

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
<<МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЛЕСА>>**

Н. П. Полуэктов, Ю. П. Царьгородцев, И. И. Усатов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

*Механика Определение скорости полёта пули методом
баллистического маятника*

**Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
университета в качестве учебно-методического пособия
для студентов технических специальностей МГУЛ**

Москва

Издательство Московского государственного университета леса
2015

Разработано в соответствии с Государственным образовательным стандартом ВПО 2000г.

Рецензенты: профессор кафедры высшей математики МГУЛ
доктор технических наук О. М. Полещук;
профессор кафедры физики МГУЛ
доктор технических наук В. Д. Бурков.

Работа подготовлена на кафедре физики

Полуэктов Н. П.

К 59 Лабораторный практикум по физике. Механика: Определение скорости полёта пули методом баллистического маятника
учеб.-методич. пособие / Н. П. Полуэктов, Ю. П. Царьгородцев, И. И. Усатов.
-М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2015. - 13 с.

В данном учебно-методическом пособии представлена лабораторная работа по физике, в которой, применяя законы сохранения момента импульса и механической энергии, определяется скорость полета пули.

Сборник предназначен для студентов технических специальностей Московского государственного университета леса.

Учебное издание

Полуэктов Николай Павлович
Царьгородцев Юрий Петрович
Усатов Игорь Игоревич

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

Механика: *Определение скорости полёта пули методом баллистического маятника.*

В авторской редакции. Компьютерный набор и верстка авторов

По тематическому плану внутривузовских изданий учебной и научной литературы на 2015 г.

Подписано в печать 2015. Формат 60x90 1/16. Бумага 80 г/м².
Ризография. Усл. печ. л. , . Тираж экз. Заказ № .

Издательство Московского государственного университета леса. 141005, Мытищи-5,
Московская обл., 1-я Институтская, 1, МГУЛ. E-mail: izdat@mgul.ac.ru

По Вопросам приобретения литературы издательства ФГБОУ ВПО МГУЛ
обращаться в отдел реализации. Телефон: (498) 687-41-33, E-mail: kurilkina@mgul.ac.ru
© Н. П. Полуэктов, Ю. П. Царьгородцев, И. И. Усатов 2015 © ФГБОУ ВПО МГУЛ

Лабораторная работа № 9

Определение скорости полёта пули методом баллистического маятника

Цель работы: изучить законы сохранения в механике, ознакомиться с методом крутильного баллистического маятника, определить скорость полета пули.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Примером применения законов сохранения импульса, момента импульса и энергии при решении физических задач является упругое или неупругое соударение двух или более тел.

Удар (соударение) - это столкновение двух или более тел, при котором взаимодействие длится очень короткое время.

Абсолютно упругий удар - столкновение двух тел, в результате которого в обоих взаимодействующих телах не остается никаких деформаций и вся кинетическая энергия, которой обладали тела до удара, снова превращается в кинетическую энергию.

Абсолютно неупругий удар - столкновение двух тел, в результате которого тела объединяются, двигаясь дальше как единое целое.

К динамическим характеристикам поступательного движения тел относится также импульс тела.

Импульс тела - векторная физическая величина, равная произведению массы тела на его скорость:

$$\vec{p} = m\vec{v} \left(\frac{кг \cdot м}{с} \right)$$

Закон сохранения импульса: в замкнутой системе тел геометрическая сумма импульсов тел остается постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой.

Закон сохранения импульса для упругого взаимодействия:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2$$

Закон сохранения импульса для неупругого взаимодействия:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{u}$$

где: m_1, m_2 - массы соударяющихся тел;

v_1, v_2 - скорости тел до столкновения;

u_1, u_2 - скорости тел после столкновения.

Абсолютно неупругий удар является примером потери механической энергии системы под действием диссипативных сил.

Диссипативная сила - сила, работа которой при перемещении тела из одного положения в другое зависит от траектории перемещения тела.

Диссипация энергии - процесс постепенного уменьшения энергии замкнутой механической системы под действием диссипативных сил.

Система, механическая энергия которой непрерывно уменьшается с течением времени, называется **диссипативной системой**.

