Министерство образования Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2м.1

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

МЕТОДИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ

Минск 2022

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2м.1

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы:

1. Ознакомиться с баллистическим методом определения скорости быстродвижущихся тел.
2. Изучить законы изменения и сохранения момента импульса и полной механической энергии системы.
3. Измерить скорость пули с помощью баллистического маятника.

ВНИМАНИЕ! В данной работе используется пружинный пистолет, поэтому при выполнении практической части задания следует строго соблюдать технику безопасности:

1) в отсутствие пули в стволе сжать пружину пистолета, зафиксировать ее штифтом и, не отпуская, удерживать его рукой до момента выстрела;
2) вставить в ствол пулю;
3) убедиться, что в направлении выстрела не находится человек, и поднятием штифта произвести выстрел в сторону маятника.

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Определение скорости быстродвижущегося тела (пули или снаряда) по измерению времени и расстояния, которое проходит данное тело за это время, является весьма сложной задачей из-за достаточно большого значения скорости (скорость полета пули из пневматического ружья составляет 50–200 м/с, а боевой винтовки – 800–1000 м/с). Поэтому на практике применяют другие методы, среди которых широко распространен баллистический метод.

В основе баллистического метода измерения скорости быстродвижущегося тела лежит его абсолютно неупругое соударение с первоначально покоившимся массивным телом – баллистическим маятником. После соударения маятник и остановившееся в нем тело начинают совершать колебания как единое целое со сравнительно меньшими скоростями. Применение законов изменения и сохранения импульса, момента импульса и полной механической энергии системы позволяет установить соотношение между скоростью быстродвижущегося тела и характеризующими колебательное движение маятника величинами. Таким образом, баллистический метод позволяет свести измерение скорости быстродвижущегося тела к измерению периода колебаний, их амплитуды и т. д.

В данной лабораторной работе баллистический маятник представляет собой физический маятник, поэтому выражение первоначальной скорости быстродвижущегося тела через измеряемые характеристики колебаний можно получить, воспользовавшись законами изменения и сохранения момента импульса и полной механической энергии системы.

Момент импульса частицы относительно точки *O* – векторная величина $\vec{L}_O$, равная векторному произведению радиус-вектора $\vec{r}$, проведенного из точки *O* в место нахождения этой частицы, и вектора ее импульса $\vec{p}$:

$$\vec{L}_O = [\vec{r},\, \vec{p}] = [\vec{r}, m\vec{\upsilon}], \qquad (1)$$

где m и $\vec{\upsilon}$ – масса и скорость частицы соответственно.

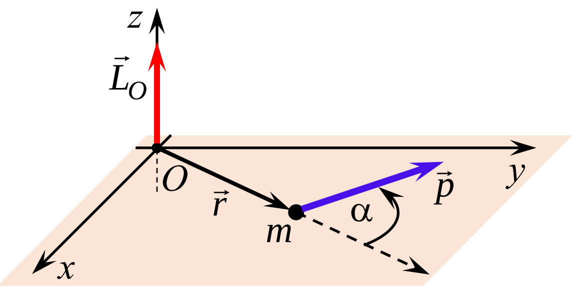

Рис. 1

По определению (1) векторы $\vec{r}$, $\vec{p}$ и $\vec{L}_O$ образуют правовинтовую систему (рис. 1), т. е. вектор $\vec{L}_O$ перпендикулярен плоскости, в которой лежат векторы $\vec{r}$ и $\vec{p}$, а направление $\vec{L}_O$ можно определить по правилу правой руки: если четырьмя пальцами правой руки по кратчайшему углу поворачивать первый множитель вектор $\vec{r}$ ко второму множителю вектору $\vec{p}$, то отогнутый большой палец укажет направление вектора $\vec{L}_O$.

Модуль L_O равен:

$$L_O = r \cdot p \cdot \sin\alpha = r \cdot m\upsilon \cdot \sin\alpha,$$

где α – величина угла между $\vec{r}$ и $\vec{p}$.

В СИ [L] = кг·м^2/с = Дж·с.

