

## Работа 1.2.1

# Определение скорости полета пули при помощи баллистического маятника

Малиновский Владимир

galqiwi@galqiwi.ru

**Цель работы:** определить скорость полета пули, применяя законы сохранения и используя баллистические маятники.

**В работе используются:** духовое ружье на штативе, осветитель, оптическая система для измерения отклонений маятника, измерительная линейка, пули и весы для их взвешивания, а также баллистические маятники.

## 1 Метод баллистического маятника, совершающего поступательное движение

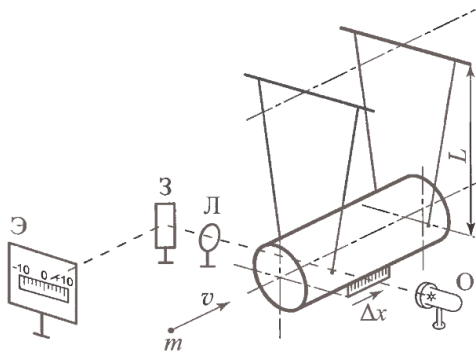


рис. 1, схема установки

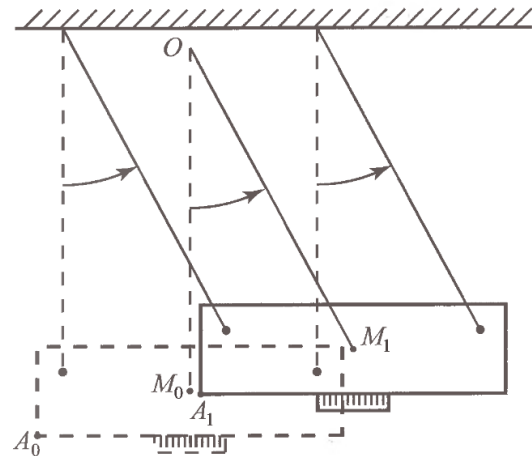


рис. 2, поведение баллистического маятника при попадании в него пули.

В этой части используется установка, изображенная на рис. 1. Если масса маятника равна  $M$ , то скорость системы маятник-пуля сразу после попадания маятника равна

$$v_0 = \frac{m}{M + m} v. \quad (1)$$

У маятника угловая скорость  $\omega = \sqrt{g/L}$ . Если у него амплитуда  $A$ , то верно, что

$$A\omega = v_0. \quad (2)$$

Из этого скорость выражается, как

$$v = \sqrt{\frac{g}{L}} \frac{M + m}{m} A. \quad (3)$$

## 1.1 Результаты и обработка

Массы пулек:

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m$ , г	0.5128	0.5110	0.5120	0.5160	0.5090	0.5174	0.5039	0.5172	0.5083	0.5000

$$\Delta m = 0.001 \text{ г}$$

$$L = (2208 \pm 10) \text{ мм}, M = (2900 \pm 5) \text{ г}.$$

Амплитуды и соответствующие скорости:

$A$ , мм	$v$ , м/с
$12.2 \pm 0.2$	$145 \pm 3$
$12.2 \pm 0.2$	$146 \pm 3$
$12.2 \pm 0.2$	$146 \pm 3$
$12.2 \pm 0.2$	$145 \pm 3$

Усредняя, получаем  $\langle v \rangle = (146 \pm 3)$ , м/с.

## 2 Метод крутильного баллистического маятника

В этом методе используется установка, изображенная на рис. 3.