К динамическим характеристикам вращательного движения твердого тела относятся:

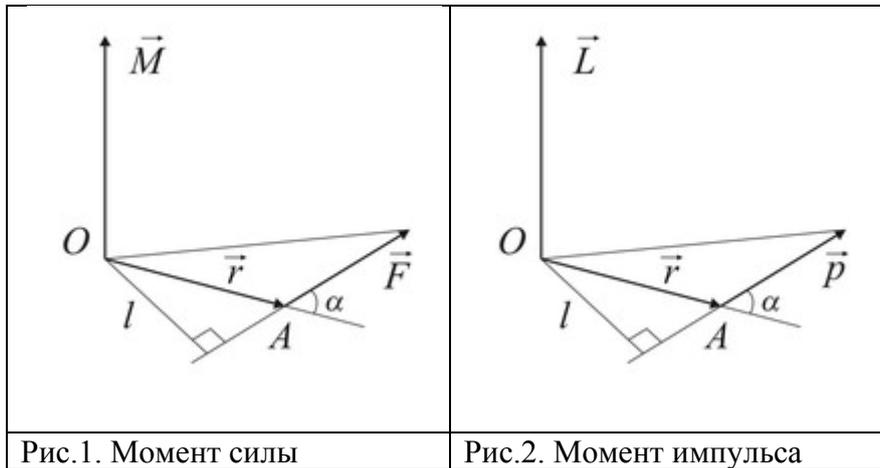
Момент силы (относительно неподвижной точки O) - физическая величина, определяемая векторным произведением радиуса-вектора r , проведенным из точки O в точку приложения силы F , на эту силу (рис.1):

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}]$$

Модуль момента силы: $M = Fr \sin \alpha = Fl$ ($H \cdot m$)

где α - угол между r и F ;

$r \cdot \sin \alpha = l$ - **плечо силы** - кратчайшее расстояние между линией действия силы и точкой приложения силы.



Момент инерции материальной точки относительно данной оси - скалярная величина, равная произведению массы точки на квадрат расстояния от этой точки до оси.

$$J = mr^2 \quad (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

где m - масса точки, r - расстояние от точки до оси.

Момент инерции тела относительно оси - физическая величина, равная сумме произведений масс n материальных точек системы на квадраты их расстояний до рассматриваемой оси.

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$

Момент инерции тела при вращательном движении играет такую же роль, как масса при поступательном движении, т.е. служит мерой инертности тела.

Для определения момента инерции твердого тела относительно произвольной оси используется **теорема Штейнера**: момент инерции тела относительно любой оси вращения равен моменту его инерции J_c относительно параллельной оси, проходящей через центр масс C тела, сложенному с произведением массы тела m на квадрат расстояния a между осями:

$$J = J_c + ma^2$$

Момент импульса относительно неподвижной точки O - физическая величина, определяемая векторным произведением радиус-вектора r , проведенного из точки O в точку A , на вектор импульса p (рис.2).

$$\vec{L} = [\vec{r}, \vec{p}] = [\vec{r}, m\vec{v}]$$

Модуль вектора момента импульса:

$$L = r \cdot p \sin \alpha = mv \cdot r \cdot \sin \alpha = pl$$

где α - угол между r и p ;

Закон сохранения момента импульса: момент импульса замкнутой системы сохраняется т.е. не изменяется с течением времени.

$$\vec{L} = const$$

Энергия - универсальная количественная мера движения и взаимодействия всех видов материи.

Механическая энергия - энергия движения и взаимодействия.

Потенциальная энергия - механическая энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними.

Потенциальная энергия упруго деформированной проволоки:

$$E_p = \frac{C\varphi^2}{2}$$

где C - постоянная кручения проволоки, φ - угол поворота.

Кинетическая энергия тела массой m , движущегося со скоростью v , определяется работой, которую надо совершить, чтобы сообщить телу данную скорость:

$$E_k = \frac{mV^2}{2}$$

Закон сохранения полной механической энергии: полная механическая энергия системы тел остается неизменной при любых движениях тел системы.

$$E = E_k + E_p = const$$

Общезначимый закон сохранения энергии (закон сохранения и превращения энергии) : при любых физических взаимодействиях энергия не возникает и не исчезает, а только превращается из одной формы в другую.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание прибора

Баллистическим в физике принято называть устройство, приводимое в движение кратковременным (ударным) воздействием. Измеряя параметры движения такого устройства после удара, можно определить величины, характеризующие тело или явление, создавшее это воздействие. На этих принципах основано определение скорости полета пули при помощи баллистического маятника. Баллистическим крутильным маятником называется колебательное устройство, масса которого значительно превышает массу соударяющегося с ним тела и обладающего большим по сравнению со временем взаимодействия τ периодом T собственных колебаний. После удара первоначально покоящийся маятник приобретает момент импульса и приходит в движение, причем его начальная скорость существенно меньше скорости летящего тела. В этом случае экспериментальное определение кинематических характеристик маятника упрощается.