Момент импульса относительно неподвижной оси *Oz* – скалярная величина L_z, равная проекции на эту ось момента импульса $\vec{L}_O$ относительно точки *O*, принадлежащей данной оси:

$$L_z = \left[\vec{L}_O\right]_{\text{проекция на } Oz}. \qquad (2)$$

Момент импульса L_z вращающегося вокруг неподвижной оси *Oz* твердого тела относительно этой оси равен:

$$L_z = I \cdot \omega_z, \qquad (3)$$

где I – момент инерции тела относительно оси вращения *Oz* (определение I приведено в лабораторной работе № 2м.3 настоящего пособия);

ω_z – проекция на ось *Oz* угловой скорости тела.

Момент импульса системы *n* частиц относительно точки *O* − величина, равная:

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^{n} \vec{L}_i = \sum_{i=1}^{n} [\vec{r}_i, \vec{p}_i], \qquad (4)$$

где $\vec{L}_i = [\vec{r}_i, \vec{p}_i]$ − момент импульса *i*-й частицы относительно точки *O*;

$\vec{r}_i$ и $\vec{p}_i$ − соответственно радиус-вектор и импульс *i*-й частицы.

Закон изменения момента импульса системы: производная по времени момента импульса системы относительно некоторой неподвижной точки равна сумме моментов всех внешних сил, действующих на эту систему, относительно той же самой точки:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum_{j=1}^{N} \vec{M}_j^{\text{внеш}}, \tag{5}$$

где $\vec{L}$ – момент импульса системы относительно некоторой неподвижной точки;

$\vec{M}_j^{\text{внеш}}$ – момент j-й внешней силы, одной из N действующих на систему внешних сил, относительно той же точки.

Момент силы $\vec{M}_O$ **относительно точки** O определяется как векторное произведение радиус-вектора $\vec{r}$, проведенного из точки O в точку приложения силы $\vec{F}$, и вектора этой силы:

$$\vec{M}_O = \left[\vec{r}, \vec{F}\right].$$

Из (1.5) следует **закон сохранения момента импульса системы**: если суммарный момент всех действующих на систему внешних сил относительно некоторой неподвижной точки равен нулю, то момент импульса данной системы относительно той же точки со временем сохраняется, т. е. $\vec{L} = \overrightarrow{\text{const}}$.

Кинетическая энергия W^k материальной точки – часть механической энергии, зависящая от скорости движения этой материальной точки:

$$W^k = \frac{m\upsilon^2}{2}, \tag{6}$$

где m и $\vec{\upsilon}$ – соответственно масса и скорость материальной точки.

Кинетическая энергия W^k **твердого тела**, вращающегося с угловой скоростью $\vec{\omega}$ вокруг неподвижной оси:

$$W^k = \frac{I\omega^2}{2}, \tag{7}$$

где I – момент инерции тела относительно данной оси.

Кинетическая энергия W^k **механической системы** – это сумма кинетических энергий всех частей этой системы:

$$W^k = \sum_{i=1}^{n} W_i^k, \tag{8}$$

где W_i^k – кинетическая энергия i-й части системы, одной из n ее частей.

Полная механическая энергия W **системы взаимодействующих материальных точек, находящихся во внешнем стационарном потенциальном поле** – величина, равная:

$$W = W^k + W^p_{\text{вз.внут}} + W^p_{\text{внеш}}, \tag{9}$$

где W^k – кинетическая энергия системы;

$W^p_{\text{вз.внут}}$ – потенциальная энергия взаимодействия материальных точек системы друг с другом (собственная потенциальная энергия);

$W^p_{\text{внеш}}$ – потенциальная энергия системы во внешнем стационарном потенциальном поле, равная сумме потенциальных энергий всех материальных точек системы в этом поле.

Центр тяжести твердого тела – точка C, относительно которой сумма моментов сил тяжести, действующих на все части данного тела, равна нулю. Центр тяжести однородного тела, имеющего центр симметрии, находится в этом центре. В однородном поле силы тяжести положение центра тяжести тела совпадает с положением его центра масс (центра инерции).

Центр масс (инерции) системы n частиц – точка C, радиус-вектор $\vec{r}_C$ которой вычисляется как:

$$\vec{r}_C = \frac{m_1\vec{r}_1 + m_2\vec{r}_2 + \ldots + m_n\vec{r}_n}{m_1 + m_2 + \ldots + m_n} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{n} m_i\vec{r}_i\,, \qquad (10)$$

где m_i и $\vec{r}_i$ – соответственно масса и радиус-вектор i-й частицы;

$m = \sum_{i=1}^{n} m_i$ – масса системы.

