

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Кафедра общей физики
Лаборатория механики

Лабораторная работа № 6
Измерение скорости
полета пули

Ярославль
2009

Оглавление

1. Краткая теория	3
2. Описание установки и метода измерений	7
3. Вычисления и обработка результатов измерений	8
4. Контрольные вопросы	9
Дополнение	9
Библиографический список	11

Лабораторная работа № 6

Измерение скорости полета пули

Цель работы: знакомство с кинематическим и динамическим методами измерения скорости пули.

Приборы и принадлежности: электродвигатель с валом для крепления бумажных дисков, два бумажных диска, баллистический маятник, пневматическая винтовка, пуля, весы, устройство для измерения углов, секундомер.

1. Краткая теория

В работе скорость пули одновременно измеряется двумя методами. Рассмотрим сущность каждого из них.

Кинематический метод. Для проведения опытов этим методом используются винтовка, пуля и два бумажных диска, расположенных на расстоянии S и вращающихся на одном валу с электродвигателем. При установившемся движении угловая скорость дисков ω_g постоянна.

Пуля после выстрела движется между дисками прямолинейно. В случае равномерного движения ее скорость можно найти следующим образом:

$$v_{\text{п}} = \frac{S}{t}, \quad (1.1)$$

где t — время движения пули между дисками.

За промежуток времени t второй диск повернется на угол φ относительно первого:

$$\varphi = \omega_g t. \quad (1.2)$$

Выразим угловую скорость дисков через частоту n :

$$\omega_g = 2\pi n,$$

тогда время движения пули между дисками:

$$t = \frac{\varphi}{2\pi n}. \quad (1.3)$$

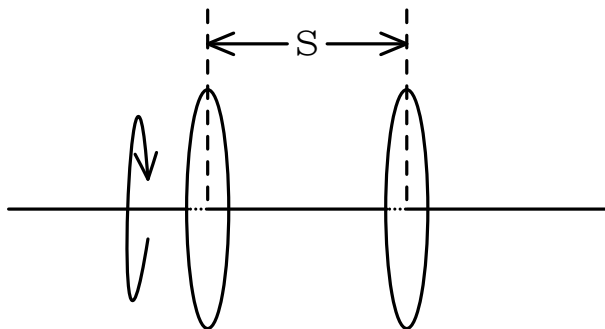


Рис. 1.1

Подставив (1.3) в (1.1), получим расчетную формулу для нахождения скорости пули кинематическим методом:

$$v_{\text{п}} = \frac{2\pi n S}{\varphi}, \quad (1.4)$$

где n выражается в об/с, а φ — в радианах.

Таким образом, для расчета скорости пули кинематическим методом необходимо измерить расстояние между дисками S , угол φ между отверстиями в дисках, образованными пулей, и знать число оборотов вала электродвигателя n .

Динамический метод. Для проведения опытов этим методом используются винтовка, пуля и баллистический маятник — массивное тело на специальном подвесе, заполненное пластичным веществом, в котором пуля остается после выстрела. В результате неупругого взаимодействия пули с маятником он отклоняется на некоторый угол α , величина которого зависит от скорости пули $v_{\text{п}}$.

Для вывода расчетной формулы используются два подхода. Рассмотрим подход на основе закона сохранения импульса изолированной системы, состоящей из пули и маятника, и на законе сохранения механической энергии материальной точки.

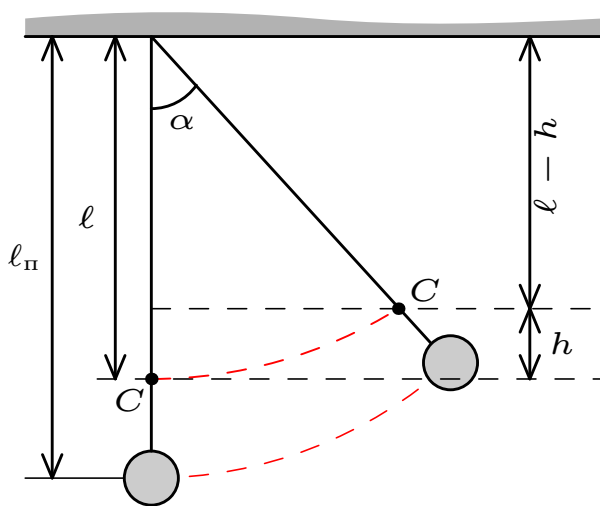


Рис. 1.2

До взаимодействия импульсом обладает только пуля (маятник покоится), непосредственно после удара маятник вместе с попавшей в него пулей приобретает некоторую скорость. В проекциях на ось закон сохранения импульса имеет вид:

$$mv_{\text{п}} = Mv, \quad (1.5)$$

1. Краткая теория

где m — масса пули,
 M — масса маятника вместе с пулей,
 $v_{\text{п}}$ — скорость пули,
 v — скорость центра масс (центра тяжести) маятника с пулей.

