременном действии сухого и вязкого трения.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Сформулируйте основные закономерности сухого трения (эмпирический закон Кулона – Амонтона). Что Вам известно о физических причинах сухого трения? Какие отклонения от закона Кулона – Амонтона наблюдаются на опыте?
2. Приведите примеры физических систем, в которых сухое трение играет важную роль.

3. Какие практические приложения имеет модель механического торсионного осциллятора с сухим и вязким трением, используемая в этой лабораторной работе?
4. Опишите физическую систему (торсионный пружинный осциллятор с сухим и вязким трением), которая моделируется в лабораторной работе. Какими физическими параметрами определяются свойства пружинного осциллятора с сухим и вязким трением?
5. Какие параметры определяют математическую модель осциллятора, используемую в лабораторной работе? Что такое  $z$ -характеристика? Какие параметры используются в модели осциллятора для характеристики интенсивности сухого трения и вязкого трения?
6. Что такое зона застоя или мертвая зона (применительно к торсионному пружинному осциллятору)?
7. Какую роль играет сухое трение в стрелочных измерительных приборах типа гальванометра с подвижной катушкой?
8. Каким дифференциальным уравнением описывается движение пружинного осциллятора с сухим и вязким трением? Почему, несмотря на то, что в это дифференциальное уравнение искомая функция (угол отклонения) и ее производные входят в первой степени, рассматриваемую модель нельзя отнести к линейным физическим системам?
9. Объясните идею метода поэтапного интегрирования дифференциального уравнения пружинного осциллятора с сухим трением.
10. Какие изменения в характере колебаний торсионного осциллятора происходят, если наряду с пружиной на ротор действует дополнительно постоянный момент сил (в отсутствие трения)?
11. Каким будет график угла отклонения от времени при колебаниях осциллятора с сухим трением (в отсутствие вязкого трения) на интервале между соседними моментами поворота (моментами изменения направления движения)? Как соединяются эти графики в моменты поворота?
12. Сравните характер убывающих последовательностей максимальных отклонений при затухании колебаний под действием вязкого и сухого трения. Почему колебания осциллятора с сухим трением полностью прекращаются после конечного числа циклов? На каком максимальном угловом расстоянии от положения равновесия может остановиться ротор при прекращении колебаний?
13. Как влияет сухое трение на (условный) период затухающих колебаний? Сравните с влиянием вязкого трения на период колебаний осциллятора.
14. Как выглядит фазовая траектория колебаний, затухающих под действием сухого трения? Сравните ее с фазовой траекторией колебаний, затухающих под действием вязкого трения.
15. Объясните, почему график зависимости полной энергии от углового положения ротора для осциллятора с сухим трением состоит из прямолинейных отрезков, соединяющих берега параболической потенциальной ямы осциллятора.
16. Почему при полном прекращении колебаний осциллятора с сухим трением его полная энергия, вообще говоря, не обращается в нуль?
17. Если осциллятор одновременно подвержен действию сухого и вязкого трения, каким критерием определяется вид трения, играющего доминирующую роль в затухании колебаний?
18. Торсионный осциллятор подвержен одновременно действию сухого трения, характеризуемого конечной шириной зоны застоя, и вязкого трения, характеризуемого критическим затуханием. В какой точке произойдет остановка ротора при прекращении колебаний, возбужденных сообщением находящемуся в положении равновесия ротору некоторой начальной угловой скорости?

## **Задания и порядок выполнения лабораторной работы**

1. Начните работу с раздела «Основы теории», в котором приведены краткие сведения об изучаемой физической системе и о соответствующей математической модели.
  - Просмотрите последовательно все страницы этого раздела, запуская каждый раз (кнопкой «Пуск») моделирование соответствующих движений осциллятора.
  - Особое внимание обратите на страницу, где обсуждается понятие зоны застоя (мертвой зоны) осциллятора и связь ширины этой зоны с интенсивностью сухого трения.
2. Вспомните, как происходят колебания осциллятора в отсутствие трения.
  - Откройте панель ввода параметров (либо нажатием кнопки «Ввод», либо выбрав пункт меню «Ввод данных»), введите нулевую ширину зоны застоя и снимите «галочку» в боксе «Вязкое трение». Введите некоторое начальное отклонение (скажем, 90 или 120 градусов) и нулевую начальную скорость. Закройте панель ввода, нажав кнопку «Ок».
  - Начните моделирование, нажав кнопку «Пуск». Регулятором «Моделирование» установите временной масштаб, удобный для наблюдения. Обратите внимание на вид графиков угла отклонения и угловой скорости при выбранных начальных условиях. Какой математической функции соответствует каждый из графиков? Обратите особое внимание на соотношение фаз колебаний угла отклонения и угловой скорости.

