

## Работа 10

### ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

**Цель работы:** Определение скорости шарика в результате неупругого удара с баллистическим маятником.

#### Введение

Баллистический маятник представляет собой уловитель, в виде массивного цилиндра, прикрепленного к стальному стержню. Верхний конец которого закреплен к оси вращения маятника. Горизонтально летевший шарик попадает в неподвижный уловитель и застревает в нем, происходит неупругий удар. После удара маятник с шариком начнет двигаться и отклонится на некоторый угол, измерив который можно определить скорость шарика до попадания.

Ударом называется конечное изменение скоростей тел за весьма малый промежуток времени, происходящее при их столкновении.

Существуют два предельных вида удара: абсолютно упругий и абсолютно неупругий. **Абсолютно упругим** называется такой удар, при котором механическая энергия тел не переходит в другие, немеханические, виды энергии. При таком ударе кинетическая энергия переходит полностью или частично в потенциальную энергию упругой деформации. Затем тела возвращаются к первоначальной форме, отталкивая друг друга. В итоге потенциальная энергия упругой деформации снова переходит в кинетическую энергию, причем тела разлетаются со скоростями, величина и направление которых определяются двумя условиями - сохранением полной энергии и сохранением полного импульса системы тел и момента полного импульса.

**Абсолютно неупругий** удар характеризуется тем, что потенциальной энергии деформации не возникает, кинетическая энергия тел полностью или частично превращается во внутреннюю энергию и после удара столкнувшиеся тела либо движутся с одинаковой скоростью, либо покоятся. При абсолютно неупругом

ударе выполняется лишь законы сохранения импульса и момента импульса, закон же сохранения механической энергии не соблюдается - имеет место закон сохранения суммарной энергии различных видов, механической и внутренней.

*В момент попадания в неподвижный цилиндр баллистического маятника с конусом-уловителем шарик испытывает неупругий удар. После удара маятник с шариком начнет двигаться.*

До момента попадания шарика в уловитель на систему не действуют никакие силы в горизонтальном направлении (в пренебрежении сопротивлением воздуха). В этом случае момент внешних сил (тяжести и реакции подвеса) относительно оси вращения равен нулю, следовательно, выполняется закон сохранения момента импульса, момент импульса замкнутой системы относительно оси вращения маятника остается постоянным.

В начальный момент удара угловая скорость стержня равна нулю. Таким образом, момент импульса шарика, который может быть рассчитан как момент импульса материальной точки относительно оси маятника, до удара будет равен моменту импульса маятника с застрявшим в нем шариком сразу же после удара. В конечный момент удара стержень имеет угловую скорость  $\omega$ , а шарик с уловителем – линейную скорость  $u$ , равную линейной скорости точек стержня, находящихся на расстоянии  $l$  от оси вращения.

$$mvl = I_{\text{сист}} \omega, \quad (1)$$

где  $I_{\text{сист}}$  – момент инерции системы относительно точки оси вращения, равный сумме моментов инерции, составляющих систему тел относительно той же точки:

$$I_{\text{сист}} = I_{\text{ш}} + I_{\text{ул}} + I_{\text{ст}}. \quad (2)$$

Момент инерции шарика и уловителя (рассматриваем их как материальные точки) относительно оси вращения стержня по теореме Штейнера можно записать в виде:

$$I_{\text{ш}} + I_{\text{ул}} = ml^2 + Ml^2, \quad (3)$$

где  $m$  и  $M$  – массы шарика и уловителя;  $l$  – длина маятника.

Момент инерции стержня относительно точки оси вращения по теореме Штейнера равен:

$$I_{cm} = I_{0cm} + m_{cm} \left( \frac{l}{2} \right)^2 = m_{cm} \frac{l^2}{12} + m_{cm} \frac{l^2}{4} = \frac{1}{3} m_{cm} l^2. \quad (4)$$

Таким образом,

$$I_{сум} = (m + M)l^2 + \frac{1}{3} m_{cm} l^2. \quad (5)$$

Так как, линейная скорость точек стержня находящихся на расстоянии  $l$  от оси вращения связана с угловой скоростью маятника  $\omega$  соотношением  $V = \omega l$ , то выражение (1) с учетом (3) можно записать как

$$mvl = (m + M)Vl + \frac{1}{3} m_{cm} Vl. \quad (6)$$

Отсюда получим выражение для скорости:

$$v = \frac{m + M + \frac{1}{3} m_{cm}}{m} V. \quad (7)$$

Кинетическая энергия вращательного движения системы после попадания шарика в цилиндр равна

$$T = \frac{1}{2} I_{сум} \omega^2 = \frac{1}{2} (m + M + \frac{1}{3} m_{cm}) V^2. \quad (8)$$