В случае твердого тела дискретная сумма в формуле (10) заменяется определенным интегралом, в котором интегрирование проводится по всем точкам пространственной области, занятой телом.

Потенциальная энергия W^p **твердого тела в однородном поле силы тяжести** определяется расстоянием h между его центром тяжести и произвольно выбранной горизонтальной плоскостью, обладающей следующим свойством: если центр тяжести тела принадлежит данной плоскости (нулевому уровню), то потенциальная энергия этого тела обращается в нуль $(W_0^p = 0)$:

$$W^p = \pm mgh, \qquad (11)$$

где m – масса тела; g – модуль ускорения свободного падения.

Знак «+» в выражении (11) соответствует случаю, когда центр тяжести тела расположен **над** выбранным нулевым уровнем потенциальной энергии, а знак «–» – **под** ним.

Сторонними называются действующие на находящуюся в стационарном потенциальном поле систему внешние силы, не являющиеся силами этого поля.

Закон изменения полной механической энергии системы: изменение полной механической энергии ΔW системы взаимодействующих материальных точек, находящихся во внешнем стационарном потенциальном поле, равно сумме работы $A_{\text{внеш}}^{\text{стор}}$ всех внешних сторонних сил и работы $A_{\text{внут}}^{\text{некон}}$ внутренних неконсервативных сил:

$$\Delta W = A_{\text{внеш}}^{\text{стор}} + A_{\text{внут}}^{\text{некон}}. \qquad (12)$$

Из последнего равенство очевидно вытекает закон сохранения полной механической энергии.

Закон сохранения полной механической энергии системы: если на систему не действуют внутренние неконсервативные и внешние сторонние силы или алгебраическая сумма работ этих сил равна нулю ($A_{\text{внеш}}^{\text{стор}} + A_{\text{внут}}^{\text{некон}} = 0$), то полная механическая энергия системы со временем сохраняется:

$$W = W^k(t) + W_{\text{вз.внут}}^p(t) + W_{\text{внеш}}^p(t) = \text{const}. \qquad (13)$$

В данной лабораторной работе баллистический маятник может совершать колебания относительно горизонтальной неподвижной оси (оси подвеса) в однородном поле силы тяжести. Он представляет собой вертикальный металлический стержень массой $m_с$ с закрепленным на нижнем конце заполненным пластилином полым цилиндром массой $m_ц$. На противоположном конце стержня имеется подшипник (для уменьшения силы трения), который насажен на ось подвеса. В маятник производится выстрел из пружинного пистолета в горизонтальном направлении пулей массой m. После неупругого соударения маятник с остановившейся в нем пулей начинает колебаться.

На рассматриваемую систему «маятник + пуля» действуют внешние силы тяжести, сопротивления воздуха, реакции опоры и трения в оси подвеса маятника. Кроме того, в течение времени τ соударения пули с маятником (т. е. времени, в течение которого модуль скорости пули относительно маятника изменяется от υ до нуля) между ними действуют силы внутреннего трения, не являющиеся консервативными. В дальнейшем считается, что сила сопротивления воздуха и силы

