

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет



**Кафедра общей и технической физики**

## **Отчет по лабораторной работе №4**

По дисциплине

**ФИЗИКА**

---

(наименование учебной дисциплины согласно учебному плану)

Тема: Измерение скорости полёта пули с помощью баллистического маятника

Выполнил: студент гр. **МЦ-22**

\_\_\_\_\_

(подпись)

Корнышов Г.В.

(Ф.И.О.)

Дата:

Проверил:

\_\_\_\_\_

(должность)

\_\_\_\_\_

(подпись)

/ \_\_\_\_\_ /

(Ф.И.О.)

Санкт-Петербург  
2023

## Цель работы

Определить скорость полета пули с помощью крутильных колебаний баллистического маятника.

## Явление, изучаемое в работе

Явление неупругого соударения тел

## Основные определения

### Краткие теоретические сведения

Скорость полета пули может достигать значительной величины в зависимости от стреляющего устройства. Ее прямое измерение, то есть определение времени, за которое пуля проходит известное расстояние, в учебной лаборатории не представляется возможным.

Для лабораторной работы разработана методика косвенного измерения скорости полета пули с помощью баллистического маятника.

В основе эксперимента лежит явление неупругого соударения тел, в результате которого баллистический маятник совершает крутильные колебания.

Если летящая пуля испытывает неупругий удар с неподвижным телом большей массы, то скорость тела после удара будет существенно меньше первоначальной скорости пули и ее можно будет измерить достаточно простыми методами.

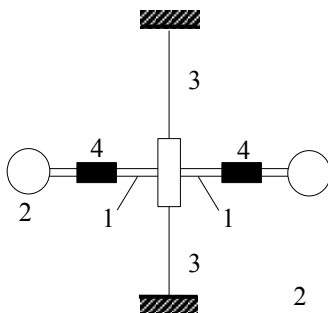


Рисунок 4.1. Баллистический маятник. 1 – стержни, 2 шт.; 2 – емкости с пластилином, 2 шт.; 3 – проволока; 4 – грузы.

*Баллистический маятник* представляет собой два стержня 1, подвешенных на вертикально натянутой проволоке 3 (рис. 4.1). На стержнях закреплены мисочки с пластилином 2 и перемещаемые грузы 4. При попадании пули в мисочку с пластилином, маятник начинает поворачиваться вокруг своей вертикальной оси, совершая крутильные колебания.

При выводе расчётных формул использованы формулы для момента инерции и периода крутильных колебаний физического маятника, а также законы сохранения момента импульса и полной механической энергии. Принято допущение при этом о малости неконсервативных сил.

На основании закона сохранения момента импульса можно написать

$$mvl = (J + m l^2) \omega \quad (4.1)$$

где  $m$  - масса пули;  $v$  - величина скорости пули;  $l$  - расстояние от оси вращения маятника до точки удара пули;  $\omega$  - величина угловой скорости маятника;  $J$  - момент инерции маятника.

Согласно закону сохранения полной механической энергии при повороте маятника кинетическая энергия маятника переходит в потенциальную энергию закручивающейся проволоки

$$\frac{1}{2}(J + ml^2)\omega^2 = \frac{1}{2}D\alpha_{\max}^2, \quad (4.2)$$

где  $\alpha_{\max}$  - наибольший угол поворота маятника;  $D$  - модуль кручения проволоки. Учитывая, что момент инерции пули  $ml^2$  существенно меньше момента инерции маятника  $J$ , из уравнений (1) и (2) получим

$$v^2 = D\alpha_{\max}^2 J / (m^2 l^2). \quad (4.3)$$

Модуль кручения проволоки  $D$  можно определить, измерив период крутильных колебаний маятника  $T$ .

