

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени акад. С. П. Королёва



Лабораторная работа № 9-М

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПУЛИ
МЕТОДОМ КРУТИЛЬНОГО БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

1-9

Утверждено редакционным
советом института в ка-
честве методических ука-
заний к лабораторной ра-
боте № 9-М для студентов



Куйбышев 1988

Лабораторная работа № 9 - М

"Определение скорости полета пули
методом крутильного баллистического маятника"

Методические указания содержат: краткие сведения о законах динамики вращательного движения и их использовании для определения момента инерции крутильного маятника, модуля кручения проволоки и скорости полета пули.

Приводятся схема экспериментальной установки, порядок выполнения работы и обработки полученных результатов; перечень контрольных вопросов, необходимых для самостоятельной подготовки студентов и перечень рекомендуемой литературы.

Лабораторная работа предназначена для студентов дневных и вечерних отделений всех факультетов.

Составитель: В.А.Реметов.

Рецензенты: А.Н.Бекренев, В.Г.Лахов.

Цель работы: ознакомление с законами динамики вращательного движения, определение момента инерции крутильного баллистического маятника, определение модуля кручения проволоки, определение скорости полета пули.

Приборы и принадлежности: Установка ГРМ -09

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Крутильный баллистический маятник представляет собой горизонтальный стержень, закрепленный на вертикальной проволоке. При отклонении маятника от положения равновесия на угол φ в горизонтальной плоскости со стороны проволоки на него действует возвращающий момент силы M_B , который при достаточно малом угле отклонения прямо пропорционален величине этого угла

$$M_B = -k\varphi, \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности k называется модулем кручения проволоки и зависит от материала проволоки и от ее размеров. Знак минус в формуле (1) показывает, что вращающий момент силы M_B препятствует отклонению маятника из положения равновесия, соответствующего значению угла φ . Тогда, если пренебречь действием сил трения, уравнение движения маятника запишется в виде

$$J\ddot{\varphi} = -k\varphi, \quad (2)$$

где $\ddot{\varphi}$ - угловое ускорение маятника, J - его момент инерции относительно оси вращения.

Уравнение (2) представляет собой дифференциальное уравнение, описывающее гармонические колебания с периодом

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k}} \quad (3)$$

Формула (3) может быть использована для определения момента инерции J маятника по известному значению периода T его колебаний, который можно непосредственно измерить.

Однако, помимо периода колебаний T , в формулу (3) входит еще неизвестный модуль кручения проволоки k . Для того, чтобы исключить величину k из расчетной формулы на маятнике имеются два одинаковых добавочных груза, которые могут перемещаться вдоль него. Согласно теореме Гюйгенса-Штейнера момент инерции J маятника вместе с грузами относительно оси вращения равен

$$J = J_M + 2J_{гр} + 2md^2, \quad (4)$$

где J_M - момент инерции маятника без добавочных грузов, $J_{гр}$ - момент инерции добавочного груза относительно оси, проходящей через его центр инерции параллельно оси вращения, m - масса добавочного груза, а d - расстояние от центра инерции груза до оси вращения. Теперь из формул (3) и (4) получим

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k} (J_M + 2J_{гр} + 2md^2). \quad (5)$$

Изменяя положение добавочных грузов на маятнике и, измеряя для каждого значения расстояния d период колебаний маятника T , можно построить график зависимости $T^2 = f(2md^2)$. Этот график в соответствии с формулой (5) должен представлять собой прямую линию (рис.1).

Для определения момента инерции маятника нужно продлить экспериментально построенную прямую до ее пересечения с осью абсцисс в точке А. При этом длина J_{OA} отрезка OA в соответствующих единицах измерения будет равна моменту инерции маятника и добавочных грузов, если бы ось вращения проходила через их центры инерции

$$J_{OA} = J_M + 2J_{гр} \quad (6)$$

Добавочный груз представляет собой цилиндр радиуса R и высоты h . Момент инерции груза $J_{гр}$ относительно оси, проходящей через его центр инерции перпендикулярно к оси симметрии, вычисляется по формуле

