

Экспериментальное задание

Измерение скорости пули с помощью баллистического маятника

<https://youtu.be/dVJzdtPe1r0>

Цель работы:

- 1) определить скорость пули перед столкновением с маятником;
- 2) определить потери механической энергии в результате неупругого столкновения пули и маятника.

Оборудование: баллистический маятник, пружинный пистолет, измерительная линейка, измерительная лента.

Краткая теория

В эксперименте определяют скорость пули v в момент попадания ее в маятник (рис.1). Для получения формулы для ее расчета, применяют закон сохранения импульса и закон сохранения механической энергии.

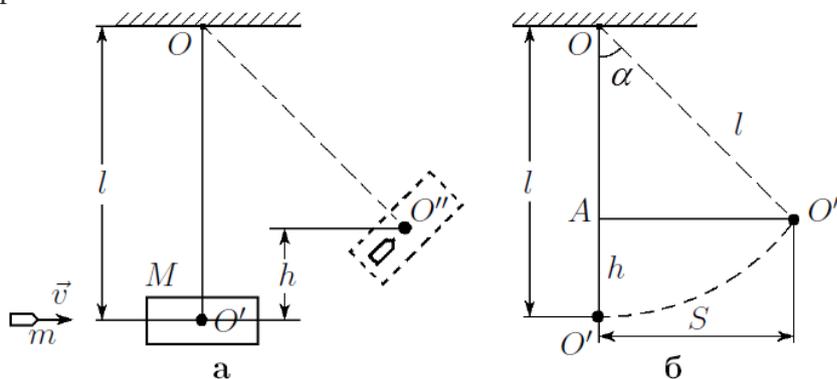


Рис.1

Кинетическая энергия пули, полученная при выстреле из пружинного пистолета равна:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

где m – масса пули, v – ее скорость.

При ударе пули о маятник часть ее кинетической энергии переходит в тепло Q . Другая часть передается в виде кинетической энергии маятнику, в результате чего маятник с застрявшей в нем пулей начинает двигаться со скоростью u . Закон сохранения импульса связывает скорость пули перед столкновением и скорость системы «маятник – пуля» после неупругого столкновения:

$$mv = (m + M)u, \quad (2)$$

где M – масса маятника.

Далее кинетическая энергия системы преобразуется в потенциальную энергию вследствие того, что система переходит из точки O' в точку O'' согласно закону сохранения механической энергии:

$$\frac{(m + M)u^2}{2} = (m + M)gh, \quad (3)$$

где h – высота поднятия центра масс маятника (рис. 1, а).

Закон сохранения механической энергии (3) помогает найти скорость системы «маятник – пуля» сразу после неупругого столкновения:

$$u = \sqrt{2gh}. \quad (4)$$

Следовательно, скорость пули перед столкновением с маятником согласно формулам (2) и (4) будет равна:

$$v = \frac{m+M}{m} \cdot \sqrt{2gh}. \quad (5)$$

Высоту поднятия центра масс маятника h можно найти, рассматривая треугольник AOO'' (рис. 1, б):

$$\cos \alpha = \frac{l-h}{l}, \text{ откуда } h = l(1 - \cos \alpha) = 2l \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (6)$$

где l – длина маятника, равная расстоянию от точки O до центра масс, α – угол отклонения подвеса при переходе системы из точки O' в точку O'' .

Для малых углов $\sin \alpha \approx \text{tg} \alpha \approx \alpha \approx \frac{s}{l}$, где s – длина дуги $O'O''$, которая приблизительно равна отрезку AO'' (горизонтальное отклонение маятника). С учетом этих рассуждений и формулы (6) формула (5) будет иметь вид:

$$v = \frac{m+M}{m} \cdot s \cdot \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (7)$$

I. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 2: 1 – пружинный пистолет, 2 – баллистический маятник, 3 – измерительная линейка, 4 – нить (подвес).

