

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Отчёт о выполнении лабораторной работы

1.2.1

Определение скорости полёта пули при помощи баллистического маятника

Сметанина Елена Владимировна Б03-109

Октябрь 2021

1 Аннотация

В данной работе измерена скорость пуль, вылетающих из духового ружья, при помощи двух баллистических маятников разных типов. В ходе измерений и вычислений исследованы

погрешности прямых и косвенных измерений, а также изучены отклонения значений скорости от средних с целью определить факторы, влияющие на скорость пули.

2 Теоретические сведения и (3.Методика измерений)

2.1 Метод баллистического маятника, совершающего поступательное движение

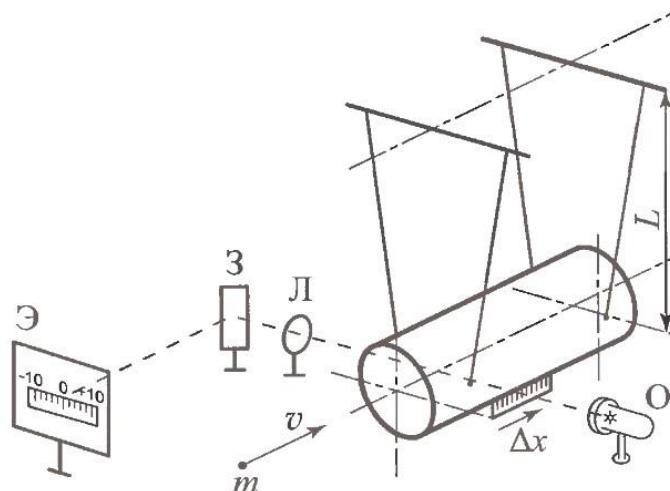


Рис. 1: Схема установки для измерения скорости полёта пули

В первом опыте использовалась установка, изображенная на рисунке 1. Пусть масса маятника равна M , пули - m , причём $m \ll M$. Тогда из закона сохранения импульса и скорости системы V сразу после столкновения можно найти скорость пули u

$$mu = (M + m)V, u = \frac{M + m}{m}V \approx \frac{M}{m}V \quad (1)$$

При попадании пули маятник приобретает некоторую кинетическую энергию, которая при отклонении переходит в потенциальную. Пренебрегая потерями энергии, запишем закон сохранения механической энергии для маятника, где h - максимальная высота подъёма маятника, L - длина нитей подвеса:

$$\frac{MV^2}{2} = Mgh, V^2 = 2gh \quad (2)$$

Высота подъёма маятника определяется через угол ϕ его отклонения от вертикали и величину Δx сдвига по горизонтальной оси как

$$h = L(1 - \cos \varphi) = 2L \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \text{ где } \varphi \approx \frac{\Delta x}{L}$$

Из (2) и (1) скорость выражается, как

$$v = \sqrt{\frac{g}{L} \frac{M}{m}} \Delta x.$$

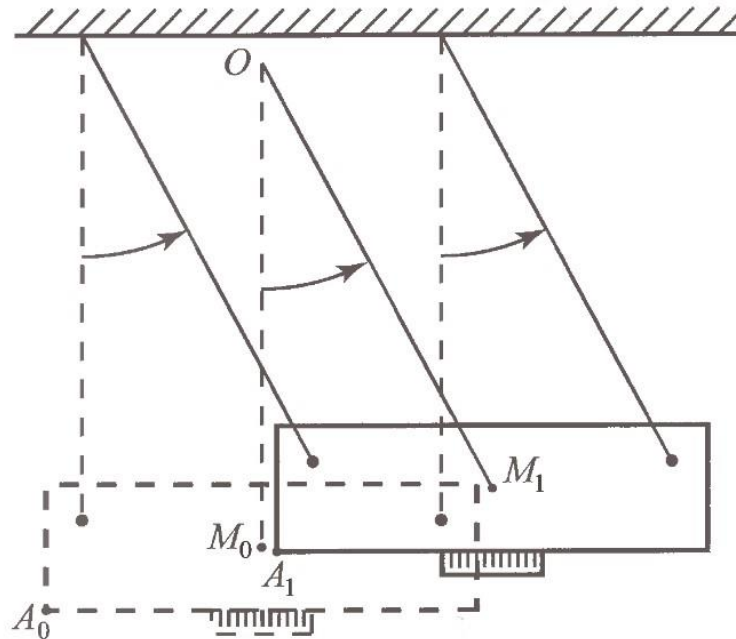


Рис. 2: Поступательное движение баллистического маятника при попадании в него пули