При малых углах отклонения период крутильных колебаний маятника определяется по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{J/D} \quad (4.4)$$

Модуль кручения проволоки

$$D = \frac{4\pi^2 J}{T^2} \quad (4.5)$$

Подставив выражение (4.5) в уравнение (4.3), выразим величину скорости пули

$$v = \frac{\alpha_{\max}}{ml} \sqrt{DJ} = \frac{2\pi}{T} \frac{J}{ml} \alpha_{\max} \quad (4.6)$$

Чтобы исключить измерения момента инерции  $J$ , запишем периоды колебаний маятника  $T_1$  и  $T_2$  при различных положениях грузов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J_1}{D}} \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{J_2}{D}} \quad (4.7)$$

отсюда

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{T_1^2}{T_2^2} \quad (4.8)$$

В силу того, что момент инерции - величина аддитивная, момент инерции баллистического маятника с грузами выразим в виде суммы

$$J = J_0 + 2MR^2 \quad (4.9)$$

где  $M$  - масса одного неподвижного груза;  $R$  - расстояние от центра масс груза до оси вращения;  $J_0$  - момент инерции маятника без грузов.

Для различных положений грузов на расстояниях  $R_1$  и  $R_2$ : в первом положении  $J_1 = J_0 + 2MR_1^2$ ; во втором положении

$$J_2 = J_0 + 2MR_2^2$$

Разность моментов инерции

$$J_1 - J_2 = 2M(R_1^2 - R_2^2) \quad (4.10)$$

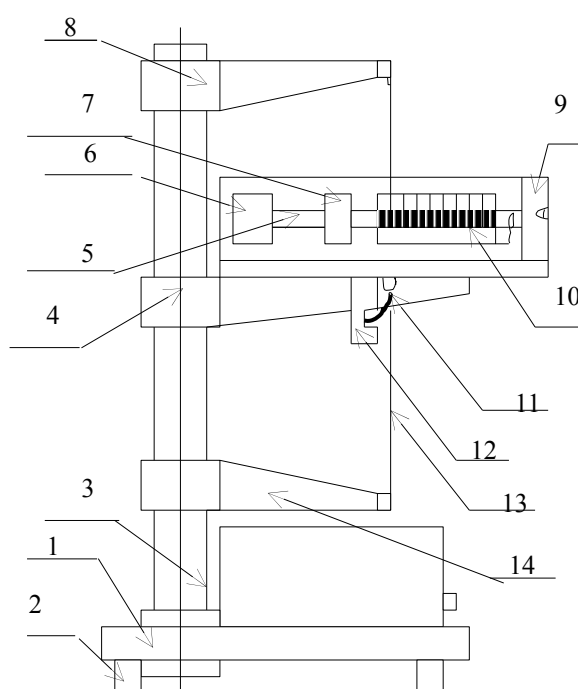
Решая уравнение (8) и (10) относительно  $J_1$  найдём

$$J_1 = \frac{2M(R_1^2 - R_2^2)T_1^2}{T_1^2 - T_2^2} \quad (4.11)$$

Подставив в формулу (4.6) период  $T_1$  и момент инерции  $J_1$  для положения грузов на расстоянии  $R_1$ , получим окончательную формулу для расчета величины скорости пули

$$v = \frac{4\pi M \alpha_{\max} T_1}{m \cdot l \cdot (T_1^2 - T_2^2)} (R_1^2 - R_2^2). \quad (4.12)$$

### Схема установки



Общий вид установки показан на рис. 4.2. В основании 1, снабжённом регулируемыми ножками 2, позволяющими выравнять прибор, закреплена колонка 3 с тремя кронштейнами: верхним 8, средним 4 и нижним 14. К кронштейну 4 прикреплено стреляющее устройство 9, прозрачный экран с нанесённой на него угловой шкалой 10 и фотоэлектрический датчик 12. Кронштейны 4 и 8 имеют зажимы, служащие для крепления стальной проволоки 13, на которой подвешен маятник, состоящий из двух мисочек 6, наполненных пластилином, двух перемещаемых грузов 7, двух стержней 5 и «водилки» 11. Фотоэлектрический датчик соединен разъёмом с привинченным к основанию секундомером.