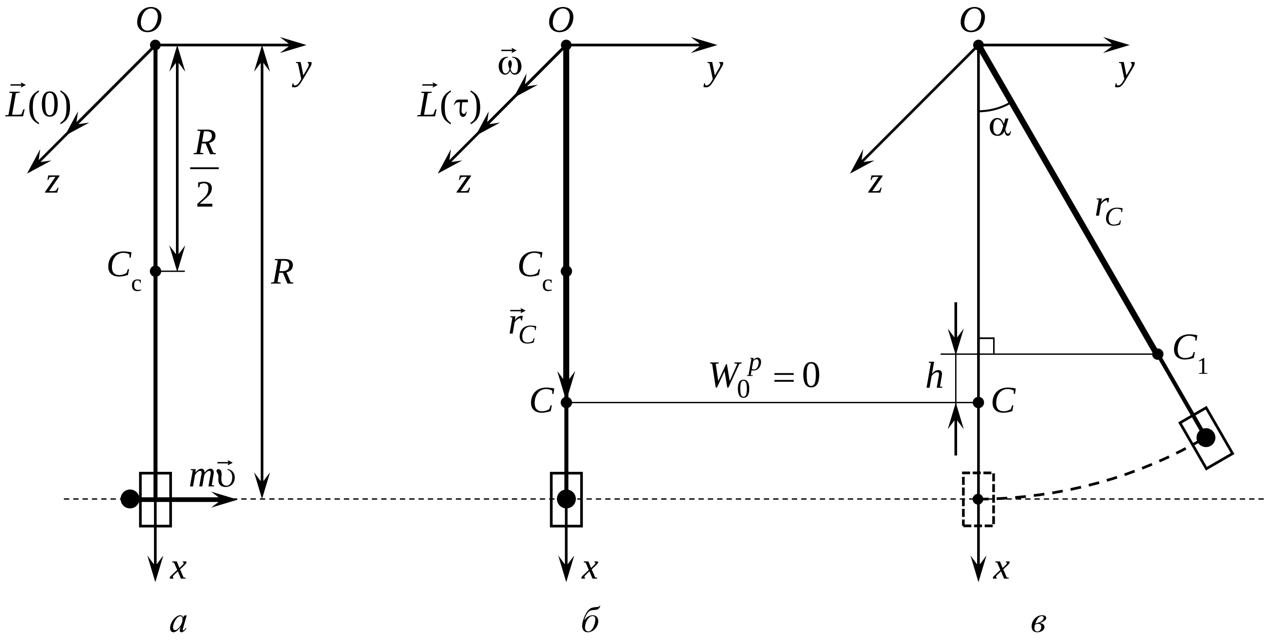

Рис. 2

трения в оси подвеса пренебрежимо малы, а летящая пуля, нижний конец стержня и центр цилиндра маятника находятся на одной горизонтальной прямой, содержащей вектор скорости $\vec{\upsilon}$ пули (рис. 2).

Пусть T – период колебаний маятника с пулей, возникающих после соударения. Если предположить, что $\tau << T$, то за время τ отклонение маятника с пулей от положения равновесия незначительно.

Выберем к рассмотрению три состояния системы «маятник + пуля»:

1) в начальный момент времени $t_0 = 0$ маятник находится в покое в вертикальном положении, а подлетевшая к нему пуля непосредственно перед соударением обладает скоростью $\vec{\upsilon}$ (см. рис. 2, *а*);

2) сразу после удара в момент времени τ маятник с остановившейся в нем пулей обладает угловой скоростью $\vec{\omega}$, находясь при этом еще практически в вертикальном положении (см. рис. 2, *б*);

3) в момент времени t_1 система «маятник + пуля» отклонена от вертикали на максимальный угол α (см. рис. 2, *в*).

Поскольку в течение времени τ отклонение системы «маятник + пуля» от вертикального положения незначительно, то моменты сил тяжести, действующих на все тела системы, относительно точки *O* (см. рис. 2, *б*) в течение этого времени можно считать равными нулю. Так как момент силы реакции опоры относительно точки *O* всегда равен нулю, а действием других внешних сил пренебрегается, то согласно (5) в течение времени соударения $d\vec{L}\,/\,dt = \vec{0}$, т. е. момент импульса системы «маятник + пуля» сохраняется для всех $0 \le t \le \tau$.

Принимая во внимание определения (1)–(4), момент импульса системы «маятник + пуля» относительно оси *Oz* в момент времени $t_0 = 0$ равен:

$$L_z(0) = m\upsilon R, \qquad (14)$$

где *R* – расстояние от точки *O* до то точки удара пули в маятник (длина металлического стержня баллистического маятника); а в момент времени τ :

$$L_z(\tau) = I\omega, \qquad (15)$$

где *I* – момент инерции системы «маятник + пуля» относительно оси *Oz*, равный:

$$I = \left(\frac{m_\text{с}}{3} + m_\text{ц} + m\right)R^2. \qquad (1.16)$$

Тогда в соответствии с законом сохранения момента импульса $L_z(0) = L_z(\tau)$ и с учетом (14), (15):

