

1. Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ ПРИ ПОМОЩИ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы

Определить скорость пули, используя законы сохранения импульса и механической энергии.

Приборы и принадлежности:

- 1) баллистический маятник;
- 2) пружинный пистолет;
- 3) отсчетная шкала;
- 4) набор пуль;
- 5) линейка.

Подготовка к работе

По лекциям и приведенному ниже списку литературы изучите следующие вопросы:

- 1) законы Ньютона;
- 2) понятие импульса системы, закон сохранения импульса;
- 3) консервативные и неконсервативные силы;
- 4) понятие энергии, закон сохранения механической энергии.

Вопросы для допуска к работе

1. Дайте определение импульса тела, импульса системы тел.
2. Запишите основной закон динамики поступательного движения.
3. Какие силы называются внешними, а какие – внутренними?
4. Какая система называется замкнутой?

5. Какие силы называются консервативными, какие – неконсервативными?

6. Сформулируйте закон сохранения импульса для одного тела и для системы тел.

7. Дайте понятия потенциальной энергии, кинетической энергии и полной механической энергии.

8. При каких условиях сохраняется полная механическая энергия системы?

Теоретическое введение

Законы Ньютона

В основе классической динамики лежат три закона Ньютона.

Законы Ньютона справедливы только для инерциальных систем отсчета.

Инерциальная система отсчета – это система отсчета, в которой тела, не подверженные воздействию других тел, движутся прямолинейно и равномерно или покоятся.

I закон Ньютона

Всякое тело находится в состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние.

II закон Ньютона

Второй закон Ньютона называют основным законом динамики поступательного движения. Он формулируется так: скорость изменения импульса тела равна действующей на тело результирующей силе:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i. \quad (1.1)$$

Сила $\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$ – векторная сумма всех сил, действующих на дан-

ное тело со стороны других тел.

$\vec{p} = m\vec{v}$ – импульс тела.

В частном случае, при $m = \text{const}$, второй закон Ньютона может быть записан в следующем виде:

$$\vec{F} = m\vec{a},$$

где \vec{a} – ускорение тела.

III закон Ньютона

Силы, с которыми взаимодействуют два тела, равны по модулю и противоположны по направлению. Подчеркнем, что эти силы приложены к разным телам (рис. 1.1).

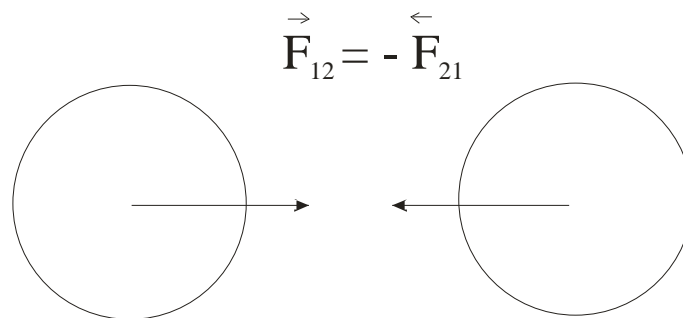


Рис. 1.1. Взаимодействие двух тел

Закон сохранения импульса

Используя второй и третий законы Ньютона, можно получить закон сохранения импульса.

Рассмотрим систему из n тел. К каждому из тел можно применить второй закон Ньютона (1.1). В правой части этого уравнения стоит

результатирующая сила, действующая на тело. Среди сил различают внутренние и внешние силы.

Внутренними силами называются силы, действующие на тела системы со стороны других тел этой системы.

Внешними называются силы, действующие на тела системы со стороны других тел, не входящих в систему.

Если уравнение (1.1) записать для каждого тела, входящего в рассматриваемую систему из n тел, то получим систему из n уравнений. Если сложить левые и правые части этих уравнений, получим уравнение, которое представляет собой в левой части сумму производных импульсов тел по времени, а в правой части – сумму всех сил, действующих на тела системы. По третьему закону Ньютона, сумма внутренних сил равна нулю. Если система замкнута (внешние силы отсутствуют), или сумма внешних сил равна нулю, то:

$$\sum_{i=1}^n \frac{d\vec{p}_i}{dt} = 0,$$

а поскольку сумма производных равна производной от суммы, то

$$\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n \vec{p}_i = 0.$$

Введем понятие импульса системы как векторную сумму импульсов всех тел, входящих в эту систему:

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i.$$

Тогда производная по времени от импульса системы равна нулю, т. е.

