

Задача № 103 (Лабораторная работа 3.1)

Измерение скорости полёта тела с помощью баллистического маятника

При подготовке к выполнению этой задачи следует ознакомиться с теорией, используя пособия из списка литературы, рекомендованной по курсу, например:

1. Глава 3, И.В. Савельев «Курс общей физики», т.1, М., «Наука».
2. § 5 П.К. Кашкарров, А.В. Зотеев, А.Н. Невзоров, А.А. Склянкин «Задачи по курсу общей физики с решениями. «Механика. Электричество и магнетизм», М., изд. МГУ.

1. Цель работы

Целью данной работы является изучение законов сохранения в механике и их применение при решении практических задач.

Идея эксперимента

В работе предстоит определить скорость полёта пули тела, применив законы сохранения для случая её абсолютно неупругого соударения с «телом» баллистического маятника.

2. Теоретическая часть

Баллистическим маятником называется система в виде закреплённого на длинном подвесе массивного тела, используемая для экспериментального определения скорости полёта быстро движущихся тел.

При расчёте скорости полёта пули используются законы сохранения: 1) импульса (в приближении математического маятника) или момента импульса (в приближении физического маятника) на этапе соударения; и 2) полной механической энергии на этапе движения после его завершения.

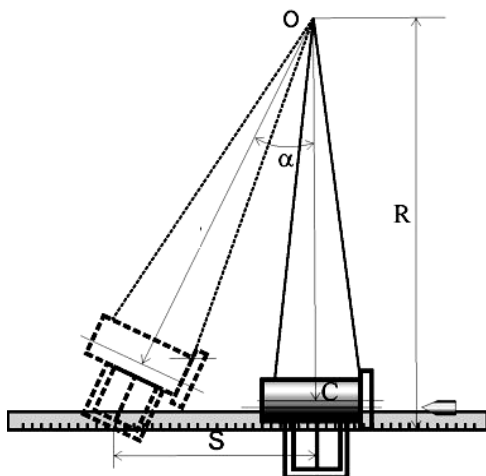


Рис. 103.1. Устройство баллистического маятника.

Существуют два предельных вида удара: абсолютно упругий и абсолютно неупругий. **Абсолютно упругим** называется такой удар, при котором механическая энергия тел не переходит в другие виды энергии (во «внутреннюю» – тепло, прежде всего). При таком ударе кинетическая энергия переходит полностью или частично в потенциальную энергию упругой деформации тел. Затем тела возвращаются к

первоначальной форме, отталкивая друг друга. В итоге потенциальная энергия

упругой деформации снова переходит в кинетическую энергию. В тех случаях, когда влиянием внешних сил или их моментов в процессе удара можно пренебречь для определения скоростей, с которыми тела разлетаются, следует использовать также законы сохранения импульса или момента импульса системы соответственно.

Абсолютно неупругий удар характеризуется тем, что после удара столкнувшиеся тела движутся совместно (с одинаковой скоростью). Кинетическая энергия тел полностью или частично превращается во внутреннюю энергию. При абсолютно неупругом ударе можно использовать лишь законы сохранения импульса или момента импульса. **Механическая же энергия не сохраняется**, сохраняется суммарная энергия различных видов, механической и внутренней.

При попадании в неподвижный цилиндр баллистического маятника с пластилиновой вставкой пуля испытывает абсолютно неупругое соударение. Поскольку длина нитей подвеса в рассматриваемом случае значительно больше размеров цилиндра маятника, маятник можно считать математическим. Тогда для расчёта скорости цилиндра с пулей сразу после удара можно применить закон сохранения импульса^{*)}:

$$m_0 v = (m + m_0) u, \quad (103.1)$$

После удара маятник с пулей начинают двигаться со скоростью u . При последующем отклонении маятника работу над телами системы совершают **только консервативные силы** (сила тяжести). Поэтому механическая энергия системы сохраняется – кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию гравитационного взаимодействия (в поле тяготения). Если за нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии принять горизонталь, проходящую через центры масс цилиндра и пули в момент начала их совместного движения, баланс энергий для данной механической системы выглядит так:

$$\frac{(m + m_0) u^2}{2} = (m + m_0) g h,$$

где h – высота подъёма центра масс тел при отклонения маятника от вертикали на максимальный угол α . Если использовать простую геометрическую связь между этими величинами:

$$h = \ell - \ell \cos \alpha,$$

то окончательно можно записать уравнение, соответствующее закону сохранения механической энергии в виде:

$$\frac{(m + m_0) u^2}{2} = (m + m_0) g \ell (1 - \cos \alpha). \quad (103.2)$$

Итак, мы пришли к равенствам (*) и (**) соответствующим **законам сохранения импульса и механической энергии для данной механической системы**. Наша задача получить расчётную формулу для определения скорости полёта пули

^{*)} В случае физического маятника придётся использовать закон сохранения *момента* импульса.