$$m\upsilon R = I\omega, \qquad (17)$$

Так как после соударения действие сил внутреннего трения прекращается, а силы сопротивления воздуха и трения в оси подвеса пренебрежимо малы, то для всех $t \ge \tau$ полная механическая энергия *W* системы «маятник + пуля» сохраняется. В частности, для моментов времени τ и t_1:

$$W(\tau) = W(t_1). \qquad (18)$$

Пусть нулевой уровень отсчета потенциальной энергии в однородном поле силы тяжести проходит через центр тяжести (точку *C*) системы «маятник + пуля» в момент времени τ (см. рис. 2, *б*). Тогда в соответствии с определениями (7)–(9) и (11):

$$W(\tau) = \frac{I\omega^2}{2} + W^p_\text{вз.внут}(\tau), \qquad (19)$$

$$W(t_1) = \left(m_\text{с} + m_\text{ц} + m\right)gh + W^p_\text{вз.внут}(t_1), \qquad (20)$$

где *h* – расстояние от центра тяжести (точки C_1) системы «маятник + пуля» в момент времени t_1 (когда система максимально отклонена от положения равновесия) до нулевого уровня отсчета потенциальной энергии (см. рис. 2, *в*).

Поскольку после соударения маятник с пулей рассматривается как недеформируемое целое (т. е. как твердое тело), то для всех $t \ge \tau$ собственная потенциальная энергия системы не изменяется, т. е $W^p_\text{вз.внут}(\tau) = W^p_\text{вз.внут}(t_1)$.

Тогда, подставляя (19) и (20) в (18), получается следующее равенство:

$$\frac{I\omega^2}{2} = \left(m_{\text{с}} + m_{\text{ц}} + m\right) gh. \qquad (21)$$

Поскольку непосредственное измерение расстояния h затруднительно, то удобно выразить его через модуль радиус-вектора r_C центра тяжести системы «маятник + пуля» (расстояние от точки O подвеса до центра масс системы) и максимальный угол α ее отклонения от положения равновесия (см. рис. 2, *в*):

$$h = r_C(1 - \cos\alpha). \qquad (22)$$

Согласно определению центра масс (10):

$$r_C = \frac{R\left(\frac{m_{\text{с}}}{2} + m_{\text{ц}} + m\right)}{\left(m_{\text{с}} + m_{\text{ц}} + m\right)}, \qquad (23)$$

тогда

$$h = \frac{R\left(\frac{m_{\text{с}}}{2} + m_{\text{ц}} + m\right)}{\left(m_{\text{с}} + m_{\text{ц}} + m\right)} \cdot (1 - \cos\alpha) = \frac{R\left(\frac{m_{\text{с}}}{2} + m_{\text{ц}} + m\right)}{\left(m_{\text{с}} + m_{\text{ц}} + m\right)} \cdot 2\sin^2\frac{\alpha}{2}. \qquad (24)$$

Подставим выражение (24) в равенство (21):

$$\frac{I\omega^2}{2} = 2gR\left(\frac{m_{\text{с}}}{2} + m_{\text{ц}} + m\right)\sin^2\frac{\alpha}{2}. \qquad (25)$$

Решая систему уравнений (15), (16) и (25) относительно скорости пули υ, получается:

$$\upsilon = \frac{2 \cdot \sin\frac{\alpha}{2}}{m}\sqrt{gR\left(\frac{m_{\text{с}}}{2} + m_{\text{ц}} + m\right)\left(\frac{m_{\text{с}}}{3} + m_{\text{ц}} + m\right)}. \qquad (26)$$

Поскольку система «маятник + пуля» представляет собой физический маятник, то период T ее колебаний вычисляется как:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{\left(m_{\text{с}} + m_{\text{ц}} + m\right) g r_C}}, \qquad (27)$$

а учитывая (1.16) и (1.23):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R\left(\frac{m_{\text{с}}}{3} + m_{\text{ц}} + m\right)}{g\left(\frac{m_{\text{с}}}{2} + m_{\text{ц}} + m\right)}}, \qquad (28)$$

Вывод формулы (27) представлен в лабораторной работе № 2м.5.

