

## Лабораторная работа №1.2.1

### Определение скорости полёта пули при помощи баллистического маятника

Струков О. И.  
Б04-404

## Аннотация

**Цель работы:** Определить скорость полёта пули применяя законы сохранения и используя баллистические маятники.

**Оборудование:** Духовое ружьё на штативе, осветитель, оптическая система для измерения отклонений маятника, измерительная линейка, пули и весы для их взвешивания, баллистические маятники.

## Экспериментальная установка

При попадании пули в цилиндр любая его точка движется по окружности известного радиуса, поэтому его смещение с помощью собирающей линзы можно перевести в линейное отклонение на линейке.

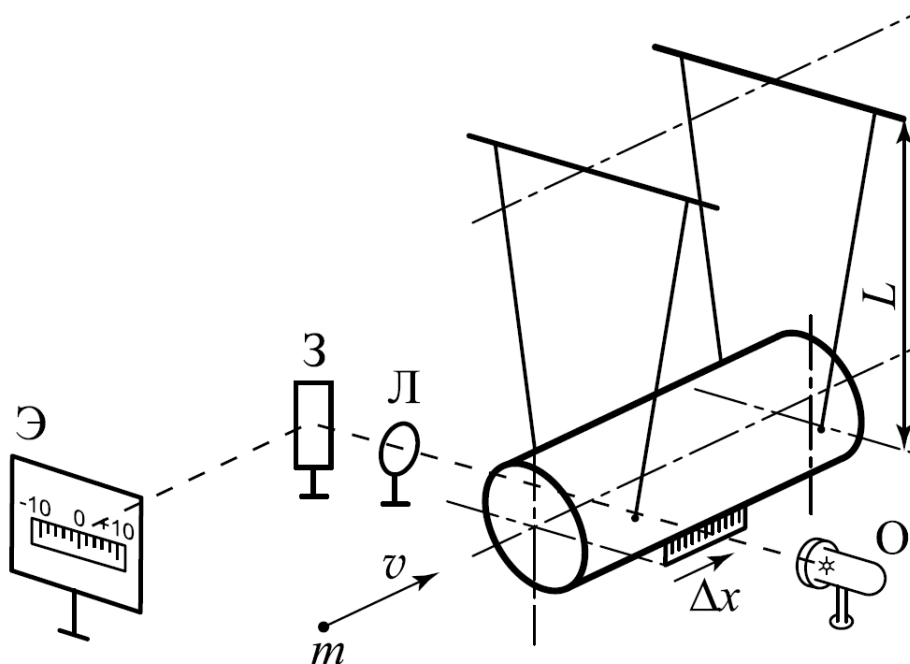


Рисунок 1: Схема установки для измерения скорости полета пули

## Метод баллистического маятника, совершающего поступательное движение

При контакте пули с цилиндром можно записать ЗСИ:

$$mu = (M + m)V \quad (1)$$

где  $m$  – масса пули,  $u$  – скорость пули перед ударом,  $V$  – скорость цилиндра вместе с пулей после удара.

$$u = \frac{M + m}{m} V \approx \frac{M}{m} V \quad V^2 = 2gh \quad h = L(1 - \cos\varphi) = 2L^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad \varphi \approx \frac{\Delta x}{L} \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол отклонения маятника от вертикали,  $\Delta x$  – отклонение маятника