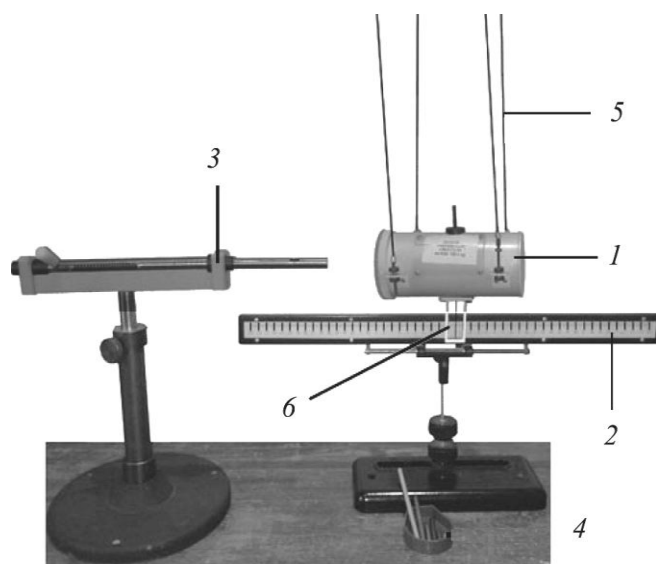
по результатам измерений максимального угла α отклонения баллистического маятника. Совместное решение системы уравнений (103.1) и (103.2) приводит к результату для скорости полёта пули:

$$v = \frac{m + m_0}{m} \sqrt{2g \cdot \ell \cdot (1 - \cos\alpha)} \quad \text{или, с учётом } 1 - \cos\alpha = 2\sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

$$v = \frac{m + m_0}{m} \sqrt{g \cdot \ell} \cdot 2\sin \frac{\alpha}{2}. \quad (103.3)$$

3. Экспериментальная установка

Установка состоит из баллистического маятника 1, шкалы 2 для отсчёта отклонений маятника, пружинной пушки 3, набора пуль (снарядов) 4 (рис. 103.2). Баллистический маятник – цилиндр, частично заполненный пластилином и подвешенный в горизонтальном положении на длинных и лёгких нитях 5.



Масса цилиндра с пластилином равна m . В маятник в горизонтальном направлении стреляют из пружинной пушки 3 пулей, имеющей массу m_0 . Пуля входит в пластилин и сообщает маятнику некоторую скорость, в результате чего маятник отклоняется на небольшой угол, который может быть измерен.

Шкалу 2, предназначенную для определения отклонения маятника, устанавливают параллельно отсчётной рамке 6 маятника, на расстоянии примерно 5–6 мм от нее.

Рис. 103.2. Экспериментальная установка.

Угол отклонения α маятника определяется по смещению L визира отсчётной рамки 6 в горизонтальном направлении (рис. 103.2). Он равен

$$\alpha = \arctg\left(\frac{L}{R}\right), \quad (103.15)$$

где R – расстояние от оси маятника до горизонтальной линии шкалы, вдоль которой измеряется смещение нити рамки. При малых углах можно считать, что $\alpha = L/R$.

4. Порядок проведения работы

Параметры установки:

Длина подвеса маятника:

$R = (\dots \pm 0,1) \text{ см.}$

Масса цилиндра маятника:

$m = (\dots \pm 0,1) \text{ кг.}$

Упражнение 1. Определение скорости полёта пули

Чтобы подготовить пушку к выстрелу, затвор отводят в крайнее положение. Вставляют пулю в дуло пистолета и задвигают её шомполом до касания пружины. Убедившись, что пуля после вылета из пушки попадет в маятник, производят выстрел. Для этого курок отводят вертикально вниз. Отклонения маятника определяют по шкале.

Измерения

1. Провести взвешивание пяти пуль. Результат для каждой пули m_0 записать в стандартной форме.