За короткое время соударения изменение импульса системы под действием внешних сил незначительно и им можно пренебречь.

Скорость пули в этом выражении можно определить через массы m , M и скорость v :

$$v_{\text{п}} = \frac{Mv}{m}. \quad (1.6)$$

Неизвестную v выразим из закона сохранения механической энергии маятника:

$$\frac{Mv^2}{2} = Mgh, \quad (1.7)$$

где h — высота подъема центра масс; в свою очередь h можно выразить через угол α отклонения маятника и длину ℓ от точки подвеса до центра тяжести маятника (рис. 1.2):

$$\cos \alpha = \frac{\ell - h}{\ell} \implies$$

$$h = \ell(1 - \cos \alpha) = 2\ell \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (1.8)$$

так как $(1 - \cos \alpha) = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}$.

Для v получим:

$$v = \sqrt{2gh} = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{g\ell}. \quad (1.9)$$

Подставив (1.9) в (1.6), найдем выражение для искомой скорости пули в рассматриваемом случае:

$$v_{\text{п}} = \frac{2M}{m} \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{g\ell}. \quad (1.10)$$

Таким образом, для определения скорости пули при таком подходе нужно измерить массу пули m , массу маятника с пулей M , расстояние ℓ и угол отклонения маятника от положения равновесия α .

Второй подход основан на законах динамики вращательного движения системы материальных точек. Для вывода расчетной формулы используется закон сохранения момента импульса системы,

состоящей из пули и маятника, и закон сохранения механической энергии маятника.

Скорость пули можно выразить из закона сохранения момента импульса в скалярной форме:

$$mv_{\text{п}}\ell_{\text{п}} = I\omega, \quad (1.11)$$

где m — масса пули,
 $v_{\text{п}}$ — скорость пули,
 $\ell_{\text{п}}$ — расстояние от оси вращения до точки попадания пули в маятник,
 I — момент инерции маятника с пулей,
 ω — угловая скорость вращения маятника с пулей.

Исходное соотношение для скорости пули имеет вид:

$$v_{\text{п}} = \frac{I\omega}{m\ell_{\text{п}}}. \quad (1.12)$$

Здесь неизвестными величинами являются I и ω . Момент инерции I выразим из формулы периода собственных колебаний физического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{Mg\ell}},$$

где ℓ — расстояние от точки подвеса (оси) до центра тяжести маятника.

Момент инерции выражается так:

$$I = \frac{T^2 Mg\ell}{4\pi^2}. \quad (1.13)$$

Угловую скорость маятника ω выразим из закона сохранения механической энергии с учетом (1.13) и (1.8):

$$W_{\text{к}} = W_{\text{п}}; \quad \frac{I\omega^2}{2} = 2Mg\ell \sin^2 \frac{\alpha}{2},$$

откуда

$$\omega = \frac{4\pi \sin \frac{\alpha}{2}}{T}. \quad (1.14)$$

Подставляя (1.13) и (1.14) в исходное соотношение (1.12), получим:

$$v_{\text{п}} = \frac{Mg\ell T \sin \frac{\alpha}{2}}{m\pi\ell_{\text{п}}}. \quad (1.15)$$

2. Описание установки и метода измерений

Период колебаний маятника можно найти экспериментально:

$$T = \frac{t}{N},$$

где t — время некоторого числа полных колебаний N . В результате получим расчетную формулу для скорости пули при данном подходе:

$$v_{\text{п}} = \frac{Mgl t \sin \frac{\alpha}{2}}{Nm\pi l_{\text{п}}}. \quad (1.16)$$

Здесь кроме величин, измеряемых в 1-м подходе, необходимо измерить t , N и $l_{\text{п}}$.

Примечание. При подстановке в (1.15) периода собственных колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

с учетом того, что в этом случае $l_{\text{п}} = \ell$, получим выражение для расчета скорости пули в 1-м подходе (1.10) — приближении, соответствующем законам динамики материальной точки.

2. Описание установки и метода измерений

Экспериментальная установка смонтирована так, что необходимые для вычислений кинематическим и динамическим методом данные получаются одновременно, в результате одного выстрела: пуля пробивает вращающиеся диски и попадает в баллистический маятник, вызывая его отклонение.