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = 0.$$

Отсюда следует, что $\vec{P} = \text{const}$.

Закон сохранения импульса формулируется так: *если векторная сумма внешних сил, действующих на систему, равна нулю, то импульс системы сохраняется. Сумма внешних сил равна нулю в двух случаях: а) система замкнутая (в этом случае внешние силы отсутствуют); б) внешние силы есть, но в сумме они дают нуль.*

Консервативные и неконсервативные силы

В механике рассматриваются консервативные и неконсервативные силы. Консервативными называются силы, работа которых не зависит от траектории, а определяется только начальным и конечным положением материальной точки. Силы, не обладающие таким свойством, называются неконсервативными.

Например, сила тяжести и упругая силы – это консервативные силы, а сила трения – неконсервативная сила.

Энергия. Закон сохранения механической энергии

В механике рассматривают энергию двух видов: кинетическую и потенциальную.

Кинетической энергией W_K называется энергия движущегося тела. Она зависит от скорости тела и в классической механике (при скоростях, малых по сравнению со скоростью света в вакууме) вычисляется по следующей формуле:

$$W_K = \frac{mv^2}{2}.$$

Потенциальная энергия W_{Π} – это энергия, обусловленная взаимным расположением тел или их частей. Она зависит от координат тела и определяется следующим образом.

Определение 1. *Потенциальная энергия – это функция координат, разность значений которой в двух точках равна работе консервативной силы, совершаемой при перемещении тела из одной точки в другую:*

$$W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2} = A_{1 \rightarrow 2}.$$

Определение 2. *Потенциальная энергия – это такая функция координат, минус градиент которой в каждой точке пространства равен вектору силы, действующей на тело:*

$$-\text{grad}W_{\Pi} = \vec{F}.$$

Данные определения равносильны друг другу и имеют смысл только для консервативного поля сил. Важно помнить, что абсолютное значение потенциальной энергии имеет смысл, только если задано начало ее отсчета. В качестве примера приведем выражение для потенциальной энергии тела, поднятого в однородном поле силы тяжести на высоту h :

$$W_{\Pi} = mgh.$$

Полная механическая энергия равна сумме кинетической и потенциальной энергий:

$$W = W_{\text{К}} + W_{\Pi}.$$

Полная механическая энергия системы тел сохраняется, если силы, действующие на тела системы, консервативны. Это утверждение и представляет собой закон сохранения полной механической энергии.

Если же в системе есть неконсервативные силы (типа сил трения), работа которых, как правило, отрицательна, то механическая энергия системы будет убывать, переходя в тепло:

$$W_1 - W_2 = Q_{1 \rightarrow 2};$$

В данной работе для определения скорости пули используется баллистический маятник. Баллистический маятник – это массивное тело, подвешенное на длинных нитях. В лабораторной работе этим телом является полый металлический цилиндр, заполненный пластилином. Обозначим массу этого цилиндра буквой M . В цилиндр стреляют из пружинного пистолета пулей массой m . Пуля, летящая со скоростью v , попадает в баллистический маятник и застревает в пластилине. Цилиндр маятника, висевший неподвижно, получает вследствие удара пули некоторый импульс и отклоняется от положения равновесия. Законы сохранения импульса и энергии позволяют связать скорость пули v с максимальным отклонением маятника. На рис. 1.2 изображена система «пуля – маятник» в трех важных для установления этой связи состояниях.

Состояние 1 – пуля вылетела из пистолета, но еще не долетела до мишени. Мишень неподвижна.

Состояние 2 – пуля попала в мишень, мишень вместе с пулей начали движение со скоростью u , отклонение маятника приблизительно равно нулю.

Состояние 3 – маятник отклонился на максимальный угол.

В процессе перехода системы из первого состояния во второе (процесс 1-2) сохраняется проекция полного импульса системы на горизонтальную ось, так как в момент удара горизонтальных внешних сил нет (сопротивлением воздуха пренебрегаем). Таким образом, горизонтальная проекция полного импульса системы до попадания пули в маятник $p_1 = mv$ будет равна горизонтальной проекции

