

Определение скорости полета пули при помощи баллистического маятника (1.2.1)

Павлушкин Вячеслав

December 2021

1 Введение

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.

2 Ход работы

2.1 Метод баллистического маятника, совершающего поступательное движение

В этой части работы будем использовать установку, изображённую на рисунке ниже. 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.

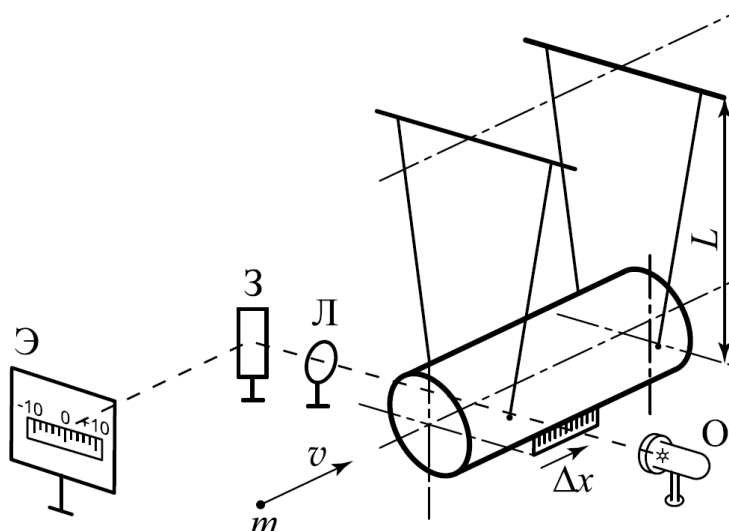


Рис. 1: схема установки для измерения скорости полета пули

При контакте пули с цилиндром можно записать ЗСИ:

$$mu = (M + m)V$$

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

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

Тогда скорость пули можно выразить как

$$u = \frac{M}{m} \sqrt{\frac{g}{L}} \Delta x \quad (1)$$

При измерении было замечено, что за 10 периодов амплитуда колебаний почти не уменьшилась, поэтому их затуханием можно пренебречь.

Для начала проверим работоспособность установки, а именно проведем несколько холостых выстрелов по маятнику и убедимся в том, что он практически не реагирует на удар воздушной струи.

Вычислять скорость пули будем по формуле (1), для чего нужно проверить, что за 10 колебаний амплитуда уменьшается меньше, чем на половину.

Произведем 4 выстрела, запишем амплитуды, полученные при выстрелах, и по их значениям найдем скорости пуль.

m , г	0,504	0,508	0,506	0,502
Δx , мм	12,75	13,75	13,5	13,5
u , м/с	156,1	165	164,6	170

Таблица 1:

наша установка имела параметры: $M = (2925 \pm 5)$ г, и $L = (220,4 \pm 0,1)$ см.

Средняя скорость пули $u_{\text{ср}} = 163,9$ м/с, а погрешность будет равна:

$$\sigma_u^{\text{сист}} = u \sqrt{\varepsilon_M^2 + \varepsilon_m^2 + \varepsilon_{\Delta x}^2 + \left(\frac{\varepsilon_L}{2}\right)^2} \quad \sigma_u^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (u_i - u_{\text{ср}})^2} \quad \sigma_u = \sqrt{\sigma_{\text{сист}}^2 + \sigma_{\text{случ}}^2}$$

$$\sigma_u^{\text{сист}} \approx 3,1 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \sigma_u^{\text{случ}} \approx 2,9 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \sigma_u \approx 4,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Окончательно получаем скорость пули равную $u = (163,9 \pm 4,2), \frac{\text{м}}{\text{с}}$

2.2 Метод крутильного баллистического маятника

В этой части работы мы будем использовать крутильный баллистический маятник. Схема установки представлена на картинке ниже.

Считая удар неупругим, можно записать уравнение

$$mvr = I\Omega$$

r – расстояние от линии полёта пули до оси вращения, I – момент инерции относительно этой оси, Ω – угловая скорость маятника сразу после удара.