$$J_{гр} = m \left(\frac{R^2}{4} + \frac{h^2}{12} \right) \quad (7)$$

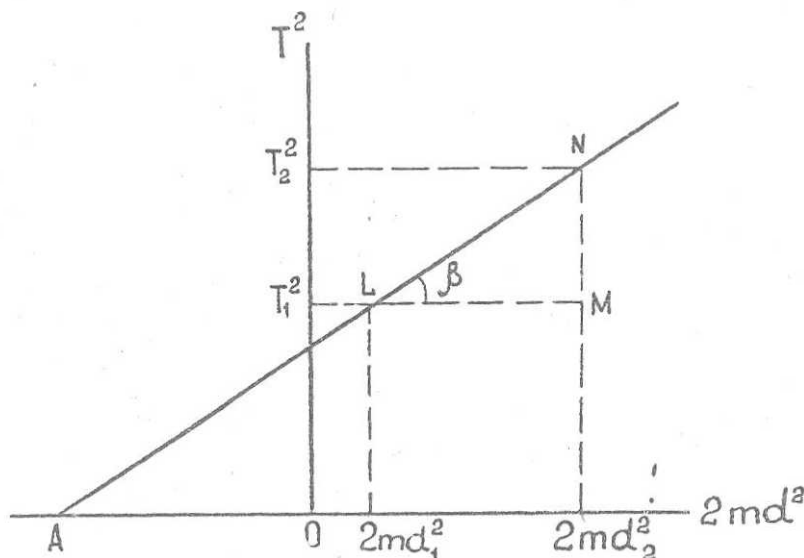


Рис. I

Момент инерции маятника J_M можно теперь определить с помощью формул (6) и (7)

$$J_M = J_{OA} - 2J_{гр} \quad (8)$$

Построенный график зависимости $T^2 = f(2md^2)$ (рис. I) позволяет определить не только момент инерции маятника, но также и модуль кручения проволоки k . Как следует из формулы (5), тангенс угла β наклона прямой $T^2 = f(2md^2)$ в соответствующих единицах измерения должен быть равен величине $4\pi^2/k$.

Из рис. I следует

$$\frac{4N^2}{k} = \frac{NM}{LM} = \frac{T_2^2 - T_1^2}{2md_2^2 - 2md_1^2},$$

откуда

$$k = \frac{8N^2 m (d_2^2 - d_1^2)}{T_2^2 - T_1^2} \quad (9)$$

Здесь точки N и L - две произвольные точки на экспериментальной прямой $T^2 = f(2md^2)$ с ординатами T_2^2 и T_1^2 и с абсциссами $2md_2^2$ и $2md_1^2$ соответственно.

Крутильный баллистический маятник можно использовать для определения скорости полета пули. Пусть пуля массой m_n , летящая со скоростью v , попадает в закрепленную на маятнике мишень и застревает в ней, вызывая отклонение маятника от положения равновесия на угол ψ_0 . Поскольку сумме моментов всех внешних сил, действующих на систему, состоящую из маятника и пули, равна нулю, то эту систему можно считать замкнутой. В такой системе выполняется закон сохранения момента импульса

$$m_n v \ell = J \omega, \quad (10)$$

где ℓ - расстояние от оси вращения маятника до линии полета пули, J - момент инерции маятника (моментом инерции застрявшей в нем пули можно пренебречь), ω - угловая скорость вращения маятника сразу же после удара. Удар можно считать мгновенным, так как время удара много меньше периода колебаний маятника. Угловую скорость ω маятника в момент после удара можно выразить через угол ψ_0 максимального отклонения маятника от положения равновесия из закона сохранения энергии

$$\frac{J \omega^2}{2} = \frac{k \psi_0^2}{2}, \quad (11)$$

где величина $k \psi_0^2 / 2$ представляет собой потенциальную энергию проволоки, закрученной на угол ψ_0 . Исключая из формул

(I0) и (II) неизвестную величину ω , получаем для скорости полета пули следующее выражение

$$v = \frac{\sqrt{2k} \psi_0}{m_n \ell}$$

После подстановки в это выражение момента инерции маятника J , определенного из (3) получим

$$v = \frac{k \psi_0 T_1}{2\pi m_n \ell}, \quad (12)$$

где T_1 - период колебаний маятника после удара.

Все величины, входящие в формулу (12), кроме модуля кручения проволоки k , могут быть непосредственно измерены в опыте. Для определения модуля кручения проволоки k необходимо воспользоваться формулой (9).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Основным элементом установки является крутильный баллистический маятник (рис.2а). Он состоит из горизонтального стержня I и закрепленных на его концах пластин 2. На пластинах 2 имеются выемки 3, наполненные пластилином, в котором застревает пуля после выстрела. Вдоль стержня I могут перемещаться два добавочных груза 4, положение которых фиксируется с помощью винтов 5. Маятник подвешен на стальной проволоке 6, натянутой между кронштейнами установки. На стержне I нанесены поперечные штрихи 7 на расстоянии I см друг от друга, первый на расстоянии 2 см от оси. Шкала 8 на пластине 2 служит для определения расстояния от оси подвеса маятника. На прозрачный экран, закрывающий маятник, нанесены деления, позволяющие определить угол поворота маятника. Измерение угла поворота производится при совпадении делений шкалы с вертикальной чертой, нанесенной на пластине 2.