- Перейдите в раздел «Фазовая траектория». Проследите за движением изображающей точки по фазовой траектории при построении графиков временной зависимости переменных. Приостанавливая моделирование, проследите за одновременными положениями ротора на изображении осциллятора и точек на всех графиках. Сопоставьте форму графиков и фазовой траектории колебаний в отсутствие трения.
  - Перейдите в раздел «Превращения энергии». При моделировании колебаний обратите внимание на форму графиков потенциальной и кинетической энергий. Сопоставьте период колебаний угла отклонения с периодом колебаний потенциальной и кинетической энергий.
3. Изучите затухающие колебания осциллятора при сухом трении.
- На панели ввода параметров снимите «галочку» в боксе «Вязкое трение». Задайте некоторое значение ширины зоны застоя (10 – 20 градусов). Введите начальное отклонение, в несколько раз превышающее ширину зоны застоя, и нулевую начальную скорость. Перейдите в раздел «Физическая система». Выполняя моделирование колебаний, занесите в таблицу серию значений последовательных максимальных отклонений ротора в одну сторону. Убедитесь в том, что эта последовательность представляет собой убывающую арифметическую прогрессию. Это можно сделать, вычисляя разности последовательных максимальных отклонений – в случае арифметической прогрессии разность должна быть одной и той же для любой пары последовательных членов. Как эта разность связана с введенным Вами значением ширины зоны застоя?
  - Перейдите в раздел «Фазовая траектория». При моделировании обратите внимание на форму графиков и фазовой траектории для отдельных полупериодов затухающих колебаний. Убедитесь, что по мере линейного убывания амплитуды под действием сухого трения витки фазовой траектории эквидистантны, а условный период колебаний (т.е. промежуток времени между последовательными пересечениями оси абсцисс графиками) остается неизменным.
  - Обратите внимание на то, что как только постепенно сжимающаяся (скручивающаяся к началу координат фазовой плоскости) фазовая траектория достигнет отрезка оси абсцисс между границами зоны застоя, колебания ротора сразу прекращаются – вместо изменения направления движения происходит полная остановка ротора в пределах зоны застоя.
  - Перейдите в раздел «Превращения энергии». Обратите внимание на характер графиков временной зависимости кинетической, потенциальной и полной энергии для затухающих колебаний.
  - Сопоставьте поведение изображающей точки на фазовой плоскости с графиком зависимости полной энергии от угла отклонения – точка в потенциальной яме перемещается от одного берега к другому, достигая берегов ямы в точках поворота и постепенно опускаясь на ее дно. Обратите внимание на то, что эта траектория изображающей точки в потенциальной яме состоит из прямолинейных отрезков одинакового наклона.
  - По поведению графика зависимости полной энергии от времени сделайте вывод о скорости рассеяния механической энергии на протяжении периода колебаний.
4. Промоделируйте движение осциллятора при одновременном действии сухого и вязкого трения, в том числе с критическим затуханием.
- Введите некоторую ширину зоны застоя и задайте значение добротности, соответствующее критическому затуханию. Введите начальные условия, соответствующие возбуждению осциллятора начальным толчком из положения равновесия.
  - Откройте раздел «Фазовая траектория». В какой точке фазовой плоскости происходит прекращение движения? Где останавливается ротор осциллятора? Оцените время, в течение которого осциллятор приходит в это состояние покоя при критическом затухании.
5. Проверьте в моделирующем эксперименте Ваши теоретические решения тех задач из учебного пособия, которые были Вам предложены преподавателем в качестве индивидуального задания.
- Введите необходимые значения параметров и выполните соответствующие эксперименты. Зарисуйте (или распечатайте на принтере) графики и фазовые диаграммы для включения в отчет.
  - Сопоставьте результаты экспериментов с Вашими теоретическими предсказаниями. Если обнаруживаются расхождения результатов расчета с экспериментом, обязательно попытайтесь установить причину расхождений. Результаты экспериментальной проверки Ваших решений включите в отчет о лабораторной работе.

После выполнения всех заданий подготовьте отчет о проделанной лабораторной работе, руководствуясь «Требованиями к оформлению отчета».

## Требования к оформлению отчета

Отчет о проделанной лабораторной работе должен содержать следующие разделы:

1. Титульный лист с указанием названия и номера лабораторной работы, фамилии и имени студента, номера учебной группы, даты выполнения работы и даты представления отчета.
2. Цель лабораторной работы с определением изучаемого физического явления и краткое описание моделируемой физической системы и ее математической модели.
3. Теоретический раздел с кратким изложением основных характеристик изучаемого явления, его места в классификации колебаний по разным признакам, и описанием математической модели физической системы, используемой для его изучения. В этом разделе должны быть приведены все основные формулы (связь параметров физической системы и ее математической модели, дифференциальное уравнение, описывающее систему, его общее решение, частные решения для наиболее важных и интересных случаев, уравнение фазовой траектории, выражения для разных видов энергии и их средних значений и т.п.). В этом разделе следует обязательно привести вывод тех формул, которые в учебном пособии приведены без вывода.
4. Ответы на вопросы для самоконтроля, которые сформулированы в «Методических рекомендациях» к данной лабораторной работе. Рекомендуется проиллюстрировать Ваши ответы соответствующими графиками или иными результатами моделирования (для тех вопросов, где это целесообразно).
5. Теоретическое решение задач из учебного пособия, предложенных Вам преподавателем в качестве индивидуального задания, и результаты самостоятельной проверки Ваших решений с помощью моделирующего эксперимента. В этом разделе нужно привести таблицы соответствующих измерений с обработкой результатов (для заданий, где такие измерения необходимы), графики и/или фазовые траектории (зарисовав их с экрана или распечатав на принтере, если есть такая возможность).