Тогда скорость пули можно выразить как

$$u = \frac{M}{m} \sqrt{\frac{g}{L}} \Delta x \quad (3)$$

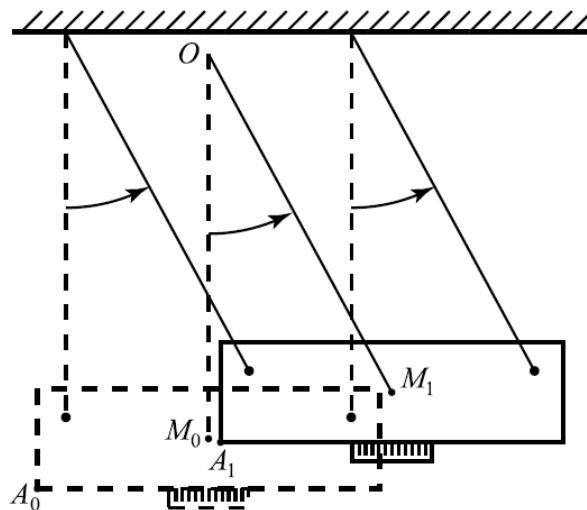


Рисунок 2: Схема установки для измерения скорости полета пули

## Метод крутильного баллистического маятника

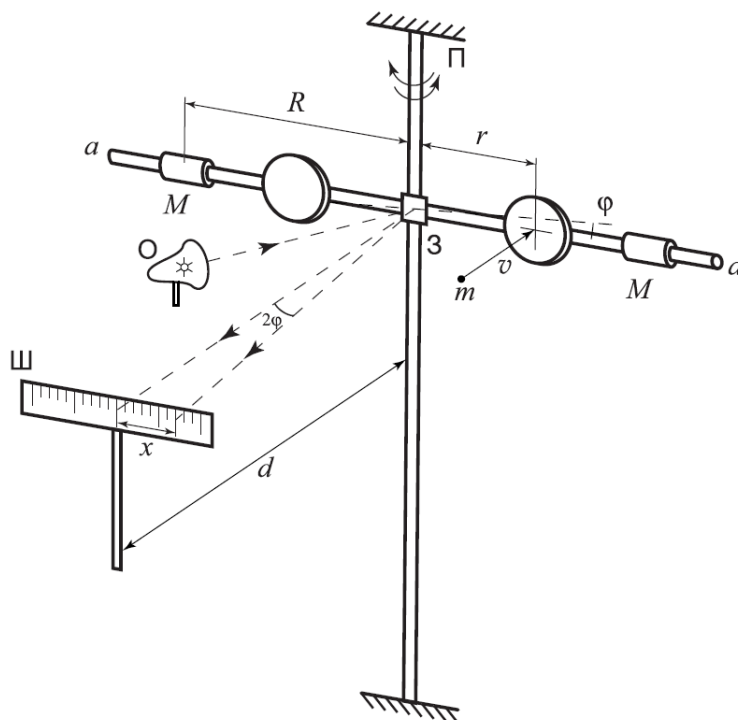


Рисунок 3: Схема установки для измерения скорости полета пули с крутильным баллистическим маятником

Считая удар неупругим, можно записать уравнение

$$mur = I\Omega$$

$r$ —расстояние от линии полёта пули до оси вращения,  $I$  — момент инерции относительно этой оси,  $\Omega$  — угловая скорость маятника сразу после удара.

Можно пренебречь затуханием колебаний и потерями энергии и записать ЗСЭ:

$$k \frac{\varphi^2}{2} = I \frac{\Omega^2}{2}$$

где  $k$  — модуль кручения проволоки,  $\varphi$  — максимальный угол поворота маятника, тогда:

$$u = \varphi \frac{\sqrt{kI}}{mr} \quad (4)$$

$$\varphi \approx \frac{x}{d} \quad (5)$$

где  $x$  – смещение изображения нити осветителя на шкале, которое легко можно измерить.  
Периоды колебаний маятника с грузами и без можно выразить как

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I - 2MR^2}{k}} \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}}$$

Тогда  $\sqrt{kI}$  можно найти как:

$$\sqrt{kI} = \frac{4\pi MR^2 T_2}{T_2^2 - T_1^2} \quad (6)$$

$R$  – расстояние от оси вращения до центров грузиков,  $M$  - масса грузиков.

## Ход работы

### Метод баллистического маятника, совершающего поступательное движение

1. Было проведено ознакомление с устройством баллистического маятника, прослушан инструктаж безопасности.
2. На аналитических весах были определены массы пяти используемых в данном эксперименте пуль. Значения внесены в таблицу. Абсолютной погрешностью каждого измерения является  $\sigma_m = 0,005$  г.

Номер пули	1	2	3	4	5
Масса, г	0,514	0,506	0,509	0,511	0,513

3. С помощью длинной линейки было измерено расстояние  $L$  для каждой из четырёх проволок. Среднее значение всех измерений составило  $L = 220,2$  см, а погрешность измерения -  $\sigma_L = 0,1$  см. Масса маятника была известна:  $M = (2905 \pm 5)$  г.
4. Оптическая система, предназначенная для измерения поворота маятника была настроена корректно, на стене было получено чёткое изображение шкалы для определения амплитуды колебаний, маятник покоился.
5. Был произведён холостой выстрел в сторону мишени, в результате чего было установлено, что маятник практически не реагирует на удар воздушной струи из ружья.
6. Затухание колебаний являлось малым, так как через десять колебаний их амплитуда уменьшилась меньше, чем на половину.
7. Было произведено пять выстрелов и для каждого из них по формуле 3 была определена скорости полёта пули. Результаты занесены в таблицу.

