Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Факультет: «Фундаментальные науки»
Кафедра «Физика»

Инфимовский Ю.Ю.
Селиванов А.В.

Лабораторная работа М-111

Измерение скорости тела методом баллистического маятника

Методическое руководство

Москва, 2024

Измерение скорости тела методом баллистического маятника



Рис.1

1. Цель лабораторной работы

Цель данной работы заключается в изучении законов сохранения количества движения и полной механической энергии и их применении при решении практических задач.

2. Задачи лабораторной работы

Задачей работы является определение скорости шарика с помощью баллистического маятника.

3. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности

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).

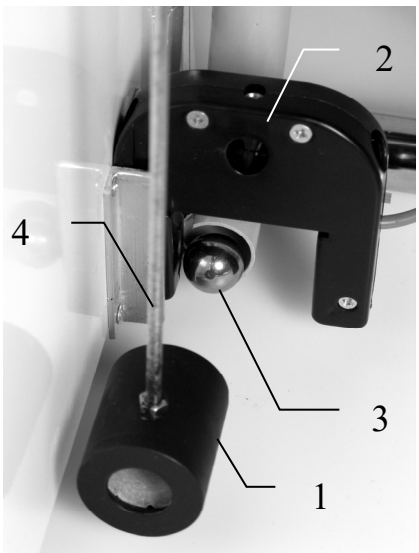


Рис.2

4. Теоретическая часть

Вывод расчетной формулы основан на использовании законов сохранения полной механической энергии и сохранения момента импульса при неупругом ударе.

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

В процессе деформации тел при ударе возникают мгновенные (ударные) силы, величина которых весьма значительна. Для системы соударяющихся тел эти силы являются внутренними. Их импульсы за время продолжительности удара называются мгновенными импульсами. Они во много раз больше импульсов за то же время всех внешних сил, приложенных к системе. Поэтому в процессе удара влиянием внешних сил можно пренебречь и считать, что система соударяющихся тел является замкнутой, т.е. в ней выполняется законы сохранения импульса (количества движения системы) и момента импульса.

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). Следовательно, момент импульса системы относительно оси вращения маятника остается постоянным.

$$mv\ell = (M + m)u\ell + J_{cm}\omega, \qquad (1)$$

где m и M – массы шарика и уловителя; v и u – скорости шарика до столкновения и шарика вместе с уловителем после столкновения; ℓ - длина

маятника; J_{cm} – момент инерции стержня 4 (рис.2), связывающего корпус уловителя с осью вращения маятника. Считая в первом приближении, что длина стержня равна расстоянию от оси до середины уловителя, т.е. ℓ, воспользуемся формулой для оценки осевого момента инерции стержня относительно его торца:

$$J_{cm} = \frac{1}{3} m_{cm} \ell^2 \tag{2}$$

Здесь m_{cm} – масса стержня. Угловая скорость маятника после удара определяется из кинематики вращательного движения:

$$\omega = u / \ell . \tag{3}$$

С учетом (3) после подстановки (2) в (1) получим выражение для скорости v:

$$v = \frac{m + M + \frac{1}{3} m_{cm}}{m} u \tag{4}$$

Кинетическая энергия вращательного движения системы после попадания шарика в цилиндр равна

$$T = \frac{1}{2} J_{сист} \omega^2 = \frac{1}{2} ((m + M)\ell^2 + J_{cm})\omega^2 \tag{5}$$

После подстановки выражений (2) и (3) получим:

$$T = \frac{1}{2} (m + M + \frac{1}{3} m_{cm}) u^2 \tag{6}$$

При последующем отклонении маятника в соответствии с законом сохранения механической энергии кинетическая энергия его движения переходит в потенциальную энергию сил тяжести. При максимальном его отклонении баланс энергий выглядит так:

$$T = \Pi((m + M)\vec{g}) + \Pi(m_{cm}\vec{g}), \tag{7}$$

где $\Pi((m + M)\vec{g})$ и $\Pi(m_{cm}\vec{g})$ - потенциальные энергии сил тяжестей шарика с уловителем и стержня. Они определяются максимальным ростом их высот относительно своих нижних положений:

$$\Pi((m + M)\vec{g}) = (m + M) g (\ell - \ell \cos\varphi_{\max}); \quad \Pi(m_{cm}\vec{g}) = m_{cm} g (\frac{\ell}{2} - \frac{\ell}{2} \cos\varphi_{\max}) \tag{8}$$

Во второй формуле в (8) введены коэффициенты 1/2 для учета положения центра тяжести стержня относительно оси вращения.