### Основные расчётные формулы

1) Среднее значение  $\bar{\alpha}_{\max}$  по результатам измерения  $\alpha_{\max}$ :

$$\bar{\alpha}_{\max} = \frac{\alpha_{\max 1} + \alpha_{\max 2} + \alpha_{\max 3} + \alpha_{\max 4} + \alpha_{\max 5}}{5}$$

2)  $T$  по результатам измерения времени  $t$

$$T = \frac{t}{10}$$

3) Среднее значение периода  $T \quad \bar{T} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5}{5}$

4) Величина скорости полёта пули. В формуле используется величина  $\alpha_{\max}$ , измеренная в радианах:

$$v = \frac{4\pi M \alpha_{\max} T_1}{m \times l \times (T_1^2 - T_2^2)} (R_1^2 - R_2^2)$$

### Формула для расчёта погрешности косвенных измерений

$$\Delta v = \left( \frac{\Delta \alpha_{\max}}{\bar{\alpha}_{\max}} + \frac{\Delta T_1}{\bar{T}_1} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{2T_1 \Delta T_1 + 2T_2 \Delta T_2}{\bar{T}_1^2 - \bar{T}_2^2} + \frac{2R_1 \Delta R_1 + 2R_2 \Delta R_2}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_2^2} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta m}{m} \right) \cdot v$$

### Погрешности прямых измерений

$\Delta t = 0,001 \text{ с}$

$\Delta R = 0,0005 \text{ м}$

$\Delta l = 0,0005 \text{ м}$

$\Delta \alpha = 0,5^\circ$

$\Delta m = 0,5 \text{ г}$

### Таблицы

Таблица №1 с результатами измерений и вычислений

Величины	$R_1$	$t_1$	$T_1$	$R_2$	$t_2$	$T_2$	$\alpha_{\max}$	$M$	$m$	$l$	$v$
Единицы измерений	м	с	с	м	с	с	°	кг	кг	м	м/с
№ опыта											
1	0,09	16,217	1,62	0,02	9,576	0,96	26	0,2	0,0125	0,0125	30,2
2		16,217	1,62		9,526	0,95					30,3
3		16,217	1,62		9,526	0,95					30,3
4		16,208	1,62		9,577	0,96					30,2
5		16,267	1,63		9,576	0,96					30,3

### Исходные данные

- 1) Масса грузов  $M = 0,2 \text{ кг}$ ;
- 2) Расстояние от центра масс груза до оси вращения 1  $R_1 = 0,09 \text{ м}$ ;
- 3) Расстояние от центра масс груза до оси вращения 2  $R_2 = 0,02 \text{ м}$ ;
- 4) Масса пули  $m = 0,0125 \text{ кг}$ ;
- 5) Расстояние от оси вращения вращения  $l = 0,0125 \text{ м}$ ;

### Примеры вычислений

$$1) \bar{\alpha}_{\max} = \frac{26 + 26 + 26 + 26 + 26}{5} = 26^\circ;$$

$$2) \bar{T}_1 = \frac{16,217}{10} \approx 1,62 \text{ с};$$

$$3) T_{cp1} = \frac{1,62 + 1,62 + 1,62 + 1,62 + 1,63}{5} = 1,62 \text{ с};$$

$$4) \dot{v} = \frac{4 \times \pi \times 0,2 \times 26 \times 1,62}{0,0125 \times 0,125 \times (1,62^2 - 0,96^2)} \times (0,09^2 - 0,02^2) \approx 30,2 \text{ м/с}$$

$$5) \Delta v = \frac{0,001}{1,62} + \frac{0,0005}{0,0125} + \frac{2 \times 1,62 \times 0,001 + 2 \times 0,96 \times 0,001}{1,62^2 - 0,96^2} + \frac{2 \times 0,09 \times 0,0005 + 2 \times 0,02 \times 0,0005}{0,09^2 - 0,02^2} + \frac{0,5}{26} + \frac{0,00005}{0,2} + \frac{0,00005}{0,0125} = 1,18 \text{ м/с}$$

### Результаты

$$v = v \pm \Delta v \quad v = 30,2 \frac{\text{м}}{\text{с}} \pm 1,18 \text{ м/с}$$

### Вывод

В ходе выполнения лабораторной работы на измерение скорости полёта пули с помощью баллистического маятника были экспериментально определены различные скорости пули. В результатах имеются различия, что может объясняться неточностью, связанной с человеческим фактором.