

ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра общей физики

Лабораторная работа 1.2.1

Определение скорости полета пули при помощи баллистического маятника

Преподаватель: к.ф.-м.н., доц. Яворский В.А.

Обучающийся: Готов А.А.

Долгопрудный
2021

Введение

Цели работы

- Экспериментальная проверка законов сохранения
- Определение скорости полета пули

Приборы и материалы

1. Духовое ружьё на штативе
2. Осветитель
3. Оптическая система для измерения отклонений маятника
4. Измерительная линейка
5. Пули
6. Весы
7. Баллистические маятники

Теоретические сведения

Метод I. Метод баллистического маятника, совершающего поступательно движение

Скорость вылета пули из духового ружья $150 - 200 \frac{m}{c}$, и значительно выше при использовании, например, винтовки. Эти значения на порядок больше скоростей, наблюдаемых в повседневной жизни. Для измерения времени прохождения телом с такой скоростью расстояния в несколько метров необходима высокочувствительная аппаратура, способная фиксировать величина порядка $10^{-2} - 10^{-3} c$. Поэтому скорость движения небольших тел можно определять с помощью их импульса, используя баллистические маятники

Баллистический маятник - маятник, колебания которого вызываются кратковременным начальным импульсом (время соударения значительно меньше периода колебаний)

$$\frac{\Delta\phi}{\phi_m} \approx \frac{2\pi\tau}{T} \quad (1)$$

$\Delta\phi$ - отклонения маятника за время соударения, ϕ_m - максимальное отклонение, τ - время соударения, T - период колебаний маятника

Связь между максимальным отклонением маятника и начальной скоростью, полученной им в результате соударения, описывается законов сохранения механической энергии (если колебания малые и незатухающие). По начальному максимальному отклонению (амплитуда угла отклонения маятника при малых незатухающих колебаниях) определяются импульс и скорость пули

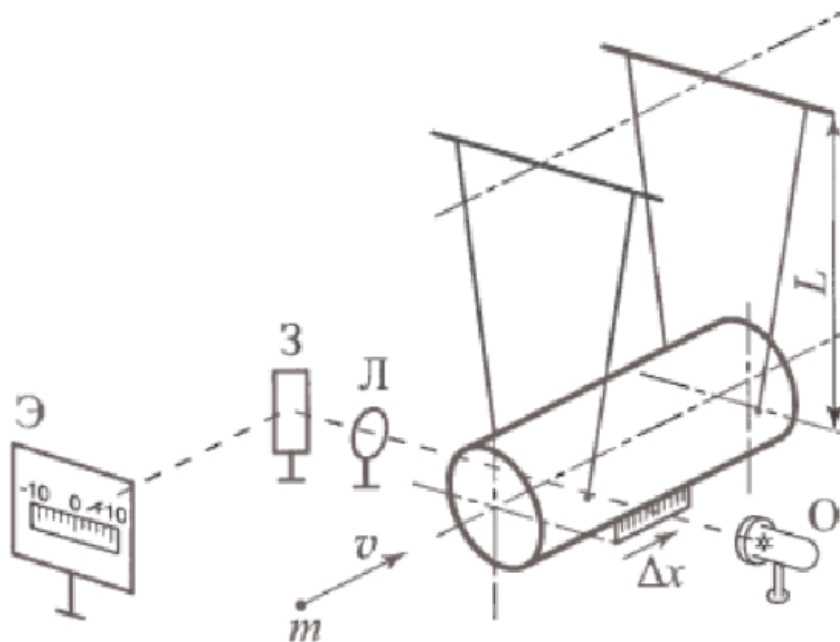


Рис. 1: Схема установки для измерения скорости полета пули

Используемая установка представляет собой тяжелый цилиндр, подвешенный на четырех нитях одинаковой длины (см рис.1 и рис.2)