полного импульса системы $p_2 = (m + M)u$ сразу после попадания пули в маятник:

$$mv = (m + M)u . \quad (1.2)$$

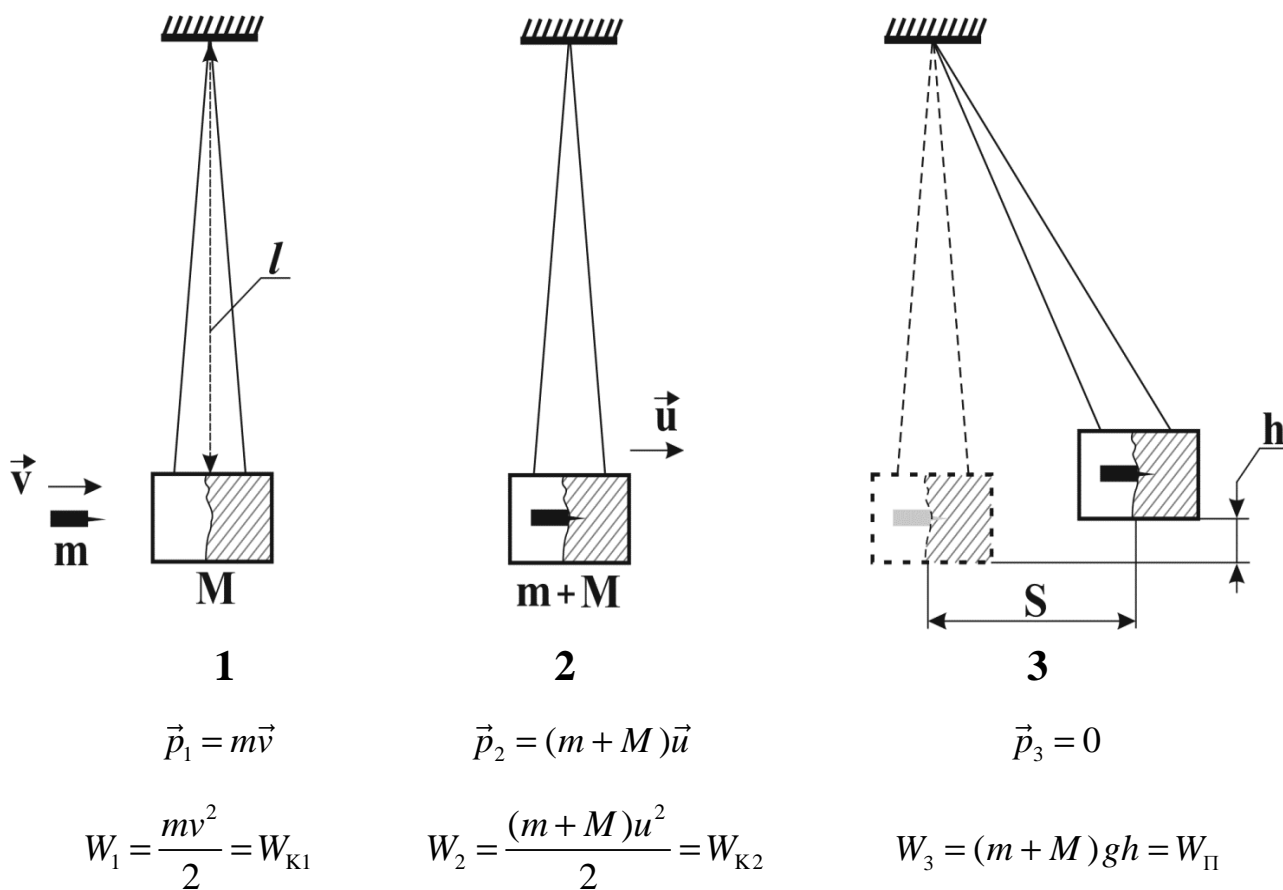


Рис. 1.2. Импульс и энергия маятника в трех состояниях

Таким образом, закон сохранения импульса связывает состояние 1 и состояние 2. Полная механическая энергия системы «пуля – маятник» в процессе 1-2 не сохраняется, так как при движении пули в пластине действуют неконсервативные силы (силы трения пули о пластину).

Убыль механической энергии равна выделившемуся в системе теплу (работе неконсервативных сил пластической деформации):

$$Q = \frac{mv^2}{2} - \frac{(m+M)u^2}{2}. \quad (1.3)$$

В процессе 2-3 (перехода из второго состояние в третье) работу совершают только консервативная сила тяжести, поэтому к процессу 2-3 можно применить закон сохранения полной механической энергии:

$$W_2 = W_3,$$

где $W_2 = \frac{(m+M)u^2}{2}$ – полная механическая энергия системы «пуля – маятник» в состоянии 2;

$W_3 = (m+M)gh$ – полная механическая энергия системы «пуля – маятник» в состоянии 3.