Выразив из (28) массу $m_{\text{ц}}$ цилиндра с пластилином и подставив ее в (26), получается:

$$\upsilon = \frac{2\pi gRm_{\text{с}}T\sin\frac{\alpha}{2}}{3m\left(4\pi^2R - gT^2\right)}. \qquad (29)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка (рис. 3) состоит из баллистического маятника 1, пружинного пистолета с пулей 2, линейки 3 для измерения угла отклонения (в градусах), фотоприемника 4 и электронного таймера 5.

После выстрела из пружинного пистолета в результате абсолютно неупругого соударения пули с маятником наблюдаются свободные колебания системы «маятник + пуля» вокруг горизонтальной оси подвеса в однородном поле силы тяжести.

Полное число колебаний N (или периодов) и время t, за которое эти колебания совершаются, регистрируются автоматически и указываются соответственно на индикаторах ПЕРИОД 6 и ВРЕМЯ 7.

ВНИМАНИЕ! Для измерения времени t крутильных колебаний числом N, кнопку СТОП 8 нужно нажать, когда индикатор ПЕРИОД 6 показывает $N-1$ колебание.

Период T колебаний системы «маятник + пуля» определяется по измеренным значениям числа колебаний N и времени t, за которое эти колебания совершаются:

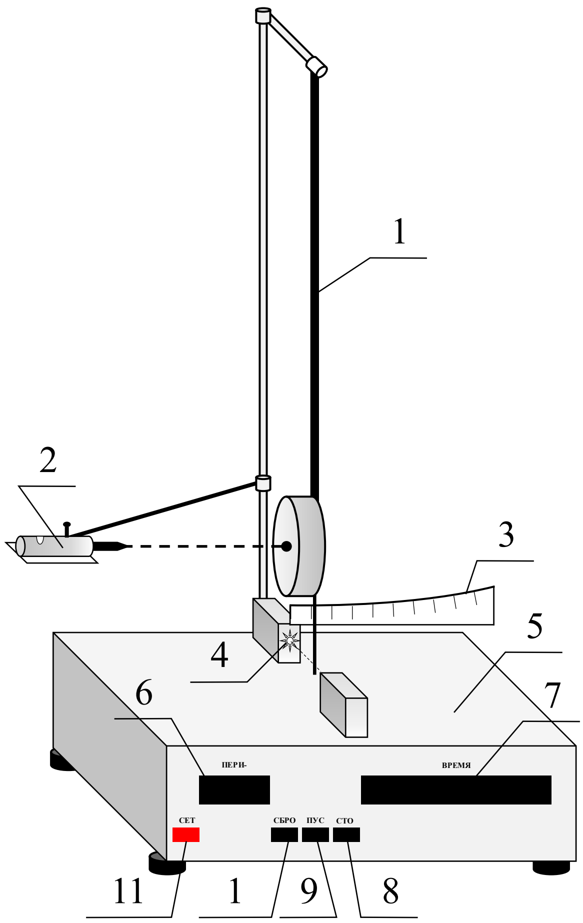

Рис. 3

$$T = \frac{t}{N}. \tag{30}$$

Тогда, принимая во внимание, что для малых углов $\sin(\alpha/2)$ можно заменить его аргументом в радианах, выражение (1.29) принимает вид:

$$\upsilon = \frac{\pi g R m_c t N \alpha}{3m\left(4\pi^2 N^2 R - g t^2\right)}. \tag{31}$$

Выражая в (1.31) угол α в радианах через угол α_0 в градусах:

$$\alpha = \frac{\pi\alpha_0}{180^\circ},$$

получается расчетная формула для определения скорости υ пули:

$$\upsilon = \frac{\pi^2 g R m_c t N \alpha_0}{540^\circ m\left(4\pi^2 N^2 R - g t^2\right)}, \tag{32}$$

где R – длина металлического стержня баллистического маятника; $m_с$ – масса металлического стержня; t – время, за которое система «маятник + пуля» совершает N колебаний; α_0 – максимальный угол отклонения маятника от положения равновесия в градусах; m – масса пули.

ПОДГОТОВКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ К РАБОТЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

ВНИМАНИЕ! В данной работе используется пружинный пистолет, поэтому при выполнении практической части задания следует строго соблюдать изложенную выше технику безопасности.

