

### 010101. Измерение скорости пули с помощью баллистического маятника

**Цель работы:** С помощью баллистического маятника определить скорости пуль с различными массами.

**Требуемое оборудование:** Модульный учебный комплекс МУК-М1

#### *Краткое теоретическое введение*

Баллистический маятник представляет собой массивный цилиндр массой  $M$ , который подвешен на невесомых и нерастяжимых нитях так, что он может двигаться только поступательно. В цилиндр в горизонтальном направлении производят выстрел пуль массы  $m$  из пружинного пистолета, неподвижно закрепленного вблизи маятника (рис. 1). Если торцевая стенка цилиндра изготовлена из мягкого и легко деформируемого материала, например, пластилина, то пуля при попадании в маятник может испытывать абсолютно неупругий удар. **Абсолютно неупругий удар** – это удар, при котором потенциальная энергия упругой деформации не возникает; кинетическая энергия тел частично либо полностью превращается во внутреннюю энергию; после удара тела движутся с одинаковой скоростью (т. е. как единое тело) либо покоятся. При таком ударе выполняется только закон сохранения импульса, закон же сохранения механической энергии не соблюдается – механическая энергия частично или полностью переходит во внутреннюю.

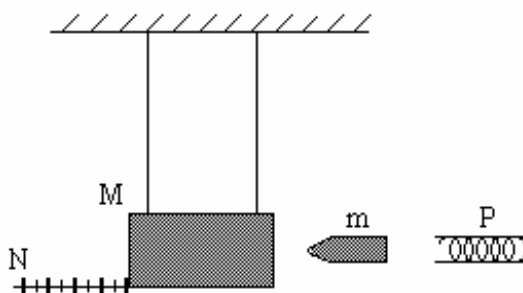


Рис. 1

Если зарядить пистолет пулей, то в сжатой при этом пружине будет запасена потенциальная энергия:

$$E_{\text{пруж.}} = \frac{kb^2}{2}, \quad (1)$$

где  $k$  - коэффициент упругости пружины,  
 $b$  - деформация пружины.

Предположим, что вся энергия сжатой пружины при выстреле полностью превращается в кинетическую энергию пули. Это означает, что мы пренебрегаем потерями энергии на преодоление трения между пулей и стволом пистолета и на сообщение кинетической энергии самой пружине. Учтем, кроме того, что геометрические размеры всех пуль одинаковы, а, значит, одинакова деформация пружины для любой пули и, следовательно, одинакова запасаемая пружиной потенциальная энергия. Тогда из закона сохранения механической энергии следует, что пули различных масс, вылетая из пружинного пистолета, должны иметь одинаковые кинетические энергии:

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

где  $v_i$  - скорость пули после выстрела.

Из (2) получаем зависимость скорости пули после выстрела от ее массы:

$$v = b\sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3)$$

Поскольку величины  $b$  и  $k$  для всех пуль одинаковы, то график ожидаемой зависимости скорости пули  $v$  от  $\sqrt{\frac{1}{m}}$  должен, согласно формуле (3), представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат.

Пролетев небольшое расстояние между пистолетом и маятником, пуля входит в пластилин, заполняющий цилиндр, и за счет вязкого трения быстро теряет скорость. При этом часть механической энергии пули расходуется на неупругую деформацию и превращается во внутреннюю энергию пластилина и пули, то есть пластилин и пуля нагреваются.

Процесс удара является кратковременным. Если масса маятника достаточно велика по сравнению с массой пули ( $M \gg m$ ), то за время удара он в силу своей инерционности не успевает выйти из положения равновесия. Это позволяет считать систему маятник-пуля в момент удара замкнутой в горизонтальном направлении, так как сила тяжести и сила натяжения подвеса направлены вертикально при вертикальном положении маятника. Для замкнутой системы можно применить закон сохранения импульса:

$$mv = (M + m)u, \quad (4)$$

где  $v$  - скорость пули до удара (при этом скорость маятника равна нулю),  
 $u$  - скорость, приобретенная системой маятник-пуля сразу после удара.

