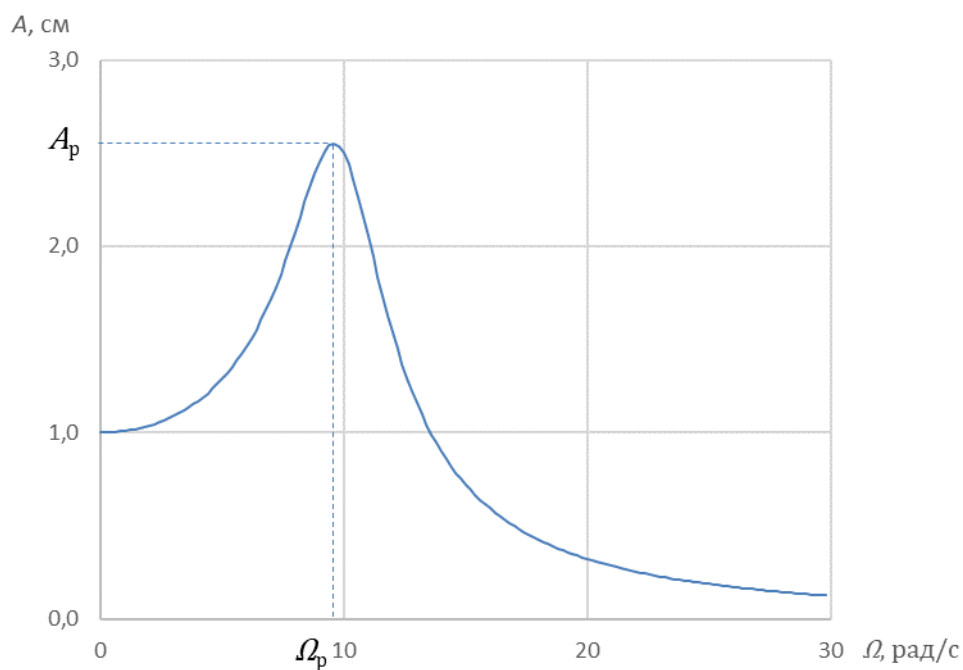


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Г. Рипп, О.В. Матузаева

Амплитудная характеристика



Учебное пособие
по общей физике
для студентов технических
и естественно-научных специальностей

Севастополь
СевГУ
2019

УДК 53.08 (075.8)
Р537

Рецензент:

А.Н. Бакулина - кандидат технических наук, доцент

Рипп А.Г.

Р537 Амплитудная характеристика: учеб. пособие по общей физике / А.Г. Рипп, О.В. Матузаева. – Севастополь: СевГУ, 2019. – 16 с.

Учебное пособие разработано преподавателями кафедры «Физика» СевГУ и предназначено для студентов 1 и 2 курсов технических и естественно-научных специальностей, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам: «физика» и «физический практикум». В пособии студентам предлагается познакомиться с особенностями вынужденных колебаний осциллятора – в частности, пружинного маятника, исследовать экспериментальным путём амплитудную характеристику маятника и убедиться в том, что она согласуется с теоретической амплитудной характеристикой. Лабораторная установка, на которой предлагается провести эксперименты, виртуальная.

Пособие содержит краткий теоретический материал, описание лабораторной установки, порядок выполнения лабораторной работы и методы оценки погрешности измерений. Материал изложен подробно и в доступной форме. Для студентов, желающих получить больше информации, в конце пособия приводится список литературы.

УДК 53.08 (075.8)

Учебное пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Физика», протокол № 6 от 28 февраля 2019 г.

Работа 54 А. Амплитудная характеристика

Цель работы

Изучение особенностей вынужденного колебательного движения. Исследование амплитудной характеристики осциллятора. Измерение резонансной частоты.

1. Краткая теория

1.1. Вынужденные механические колебания

Чтобы получить незатухающие колебания реального осциллятора, надо компенсировать потери энергии, возникающие за счёт сопротивления среды. Такая компенсация может быть обеспечена введением какого-либо периодически действующего фактора. Колебания осциллятора, на который действует периодический внешний фактор, называются *вынужденными*.

Рассмотрим вынужденные колебания конкретного осциллятора – пружинного маятника. Его устройство показано на рисунке 1.1. Некоторое тело массой

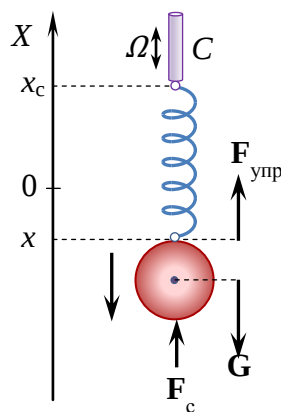


Рис. 1.1. Маятник и действующие на него силы

m , которое собственно и называется маятником (на рисунке – это шарик), соединено с вертикально расположенной пружиной, упругость пружины (коэффициент жёсткости) равна k . Второй конец пружины прикреплён к некоторому телу C (на рисунке – это стержень), которое приводится в вертикальное колебательное движение мотором (на рисунке не показан). Колебательное движение стержня и представляет собой внешний для маятника периодический фактор.