1. Определить значения инструментальных абсолютных погрешностей $\Delta m_{с}$, ΔR, Δm, $\Delta\alpha_0$, Δt и полученные результаты внести табл. 1.

ВНИМАНИЕ! Значения физических величин выражаются в единицах СИ и, как правило, представляются в стандартном виде. При этом множитель 10^n (n – порядок числа) выносится в заголовок соответствующего столбца таблицы.

2. В табл. 1 внести значения следующих величин: $m_{с} = 77{,}0 \cdot 10^{-3}$ кг, $R = 44{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $m = 10{,}0 \cdot 10^{-3}$ кг.
3. Подключить лабораторную установку к сети 220 В.
4. Включить кнопку СЕТЬ 11 на передней панели установки (см. рис. 3).
5. В отсутствие пули в стволе двумя руками сжать пружину пистолета, зафиксировать ее штифтом и, не отпуская, удерживать его рукой до момента выстрела.
6. Вставить в ствол пулю.
7. Убедиться, что маятник находится в покое и перекрывает луч света, падающий на фотоприемник 4 (см. рис. 3), нажать кнопку СБРОС 10.

Таблица 1

<table>
<tr><th></th><th>m_c,</th><th>Δm_c,</th><th>R,</th><th>ΔR,</th><th>m,</th><th>Δm,</th><th>α_0,°</th><th>$\Delta\alpha_0$,°</th><th>N</th><th>t,</th><th>Δt,</th><th>υ,</th><th>$\Delta\upsilon$,</th><th>ε_υ, %</th></tr>
<tr><td>1.</td><td></td><td rowspan="3">–</td><td></td><td rowspan="3">–</td><td></td><td rowspan="3">–</td><td></td><td rowspan="3">–</td><td></td><td></td><td rowspan="3">–</td><td rowspan="3">–</td><td rowspan="3">–</td><td rowspan="3">–</td></tr>
<tr><td>2.</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3.</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>ср.</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

8. Убедившись, что в направлении выстрела не находится человек, поднятием штифта произвести выстрел в сторону маятника.
9. Измерить максимальный угол α_0 отклонения маятника от положения равновесия в градусах.
10. **Для измерения времени *t* колебаний числом *N* кнопку СТОП 8 нужно нажать, когда индикатор ПЕРИОД 6 показывает $N-1$ колебание.**
11. В соответствии с п. 10 измерить время t для N = 10 колебаний маятника и результат внести в табл. 1.1.
12. Повторить пп. 5–11 два раза.
13. Выключить кнопку СЕТЬ 11.
14. Отключить лабораторную установку от сети 220 В.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит баллистический метод определения скорости быстродвижущегося тела?
2. Какое столкновение называют абсолютно неупругим, абсолютно упругим?
3. С какими физическими величинами Вы познакомились при изучении теоретического обоснования работы? Дайте определение этих величин.
4. На каких физических законах основан вывод расчетной формулы для определения скорости пули в данной лабораторной работе? Дать формулировку этих законов.
5. Почему при соударении пули и маятника можно считать, что закон сохранения момента импульса выполняется?
6. Почему при движении системы «маятник + пуля» как единого целого полная механической энергии данной системы практически не изменяется?
7. Дать определение центра масс (инерции) механической системы.
8. Вывести формулу для кинетической энергии твердого тела, вращающегося вокруг фиксированной оси.
9. В предположении, что взаимодействие пули с маятником носит характер абсолютно упругого удара, записать закон сохранения момента импульса системы «маятник + пуля» относительно оси колебаний *Oz* и закон сохранения полной механической энергии данной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И. В. Курс общей физики : учеб. пособие для вузов по техн. (550000) и технол. (650000) направлениям. В 3 т. / И. В. Савельев. – 9-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2007. – Т. 1 – 340 с.
2. Иродов, И. Е. Механика. Основные законы / И. Е. Иродов. – 12-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 309 с.
3. Детлаф, А. А. Курс физики: учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 7-е изд., стер. – М. : Академия, 2008. – 718 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При обработке результатов измерений учитываются только систематические погрешности.

1. По данным табл. 1 вычислить средние значения прямых измерений (результат которых непосредственно считывается со шкалы прибора) физических величин $m_с$, R, m, α_0, t.