Маятник вместе с пулей, получив за счет неупругого удара импульс, отклоняется от положения равновесия на угол  $\alpha$ . В процессе отклонения на маятник действуют сила тяжести (вниз) и сила упругости подвеса (перпендикулярно направлению мгновенной скорости маятника). Если пренебречь потерями энергии на трение в подвесе и на сопротивление воздуха, то работу при отклонении маятника совершает только гравитационная сила. Это позволяет воспользоваться законом сохранения механической энергии:

$$\frac{(M + m)u^2}{2} = (M + m)gh, \quad (5)$$

где  $h$  - наибольшая высота, на которую поднимается маятник (рис. 2).

Слева в этой формуле стоит кинетическая энергия при поступательном движении маятника сразу после удара (в этой точке потенциальную энергию принимаем равной нулю), а справа – потенциальная энергия системы в момент ее остановки на высоте  $h$ .

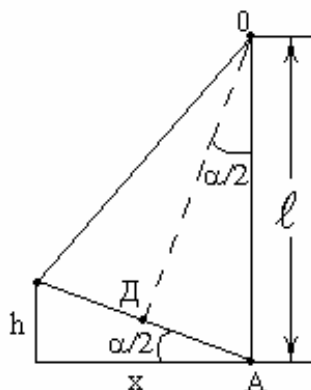


Рис. 2

Решая совместно уравнения (4) и (5) получим

$$v = \frac{(M + m)}{m} \sqrt{2gl} \quad (6)$$

Таким образом, найдя значение высоты подъема маятника можно рассчитать скорость полета пули.

### **Методика эксперимента**

Практическое измерение высоты подъема маятника затруднительно. По этому в лабораторном комплексе МУК-М1 предусмотрено измерение горизонтального смещения маятника  $x$ .

Выразим высоту  $h$  через соответствующее горизонтальное смещение маятника  $x$ , которое удобнее измерять. Предположим, что угол отклонения маятника от положения равновесия  $\alpha$  мал. Из рис.2. видно, что

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{h}{x} = \frac{AD}{DO} \approx \sin \frac{\alpha}{2} = \frac{AD}{AO} \approx \frac{x/2}{l} = \frac{x}{2l}, \quad (7)$$

где  $l$  - длина нити подвеса.

Из (7) получаем

$$h = \frac{x^2}{2l}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6) получим выражения для вычисления скорости пули  $v$  перед ударом

$$v = \frac{(M + m)}{m} x \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет, осуществив прямые измерения смещения маятника  $x$  и зная значения остальных величин, входящих в эту рабочую формулу, определить скорость пули  $v$

путем косвенных измерений. Измерив скорости для пуль с разными массами можно, следовательно, убедиться в справедливости теоретической зависимости (3).

### ***Рекомендуемое задание к работе***

1. Зарядите пружинный пистолет пуль с наибольшей массой.

2. Подготовьте устройство N (см. рис.1) к измерению горизонтального смещения маятника. Запишите численное значение начальной координаты  $x_{нач}$  маятника по линейке отсчетного устройства N.

3. Осуществите первый выстрел, нажав пусковой рычаг пружинного пистолета. Запишите численное значение конечной координаты  $x_{кон}$ , определив его по линейке отсчетного устройства N. Вычислите смещение маятника при первом опыте:

$$x = |x_{кон} - x_{нач}|.$$

4. Проведите измерения смещения маятника для пуль с другой массой (п. 3,4,5).

5. По формуле (9) получите оценку значения скорости пули  $v$  для пуль с используемыми массами.

6. Учитывая, что для проведенных опытов должна выполняться зависимость (3), постройте оси графика этой зависимости в координатах  $v, \sqrt{\frac{1}{m}}$  для диапазона численных значений, соответствующего используемым в опытах массам пуль и полученным для них скоростям. Сравните ход полученного графика с теоретическим.

### ***Список использованных источников***

1. Механика и термодинамика. Методические указания к вводному занятию и к лабораторным работам №0-6 по физике./ Сост.: А.В.Баранов, А.М. Погорельский, В.В.Христофоров, и др. – Новосибирск: НГТУ, 2004.