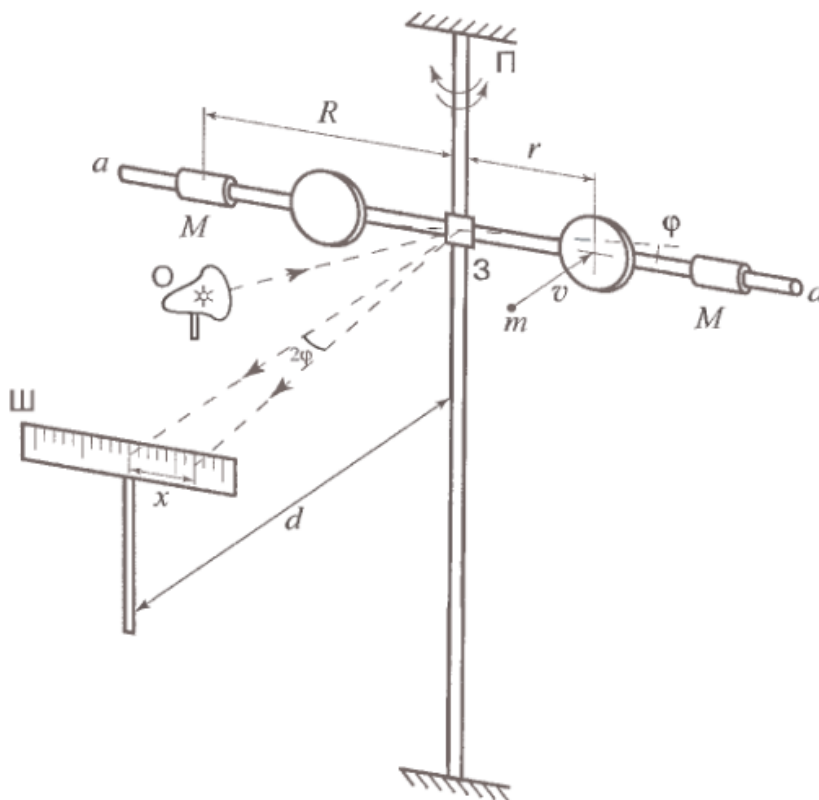


рис. 3, крутильный баллистический маятник.

Сразу после попадания пули в мишень, система пуля-мишень будет двигаться с угловой скоростью  $\Omega$  такой, что

$$mvr = I\Omega, \quad (4)$$

где  $I$  – момент инерции систему пуля-мишень.

Если  $k$  – модуль кручения проволоки, то из закона сохранения энергии следует, что

$$k \frac{\varphi^2}{2} = I \frac{\Omega^2}{2}, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – амплитуда колебаний маятника после выстрела. Из уравнений (4) и (5) можно найти скорость  $v$  по амплитуде  $\varphi$ .

$$v = \varphi \frac{\sqrt{kI}}{mr}. \quad (6)$$

Есть два метода расчета  $\varphi$  – простой и сложный.

$$\varphi_s = \frac{|x_0 - x_1|}{d}, \varphi_h = |atan(\frac{x_0}{d}) - atan(\frac{x_1}{d})|/2. \quad (7)$$

Если система колебается с периодом  $T$ , то верно, что ее момент инерции равен:

$$I = \frac{k}{4\pi^2} T^2. \quad (8)$$

Если грузов на маятнике нет, то момент инерции системы обозначим за  $I_0$ . Если есть, то он равен

$$I = I_0 + 2\Delta I + 2MR^2, \quad (9)$$

Где  $M$  – масса одного груза, а  $\Delta I$  – момент инерции груза относительно вертикальной оси, проходящей через его центр.

## 2.1 Результаты и обработка

Данные для момента инерции

$R$ , мм	$R^2$ , м <sup>2</sup>	$T_5$ , с	$T_5$ , с	$T$ , с	$T^2$ , с <sup>2</sup>	$\Delta T$ , с	$\Delta T^2$ , с <sup>2</sup>
0*	0*	38.66	38.60	7.726	59.7	0.2	0.6
329	0.108	56.03	56.54	11.26	126.7	0.2	0.9
303	0.0918	53.68	54.22	10.79	116.4	0.2	0.9
273	0.0745	51.34	51.56	10.29	105.9	0.2	0.8

Рис. 1: \*без учета момента инерции грузов

Из линейности графика на рис. 4, следует, что  $\Delta I \ll I$ , то есть собственный момент инерции грузов меньше погрешности измерения момента инерции.