Так как удар неупругий, то в процессе удара механическая энергия не сохраняется. Однако после удара механическая энергия системы шарик-маятник будет сохраняться, так как силы действующие на систему будут консервативны. Сопротивлением воздуха и трением в точке вращения пренебрегаем. В соответствии с законом сохранения механической энергии кинетическая энергия движения переходит в потенциальную энергию сил тяжести. При максимальном его отклонении баланс энергий выглядит так:

$$T = U = U_{cm} + U_{ш+у}, \quad (9)$$

где  $U_{cm} = m_{cm} gh_1$  и  $U_{ш+у} = (m + M)gh$  – потенциальные энергии стержня и шарика с уловителем в поле силы тяжести. В результате подъема маятник отклонится на максимальный угол  $\varphi$ . Центр масс шарик+уловитель поднимется на высоту

$$h = l(1 - \cos \varphi), \quad (10)$$

а центр масс стержня на высоту

$$h_1 = \frac{l}{2}(1 - \cos \varphi) . \quad (11)$$

Приравняв правые части (8) и (9) с учетом (10) и (11), получим выражение для скорости движения маятника после столкновения  $V$  :

$$V = \sqrt{\frac{m + M + \frac{1}{2}m_{cm}}{m + M + \frac{1}{3}m_{cm}}} 2gl(1 - \cos \varphi) . \quad (12)$$

Воспользовавшись (7), можно получить расчетную формулу для определения скорости шарика:

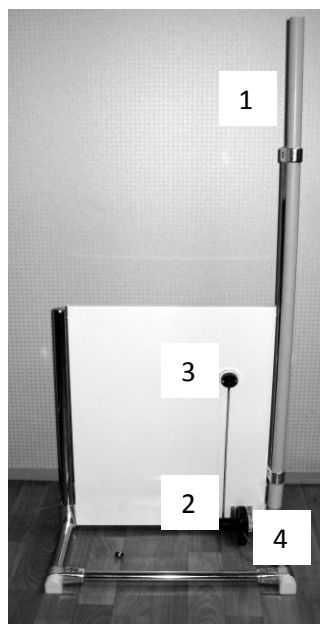
$$v = \frac{1}{m} \sqrt{(m + M + \frac{1}{2}m_{cm})(m + M + \frac{1}{3}m_{cm})} 2gl(1 - \cos \varphi_{\max}) . \quad (13)$$

В работе определяется скорость шарика с помощью баллистического маятника.

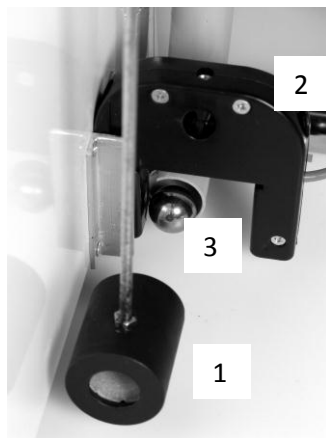
### Методика выполнения работы

Лабораторный стенд (рис.1) включает направляющую трубу (рис.1-1) для фиксации траектории движения шарика, баллистический маятник с конусом – уловителем (рис.1-2 и рис.2-1), датчик угла отклонения маятника на его оси (рис.1-3 и рис.3), оптический датчик (рис.1-4 и рис.2-2) для определения скорости вылета шарика.

К приборам и принадлежностям относятся также компьютер с необходимым программным обеспечением, концентратор для подключения датчика к компьютеру и металлический шарик (рис. 2-3).



Для определения скорости шарика используется баллистический маятник, который представляет собой массивный корпус с внутренним конусом – уловителем (рис. 2-1), соединенный с помощью стального стержня (рис.2-4) с осью маятника, угол поворота которой измеряется датчиком угла отклонения.



Для проведения эксперимента необходимо опустить шарик в верхнее приемное отверстие направляющей трубы. За счет изгиба нижнего колена трубы шарик вылетает из него в горизонтальном направлении. Регистрация времени перекрытия шариком оптической оси оптического датчика (рис.2-2) позволяет определить скорость его движения оптическим способом:

$$v = \frac{d_{ш}}{t_{шм}}, \quad (14)$$

фиксация максимального угла отклонения дает возможность определить эту скорость методом баллистического маятника (13).