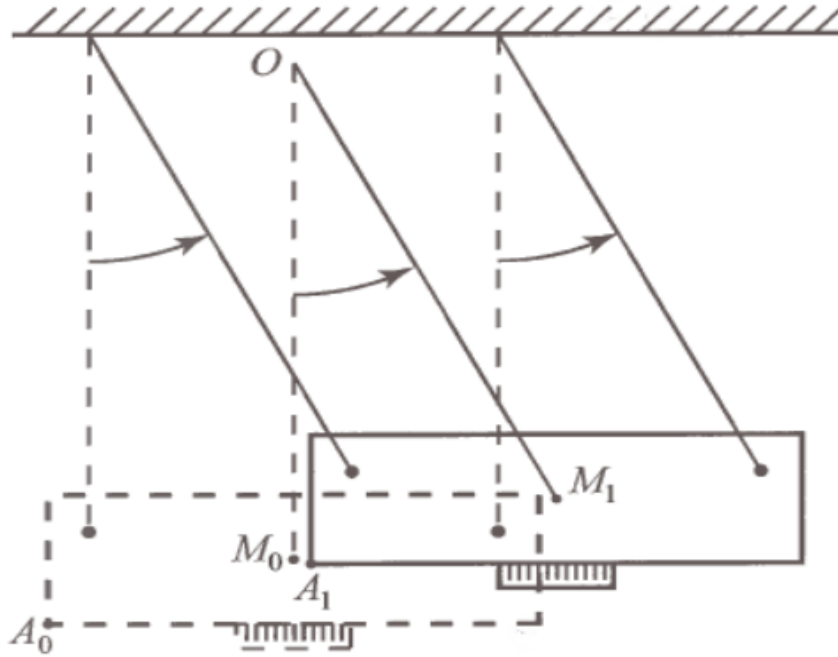


Рис. 2: Схема установки для измерения скорости полета пули (вид сбоку)

При малых отклонениях и времени соударения импульс от вертикальной составляющей сил натяжения нитей можно считать малым. Сила тяжести также мала, а также горизонтальна. Тогда ЗСИ в рассматриваемом соударении будет выглядеть следующим образом

$$mv = (M + m)u \quad (2)$$

M - масса цилиндра, u - скорость цилиндра и пули после абсолютно неупругого соударения. Так как $M \ll m$, будет справедливо

$$v = \frac{M}{m}u \quad (3)$$

Получив начальную кинетическую энергию, маятник начнет движение. Тогда из закона сохранения механической энергии:

$$u^2 = 2gh \quad (4)$$

Высота подъема выражается через угол отклонения маятника, причем с учетом малости отклонений:

$$h = L(1 - \cos \phi) = 2L \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad \phi \approx \frac{\Delta x}{L} \quad (5)$$

Подставляя (3), (4) и (5) друг в друга, получим формулу для определения скорости пули:

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{\frac{2g}{L}} \Delta x \quad (6)$$