Стреляющее устройство (рис.2б) крепится на среднем кронштейне установки на одном уровне с маятником. В нем имеются две пары ручек - неподвижные 9 и подвижные 10. Подвижные ручки соединены со стержнем II, на который помещается пуля 12. Пуля представляет

собой пластмассовый или металлический цилиндр. Для того, чтобы зарядить стреляющее устройство, необходимо сдвинуть ручки 10 вперед до упора, поместить пулю на стержень 11, привести ручки в горизонтальное положение и, сжимая пружину, оттянуть их назад до щелчка. Для производства выстрела нужно освободить пружину, повернув ручки 10 в вертикальной плоскости.

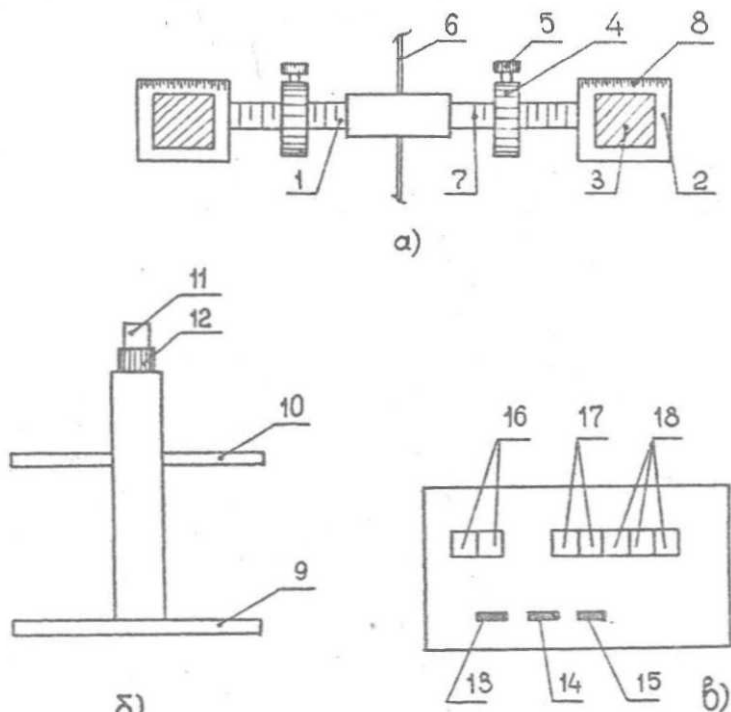


Рис.2

Миллисекундомер (рис.2в), закрепленный на установке, служит для определения числа колебаний и их полного времени. На его лицевой панели размещены три клавиши: 13 - "сеть", 14 - "стоп", 15 - "сброс". Нажатие клавиши "сеть" включает питающее напряжение прибора. Нажатие клавиши "сброс" вызывает включение и обнуление счетчика времени, а нажатие клавиши "стоп" приводит к прекращению

счета. Число и время колебаний высвечивается с помощью индикаторных ламп I6, I7 и I8. Первые две - I6 - показывают число периодов колебаний, а остальные - I7 и I8 - полное время колебаний, причем две лампы I7 показывают целое число секунд, а три лампы I8 - десятые, сотые и тысячные доли секунды.

Для замера числа колебаний маятника на установке имеется фотоэлемент.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Упражнение I. Определение момента инерции крутильного баллистического маятника и модуля кручения проволоки

1. Включить шнур питания установки в сеть.

2. Нажать на клавишу "сеть". При этом должны загореться индикаторные лампы и лампа подсветки фотоэлемента.

3. Закрепить добавочные грузы 4 с помощью винтов 5 (рис.2а) симметрично относительно оси вращения на некотором расстоянии d от нее. Определить d с помощью шкалы 7 и результат занести в таблицу I. Минимальное расстояние от центра инерции груза до оси вращения $d_1 = 2$ см.

4. Отклонить маятник от положения равновесия на угол $5-10^\circ$ и отпустить.

5. Нажать на клавишу "сброс". При этом должно происходить обнуление и включение счетчика времени.

6. После трех-пяти полных колебаний маятника отключить счетчик времени, нажав на клавишу "стоп". Число полных колебаний высветятся индикаторными лампами I6 (рис.2в), а полное время t колебаний - лампами I7 и I8.

Результаты занести в таблицу I.

7. Определить период колебаний T по формуле

$$T = t/n \quad (13)$$

При заданном значении расстояние d от грузов до оси вращения повторить измерение периода колебаний не менее трех раз и определить его среднее значение

$$T_{cp} = \left(\sum_{i=1}^N T_i \right) / N, \quad (14)$$

где N — число измерений.