Приравнивая W_2 и W_3 , получим:

$$\frac{(m+M)u^2}{2} = (m+M)gh.$$

После сокращения на $(m+M)$ и очевидных преобразований имеем:

$$u = \sqrt{2gh}. \quad (1.4)$$

Таким образом, равенства (1.2) и (1.4) связывают между собой первое и третье состояние. Исключая из них промежуточный параметр u , получим:

$$v = \frac{m+M}{m} \sqrt{2gh}. \quad (1.5)$$

Высоту подъема маятника измерить труднее, чем горизонтальное смещение S (см. рис. 1.2), поэтому выразим эту величину через S и l , которые можно легко измерить (l – длина подвеса маятника)

$$h = l - l \cos \varphi = l(1 - \cos \varphi) = 2l \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

Если $l \gg S$, то $\sin \frac{\varphi}{2} \approx \frac{\varphi}{2} \approx \frac{S}{2l}$,

тогда $h = \frac{S^2}{2l}$.

Следовательно, можно получить рабочую формулу для определения скорости пули:

$$v = \frac{m + M}{m} S \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (1.6)$$

Здесь $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

В процессе любого измерения за счет различных воздействий, причины которых нам могут быть неизвестны, неизбежно появляются **случайные ошибки**.

Среднее значение скорости пули рассчитываем по формуле:

$$\langle v \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}, \quad (1.7)$$

где n – число экспериментов, выполненных при одинаковых значениях начальных параметров;

v_i – значение скорости, рассчитанное для каждого такого эксперимента.

Среднеквадратическая ошибка для скорости σ_v вычисляется по формуле:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \langle v \rangle)^2}{n(n-1)}}. \quad (1.8)$$

Порядок выполнения работы

1. Измерьте длину подвеса маятника, значение массы маятника указано на цилиндре.
2. Отметьте по шкале отсчетной линейки положение указателя x_0 при неподвижном маятнике.
3. Оттяните поршень пистолета до конца, тем самым его зафиксировав. Вставьте пулю в ствол пистолета до упора таким образом, чтобы острый ее конец был обращен к маятнику.
4. Произведите выстрел из пистолета, для чего опустите курок вниз. Определите положение указателя x при максимальном отклонении маятника. Найдите смещение цилиндра $S = x - x_0$.
5. Опыт произведите три раза. При повторных выстрелах пистолет необходимо привести в начальное положение (т. е. выстрел производить по неподвижному маятнику).
6. Повторите пункты 1–5 с пулями другой массы.
7. Вычислите скорость пули по формуле (1.6).
8. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 1.1.
9. Вычислите погрешности измерений.
10. Сформулируйте и запишите вывод по данной лабораторной работе.

Таблица 1.1

Масса маятника $M =$		кг,		длина подвеса $l =$		м			
№ пули	масса пули	№ выстрела	$x_0,$ мм	$x,$ мм	$S,$ м	$v_i,$ м/с	$\langle v \rangle,$ м/с	$\Delta v,$ м/с	$\sigma,$ м/с
1		1							
		2							
		3							
2		1							
		2							
		3							
3		1							
		2							
		3							

Контрольные вопросы

1. Изобразите лабораторную установку в трех важных для вывода рабочей формулы состояниях.

2. Под каждым рисунком напишите формулы для полного импульса и полной энергии системы «пуля – маятник» в соответствующем состоянии.

3. Что называется полным импульсом системы? При каком условии полный импульс системы сохраняется? В каком из процессов нашей лабораторной работы полный импульс сохраняется?

4. Что называется полной механической энергией системы? При каком условии полная механическая энергия системы сохраняется? В каком из процессов нашей лабораторной работы полная механическая энергия сохраняется?

5. Используя ответы на предыдущие вопросы, выведите формулу, связывающую скорость пули с высотой поднятия маятника.

Список литературы

1. Тюшев А. Н., Вылегжанина В. Д. Курс лекций по физике. Ч. 1. Механика : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2011. – 144 с.
2. Трофимова Т. И. Курс физики : учеб. пособие. – М. : Академия, 2015. – 560 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика [Электронный ресурс] : учеб. пособие. – СПб. : Лань, 2016. – 436 с. – Режим доступа : http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=71760.