При выполнении работы следует:

ознакомится с установкой, взвесить пулю, проверить нулевое положение указателя угла отклонения, ознакомиться с ценой деления бумажных дисков, отметить на них все пробитые ранее отверстия; зарядить винтовку, установить ее на подставку, проверить наводку на маятник и сделать выстрел в неподвижные диски, получившиеся контрольные отверстия отметить красным или другим отличительным цветом, сгладить пластичную поверхность маятника;

зарядить винтовку пулей известной массы m и установить на подставку, включить электродвигатель и через некоторое время после установления постоянного числа оборотов ($n = 2950$ об/мин) произвести выстрел;

определить максимальный угол отклонения α баллистического маятника в градусах с помощью указателя на шкале, записать в таблицу;

снять бумажные диски, находящиеся на расстоянии S и, совместив контрольные отверстия, найти угол между пробоинами в данном опыте, выразить полученный угол φ в радианах (180° соответствуют π радиан) и занести его значение в таблицу;

снять маятник с подвеса, определить его массу вместе с пулей M , измерить длины $l_{\text{п}}$ и l (положение центра тяжести найти экспериментально), занести в таблицу;

подвесить маятник, отклонить его на небольшой угол и измерить секундомером время t некоторого числа N полных колебаний, занести в таблицу.

3. Вычисления и обработка результатов измерений

В данной работе проводится однократное измерение всех величин. Формулы ошибок в этом случае находятся математическими методами логарифмирования и дифференцирования расчетных выражений. Абсолютные погрешности прямых измерений считаются равными половине цены деления приборов, а числа π — половине разряда последней цифры, взятой при округлении.

Все опытные данные следует выразить в СИ, при вычислениях пользоваться правилами округления.

Рекомендуется все результаты измерений и вычислений **кинематическим методом** представить в таблице 1:

Таблица 1

S , м	n , об/с	φ , рад	$v_{\text{п}}$, м/с

Скорость пули рассчитать из выражения (1.4).

4. Контрольные вопросы

Результаты измерений и вычислений **динамическим методом** представить в таблице 2:

Таблица 2

m , кг	M , кг	ℓ , м	$\ell_{\text{п}}$, м	α , град	t , с	N	$v_{\text{п1}}$, м/с	$v_{\text{п2}}$, м/с

Скорость пули $v_{\text{п1}}$ рассчитать из выражения (1.10), $v_{\text{п2}}$ — из выражения (1.16).

4. Контрольные вопросы

1. Сущность кинематического и динамического методов определения скорости пули. Вывод расчетных формул (1.4), (1.10), (1.16).
2. Схема установки и методика проведения опытов.
3. Можно ли для определения скорости пули в данной работе пользоваться законом сохранения механической энергии системы, состоящей из пули и маятника?
4. Какой из методов более точен? Чем в основном вызваны ошибки измерения в каждом из них?
5. Сколько времени летит пуля между дисками по результатам ваших измерений? Возможно ли измерение этого промежутка времени с достаточной точностью с помощью обычного секундомера?

Дополнение. Термин “баллиста” образован от лат. *ballista*, основу которого составляет греческое слово *ballo* = “бросаю”. Баллистой называлась в древности военная осадная машина для метания камней, бревен, бочек с зажженной смолой и др.

От латинского слова было образовано и немецкое — *Ballistik*. Баллистика — научная дисциплина, изучающая законы движения тел, брошенных горизонтально и под углом к горизонту: пуль, снарядов, мин и т.д.

К описанию движения баллистического маятника в учебнике [1] применен закон сохранения импульса при неупругом ударе. На практике такой маятник для определения скорости снарядов представлял собой тя-

желый ящик с песком, подвешенный с помощью специального приспособления. Снаряд после попадания оставался в нем и маятник отклонялся на угол α .

Для вывода расчетной формулы использован динамический подход I, приведенный в данном описании. Скорость снарядов на практике рассчитывалась из выражения:

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{2g\ell(1 - \cos \alpha)},$$

идентичного формуле (1.10):

$$v_{\text{п}} = \frac{2M}{m} \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{g\ell}.$$

Составила Т.Н. Спиридонова
Октябрь 2009 г.

Библиографический список

1. Курс физики под редакцией академика Н.Д. Папалекси. Т. I. М., 1948, С. 97,124.
2. Руководство к лабораторным занятиям по общей физике. Ч. I. Сост. В.Н. Колескин, Т.Н. Спиридонова. Ярославль, 1995, С. 18-22.
3. Физика. Ч. I. Сост. В.Н. Колескин. Ярославль, 2007, С. 21-26.