2.2 Метод крутильного баллистического маятника

Во втором опыте использовалась установка, изображенная на рисунке 3. Пуля массой m попадает в мишень, закреплённую на стержне, которая вместе с дополнительным грузом массой M и проволокой P образует крутильный маятник. Считая удар пули абсолютно неупругим, для определения скорости u пули можно воспользоваться законом сохранения момента импульса

$$mur = I\Omega \quad (3)$$

где I – момент инерции системы маятника, Ω – его угловая скорость сразу после удара. Если k – модуль кручения проволоки, то из закона сохранения энергии следует, что

$$k \frac{\varphi^2}{2} = I \frac{\Omega^2}{2}, \quad (4)$$

где φ – максимальный угол поворота маятника. Из уравнений (3) и (4) можно выразить скорость u

$$u = \varphi \frac{\sqrt{kI}}{mr}. \quad (5)$$

Угол φ в данном опыте вычислялся из величины x смещения изображения нити осветителя на измерительной шкале и расстояния d от шкалы до оси вращения маятника

$$\varphi \approx \frac{x}{2d}$$

— $\sqrt{\quad}$

Величину kI из формулы (5) можно определить из периодов колебаний маятника с грузами M и без них. В первом случае период колебаний маятника равен

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k}}, \quad (6)$$

во втором случае

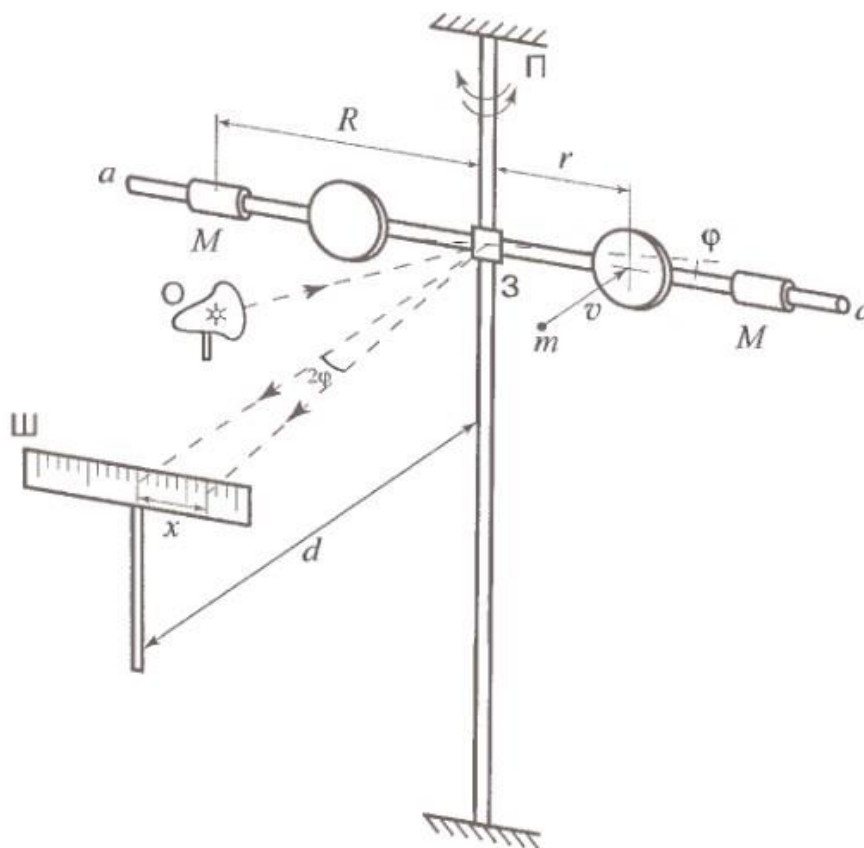


Рис. 3: Схема установки для измерения скорости полёта пули с крутильным баллистическим маятником

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I - 2MR^2}{k}} \quad (7)$$

где R - расстояние от центров масс грузов до проволоки.