Из МНК следует, что

$$\begin{cases} \frac{4\pi^2}{k} I_0 = (59.68 \pm 0.13) \text{с}^2 \\ \frac{4\pi^2}{k} 2M = (620 \pm 2) \text{с}^2/\text{м}^2. \end{cases} \quad (10)$$

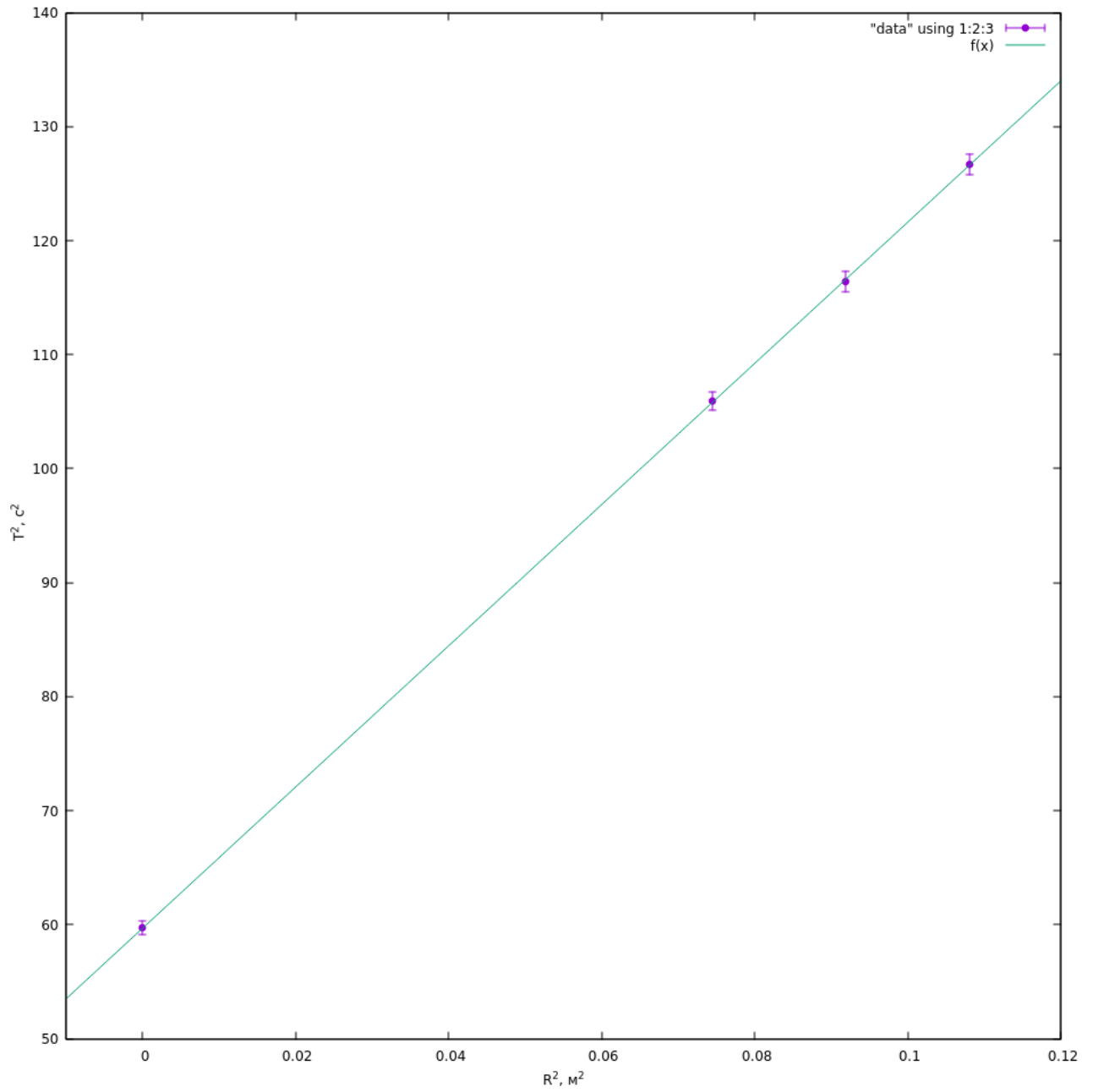


рис. 4, график зависимости  $T^2$  от  $R^2$ .