Приравняв правые части (6) и (7) с учетом (8), получим выражение для скорости движения маятника после столкновения u:

$$u = \sqrt{\frac{m + M + \frac{1}{2} m_{cm}}{m + M + \frac{1}{3} m_{cm}} 2 g \ell (1 - \cos\varphi_{\max})} \tag{9}$$

Воспользовавшись (4), можно получить расчетную формулу для определения скорости шарика:

$$v = \frac{1}{m}\sqrt{(m + M + \frac{1}{2}m_{ст})(m + M + \frac{1}{3}m_{ст})2g\ell(1 - \cos\varphi_{\max})} \qquad (10)$$

5. Описание лабораторной установки



Рис.3



Рис.4

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 (рис.3), угол поворота которой измеряется датчиком угла отклонения.

Для проведения эксперимента необходимо опустить шарик в верхнее приемное отверстие направляющей трубы (рис.4). 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:

$$v = \frac{d_ш}{t_{имп}}, \qquad (11)$$

фиксация максимального угла отклонения дает возможность определить эту скорость методом баллистического маятника (10).

6. Порядок проведения лабораторной 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 ℓ, если они отличаются от указанных величин на Вашей лабораторной установке.

Таблица 1

$m = 25 \pm 0{,}1$г, $d_ш = 18{,}3$мм $M = 42 \pm 0{,}1$г $m_{ст} = 37 \pm 0{,}1$г, $\ell = 520 \pm 5$ мм

2. Соберите лабораторную установку, вставив верхнюю часть направляющей трубы в соединительную муфту. Поместите оптический датчик на пути вылета шарика из нижней части 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 компьютеру.

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.

Таблица 2

k, номер опыта	Длительность импульса перекрытия $t_{k\ имп}$, с	Скорость шарика (11) $v_{k\ опт}$, м/с	Средняя скорость шарика (11) $\langle v_{опт} \rangle$, м/с	Максимальный угол отклонения маятника $\varphi_{k\ max}$, град	Скорость шарика (10) $v_{k\ б.м.}$, м/с	Средняя скорость шарика (10) $\langle v_{б.м.} \rangle$, м/с
1						
2						
3						
4						
5						

7. Обработка результатов измерений

1. Используя полученные результаты, определите скорость шарика $v_{опт}$ для каждого из пяти опытов. Найдите среднее значение скорости $<v_{опт}>$, полученное оптическим методом.
2. Определите скорость шарика $v_{б.м}$ для каждого из пяти опытов. Найдите среднее значение скорости $<v_{б.м.}>$, полученное методом баллистического маятника.
3. Используя правила оценки погрешностей косвенных измерений, определите погрешности оценок скоростей шарика при оптическом методе и методе баллистического маятника. Сравните полученные результаты.
4. Запишите окончательный результат работы в виде

$$v_{опт} = <v_{опт}> \pm \Delta v_{опт}) \text{ м/с}, \ \delta v_{опт} = \ldots \%,$$
$$v_{б.м} = <v_{б.м.}> \pm \Delta v_{б.м}) \text{ м/с}, \ \delta v_{б.м} = \ldots \%,$$

где вместо $<v>$ и Δv следует подставить полученные Вами численные значения этих величин, а δv указывает относительную погрешность Ваших измерений.

8. Указания по технике безопасности

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.
2. Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".

9. Контрольные вопросы

1. Оцените максимально возможное значение скорости шарика при вылете из трубки в данной установке и сравните его с полученными в ходе работы экспериментальными результатами.
2. Что называется мгновенной скоростью материальной точки?
3. Дайте определения понятий силы, массы и количества движения (импульса) и момента импульса.
4. Сформулируйте законы Ньютона и расскажите о границах применения этих законов.
5. Какая система называется замкнутой?
6. Сформулируйте закон сохранения проекции количества движения (импульса).
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.
10. Расскажите о взаимосвязи используемых в работе законов сохранения со свойствами пространства и времени.