Можно пренебречь затуханием колебаний и потерями энергии и записать ЗСЭ:

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

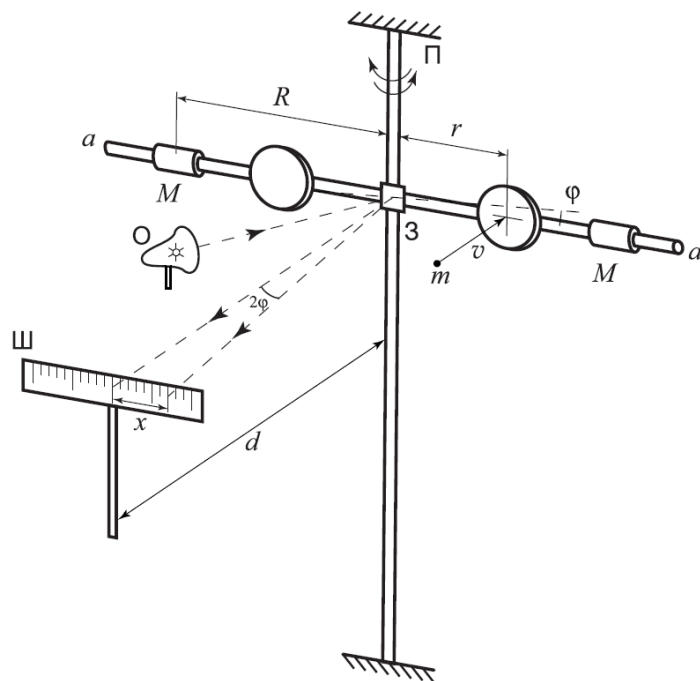


Рис. 2: схема установки для измерения скорости полета пули с баллистическим маятником

где k – модуль кручения проволоки, φ – максимальный угол поворота маятника, тогда:

$$u = \varphi \frac{\sqrt{kI}}{mr} \quad (2)$$

Измерим расстояние от оси вращения до штатива с линейкой $d = 59,3 \pm 0,1$ см, тогда в силу малости колебаний можно найти φ как

$$\varphi \approx \frac{x}{2d} \quad (3)$$

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:

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

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

Для начала запишем данные установки: $r = 22$ см, $R = 33,6$ см, $M_1 = 729,9$ г, а $M_2 = 729,6$ г.

Снимем периоды колебаний после выстрела с грузиками и без, чтобы найти \sqrt{kI} :

№	t , с	T , с	N
1. С грузами	155,94	15,594	10
2. С грузами	151,79	15,179	10
3. Без грузиков	199,28	19,928	10
4. Без грузиков	199,64	19,964	10

Таблица 2: Периоды колебаний баллистического маятника после выстрела

Из таблицы получаем, что $T_1^{\text{cp}} = (15,387 \pm 0,207)$ см, а $T_2^{\text{cp}} = (19,946 \pm 0,03)$ см. С помощью полученных периодов колебаний найдем \sqrt{kI} по формуле (4):

$$\sqrt{kI} \approx 138,18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}} \quad \sigma_{\sqrt{kI}} = \sqrt{kI} \cdot \sqrt{\varepsilon_{T_2^{\text{cp}} - T_1^{\text{cp}}}^2 + (2\varepsilon_{R^2})^2 + \varepsilon_M^2 + \varepsilon_{T^2}^2} \approx 0,54 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$$

Теперь по формулам (2) и (3) определим φ и скорость пули. Получаем таблицу:

	m , г	x , см	φ , рад	u , м/с
без грузиков	0,514	15,75	0,13	162,28
без грузиков	0,510	14,50	0,12	150,57
с грузиками	0,507	16,10	0,14	168,17
с грузиками	0,517	15,50	0,13	158,77

Таблица 3: Таблица полученных скоростей

$$\sigma_u^{\text{сист}} = u \cdot \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_d^2 + \varepsilon_{\sqrt{kI}}^2 + \varepsilon_m^2 + \varepsilon_r^2} \quad \sigma_u^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad \sigma_u = \sqrt{\sigma_{\text{случ}}^2 + \sigma_{\text{сист}}^2}$$

Тогда средняя скорость $\underline{u_{\text{cp}} = (159,95 \pm 1,44) \frac{\text{м}}{\text{с}}}$

3 Вывод

Были получены скорости пули двумя методами: методом баллистического маятника, совершающего поступательное движение, и методом крутильного баллистического маятника. Разброс полученных значений связан как с ошибками опыта, так и с различием скоростей пуль от выстрела к выстрелу. Так же имеет значение то, что стрельба в каждом методе производилась своим ружьем.