2. Полученные в п. 1 средние значения физических величин округлить так, чтобы в записи числа было столько же разрядов, сколько их есть в записи соответствующих абсолютных погрешностей, и результаты внести в табл. 1.

ВНИМАНИЕ! Последняя цифра записи среднего значения физической величины должна соответствовать тому же разряду, что и последняя цифра в записи ее результата измерения и абсолютной погрешности этой величины.

3. В расчетную формулу (32) подставить табл. 1 средние значения прямых измерений величин $m_с$, R, m, α_0, N, t из табл. 1 и вычислить среднее значение косвенного измерения (результат которого вычисляется по расчетной формуле, связывающей результаты только прямых измерений) скорости υ пули.

4. В формулу для вычисления относительной погрешности ε_υ измерения скорости пули:

$$\varepsilon_\upsilon = \left|\frac{1}{m_с}\right|\Delta m_с + \left|\frac{1}{R} - \frac{4\pi^2 N^2}{4\pi^2 N^2 R - gt^2}\right|\Delta R + \left|\frac{-1}{m}\right|\Delta m + \left|\frac{1}{\alpha_0}\right|\Delta\alpha_0 + \left|\frac{1}{t} + \frac{2gt}{4\pi^2 N^2 R - gt^2}\right|\Delta t \qquad (33)$$

подставить из табл. 1 средние значения величин $m_с$, R, m, α_0, N, t, абсолютные погрешности $\Delta m_с$, ΔR, Δm, $\Delta\alpha_0$, Δt и вычислить значение относительной погрешности ε_υ измерения скорости пули.

5. В формулу для вычисления абсолютной погрешности $\Delta\upsilon$ измерения скорости пули:

$$\Delta\upsilon = \upsilon \cdot \varepsilon_\upsilon \qquad (34)$$

подставить полученные в пп. 3, 4 значения скорости υ пули, относительной погрешности ε_υ $(\varepsilon_\upsilon < 1)$ и вычислить значение абсолютной погрешности $\Delta\upsilon$ измерения скорости пули.

6. Величину абсолютной погрешности $\Delta\upsilon$ округлить до двух значащих цифр, если первая из них равна единице, и до одной значащей цифры во всех остальных случаях. Полученный результат внести в табл. 1.

7. Полученное в п. 3 среднее значение скорости υ пули округлить так, чтобы в записи числа было столько же разрядов, сколько их есть в записи абсолютной погрешности $\Delta\upsilon$, и результат внести в табл. .1.

8. Полученное в п. 4 значение относительной погрешности ε_υ перевести в проценты, округлить до десятых и результат внести в табл. 1.

9. Записать результат измерения скорости υ пули в стандартном виде и изобразить доверительный интервал (пример приведен на рис. 4).

$$\upsilon = 15 \pm 3\,\text{м/с}, \quad \varepsilon_{\upsilon} = 19{,}2\,\%.$$

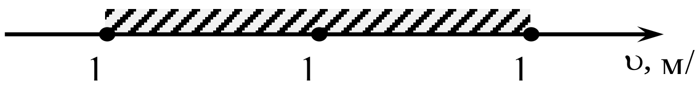

Рис. 4

ЗАДАНИЕ

1. Изучить лабораторную установку и методику измерений.
2. Следуя указаниям в подразделе «**Подготовка лабораторной установки к работе и методика измерений**» определить значения инструментальных абсолютных погрешностей Δm_c, ΔR, Δm, $\Delta\alpha_0$, Δt, провести прямые измерения величин m_c, R, m, α_0, N, t и полученные результаты внести в табл. 1.1.
3. Выключить кнопку СЕТЬ 11 на передней панели установки.
4. Отключить лабораторную установку от сети 220 В.
5. Следуя указаниям раздела «**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**» определить скорость υ пули.
6. Произвести анализ полученных результатов и сделать вывод в соответствии с целью работы.
7. Оформить отчет, который должен содержать название лабораторной работы, ее цель, краткое методическое обоснование, расчетную формулу и формулы для вычисления погрешностей, таблицу результатов измерений и вычислений, результат измерения скорости υ пули в стандартном виде, доверительный интервал и вывод.