### Порядок выполнения работы




1. Перенесите в таблицу измерений данные о массе шарика  $m$ , его диаметре  $d_{ш}$  массе уловителя  $M$ , массе стержня  $m_{ст}$  и длине подвеса маятника  $\ell$ , если они отличаются от указанных величин на Вашей лабораторной установке.

Таблица 1

$m = 24,9 \pm 0,1 \text{ г}, d_{ш} = 18,3 \text{ мм} \quad M = 102,8 \pm 0,1 \text{ г} \quad m_{ст} = 28,9 \pm 0,1 \text{ г},$ $\ell = 390 \pm 5 \text{ мм}$
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2. Соберите лабораторную установку, поместив оптический датчик на пути вылета шарика из направляющей трубки.

**ВАЖНО!** При настройке лабораторного оборудования необходимо расположить датчик таким образом, чтобы его оптическая ось пересекала середину (диаметр) шарика при движении последнего.

3. Подключите датчик углового положения и оптический датчик к обоим входам концентратора, присоединив последний к USB – входу компьютера.
4. После включения компьютера запустите программу «Практикум по физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий проведения эксперимента (Alt+C) .
5. Запустите измерения для выбранных датчиков (Ctrl+S)  и сразу, непосредственно вслед за запуском произведите сброс шарика в приемное отверстие направляющей трубки.
6. После отклонения маятника на максимальный угол остановите измерения (Ctrl+T) .
7. Проведите обработку полученных данных в соответствии со сценарием, для чего:
  - выделите область импульса перекрытия для ее детального просмотра с увеличенным масштабом (Alt+левая кнопка мыши);
  - измерьте время пролета шарика через ось оптического датчика путем постановки желтого маркера (левая клавиша мыши) на задний фронт и зеленого маркера (правая клавиша мыши) на передний фронт импульса перекрытия;
  - выделите область изменения угла отклонения маятника для ее детального просмотра с увеличенным масштабом (Alt+левая кнопка мыши);
  - измерьте значение максимального угла отклонения маятника как разность между пиковым и начальным его значениями. Для определения значения угла используйте желтый маркер (левая клавиша мыши), либо цифровой протокол показаний датчика.
8. Повторите эксперимент в соответствии с п.п. 5-7 еще 4 раза. Результаты измерений запишите в таблицу 2.
9. Используя полученные результаты, определите скорость шарика  $v_{\text{опт}}$  для каждого из пяти опытов. Найдите среднее значение скорости  $\langle v_{\text{опт}} \rangle$ , полученное оптическим методом.
10. Определите скорость шарика  $v_{\text{б.м}}$  для каждого из пяти опытов. Найдите среднее значение скорости  $\langle v_{\text{б.м}} \rangle$ , полученное методом баллистического маятника.
11. Используя правила оценки погрешностей косвенных измерений, определите погрешности оценок скоростей шарика

при оптическом методе и методе баллистического маятника. Сравните полученные результаты.

Таблица 2.

к, номер опыта	Длительность импульса перекрытия $t_{к\text{ имп, с}}$	Скорость шарика (14) $v_{к\text{ опт, м/с}}$	Средняя скорость шарика (14) $\langle v_{\text{опт}} \rangle,$ м/с	Максимальный угол отклонения маятника $\varphi_{к\text{ max, град}}$	Скорость шарика (13) $v_{к\text{ б.м.}, м/с}$	Средняя скорость шарика (13) $\langle v_{\text{б.м.}} \rangle,$ м/с
1						
2						
3						
4						
5						

12. Напишите заключение к работе.

### Контрольные вопросы

1. Что называется мгновенной скоростью материальной точки?
2. Дайте определения понятий силы, массы и количества движения (импульса) и момента импульса.
3. Сформулируйте законы Ньютона и расскажите о границах применения этих законов.
4. Какая система называется замкнутой?
5. Сформулируйте закон сохранения проекции количества движения (импульса).
6. Какие силы называются консервативными? Приведите примеры консервативных и диссипативных сил.
7. Какие виды соударений называются абсолютно упругим и абсолютно неупругим ударом?
8. Дайте формулировку закона сохранения энергии в механике. Какие системы называются консервативными?

9. Сформулируйте закон сохранения энергии в общем виде.

Предварительно