Метод II. Метод крутильного баллистического маятника

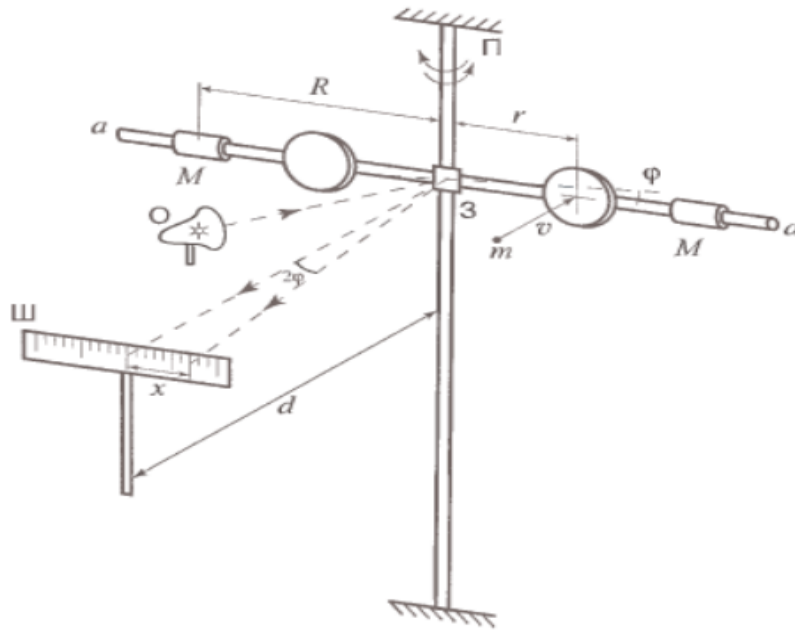


Рис. 3: Схема установки для измерения скорости полета пули с крутильным баллистическим маятником

Считая удар пули у мишень неупругим, для определения скорости пули воспользуемся законом сохранения момента импульса:

$$mur = I\Omega \quad (7)$$

Использование ЗСМИ возможно, если время соударения пули с мишенью значительно меньше периода малых колебаний маятника, а поворот маятника за время соударения мал по сравнению с амплитудой колебаний маятника. Тогда малы момент кручения, возникающий в проволоке и момент импульса, возникающий в проволоке в момент удара. Пренебрегая потерями энергии и принимая во внимание все допущения, запишем закон сохранения энергии при колебаниях

$$k\frac{\phi^2}{2} = I\frac{\Omega^2}{2} \quad (8)$$

k - модуль кручения проволоки, ϕ - амплитуда колебаний маятника

Из (7) и (8), а также учитывая малость колебаний получаем:

$$v = \phi \frac{\sqrt{kI}}{mr} \quad \phi \approx \frac{x}{2d} \quad (9)$$

Неизвестную величину \sqrt{kI} определим с помощью измерений периодов колебания маятника с грузами M и без них. В первом случае:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}} \quad (10)$$

Во втором случае:

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I-2MR^2}{k}} \quad (11)$$

Подставляя (10) в (11), получаем:

$$\sqrt{kI} = \frac{4\pi MR^2 T_1}{T_1^2 - T_2^2} \quad (12)$$

Ход работы

Часть 1

1) Измерение масс грузов

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8
m, г	0.499	0.506	0.502	0.508	0.510	0.501	0.513	0.498

$$\Delta m = 0.003\text{г}$$

2) Измерим характеристики экспериментальной установки

$$L = 225.0\text{см} \quad \Delta L = 1.0\text{см}$$

$$M = 2925\text{г} \quad \Delta M = 5\text{г}$$

3) Остановим изначальные движения маятника. Определим начальное показание системы.

x_0 - начальное показание системы

4) Проведя "холостой" выстрел, убедимся, что воздушная струя действительно не влияет на движение маятника в пределах измеряемого отклонения.

5) Убедимся, что колебания можно считать незатухающими.

Действительно, за 10 колебаний максимальное отклонение изменяется меньше чем в два раза. Значит, в дальнейшем будем считать, что колебания действительно незатухающие

6) Проведем измерения и внесем их в таблицу

№ эксперимента	1	2	3	4
x, мм	12,75	12,75	12,5	12,25

$$x = 0.25\text{мм}$$

7) По формуле (6) пересчитаем скорость пули для каждого из выстрелов

x, мм	12.75	12.75	12.5	12.25
m, г	0,499	0,506	0,502	0,508
u, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	156,0	153,8	152,0	147,2

8) Определим погрешности измерений для каждой из скоростей

$$\sigma_u^{\text{приб}} = u \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + 0.25\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2}$$

$$\sigma_u^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^4 (u_i - \langle u \rangle)^2} t_s = 3.4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

где t_s - коэффициент Стьюдента; $t_s(0.7, 4) = 1.3$

$$\sigma_u = \sqrt{(\sigma_u^{\text{случ}})^2 + (\sigma_u^{\text{приб}})^2}$$

x , мм	12.75	12.75	12.5	12.25
m , г	0,499	0,506	0,502	0,508
u , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	156,0	153,8	152,0	147,2
$\sigma_u^{\text{приб}}$, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	3.2	3.2	3.2	3.1
σ_u , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	4.7	4.7	4.7	4.6
ϵ_u , %	3.0	3.1	3.1	3.1