2. Производят выстрелы последовательно каждой из пуль. Результаты отсчёта отклонений маятника записать в табл. 103.1. Для каждой пули опыт повторить не менее пяти раз.

Экспериментальные данные Таблица 103.1

N пули	i , № экспери- мента	L_i , см	ΔL_i , см	$\langle \alpha \rangle \pm \Delta \alpha$, рад	$\langle v_i \rangle \pm \Delta v_i$, м/с	$1/v^2$, $1/(м/с)^2$
1	1					
	2					
	3					
	...					
...						

Обработка результатов

1. Для каждой пули (i) вычислите средние значения отклонения маятника и занесите в таблицу 103.1 частные отклонения от среднего значения.

2. Для каждой пули (i) по формуле (103.15)^{*)} определите угол отклонения α_i и оцените погрешность его определения.

3. По формуле (103.3) рассчитайте скорость полёта каждой пули

$$v = \frac{m + m_0}{m} \sqrt{g \cdot \ell} \cdot 2 \sin \frac{\alpha}{2}.$$

(Убедившись, что упрощённое равенство

$$v = \frac{m + m_0}{m} \sqrt{g \cdot \ell} \cdot \frac{L}{R} \quad (103.3a)$$

даёт тот же результат в пределах погрешностей, можно использовать его).

Оцените погрешность эксперимента и запишите результаты выполнения пп. 2–3 в стандартной форме в табл. 103.1.

^{*)} Убедившись, что упрощённое равенство $\alpha = L/R$ даёт тот же результат в пределах погрешностей, можно пользоваться им.

Упражнение 2. Исследование зависимости скорости полёта пули от её массы и определение потенциальной энергии сжатой пружины

В этом упражнении проводится лишь дополнительная обработка результатов измерений проведённых в упражнении 1.

Потенциальная энергия сжатой пружины пушки $U = \frac{k(\Delta l)^2}{2}$ (Δl – величина сжатия пружины) переходит в результате её выстрела в кинетическую энергию летящей пули, пружины и бойка. Если пренебречь потерями энергии за счёт работы сил трения в «стволе» пушки, то можно записать закон сохранения механической энергии в виде:

$$\frac{k(\Delta l)^2}{2} = \frac{m_0 v^2}{2} + b \frac{m_1 v^2}{2}, \quad (103.5)$$

где m_1 – масса пружины и бойка, b – коэффициент, зависящий от способа крепления и характера движения пружины и бойка, $b < 1$. Например, для однородной пружины $b = 1/3$. Преобразуем равенство (103.5) к виду

$$\frac{1}{v^2} = \frac{m}{k(\Delta l)^2} + b \frac{m_1}{k(\Delta l)^2}. \quad (103.6)$$

Согласно этому равенству, $\frac{1}{v^2}$ линейно зависит от массы m пули. Причём величина $a = \frac{1}{k\Delta l^2}$ играет роль углового коэффициента такой зависимости.

Определив из экспериментального графика $\frac{1}{v^2} = f(m)$ тангенс угла наклона, можно вычислить энергию сжатой пружины:

$$U = \frac{k(\Delta l)^2}{2} = \frac{1}{2a}. \quad (103.7)$$

Обработка результатов

1. Вычислить значения $f_i = \frac{1}{v_i^2}$ для каждой из пуль, используя данные табл. 103.1 и, занося их в ту же таблицу.

2. Построить зависимость данной величины от m и определить из линейной аппроксимации величину a . Рассчитать потенциальную энергию U сжатой пружины пушки и оценить соответствующие погрешности. Результаты записать в стандартной форме.

5. Основные итоги работы

В работе экспериментально измеряется скорость полёта пуль разной массы (не менее пяти). Также измеряют потенциальную энергию сжатой пружины.

6. Контрольные вопросы

1. Дайте определения понятий импульса и момента импульса для материальной точки и для твёрдого тела.
2. Дайте определения понятий момента силы относительно точки.
3. Сформулируйте закон сохранения импульса для системы материальных точек.
4. Сформулируйте закон сохранения момента импульса для системы материальных точек и для твёрдого тела.
5. Какие силы называются консервативными? Приведите примеры консервативных и неконсервативных сил.
6. Какие виды соударений называются абсолютно упругим и абсолютно неупругим ударом?
7. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.
8. Какие законы сохранения и на каких этапах движения применяются в данной задаче? Можно ли применить закон сохранения импульса, если в качестве баллистического используется физический, а не математический маятник?