Рассмотрим простейший случай колебаний маятника, при котором маятник двигается только в вертикальном направлении: вверх – вниз. Такое движение – одномерное, и для его количественного описания достаточно системы координат, содержащей только одну вертикальную ось. Обозначим эту ось OX и направим её вверх.

На маятник действуют три силы: сила тяжести G , сила упругости пружины $F_{\text{упр}}$ и сила сопротивления среды F_c .

- Сила тяжести направлена вниз, поэтому её проекция на ось OX равна

$$G_x = -mg. \quad (1.1)$$

- Сила упругости пружины направлена вверх, если пружина растянута, и вниз, если пружина сжата. Будем считать, что деформация пружины не слишком велика, так что выполняется закон Гука: сила упругости пропорциональна деформации. Это можно записать в следующем виде:

$$F_{\text{упр},x} = k(\ell - \ell_0),$$

где ℓ – длина деформированной пружины, а ℓ_0 – длина недеформированной пружины. Из рисунка 1.1 видно, что $\ell = (x_c - x)$. Здесь x_c – это координата точки прикрепления пружины к стержню, а x – координата точки прикрепления пружины к маятнику, в дальнейшем будем считать x координатой маятника. Таким образом,

$$F_{\text{упр},x} = k(x_c - x - \ell_0). \quad (1.2)$$

- Сила сопротивления среды F_c направлена против скорости маятника. Её зависимость от скорости – не простая, однако при малых значениях скорости эту зависимость можно считать линейной:

$$F_{c,x} = -bv_x = -b \frac{dx}{dt},$$

где коэффициент b называется *коэффициентом сопротивления среды*. Для тел шарообразной формы этот коэффициент определяется формулой Стокса

$$b = 6\pi r\eta.$$

Здесь r – радиус шара, η – динамическая вязкость среды (коэффициент внутреннего трения)

Будем для краткости использовать принятое обозначение производной по времени: $\frac{dx}{dt} = \dot{x}$. Тогда

$$F_{c,x} = -b\dot{x}, \quad (1.3)$$

Теперь запишем Второй закон Ньютона для маятника в проекциях на ось ОХ.

$$\ddot{x} = \frac{-mg + k(x_c - x - \ell_0) - b\dot{x}}{m}. \quad (1.4)$$

Здесь $\ddot{x}$ – это вторая производная от координаты маятника, то есть ускорение a_x .

Будем считать, что стержень S совершает гармонические колебания, так что координата точки его соединения с пружиной x_c – это гармонический осциллятор, уравнение которого следующее:

$$x_c(t) = x_{c0} + A_c \cos(\Omega t + \varphi_0),$$

где Ω – частота колебаний стержня, A_c – амплитуда колебаний, φ_0 – начальная фаза колебаний, x_{c0} – среднее значение x_c в процессе колебаний, то есть точка,

вокруг которой совершаются колебания. В предлагаемой вам лабораторной установке стержень C в начальный момент времени $t = 0$ находится в самом нижнем своём положении и начинает подниматься вверх. Это означает, что $\varphi_0 = \pi$ и уравнение колебаний имеет вид:

$$x_c(t) = x_{c0} - A_c \cos(\Omega t). \quad (1.5)$$

Подставив (1.5) в (1.4) и проделав некоторые преобразования, получим:

$$\ddot{x} + \frac{b}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x + \frac{mg - kx_{c0} + k\ell_0}{m} = -\frac{kA_c}{m} \cos(\Omega t). \quad (1.6)$$

Это – дифференциальное уравнение второго порядка. Прежде чем решать уравнение, полезно его немного упростить, а именно: избавиться от четвёртого (постоянного) слагаемого в левой части. Это можно сделать, если подходящим образом выбрать начало координат, так как в четвёртое слагаемое входит число x_{c0} , значение которого зависит от того, где на оси OX выбрана точка отсчёта $x = 0$. Таким образом, можно так выбрать начало координат, чтобы всё четвёртое слагаемое обратилось в нуль. Тогда уравнение (1.6) будет иметь вид:

$$\ddot{x} + \frac{b}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = -\frac{kA_c}{m} \cos(\Omega t). \quad (1.7)$$

Теперь введём следующие обозначения.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1.8)$$

$$\beta = \frac{b}{2m}, \quad (1.9)$$

$$a = \frac{k}{m} A_c. \quad (1.10)$$

При этом получим уравнение (1.7) в следующем наиболее лаконичном (стандартном) виде:

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega_0^2 x = -a \cos(\Omega t). \quad (1.11)$$

Несколько слов относительно введённых обозначений.

