

Введение

В классической механике все три закона сохранения – закон сохранения импульса, закон сохранения момента импульса, закон сохранения механической энергии являются теоремами, которые доказываются на основе трех законов Ньютона. Рассмотрим каждый из этих законов.

Для определенности введем понятия *изолированной* и *замкнутой* систем тел.

Замкнутой системой тел называется такая система тел, для которой сумма всех внешних сил равна нулю.

Изолированной системой тел называется такая система тел, на которую вообще не действуют внешние силы.

Закон сохранения импульса. Рассмотрим систему взаимодействующих между собой материальных точек с массами m_i . В силу третьего закона Ньютона для сил взаимодействия двух материальных точек с номерами i и j можно записать $\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji}$. Пусть на систему действуют внешние силы. Тогда для материальной точки с номером i уравнение движения будет иметь вид

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{F}_i + \sum \mathbf{F}_{ij}. \quad (3.1)$$

Просуммируем эти уравнения по i и учтем, что $\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji}$. В результате получим

$$\sum m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum \mathbf{F}_i. \quad (3.2)$$

В том случае, когда система тел является замкнутой $\sum \mathbf{F}_i = 0$

$$\sum m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = 0$$

или

$$\sum m_i \mathbf{v}_i = \text{const}, \quad (3.3)$$

соотношение (3.3) выражает **закон сохранения импульса** системы материальных точек:

суммарный импульс замкнутой системы тел сохраняется неизменным.

Закон сохранения момента импульса. Обозначим момент импульса системы материальных точек относительно некоторой точки О через $\mathbf{L}$, радиус-вектор i -й материальной точки $\mathbf{r}_i$.

Аналогично тому, как это было сделано выше возьмем за ос-

нову уравнение движения произвольной материальной точки (3.1)

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{F}_i + \sum \mathbf{F}_{ij} . \quad (3.4)$$

Умножим левую и правую части векторно на $\mathbf{r}_i$ и просуммируем по i . Учитывая, что

$$\mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{ij} + \mathbf{r}_j \times \mathbf{F}_{ji} = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \times \mathbf{F}_{ij} = 0 ,$$

получим

$$\sum_i m_i \mathbf{r}_i \times \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i . \quad (3.5)$$

Воспользуемся равенством

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_i m_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i = \sum_i m_i \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} \times \mathbf{v}_i + \sum_i m_i \mathbf{r}_i \times \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} . \quad (3.6)$$

Первый член правой части (3.6) равен нулю, так как $\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i$.

Следовательно,

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \sum_i m_i \mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{v}}_i = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i = \mathbf{M} ,$$

где

$$\mathbf{M} = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_i . \quad (3.7)$$

$\mathbf{M}$ — момент внешних сил относительно точки О

В результате получаем закон изменения момента импульса

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{M} . \quad (3.8)$$

В том случае, когда момент внешних сил равен нулю,

$$\frac{d\mathbf{L}}{dt} = 0$$

или

$$\mathbf{L} = \sum_i m_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i = const. \quad (3.9)$$

Таким образом, получили **закон сохранения момента импульса: Суммарный момент импульса системы тел относительно некоторой точки пространства сохраняется неизменным, если суммарный момент всех внешних сил относительно этой же точки равен нулю.**

Рассмотрим случай, в котором система материальных точек вращается вокруг закрепленной оси, например совпадающей с

осью z : $\omega = \{0, 0, \omega\}$. В этом случае можно записать:

$$\mathbf{L} = \sum_i m_i (\mathbf{r}_i \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i)) = \sum_i m_i r_i^2 \boldsymbol{\omega}, \quad (3.10)$$

т.е.

$$\mathbf{L} = J \boldsymbol{\omega}, \quad (3.11)$$

где $J = \sum_i m_i r_i^2$ – момент инерции системы материальных точек.