Номер пули	1	2	3	4	5
Амплитуда отклонения $\Delta x$ , мм	11,25	11,25	11,0	11,0	11,25
Погрешность амплитуды $\sigma_{\Delta x}$ , мм	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Скорость пули $u$ , м/с	134,2	136,4	132,6	132,0	134,5
Погрешность скорости $\sigma_u$ , м/с	3,3	3,4	3,3	3,3	3,3

8. Оценена погрешность определения скорости пули в каждом выстреле по формуле ниже. Результаты добавлены в таблицу.

$$\sigma_u = u \sqrt{\left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2}$$

9. Среднее значение скорости полёта пули составило  $u_{\text{ср}} = 134,0$  м/с. Разброс отдельных результатов от него варьируется от 0,2 м/с до 2,4 м/с, что находится в рамках погрешности. Поскольку при получении значений ошибки замечены не были и сильные отклонения отсутствовали, можно прийти к выводу, что данный разброс возникает в результате существования погрешностей измерений и различной скоростью полёта пуль, зависящей от условий при выстреле (небольшие различия в форме и массе пуль, потоки воздуха в кабинете).

### Метод крутильного баллистического маятника

1. Было проведено ознакомление с конструкцией, прослушан инструктаж безопасности.
2. На аналитических весах были определены массы пяти используемых в данном эксперименте пуль. Значения внесены в таблицу. Абсолютной погрешностью каждого измерения является  $\sigma_m = 0,005$  г.

Номер пули	1	2	3	4	5
Масса, г	0,504	0,503	0,510	0,508	0,514

3. С помощью линейки, рулетки и штангенциркуля были измерены расстояния  $r$ ,  $R$  и  $d$ . Значения и их абсолютные погрешности внесены в таблицу.

$r$ , см	$\sigma_r$ , см	$R$ , см	$\sigma_R$ , см	$d$ , см	$\sigma_d$ , см
22,4	0,1	31,3	0,1	135,7	0,1

4. Оптическая система, предназначенная для измерения поворота маятника была настроена корректно, на линейке чётко была видна отметка точка, создаваемая лазером, колебания маятника отсутствовали.

5. Преподаватель подтвердил факт того, что маятник практически не реагирует на воздушную струю из ружья при совершении холостых выстрелов.
6. Затухание колебаний являлось малым, так как через десять колебаний их амплитуда уменьшилась меньше, чем на половину.
7. При измерении десяти полных крутильных колебаний были определены их периоды  $T_1$  (без грузов) и  $T_2$  (с грузами). Измерена масса каждого из грузов  $M$ . Была найдена величина  $\sqrt{kI}$  по формуле 6 и оценена её погрешность  $\sigma_{\sqrt{kI}}$  по формуле ниже. Результаты и их абсолютные погрешности указаны в таблице.

$$\sigma_{\sqrt{kI}} = \sqrt{kI} \sqrt{\left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2 + 4\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + 4\left(\frac{\sigma_{T_1}}{T_1}\right)^2 + 9\left(\frac{\sigma_{T_2}}{T_2}\right)^2}$$

$M$ , г	$\sigma_M$ , г	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$\sigma_T$ , с	$\sqrt{kI}$ , кг · м <sup>2</sup> /с	$\sigma_{\sqrt{kI}}$ , кг · м <sup>2</sup> /с
713,6	0,1	5,05	6,62	0,05	0,3174	0,004

8. Всего было произведено пять выстрелов и определена скорость полёта пули при каждом из них по формуле 4. Результаты представлены в таблице.

Номер пули	$x$ , см	$\sigma_x$ , см	$u$ , м/с	$\sigma_u$ , м/с
1	4,6	0,1	95,3	2,4
2	4,4	0,1	91,3	2,3
3	4,7	0,1	96,2	2,4
4	4,5	0,1	92,5	2,3
5	4,7	0,1	95,5	2,4

9. Оценена погрешность определения скорости пули при каждом выстреле. Результаты добавлены в таблицу выше.

$$\sigma_u = u \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\sqrt{kI}}}{\sqrt{kI}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2}$$

10. Среднее значение скорости полёта пули составило  $u_{\text{ср}} = 94,2$  м/с. Разброс отдельных результатов от него варьируется от 1,1 м/с до 2,9 м/с, что выходит за пределы погрешности. Данный разброс возникает по обоим причинам, указанным в задании: из-за погрешностей измерений и различной скоростью полёта пуль, зависящей от условий при выстреле (небольшие различия в форме и массе пуль, потоки воздуха в кабинете).