8. Повторить измерения периода колебаний маятника для не менее, чем пяти других значений расстояния d , включая положения минимального и максимального удаления грузов от оси подвеса маятника. Все результаты записать в таблицу I.

9. Для каждого положения грузов, вычислить соответствующие ему значения величин T_{cp}^2 и $2md^2$, где масса груза $m = 180$ г, и занести их в таблицу I.

10. Построить график зависимости $T^2 = f(2md^2)$, который должен представлять собой прямую. Прямую следует проводить так, чтобы число экспериментальных точек, лежащих выше прямой, было приблизительно равно числу экспериментальных точек, лежащих ниже прямой, было приблизительно равно числу экспериментальных точек, лежащих ниже прямой.

11. Продолжить прямую $T^2 = f(2md^2)$ до ее пересечения с осью абсцисс в точке А (рис. I) и определить момент инерции J_{OA} маятника с грузами относительно оси, проходящей через их центры инерции.

12. Вычислить по формуле (7) момент инерции добавочного груза J_{gp} относительно оси, проходящей через его центр инерции перпендикулярно к его оси симметрии. Высота цилиндра $h = 20$ см, радиус цилиндра $R = 20$ см, его масса $m = 180$ г.

13. Определить момент инерции маятника J_M по формуле (8). Результаты записать в таблицу I.

14. Выбрать на прямой $T^2 = f(2md^2)$ (рис. I) две точки L и N , соответствующие положениям минимального и максимального удаления грузов от оси вращения. Определить абсциссы $2md_1^2$ и $2md_2^2$ и ординаты T_1^2 и T_2^2 этих точек и вычислить модуль сечения проволоки k по формуле (9).

Результаты записать в таблицу I.

Упражнение 2. Определение скорости полета пули.

1. Закрепить добавочные грузы в положении минимального удаления от оси подвеса маятника.

2. Определить начальное положение α_0 неподвижного маятника по шкале на кожухе прибора.

3. Определить массу m_n пули, взвесив ее на весах.

4. Зарядить стреляющее устройство и произвести выстрел.

5. Определить по шкале на кожухе прибора максимальный угол α , на который отклонится маятник сразу после выстрела. Вычислить угол максимального отклонения маятника от положения равновесия по формуле

$$\varphi_0 = \alpha - \alpha_0 \quad (15)$$

6. Определить расстояние l от центра пули, застрявшей в маятнике, до оси вращения по шкале 8 (рис.2а).

7. Вычислить скорость v полета пули по формуле (12). Значение периода колебаний маятника T_1 при минимальном удалении добавочных грузов от оси вращения и значение модуля кручения проволоки k взять из таблицы I первого упражнения.

8. Извлечь пулю из пластилина.

9. Повторить все измерения по пунктам 4-8 не менее трех раз.

10. Определить среднее значение скорости v_{cp} полета пули и полуширину Δv доверительного интервала при значении доверительной вероятности 0,95. Все результаты записать в таблицу 2.

Таблица I

№ опыта	α	n	t	T	T_{cp}	T_{cp}^2	$2md^2$	$J_{об}$	$J_{гр}$	J_M	k
I											
.											
.											
.											

Таблица 2

№ опыта	m_n	α_0	α	φ_0	l	v	v_{cp}	Δv
I								
.								
.								
.								

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение момента инерции твердого тела.
2. Сформулируйте теорему Гюйгенса-Штейнера.
3. Запишите основное уравнение вращательной динамики.
4. От чего зависит период колебаний крутильного баллистического маятника?
5. Когда выполняется закон сохранения момента импульса?
6. Когда выполняется закон сохранения механической энергии? Будет ли механическая энергия системы маятник-пуля одинаковой до и после удара?
7. Почему при определении скорости полета пули добавочные грузы следует располагать на минимальном расстоянии от оси вращения?
8. Опишите методы определения момента инерции маятника и модуля кручения проволоки, используемые в настоящей работе.
9. Выведите формулу (12) для определения скорости полета пули.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сарельев И.В. Курс общей физики.-М.: Наука, т.1, §§ 34-40, 1970.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики.-М.: Наука, т.1, §§ 39-41, 1974.
3. Руководство к лабораторным занятиям по физике (под ред. Л.Л.Гольдина).-М.: Наука, 1973.

Подписано в печать 16.01.89г.. Формат 60x84 1/16.
Бумага белая офсетная. Печать офсетная. Усл.печ.л. 0,75.
Уч-изд.л. 0,75. Тираж 100 экз. Заказ № 56.

Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии КуАИ, Куйбышев, ул.Ульяновская, 18.