Закон сохранения механической энергии. Если на материальную точку, имеющую массу m , в каждой точке пространства действует сила, которая может быть представлена в виде градиента от некоторой функции $U(x, y, z)$

$$\mathbf{F} = -\text{grad}U, \quad (3.12)$$

то наряду с кинетической энергией $mv^2/2$ можно ввести потенциальную энергию U , при этом будет сохраняться полная энергия $E = mv^2/2 + U$. Для доказательства этого утверждения рассмотрим уравнение движения этой материальной точки (второй закон Ньютона).

$$m\ddot{\mathbf{r}} = -\text{grad}U(r). \quad (3.13)$$

Умножим левую и правую части уравнения (3.13) на $d\mathbf{r} = \mathbf{v}dt$ и проинтегрируем. Учитывая, что

$$\int_{r_1}^{r_2} \ddot{\mathbf{r}} d\mathbf{r} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{\mathbf{v}} \mathbf{v} dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \left(\frac{\mathbf{v}^2}{2} \right) dt = \frac{\mathbf{v}_2^2}{2} - \frac{\mathbf{v}_1^2}{2} \quad (3.14)$$

и

$$\int_{r_1}^{r_2} \text{grad}U d\mathbf{r} = \int_{U(r_1)}^{U(r_2)} dU = U(r_2) - U(r_1), \quad (3.15)$$

получим:

$$\frac{mv_2^2}{2} + U(r_2) = \frac{mv_1^2}{2} + U(r_1). \quad (3.16)$$

Соотношение (3.16) выражает закон сохранения механической энергии для рассматриваемого случая. Условием потенциальности поля сил, т.е. условием выполнения (3.12), является обращение в ноль работы по замкнутому пути. Сама потенциальная функция $U(r)$ определяется полем сил с точностью до константы. Эта константа может быть определена, если задать значение U в некоторой точке поля.

Простейшим примером потенциального поля является поле

сил тяжести вблизи поверхности Земли. В этом случае во всех достаточно близких точках сила тяжести, действующая на данное тело, имеет одно и то же значение и направление, которое принимается за вертикаль. Если определить ось OZ по вертикали вверх, то в качестве потенциальной функции можно взять:

$$U(z)=mgz. \quad (3.17)$$

В этом случае получим:

$$F_x=0, \quad F_y=0, \quad F_z=-mg. \quad (3.18)$$

Заменить твердое тело материальной точкой можно лишь в случае поступательного движения. Если тело вращается вокруг оси, проходящей через тело, или расположенной вблизи тела, то отдельные элементы тела при этом будут иметь различные скорости и различные перемещения.

В качестве примера подобной ситуации рассмотрим твердое тело, которое может вращаться вокруг неподвижной горизонтальной оси. Начало координат выберем на оси вращения тела. Ось OY направим вдоль оси вращения, радиус-вектор i -го элемента обозначим через $\mathbf{r}_i$, при этом $\mathbf{r}_i=\mathbf{d}_i+\boldsymbol{\rho}_i$, где $\mathbf{d}_i$ – вектор параллельный оси, а $\boldsymbol{\rho}_i$ – перпендикулярен оси. Будем предполагать, что на i – элемент этого тела помимо силы тяжести, равной $\Delta m_i \mathbf{g}$ ($\mathbf{g} = \{0, 0, -g\}$) действует сила $\mathbf{F}_i$, направленная по прямой, соединяющей эту точку с осью. Кроме того, предположим, что между i -м и j -м элементами действует сила взаимодействия $\mathbf{F}_{ij}$, причем $\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji}$ и $\mathbf{F}_{ij} \uparrow\uparrow (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$, т.е. сила взаимодействия (внутренняя сила). Рассмотрим уравнение движения i – го элемента

$$\Delta m_i \dot{\mathbf{v}}_i = \Delta m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_i + \sum_j \mathbf{F}_{ij}. \quad (3.19)$$

Умножим левую и правую части на $d\mathbf{r}_i=\mathbf{v}_i dt$. При этом получим $\dot{\mathbf{v}}_i \mathbf{v}_i dt = d(v_i^2/2)$, $g d\mathbf{r}_i = -g dz_i$, $F_i d\mathbf{r}_i = 0$, так как $F_i \perp d\mathbf{r}_i$. После суммирования по всем элементам появятся пары

$$F_{ij} d\mathbf{r}_i + F_{ji} d\mathbf{r}_j = F_{ij} (\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)) = \boldsymbol{\omega} ((\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \times F_{ij}) = 0.$$