Величина ω_0 называется *собственной частотой*. Если бы на маятник не действовала сила сопротивления и если бы не было внешнего периодического воздействия в виде колеблющегося стержня C , то в уравнении (1.11) исчезли бы правая часть и слагаемое $2\beta \dot{x}$. Тогда уравнение было бы следующим:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0.$$

Это уравнение хорошо известно в математике, физике и во многих других науках. Оно называется *уравнением гармонических колебаний*, так как его решение – это гармоническая функция

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Таким образом, маятник в этом идеальном случае является гармоническим осциллятором с частотой ω_0 .

Величина β называется *коэффициентом затухания*. Если бы на маятник не было внешнего периодического воздействия, но сила сопротивления действовала, то в уравнении (1.11) исчезла бы только правая часть. В этом случае уравнение (1.11) имело бы такой вид

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0.$$

Решением этого уравнения при условии, что $\beta < \omega_0$, является функция

$$x(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (1.12)$$

Эта функция описывает колебания с амплитудой A , которая экспоненциально убывает со временем:

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t}.$$

Величина a специального названия не имеет, она является характеристикой интенсивности внешнего периодического воздействия на маятник, так как в неё входит амплитуда колебаний стержня A_c .

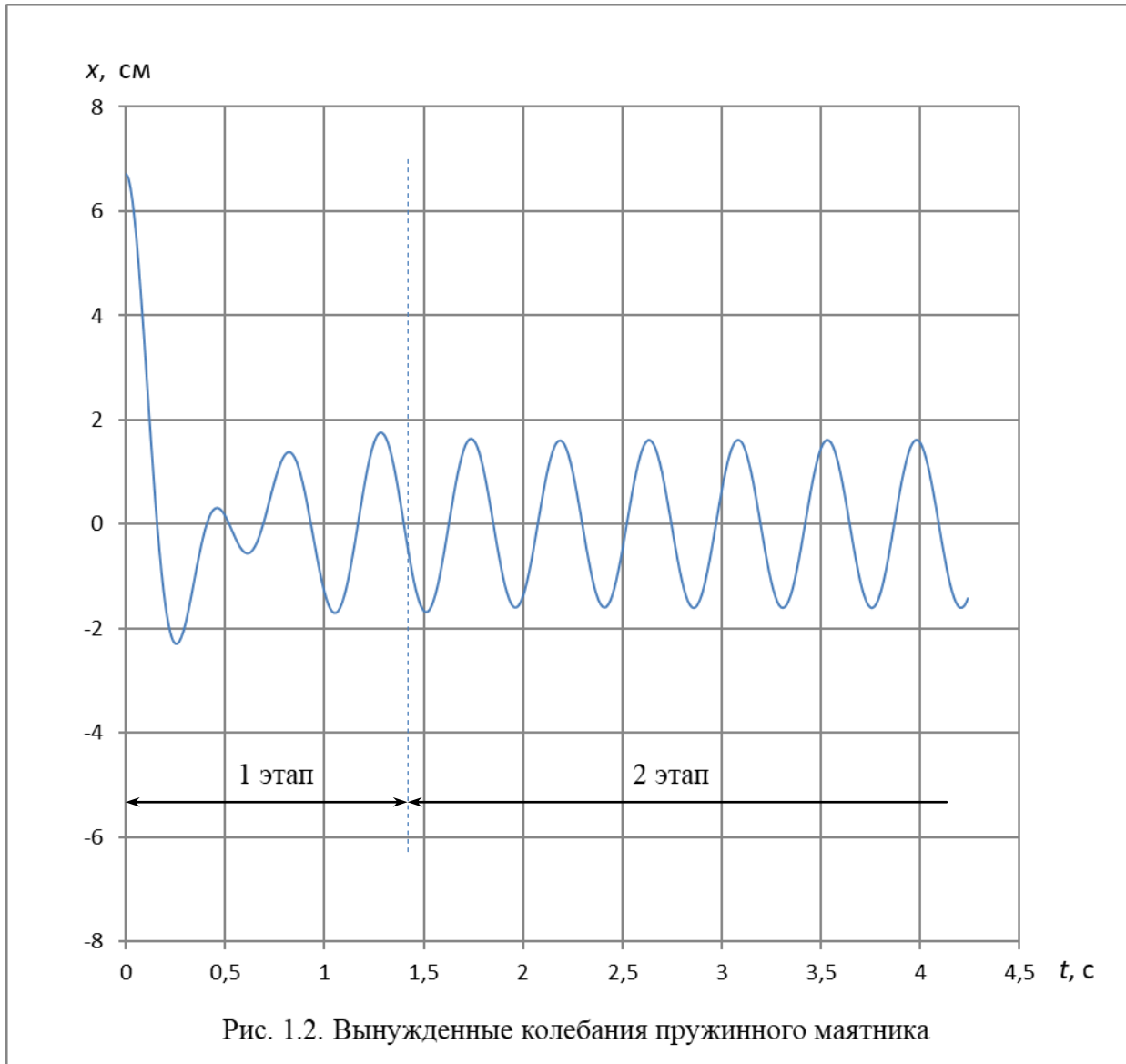
Теперь рассмотрим решение уравнения (1.11). Процедура решения достаточно подробно описана в учебниках по физике, поэтому здесь мы приведём только результат.