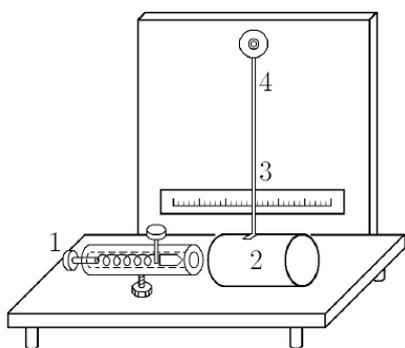


Рис.2

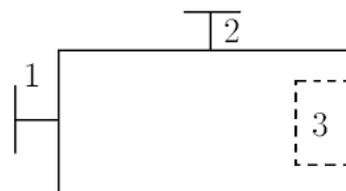


Рис.3

II. Рекомендации по проведению эксперимента и обработке его результатов

1. Измерьте длину l до центра масс маятника и абсолютную погрешность ее измерения по формуле:

$$\Delta l = \Delta l_{\text{сум.}} = \frac{c}{2}, \text{ где } c - \text{цена деления измерительной ленты.}$$

2. Подготовьте пистолет к выстрелу (рис. 3). Для этого сначала боек 1 надо оттянуть до упора и утопить стопор 2 так, чтобы он вошел в канавку бойка 1. Затем вставляют пулю в дуло пистолета 3. Для того, чтобы выстрелить, вытаскивают стопор 2.
3. Произведите измерения горизонтальных отклонений маятника s при 5 выстрелах. Результаты измерений занесите в таблицу 1.
4. Найдите среднее значение горизонтального отклонения по формуле:

$$s_{\text{ср}} = \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_5}{5}.$$

5. Найдите абсолютную погрешность измерения горизонтального отклонения маятника:

$$\Delta s = \sqrt{(\Delta s_{\text{сум.}})^2 + (\Delta s_{\text{случ.}})^2},$$

$$\Delta s_{\text{сум.}} = \frac{c}{2}, \text{ где } c - \text{цена деления измерительной линейки.}$$

$$\Delta s_{\text{случ.}} = t_{\text{см}} \cdot \sigma = t_{\text{см}} \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_i^N (s_{\text{ср}} - s_i)^2},$$

где $t_{cm} = 2,78$ – коэффициент Стьюдента для 5-ти опытов ($N = 5$), σ – среднее квадратичное отклонение величины, значение которой можно найти с помощью *Excel*.

6. Определите значение скорости пули перед столкновением с маятником по формуле (7).
7. Определите относительную погрешность измерения скорости пули по формуле:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta s}{s}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta l}{l}\right)^2}.$$

8. Рассчитайте абсолютную погрешность измерения скорости пули по формуле:
 $\Delta v = v \cdot \varepsilon.$
9. Далее заполните таблицу 2, для чего определите кинетическую скорость пули перед столкновением с маятником (1) и кинетическую энергию системы «маятник – пуля» сразу после неупругого столкновения, а также потери механической энергии, возникающие при этом столкновении. Данные для пуль из других веществ возьмите у одноклассников, которые исследовали их движение и взаимодействие с маятником.
10. Проанализируйте результаты эксперимента, представленные в таблицах 1 и 2, сделайте выводы.

Таблица 1

Результаты измерений скорости пули перед столкновением с маятником

№	$l, \text{ м}$	$\Delta l, \text{ м}$	$s, \text{ м}$	$s_{cp}, \text{ м}$	$\Delta s, \text{ м}$	$v, \text{ м/с}$	$\Delta v, \text{ м/с}$	$\varepsilon, \%$
1								
2								
3								
4								
5								

Таблица 2

Исследование потери механической энергии в результате неупругого столкновения пули и маятника

№	Вещество, из которого сделана пуля	Масса пули $m, \text{ кг}$	$E_k = \frac{mv^2}{2},$ Дж	$E'_k = \frac{(m+M)u^2}{2},$ Дж	$Q = \Delta E_k = E'_k - E_k,$ Дж
1	Сталь				
2	Бронза				
3	Дюраль				

Контрольные вопросы

1. Какие консервативные силы действуют на тела в данном эксперименте?
2. Как консервативные силы связаны с потенциальной энергией тел?
3. Какой вклад в изменение кинетической энергии системы «маятник – пуля» вносит сила натяжения подвеса?