Таким образом, после интегрирования по $d\mathbf{r}_i$ и суммирования отдельных уравнений (3.19) получим:

$$\sum \Delta m_i \frac{v_i^2}{2} + \sum \Delta m_i g z_i = const. \quad (3.20)$$

Выразим скорость v_i через вектор угловой скорости $\boldsymbol{\omega} = (0, \omega, 0)$ и

радиус-вектор $\mathbf{r}_i : \mathbf{v}_i = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_i$. Учитывая, что $\boldsymbol{\omega} \perp \boldsymbol{\rho}$, получим $v_i^2 = \omega_i \rho_i^2$. Таким образом,

$$\sum \Delta m_i \frac{v_i^2}{2} = \frac{1}{2} J \omega^2, \quad (3.21)$$

где $J = \sum \Delta m_i \rho_i^2$ представляет момент инерции тела относительно рассматриваемой оси.

Второй член (3.20) возможно преобразовать, вводя координаты центра масс

$$x_c = \frac{\sum \Delta m_i x_i}{\sum \Delta m_i}, y_c = \frac{\sum \Delta m_i y_i}{\sum \Delta m_i}, z_c = \frac{\sum \Delta m_i z_i}{\sum \Delta m_i}. \quad (3.22)$$

При этом получим закон сохранения механической энергии в виде

$$\frac{1}{2} J \omega^2 + mgz_c = const, \quad (m = \sum \Delta m_i). \quad (3.23)$$

В качестве другого примера рассмотрим упругую силу, возникающую при смещении x из положения равновесия ($z = const$, $y = const$)

$$F = -kx. \quad (3.24)$$

В качестве потенциальной энергии следует взять работу упругих сил с обратным знаком

$$U(x) = -\int_0^x F dx = k \frac{x^2}{2}. \quad (3.25)$$

Закон сохранения механической энергии в этом случае будет иметь вид

$$m \frac{v^2}{2} + \frac{1}{2} kx^2 = const. \quad (3.26)$$

Лабораторная работа 3.2 **КРУТИЛЬНЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК**

Цель работы

Демонстрация эффективности использования законов сохранения механической энергии и момента импульса для решения практических задач механики.

Идея эксперимента

Использование свойств абсолютно неупругого удара пули и тела крутильного баллистического маятника для определения скорости пули.

Теоретическое введение

Принципиальная схема крутильного баллистического маятника показана на рис. 3.3. После попадания пули в маятник он начинает колебаться вокруг своей вертикальной оси. Если пренебречь моментом сил трения при движении маятника, то можно воспользоваться двумя законами сохранения.

На основании закона сохранения момента количества движения, считая удар абсолютно неупругим, можно записать уравнение, выражающее равенство моментов до удара и после:

$$mvl = (J_1 + ml^2)\omega, \quad (3.2.1)$$

где m – масса пули, v – ее скорость, l – расстояние от оси вращения маятника до точки удара пули, ω – угловая скорость маятника, J_1 – момент инерции маятника.

Закон сохранения механической энергии (после удара) дает

$$\frac{1}{2}(J_1 + ml^2)\omega^2 = \frac{1}{2}D\varphi^2, \quad (3.2.2)$$

где φ – наибольший угол поворота маятника, D – модуль кручения. Из этих уравнений получаем

$$v^2 = \frac{D\varphi^2}{m^2l^2}(J_1 + ml^2). \quad (3.2.3)$$

Так как момент инерции пули ml^2 во много раз меньше J_1 , то уравнение (3.2.3) может быть написано в виде:

$$v^2 = \frac{D\varphi^2}{m^2l^2}J_1. \quad (3.2.4)$$

Будем считать, что:

1) $\tau \ll T$, т.е. время воздействия пули на маятник во много раз меньше периода колебаний маятника (баллистический маятник);

2) $\sin \alpha \approx \alpha$, т.е. угол отклонения маятника мал – не более $5-6^\circ$.

При таких условиях уравнение движения баллистического маятника может быть записано в виде:

$$J_1 \ddot{\alpha} = -D\alpha,$$

где φ – угол поворота маятника, $\ddot{\alpha}$ – угловое ускорение. Решение этого уравнения приводит к выражению для периода колебаний:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J_1}{D}}. \quad (3.2.5)$$

Для исключения величины D можно поступить следующим образом. Изменим момент инерции маятника, изменив расстояние между грузами. Тогда

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J_1}{D}}, \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{J_2}{D}}, \quad (3.2.6)$$

$$J_1 - J_2 = \Delta J, \quad (3.2.7)$$

где T_2 – период колебаний при новом значении момента инерции J_2 , ΔJ – разность моментов инерции.