$$x(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0) + A \cos(\Omega t + \varphi). \quad (1.13)$$

Из формулы следует, что колебания маятника – это суперпозиция двух колебаний:

- свободные затухающие колебания с частотой ω , которая определяется формулой (1.12),
- гармонические незатухающие колебания, частота которых равна частоте колебаний стержня (внешнего периодического воздействия) Ω .

Это наглядно иллюстрирует график функции $x(t)$, показанный на рисунке 1.2.



Как видно из рисунка, движение маятника можно разбить на два этапа.

Первый этап – переходной. Он начинается со свободных колебаний, которые постепенно затухают, а заканчивается вынужденными гармоническими колебаниями. Продолжительность этого этапа зависит от величины коэффициента затухания β . Если коэффициент затухания достаточно велик, то весь этап может оказаться незаметным для наблюдателя.

Второй этап – установившийся. На этом этапе происходят только гармонические колебания маятника с частотой Ω . К моменту начала второго этапа первое слагаемое в (1.13) становится уже незначительным по сравнению со вторым, так что для этого этапа уравнение движения маятника такое:

$$x(t) = A \cos(\Omega t + \varphi). \quad (1.14)$$

1.2. Амплитудная характеристика

Интересно, что амплитуда установившихся колебаний маятника A зависит от частоты внешнего воздействия Ω . Эта зависимость называется *амплитудной характеристикой* осциллятора и имеет следующий вид:

$$A(\Omega) = \frac{a}{\sqrt{(\Omega^2 - \omega_0^2)^2 + (2\beta\Omega)^2}}. \quad (1.15)$$

Пример графика функции $A(\Omega)$ показан на рисунке 1.3.

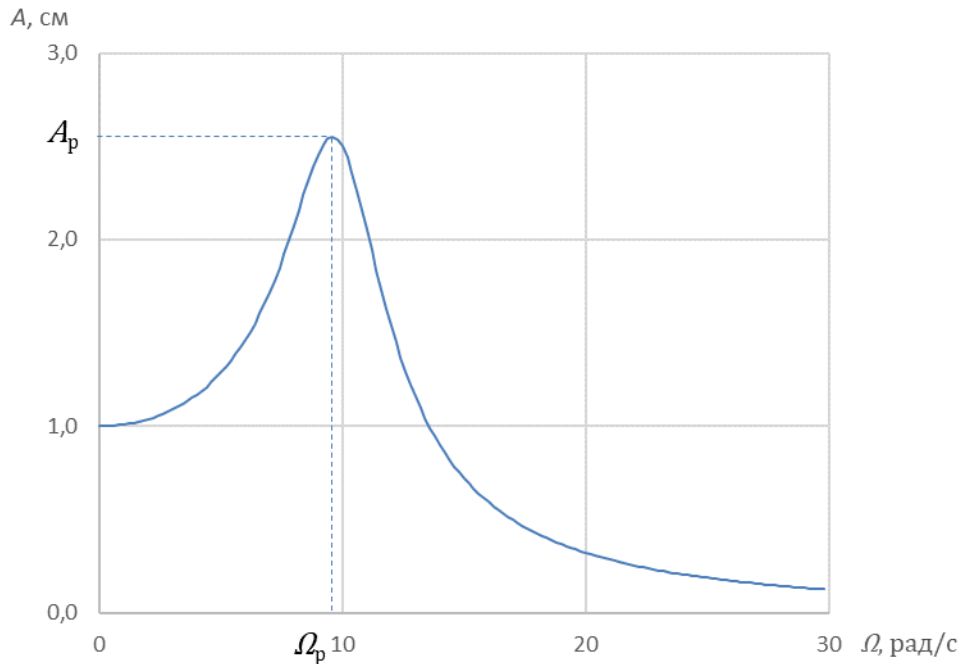


Рис. 1.3. Амплитудная характеристика маятника

Важной особенностью амплитудной характеристики является то, что при некотором значении частоты Ω_p амплитуда максимальна. Это явление называется *резонансом*, а частота Ω_p называется *резонансной частотой*. Анализ формулы (1.15) показывает, что

$$\Omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}. \quad (1.16)$$

График амплитудной характеристики называется *резонансной кривой*. Высота резонансного пика A_p равна

$$A_p = \frac{a}{2\beta\omega}. \quad (1.17)$$

Из этой формулы следует, что значение A_p существенно зависит от коэффициента затухания β – чем меньше β , тем выше пик. При устремлении коэффициента затухания к нулю величина A_p стремится к бесконечности, а резонансная частота Ω_p стремится к собственной частоте маятника ω_0 .