Из уравнений (10) можно найти  $k = (0.0929 \pm 0.0003) \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2$ .

$$v = \varphi \frac{\sqrt{kI}}{mr} = \varphi \frac{kT}{2\pi mr}. \quad (11)$$

Амплитуды и скорости:

$x_0$ , см	$\Delta x_0$ , см	$x_1$ , см	$m$ , г	$T$ , с	$\varphi_s$	$\varphi_h$	$v_s$ , м/с	$v_h$ , м/с
7.2	0.4	-0.1	0.5090	7.73	$0.113 \pm 0.008$	$0.114 \pm 0.008$	$126 \pm 10$	$127 \pm 10$
7.2	0.4	-0.1	0.5174	7.73	$0.113 \pm 0.008$	$0.114 \pm 0.008$	$124 \pm 10$	$125 \pm 10$
4.9	0.3	-0.4	0.5039	11.26	$0.083 \pm 0.007$	$0.083 \pm 0.007$	$136 \pm 12$	$136 \pm 12$
6.6	0.2	0.2	0.5172	10.79	$0.100 \pm 0.005$	$0.101 \pm 0.006$	$153 \pm 9$	$154 \pm 10$
7.5	0.1	1.0	0.5083	10.29	$0.102 \pm 0.004$	$0.103 \pm 0.005$	$151 \pm 7$	$152 \pm 8$
7.5	0.2	1.3	0.5000	10.29	$0.097 \pm 0.005$	$0.098 \pm 0.006$	$146 \pm 9$	$148 \pm 10$

Рис. 2:  $\Delta x_1 = 0.05$  см,  $d = (32 \pm 0.5)$  см.

Во 2 методе получается значение  $\langle v \rangle = (140 \pm 11)$  м/с.

При том, что  $\langle v_s \rangle = (139 \pm 11)$  м/с.

В моей работе значения скоростей, полученные двумя разными методами, сходятся:

$$v_0 = (146 \pm 3) \text{ м/с}, v_1 = (140 \pm 11) \text{ м/с}. \quad (12)$$

При этом я слышал, что у других людей на 2 установке получались значения скорости больше, чем на первой. Виной этому точно не неучет собственного момента инерции грузов в лабнике, поскольку во второй части у меня получилось, что он слишком мал. Также это не может происходить из-за приближения тангенса линейной функцией во 2 пункте, у меня отклонение финального ответа при линейном приближении получилось меньше процента от честного. Данный эффект может происходить из-за:

1. Трения о воздух
2. Того, что по-настоящему этого эффекта нет – все говорят, что он есть, но, честно промерив, его никто не получил, возможно, даже, некоторые студенты подогнали свои значения так, что этот эффект специально начал проявляться, что укрепило миф.
3. какой-то другой эффект, который не пришел мне в голову.

Рассмотрим трение о воздух. Диаметр пули равен 4.5 мм, расстояние до цели порядка 80 см на различных установках, скорость пули порядка 140 м/с. Посмотрим, насколько пуля замедлится.

Если брать квадратичную зависимость ( $F = C_f \frac{\rho v^2}{2} S$ ) силы трения от скорости, то на пулю действует сила в 153 мН, если считать пулю цилиндром. При массе в 0.5 г, пуля успеет замедлиться на 1.7 м/с за это время. Поскольку порядок вариации расстояния от конца ствола до мишени – 10 см, что в 8 раз меньше, получим вариацию в 0.2 м/с по скорости, что много меньше погрешности. Это не трение.

### 3 Вывод

Я получил значение скорости пули двумя методами – методом баллистического маятника и методом крутильного маятника. Значения скорости совпали с точностью до погрешности. Физического объяснения того, что у других студентов получаются разные значения я не нашел, хотя рассмотрел три варианта: неучет момента инерции грузов, неучет нелинейности тангенса при расчете амплитуды отклонения и неучет силы трения о воздух.