Уравнения (3.2.6) дают

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{T_1^2}{T_2^2}. \quad (3.2.8)$$

Из уравнений (3.2.7) и (3.2.8) получаем

$$J_1 = \frac{T_1^2}{T_1^2 - T_2^2} \Delta J. \quad (3.2.9)$$

Уравнения (3.2.4), (3.2.5) и (3.2.9) дают

$$\nu = \frac{2\pi\varphi}{ml} \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} \Delta J. \quad (3.2.10)$$

Величину можно ΔJ определить, пользуясь теоремой Гюйгенса—Штейнера. Из этой теоремы следует, что

$$J_1 = J_0 + 2MR_1^2, \quad (3.2.11)$$

$$J_2 = J_0 + 2MR_2^2, \quad (3.2.12)$$

где J_0 – момент инерции маятника, когда центры тяжестей грузов совпадают с осью вращения маятника, J_1 – момент инерции, когда оба груза находятся на расстоянии R_1 от оси вращения, J_2 – момент инерции, когда оба груза находятся на расстоянии R_2 от оси вращения, M – масса одного груза.

Пусть $R_1 > R_2$, тогда из уравнений (3.2.11) и (3.2.12) получаем

$$\Delta J = 2M(R_1^2 - R_2^2). \quad (3.2.13)$$

Теперь уравнения (3.2.10) и (3.2.13) окончательно дают формулу для вычисления скорости пули:

$$v = \frac{4\pi\phi M}{ml} \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} (R_1^2 - R_2^2). \quad (3.2.14)$$

Экспериментальная установка

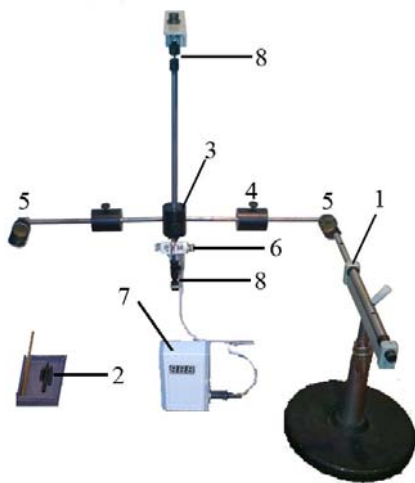


Рис. 3.3. Экспериментальная установка.

Установка состоит из крутильного маятника, *пружинного пистолета 1* и *набора пуль 2*. Крутильный маятник (рис. 3.3) собран из двух массивных металлических стержней, скрепленных *муфтой 3*.

По горизонтальным стержням могут перемещаться два металлических *цилиндра 4* (груза). Вблизи концов стержня в разных местах могут закрепляться *чашечки 5*, наполненные пластилином.

Для измерения угла поворота маятника на его вертикальном стержне укреплен *датчик поворота (датчик Холла) 6*, который соединен с *вольтметром 7*. Принцип работы датчика поворота описан ниже. Разность показаний вольтметра определяет угол поворота ϕ с помощью градуировочного графика. Маятник укреплен на кронштейне при помощи *провода 8*, деформация которой создает момент уп-

ругих сил. Массы металлических цилиндров (M) приведены на установке.

Пистолет представляет собой металлическую трубку-ствол, укрепленную на массивном основании. В закрытом конце этой трубки имеется пружина. Пружина сжимается, пуля загоняется в ствол. После освобождения пружины пуля выбрасывается.

Основой датчика угла является датчик Холла со встроенным усилителем SS495. Для работы этой микросхемы необходимо питание 5 В. В этом случае на выходе датчика оказывается напряжение, пропорциональное внешнему магнитному полю, смещенному на 2.5 В относительно нуля. То есть, при наличии нулевого внешнего магнитного поля микросхема выдает напряжение 2.5 В. Выход микросхемы соединен с входом АЦП.