1.3. Линеаризация амплитудной характеристики

Получив экспериментальным путём амплитудную характеристику, интересно проверить, согласуется ли она с теоретической, то есть с формулой (1.15).

Одним из наиболее признанных методов сравнения теоретических и экспериментальных зависимостей является *сравнение их графиков*. Кроме прямого сравнения, очень эффективным является сравнение линеаризованных зависимостей.

Рассмотрим, как можно привести к линейной зависимости теоретическую амплитудную характеристику (1.15).

Разделив (1.17) на (1.15), получим:

$$\frac{A_p}{A} = \frac{\sqrt{(\Omega^2 - \omega_0^2)^2 + (2\beta\Omega)^2}}{2\beta\omega}.$$

Возведём обе части этого равенства в квадрат:

$$\left(\frac{A_p}{A}\right)^2 = \frac{(\Omega^2 - \omega_0^2)^2 + (2\beta\Omega)^2}{(2\beta\omega)^2}. \quad (1.18)$$

Обозначим временно $x = \Omega^2$ и преобразуем числитель в правой части (1.18).

$$(\Omega^2 - \omega_0^2)^2 + (2\beta\Omega)^2 = (x - \omega_0^2)^2 + 4\beta^2 x = x^2 - 2\omega_0^2 x + \omega_0^4 + 4\beta^2 x.$$

Соберём подобные члены и дополним до полного квадрата.

$$x^2 - 2x(\omega_0^2 - 2\beta^2) + \omega_0^4 = (x - \Omega_p^2)^2 + (\omega_0^4 - \Omega_p^4).$$

Рассмотрим вторую скобку.

$$(\omega_0^4 - \Omega_p^4) = (\omega_0^2 - \Omega_p^2)(\omega_0^2 + \Omega_p^2) = 2\beta^2 2(\omega_0^2 - \beta^2) = (2\beta\omega)^2.$$

Таким образом, выражение (1.18) можно преобразовать к виду:

$$\left(\frac{A_p}{A}\right)^2 = \frac{(\Omega^2 - \Omega_p^2)^2 + (2\beta\omega)^2}{(2\beta\omega)^2} = \frac{(\Omega^2 - \Omega_p^2)^2}{(2\beta\omega)^2} + 1. \quad (1.19)$$

Перенесём единицу в левую часть.

$$\left(\frac{A_p}{A}\right)^2 - 1 = \frac{(\Omega^2 - \Omega_p^2)^2}{(2\beta\omega)^2} = \left(\frac{\Omega_p^2}{2\beta\omega}\right)^2 \left[\left(\frac{\Omega}{\Omega_p}\right)^2 - 1\right]^2. \quad (1.20)$$

Введём для линеаризации вспомогательные величины y и z :

$$y = \left[\left(\frac{\Omega}{\Omega_p}\right)^2 - 1\right]^2, \quad z = \left(\frac{A_p}{A}\right)^2 - 1. \quad (1.21)$$

В результате выражение (1.20) превращается в формулу прямо пропорциональной зависимости между вспомогательными величинами z и y :

$$z = \alpha y, \quad \alpha = \left(\frac{\Omega_p^2}{2\beta\omega}\right)^2.$$

Таким образом, для экспериментальной проверки теоретической амплитудной характеристики надо сделать следующее.

- Проведя измерения амплитуд колебаний маятника A при различных частотах вынуждающих колебаний Ω (частотах колебаний стержня), получить экспериментальную амплитудную характеристику.
- Построить график амплитудной характеристики (резонансную кривую) и определить из графика резонансную частоту Ω_p и резонансную амплитуду A_p .
- Определить по формулам (1.21) значения вспомогательных величин z и y , а затем построить график экспериментальной зависимости $z(y)$. Если точки на этом графике лягут на прямую линию, проходящую через начало координат, то это будет подтверждением формулы (1.15), то есть теоретической амплитудной характеристики.

2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка – виртуальная, то есть представляет собой компьютерную программу, имитирующую реальную установку. Программа разработана в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

При вызове программы открывается окно «Вынужденные колебания». В центральной части окна приведены цель работы и краткое описание работы. Внизу окна – три управляющие кнопки:

- **Ход работы.** При нажатии этой кнопки открывается окно, в котором показан порядок выполнения работы.
- **Эксперимент.** При нажатии на эту кнопку открывается окно с экспериментальной установкой.
- **Завершение работы.** Эта кнопка вызывает выход из программы.

Окно «Эксперимент» показано на рисунке 2.1. Оно содержит панели инструментов и два окна визуализации.