Из (6) и (7) следует

$$\sqrt{kI} = \frac{4\pi MR^2 T_1}{T_1^2 - T_2^2},$$

3 Оборудование и инструментальные погрешности

Оборудование: духовое ружьё на штативе, осветитель, оптическая система для измерения отклонений маятника, баллистические маятники, пули.

Измерительные приборы:

- Весы: $\Delta_{\text{вес}} = 0,005$ г;
- Линейка: $\Delta_{\text{лин}} = 0,5$ мм;
- Измерительная шкала установки 1: $\Delta_{\text{шк1}} = 0,5$ мм;
- Измерительная шкала установки 2: $\Delta_{\text{шк2}} = 1$ мм;

- Секундомер: $\Delta_{\text{сек}} = 0.1 \text{ с.}$

4 Результаты измерений и обработка экспериментальных данных

4.1 Измерение масс и длин

Массы пуль представлены в таблице 4.1:

№ пули	1	2	3	4	5	6	7	8
$m, \text{ г}$	0.502	0.514	0.512	0.511	0.506	0.506	0.504	0.503

Таблица 1: Массы пуль

Измерены величины $L = (2217 \pm 1) \text{ мм}$, $M = (2925 \pm 5) \text{ г}$ для первого опыта и величины $R = 345 \pm 1 \text{ мм}$, $r = 221 \pm 1 \text{ мм}$, $d = 550 \pm 1 \text{ мм}$, $M = 729,5 \pm 5 \text{ г}$.

Предварительное изучение установок показало, что затухание колебаний

4.2 Результаты опыта с установкой 1

Величины смещения Δx , соответствующие скорости пуль и их отклонения от среднего значения представлены в таблице :

$\Delta x, \text{ мм}$	$V, \text{ м/с}$	$\sigma \text{ м/с}$	$u-v, \text{ м/с}$
10,0	123,8	1,58	10,2
8,75	105,8	1,53	7,8
8,75	106,2	1,53	7,4
9,75	118,6	1,54	5

Таблица 2: Результаты измерения скорости пуль в первом опыте Среднее

значение $u = 113,6 \text{ м/с}$. Систематическая погрешность определения скорости

$$\sigma_{u1} = u \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{вес}}}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{вес}}}{m}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta_{\text{лин}}}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{шк1}}}{\Delta x}\right)^2} \approx 5,0 \text{ м/с}$$

результат:

- $\bar{u}_1 = 113,6 \pm 5,0 \text{ м/с}$

Разброс отдельных результатов около среднего значения зависит от массы пули и отклонения маятника



4.3 Результаты опыта с установкой 2

Периоды колебаний без грузов и с грузами составили $T_1 = 12,9$ с и $T_2 = 17,9$ с. Отсюда найдено значение

$$\sqrt{kI} = \frac{4\pi MR^2 T_1}{T_1^2 - T_2^2} = 0,126$$

Отсюда найдены значения скоростей, представленные в таблице , по формуле

$$v = \varphi \frac{\sqrt{kI}}{mr} = \frac{x}{2d} \frac{\sqrt{kI}}{mr}$$

Систематическая погрешность вычисления скорости найдена по формуле

x , мм	u , м/с	$u - \bar{u}$, м/с
13	138,9	19,125
13	138,9	19,125
16,0	171,6	13,575
17,0	182,7	24,675

Таблица 3: Результаты измерения скорости пуля во втором опыте

$$\sigma_{u1} = u \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{вес}}}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{лин}}}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{лин}}}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\sqrt{kI}}}{\sqrt{kI}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{шк2}}}{x}\right)^2} \approx 6,6 \text{ м/с}$$

Итоговый результат:

- $\bar{u}_2 = 158,025 \pm 6,6$ м/с

5 Обсуждение результатов и вывод

В ходе данной работы получены значения скорости пуля с точностью до 5-8 %, причём погрешеность измерений при использовании второй установки оказалась заметно больше из-за большего объёма вычислений. Полученной точности достаточно, чтобы убедиться в применимости использованных методов измерения скоростей. Однако наблюдается существенный разброс скоростей (около 10 м/с), причём между скоростями пуля и их массами невозможно установить однозначное соответствие. Это говорит о том, что на скорость пуля влияют внешние факторы, как то: сопротивление воздуха, начальное положение в духовом ружье и т.п.

Скорость пули можно определить с помощью баллистического маятника по формуле:

$$u = \frac{M}{m} \sqrt{g/L} \Delta x$$