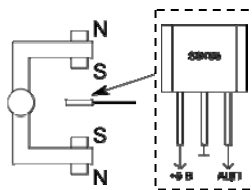


Рис. 3.4. Принципиальная схема датчика.

Для того чтобы, магнитное поле, проходящее через микросхему имело зависимость от угла поворота маятника, на нем закреплены два магнита одноименными полюсами друг к другу. В начальный момент расстояние от магнитов до микросхемы равны. Поэтому (в силу симметрии) магнитное поле в точке установки датчика равно нулю. При повороте маятника один из магнитов приближается к микросхеме, а другой – отдаляется. Таким образом, магнитное поле, пронизывающее датчик, становится отличным от нуля, а его направление зависит от направления поворота маятника.

Для регистрации максимального отклонения в вольтметре стоит система, запоминающая максимальное значение входного напряжения на несколько секунд. Эта система автоматически сбрасывает максимальное значение, поэтому не требует дополнительных органов управления. Алгоритм работы состоит в следующем. В начальный момент времени выходное значение совпадает с входным, а счетчик времени установлен в ΔT . После этого, если входное значение превышает выходное, выходное значение увеличивается до входного, а счетчик времени сбрасывается в начальное состояние ΔT . Если же входное напряжение не превышает выходное, то счетчик времени уменьшается на величину прошедшего времени. В случае, если счетчик времени обнулится, выходное

значение уменьшается до входного, а счетчик времени сбрасывается в начальное состояние ΔT .

Проведение эксперимента

Упражнение 1. Измерение периодов колебания крутильного баллистического маятника при различных значениях его момента инерции.

Для определения скорости пули необходимо измерить периоды T_1 и T_2 колебаний маятника для двух положений цилиндров, соответствующих расстояниям R_1 и R_2 от оси вращения, расстояния l , а также отклонения φ , соответствующие максимальному значению угла отклонения.

При проведении эксперимента устанавливают правильное расположение маятника и пистолета так, чтобы:

1) ось ствола пистолета была перпендикулярна к оси горизонтального стержня маятника; ось ствола и ось стержня были в одной горизонтальной плоскости;

2) конец ствола пистолета был на расстоянии 2-3 см от поверхности пластины в чашечке. Это достигается расположением пистолета, свободно перемещаемого по столу.

Измерения

1. Работу начинают с того, что оба цилиндра раздвигают вдоль стержня так, чтобы они касались колец. Измеряют величины R_1 и l (расстояние между осью маятника и серединой одной из чашечек с пластином).

Результаты измерений необходимо занести в табл. 3.2.

2. После этого производят «выстрел», пистолет отодвигают в сторону и измеряют разность между начальным и конечным значением вольтметра. Далее с помощью градуировочного графика определяют отклонение φ и заносят данные в табл. 3.2.

3. Для измерения периода колебаний T_1 , не останавливая маятника, включают секундомер. Через десять полных колебаний (периодов) секундомер останавливают, определяют значение одного периода.

Таблица 3.2.

Экспериментальные данные

№ опыта i	R_1 σ_{R_1}	T_1	$\langle T_1 \rangle$ σ_{T_1}	φ_1 σ_{φ_1}	$\langle \varphi_1 \rangle$ σ_{φ_1}	R_2 σ_{R_2}	T_2	$\langle T_2 \rangle$ σ_{T_2}	φ_2 σ_{φ_2}	$\langle \varphi_2 \rangle$ σ_{φ_2}
1										
2										
3										
4										
5										
l, σ_l										
m, σ_m										

4. Уменьшив момент инерции маятника (придвинув цилиндры вплотную к муфте), измеряют R_2 – расстояние между осью вращения маятника и серединой одного из цилиндров.

5. Для измерения периода колебаний T_2 снова производят «выстрел». Определение величины периода T_2 производится так же, как и величины периода T_1 .

Все измерения проводятся не менее пяти раз.

6. Пункты 1-5 повторяют для трех пуль различной массы.

Обработка результатов

1. Провести вычисление средних значений $\langle T_j \rangle$ и $\langle \varphi_j \rangle$ ($j = 1, 2$) по формулам:

$$\langle T_j \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ij},$$

$$\langle \varphi_j \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_{ij}.$$

Результаты вычислений занести в табл. 3.2.