- **Панели инструментов.**
 - **Внешняя сила.** Это окошко с бегунком, позволяющее выбрать частоту колебаний стержня (частоту вынужденных колебаний) в диапазоне от 0,6 рад/с до 2,0 рад/с.
 - **Среда.** Эта панель содержит раскрывающийся список для выбора одной из четырёх жидкостей. После выбора среды её название высвечивается в окошке, а под окошком появляется значение коэффициента вязкости жидкости (динамической вязкости) η .
 - **Маятник.** Панель предназначена для выбора одного из шести предлагаемых маятников. После выбора высвечиваются три параметра маятника: коэффициент жёсткости пружины (упругость) k , масса шарика (маятника) m и радиус шарика r . На самом деле панель предназначена для выбора только пружины, так как масса и радиус шарика у всех маятников одни и те же: $m = 0,15$ г, $r = 3,00$ мм.
 - **Кнопки управления экспериментом.** Этих кнопок две – одна под другой. Надпись на каждой кнопке зависит от состояния эксперимента.

А) Перед началом эксперимента на верхней кнопке написано «**Начать эксперимент**», а нижняя кнопка – не активна.

Б) В процессе эксперимента (после нажатия кнопки «**Начать эксперимент**») на верхней кнопке написано «**Остановить эксперимент**», а нижняя кнопка – не активна.

В) После окончания эксперимента на верхней кнопке написано «**Начать эксперимент**», а на нижней кнопке – «**Начальное положение**».

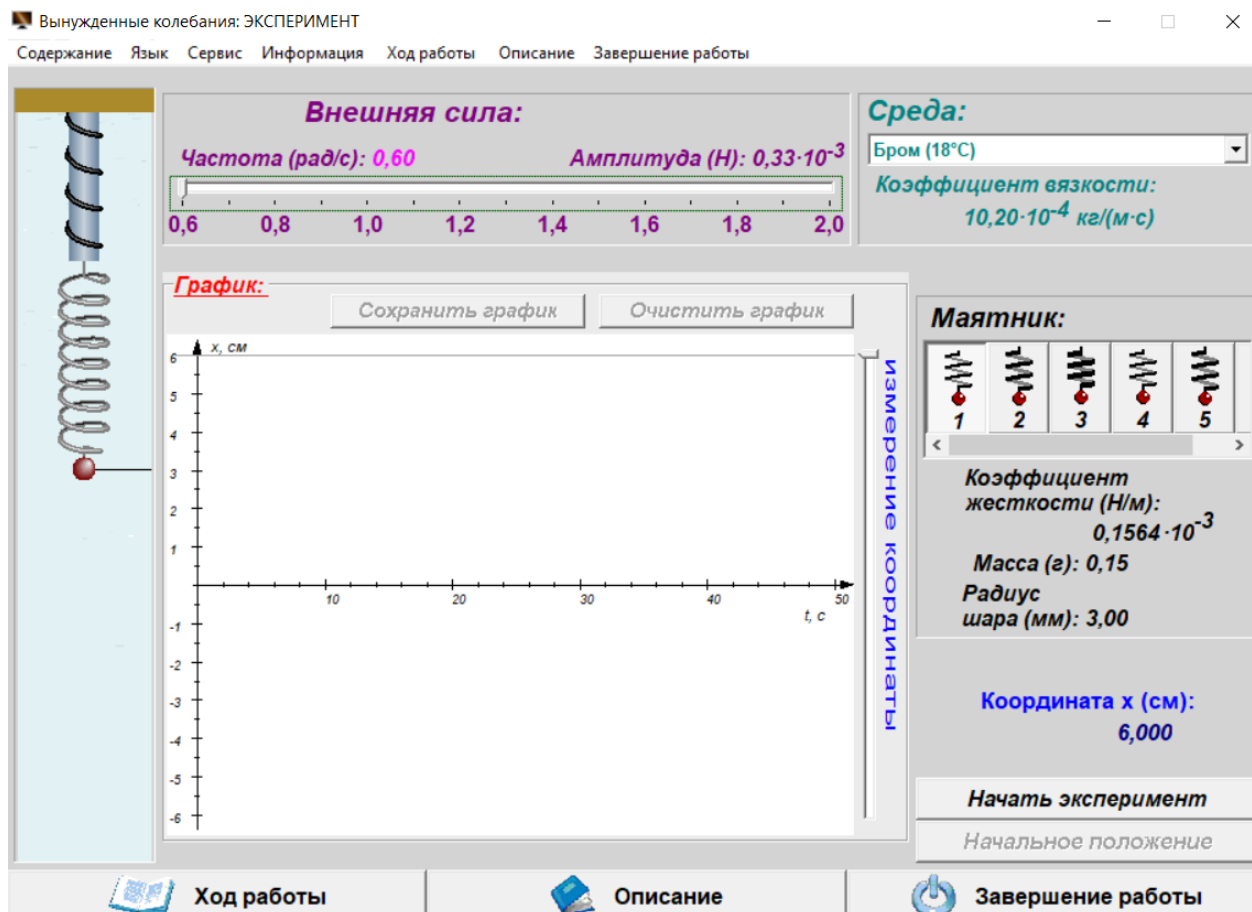


Рис. 2.1. Окно «Эксперимент»

- Окна визуализации. Этих окон два: в одном из них (слева) показывается движение маятника и стержня, во втором окне (справа, под названием «**График**») строится график зависимости $x(t)$ – синхронно с движением маятника и стержня.