9) Определим среднюю скорость, разброс значений и сделаем выводы

$$u_{\text{ср}} = 152.3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\epsilon_u = 3.0\%$$

Невозможно однозначно утверждать о происхождении разброса значений, составившем погрешность 3% от измеряемой величины. Однако т.к. ружье может быть закреплено и использовано только в одном положении, а маятник возвращается только к изначальному положению, когда пули входят точно в середину вертикальной части, то ошибка, связанная с ошибкой в опыте, маловероятна. Более вероятными ошибками являются случайная, связанная с действиями экспериментатора (например, зарядка ружья), неидеальностью оборудования (неодинаковость пуль) или случайными событиями (порыв ветра).

Часть 2

1) Измерим характеристики экспериментальной установки

$$r = 21.0 \text{ см} \quad \Delta r = 0.1 \text{ см}$$

$$d = 55.0 \text{ см} \quad \Delta d = 0.5 \text{ см}$$

$$R = 33.8 \text{ см} \quad \Delta R = 0.1 \text{ см}$$

2) Остановим изначальные движения маятника. Определим начальное показание системы

3) Проведя "холостой" выстрел, убедимся, что воздушная струя действительно не влияет на движение маятника в пределах измеряемого отклонения.

4) Убедимся, что колебания можно считать незатухающими.

Действительно, за 10 колебаний максимальное отклонение изменяется меньше чем в два раза. Значит, в дальнейшем будем считать, что колебания действительно незатухающие

5) Определим периоды колебаний (по N=10 колебаниям) маятника с дополнительными грузами и без них

$$T_1 = 12.2 \text{ с}$$

$$T_2 = 9.1 \text{ с} \quad \Delta T = 0.03 \text{ с}$$

6) Подставив (12) в (9) получим итоговую формулу для скорости пули

$$u = \frac{2\pi MR^2 T_1 x}{dmr(T_1^2 - T_2^2)}$$

Посчитаем скорости пуль в каждом из четырех выстрелов

№ эксперимента	1	2	3	4
x, мм	88	88	75	78
u, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	144.9	147.5	122.8	131.5

$$\Delta x = 0.2 \text{ см}$$

7) Оценим погрешность для каждой из измеренных скоростей

$$\sigma_u^{\text{приб}} = u \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T(T_1^2 + T_2^2)}{T_1(T_1^2 - T_2^2)}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta T T_2}{T_1^2 - T_2^2}\right)^2}$$

$$\sigma_u^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^4 (u_i - \langle u \rangle)^2} t_s = 10.7 \text{ м}$$

№ эксперимента	1	2	3	4
x, мм	88	88	75	78
u, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	144.9	147.5	122.8	131.5
$\sigma_u^{\text{приб}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	2.5	2.6	2.1	2.3
$\sigma_u, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	11.0	11.0	10.9	10.9
$\varepsilon_u, \%$	7.6	7.5	8.9	8.3

8) Определим среднюю скорость полета пули, посчитаем разброс относительно среднего значения и сделаем выводы.

$$u = 136.7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\varepsilon_u = 8.1\%$$

Как и в первой части, невозможно однозначно утверждать о происхождении разброса, а также о различии значений скорости полета пули в экспериментах. Однако можно предположить, что разница в скоростях вызвана особенностями каждого из ружей. Разброс значений в одном эксперименте можно объяснить теми же причинами, что и в части один: различная форма пули, зарядание ружья, случайными событиями. Необходимо отметить также, что маятник, используемый в этой части более чувствителен к случайным внешним событиям, что могло повлиять на точность экспериментов.

Необходимо также отметить значительно более худшую точность данного метода - средняя относительная погрешность составила 8,1%, что более чем в 2 раза выше, чем в первой части