2. Провести оценку ошибок измеренных величин. В качестве оценки случайной погрешности среднего значения принимается выборочное стандартное отклонение среднего арифметического:

$$S_{T_j} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (T_{ij} - \langle T_j \rangle)^2},$$

$$S_{\varphi_j} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (\varphi_{ij} - \langle \varphi_{ij} \rangle)^2}.$$

С учетом систематических погрешностей (погрешность прибора, погрешность округления и др.) величина стандартного отклонения суммарной погрешности физических величин T_j и φ_j вычисляется следующим образом:

$$\sigma_{T_j} = \sqrt{S_{T_j}^2 + \sigma_{T_j \text{ сист.}}^2},$$

$$\sigma_{\varphi_j} = \sqrt{S_{\varphi_j}^2 + \sigma_{\varphi_j \text{ сист.}}^2},$$

где S – выборочное стандартное отклонение среднего арифметического, $\sigma_{\text{сист.}}$ – оценка суммарной систематической погрешности.

Полученные оценки стандартных отклонений σ величин T_j и φ_j также заносятся в табл. 3.2.

Упражнение 2. Определение скорости пули.

В связи с тем, что для расчета скорости пули используются данные, полученные в *упражнении 1*, в данном упражнении осуществляется лишь обработка результатов эксперимента.

1. Определить скорости пули при двух различных положениях грузов на оси маятника, соответствующих различным значениям моментов инерции маятника, по формулам:

$$v_j = \frac{4\pi\varphi_j M}{ml} \frac{T_j}{T_1^2 - T_2^2} (R_1^2 - R_2^2).$$

Массы пули (m) и цилиндров (M) известны.

2. Провести оценку погрешности полученных результатов по формуле:

$$\sigma_{v_j} = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial v_j}{\partial \varphi_j}\right)_{\langle T_j, R_j \rangle} \cdot \sigma_{\langle \varphi_j \rangle}^2 + \left(\frac{\partial v_j}{\partial T_1}\right)_{\langle T_2, R_j, \varphi_j \rangle} \cdot \sigma_{\langle T_1 \rangle}^2 + \left(\frac{\partial v_j}{\partial T_2}\right)_{\langle T_1, R_j, \varphi_j \rangle} \cdot \sigma_{\langle T_2 \rangle}^2 + \right.} \\ \left. + \left(\frac{\partial v_j}{\partial R_1}\right)_{\langle T_j, R_2, \varphi_j \rangle} \cdot \sigma_{\langle R_1 \rangle}^2 + \left(\frac{\partial v_j}{\partial R_2}\right)_{\langle T_j, R_1, \varphi_j \rangle} \cdot \sigma_{\langle R_2 \rangle}^2}.$$

3. Провести сравнение экспериментально определенных значений скорости пули при двух различных положениях грузов на оси маятника (скорость пули не должна зависеть от положения грузов на оси маятника).

4. Определить среднее значение скорости пули и провести оценку погрешности полученных результатов. Результаты вычислений занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты обработки экспериментальных данных

m	(v_1, σ_{v_1})	(v_2, σ_{v_2})	$(\langle v \rangle, \sigma_v)$

В задаче необходимо определить скорости пуль трех различных масс.

Упражнение 3. Оценка времени соударения пули.

Аналогично упражнению 2, в данном упражнении осуществляется лишь обработка результатов эксперимента.

Условием, при котором маятник можно рассматривать как баллистический, является малость времени соударения пули по сравнению с периодом колебаний маятника. Для оценки времени соударения τ можно измерить штангенциркулем глубину h проникновения пули в пластилин и определить время τ , воспользовавшись соотношением:

$$\tau = \frac{h}{\bar{v}},$$

где для оценки можно взять $\bar{v} = v/2$. Сравнение τ с T_1 и T_2 дает возможность убедиться в том, что маятник является баллистическим (то есть, $\tau \ll T_1$ и T_2).

Основные итоги работы

В результате выполнения работы должны быть определены скорости пуль (не менее трех) разной массы.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон сохранения импульса.
2. Сформулируйте закон сохранения момента импульса.
3. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.
4. Что такое центр удара?
5. Определите положение центра удара в предположении, что тело маятника представляет собой сплошной цилиндр, масса которого в 100 раз больше массы пули.