Содержание окна «График».

- Поле графика с осями координат. При нажатии кнопки «**Начать эксперимент**» начинают двигаться маятник и стержень и одновременно (синхронно) начинает строиться график зависимости $x(t)$. Процесс *визуализации* заканчивается, когда проходит время $t_k = 50$ с. Обратите внимание: заканчиваются не колебания, а только процесс их визуализации, то есть время, в течение которого вы наблюдаете колебания на экране компьютера.

- Справа от поля графика расположено вертикальное окошко с бегунком «**измерение координаты**», позволяющее измерить координату маятника x для любого момента времени. Перемещение бегунка вызывает движение по полю графика метки (она имеет вид горизонтальной линии), одновременно справа от окошка под надписью «**Координата x (см):**» высвечивается вертикальная координата метки x . В данной работе надо будет измерять амплитуду колебаний маятника A и координату маятника x_k в конечный момент времени t_k .
- Две кнопки «**Сохранить график**» и «**Очистить график**». Если после окончания движения маятника нажать кнопку «**Сохранить график**», то график будет сохранён в виде рисунка в отдельном файле. Из этого файла график можно будет затем перенести в отчёт. Кнопка «**Очистить график**» нужна для подготовки к проведению следующего эксперимента.

3. Задания

Задание 1. Получить амплитудную характеристику пружинного маятника, построить резонансную кривую и измерить резонансную частоту и резонансную амплитуду.

Задание 2. Убедиться методом линеаризации в том, что теоретическая амплитудная характеристика согласуется с экспериментальной.

4. Порядок выполнения работы

Выполнение задания 1.

- 4.1. Выберите среду и маятник (по согласованию с преподавателем). Результаты запишите в таблицу 1.
- 4.2. Рассчитайте и впишите в таблицу 1 теоретические значения следующих параметров маятника.

- Собственная частота ω_0 – по формуле (1.8) $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.
- Коэффициент затухания β – по формуле (1.9) $\beta = \frac{b}{2m}$, где b – коэффициент сопротивления среды, который для тел шарообразной форме определяется формулой Стокса:

$$b = 6\pi r\eta.$$

- Резонансная частота Ω_p – по формуле (1.16) $\Omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$.

Параметры маятника и среды

Среда			
Динамическая вязкость	η	Па·с	
Номер маятника			
Упругость пружины	k	Н/м	
Масса шарика	m	г	0,15
Радиус шарика	r	мм	3,00
Время наблюдения	t_k	с	50,0
Коэффициент сопротивления среды	b	кг/с	
Собственная частота	ω_0	рад/с	
Коэффициент затухания	β	рад/с	
Резонансная частота	Ω_p	рад/с	
Погрешности прямых измерений	$\Delta(\Omega)$	рад/с	
	$\Delta(A)$	см	

4.3. Установите минимальное значение частоты внешней силы – 0,6 рад/с.

4.4. Нажмите кнопку «**Начать эксперимент**».

4.5. Дождитесь окончания визуализации колебаний (через 50 секунд после начала эксперимента).

4.6. Перемещая бегунок по линейке «**измерение координаты**», измерьте амплитуду колебаний маятника два раза: по верхнему уровню синусоиды и по нижнему уровню (в этом случае $x < 0$, но амплитуда равна $|x|$). Средний результат запишите в таблицу 2. Имейте в виду, что для повышения точности измерения амплитуды можно использовать скроллинг мыши.

Таблица 2

Амплитудная характеристика
пружинного маятника

Номер опыта	Ω	A
	рад/с	см
1	0,6	
2	0,8	
3	1,0	
...		
...		
8	2,0	

- 4.7. Приведите установку в начальное состояние, для чего нажмите кнопки «**Начальное положение**» и «**Очистить график**».
- 4.8. Увеличьте частоту внешней силы на 0,2 рад/с и повторите пункты 4.4 – 4.7. Продолжайте эти действия для всех частот (с шагом 0,2 рад/с) вплоть до 2 рад/с.
- 4.9. Постройте график амплитудной характеристики маятника (резонансную кривую) и определите в первом приближении резонансную частоту Ω_p , то есть частоту в точке максимума резонансной кривой.
- 4.10. С целью более точного измерения резонансной частоты исследуйте амплитудную характеристику в области резонанса, то есть в малой окрестности резонансной частоты. Для этого измерьте амплитуду колебаний ещё в 8 точках с минимальным шагом 0,01 рад/с – в четырёх точках слева от Ω_p и в четырёх точках справа от Ω_p . Результаты запишите в таблицу 3, аналогичную таблице 2.
- 4.11. Постройте фрагмент резонансной кривой в области резонанса и определите более точно значения резонансной частоты Ω_p и резонансную амплитуду A_p .
- 4.12. Результаты измерений запишите в стандартной форме:

$$\Omega_p = (... \pm ...) \text{ рад/с}, \quad \varepsilon(\Omega_p) = ... \%;$$

$$A_p = (... \pm ...) \text{ см}, \quad \varepsilon(A_p) = ... \%.$$

- 4.13. Прокомментируйте результаты. В частности, сравните экспериментальное значение резонансной частоты с теоретическим значением, которое записано в таблице 1.

Выполнение задания 2.

- 4.14. Заполните таблицу 4.

Таблица 4
Параметры амплитудной характеристики

Ω_p	рад/с	
A_p	см	
$\Delta(\Omega_p)$	рад/с	
$\Delta(A_p)$	см	

- 4.15. Заполните таблицу 5. Для этого сначала перенесите в неё из таблицы 4.2 значения вынуждающей частоты Ω и амплитуды колебаний A , а затем рассчитайте значения вспомогательных величин y и z .

Линеаризованная амплитудная характеристика маятника

Номер опыта	Ω	A	$(\Omega/\Omega_p)^2 - 1$	y	A_p/A	z	$\Delta(y)$	$\Delta(z)$
	рад/с	см						
1								
2								
...								
...								
8								

4.16. Используя данные таблицы 5, постройте график зависимости $z(y)$.

4.17. Прокомментируйте график.

4.18. Сформулируйте общие выводы по лабораторной работе.

5. Оценка погрешностей измерений

5.1. Погрешности прямых измерений.

- Вынуждающая частота Ω . Эта величина измеряется с помощью линейки и бегунка. Результат измерения высвечивается над линейкой с точностью до сотых долей рад/с. Однако на самом деле вынуждающая частота задётся немного точнее. Рекомендуется принять $\Delta(\Omega) = 0,005$ рад/с.
- Амплитуда колебаний маятника A . Измеряется тоже с помощью линейки и бегунка. Результат измерения высвечивается с точностью до тысячных долей см, однако с учётом случайной погрешности, вызванной неточностью действий экспериментатора при перемещении горизонтальной метки, следует принять $\Delta(A) = 0,02$ см.

5.2. Погрешности измерений вспомогательных величин y и z . Требуются для построения линеаризованной амплитудной характеристики.

Величины y и z определяются формулами (1.21):

$$y = \left[\left(\frac{\Omega}{\Omega_p} \right)^2 - 1 \right]^2, \quad z = \left(\frac{A_p}{A} \right)^2 - 1.$$

Из этих формул следует:

$$\Delta(y) = 4 \left(\frac{\Omega}{\Omega_p} \right)^2 \left[\frac{\Delta(\Omega)}{\Omega} + \frac{\Delta(\Omega_p)}{\Omega_p} \right], \quad \Delta(z) = 2 \left(\frac{A_p}{A} \right)^2 \left[\frac{\Delta(A)}{A} + \frac{\Delta(A_p)}{A_p} \right].$$

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Какие колебания называют вынужденными?
- 6.2. Что является внешним периодическим фактором, который действует на пружинный маятник, изучаемый в данной лабораторной работе?
- 6.3. Какие силы действуют на изучаемый пружинный маятник?
- 6.4. Что такое «коэффициент сопротивления среды» и от чего он зависит?
- 6.5. Что такое «коэффициент затухания»?

- 6.6. Каким уравнением описывается процесс колебаний изучаемого маятника?
- 6.7. Из каких двух этапов состоит процесс колебаний изучаемого маятника?
- 6.8. Что такое амплитудная характеристика вынужденных колебаний маятника?
- 6.9. Что такое резонанс?
- 6.10. Что называется резонансной кривой?
- 6.11. Какой параметр маятника можно измерить с помощью амплитудной характеристики?

7. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 7.1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. – М.: Наука, 1977–1985.
- 7.2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. – М.: Наука, 1989.
- 7.3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2003.
- 7.4. Ревинская О.Г., Кравченко Н.С. Лабораторный практикум по изучению моделей физических процессов на компьютере. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007.
- 7.5. Рипп А.Г. Обработка измерений: метод. пособие. – Севастополь: СНУЯЭП, 2012.

У ч е б н о е и з д а н и е

**Рипп Александр Гешелевич
Матузаева Ольга Вячеславовна**

Амплитудная характеристика

Учебное пособие

В авторской редакции

Изд. № 67/19. Объем 1 п.л.

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»