Принципиальная схема маятника приведена на рис. 1. Он представляет собой металлический стержень с грузами M , закрепленный в горизонтальном положении натянутой вертикально стальной проволокой. На концах стержня крепятся мишени из пластилина. После попадания пули в мишень маятник начинает поворачиваться вокруг вертикальной оси OO' . Кинетическая энергия маятника, полученная при ударе, постепенно переходит в потенциальную энергию упругой деформации закручивающейся стальной нити. При некотором угле поворота φ_0 маятник останавливается и начинает движение в обратном направлении; возникают колебания.

Рассмотрим отдельно сначала явление удара, а затем движение маятника после удара. Воспользуемся теоремой об изменении момента импульса системы пуля-маятник для описания абсолютно неупругого удара пули. Время удара τ значительно меньше периода колебаний маятника T . За время τ маятник не успевает существенно отклониться от положения равновесия; в этом случае моментом упругих сил, возникающих при повороте маятника, можно пренебречь. Следовательно, момент импульса системы пуля-маятник во время удара сохраняется. Тогда можно записать:

$$mVl = (I_1 + ml^2)\omega, \quad (1)$$

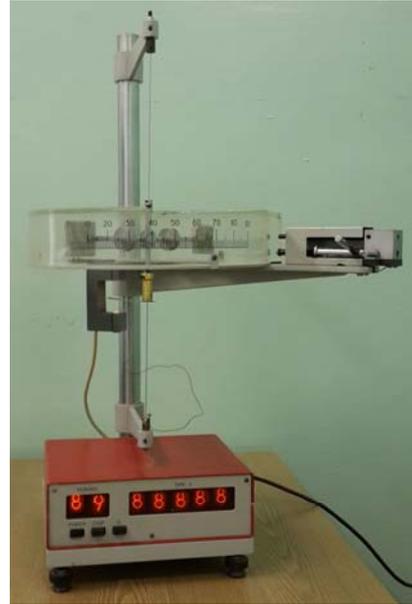
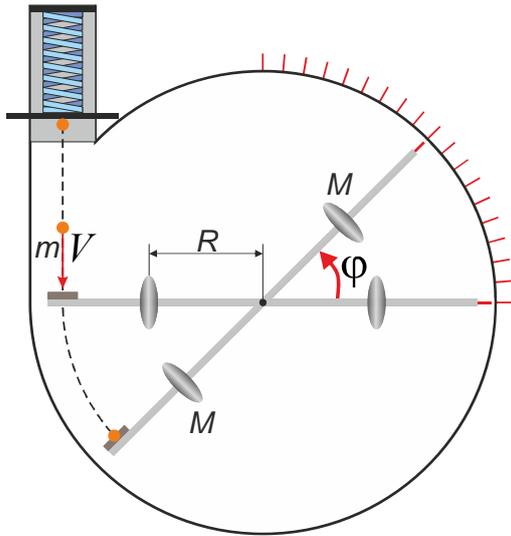


Рис.1. Схема и фото установки.

где член слева в уравнении описывает момент импульса системы до удара, второй - после удара; I_1 и ml^2 - моменты инерции маятника и пули относительно оси OO' (l - расстояние от места попадания пули в мишень до оси); ω - угловая скорость маятника вместе с пулей сразу же после удара; m и V - масса и скорость пули соответственно.

Величину ω можно определить с помощью закона сохранения энергии, если пренебречь потерями энергии (в реальности они имеют место из-за трения о воздух; не вполне жесткого закрепления точек подвеса и т.д.):

$$\frac{1}{2}C\varphi_0^2 = \frac{1}{2}(I_1 + ml^2)\omega^2, \quad (2)$$

где $\frac{1}{2}C\varphi_0^2$ - потенциальная энергия упругой деформации стальной нити в момент максимального отклонения маятника от положения равновесия (C - постоянная кручения проволоки, характеризующая её упругие свойства, φ_0 - угол поворота маятника, выраженный в радианах); $\frac{1}{2}(I_1 + ml^2)\omega^2$ - кинетическая энергия системы сразу после удара, когда нить подвеса еще не закручена.

Решая совместно (1) и (2), получим

$$V^2 = \frac{C\varphi_0^2}{m^2l^2}(I_1 + ml^2) \quad (3)$$

Так как момент инерции пули ml^2 много меньше момента инерции I_1 маятника, то выражение (3) можно переписать в следующем виде:

$$V^2 = \frac{C\varphi_0^2}{m^2l^2}I_1 \quad (4)$$

Таким образом, зная массу пули m и измеряя угол φ_0 и расстояние можно определить начальную скорость пули. Однако для этого должны быть известны постоянная кручения проволоки C и момент инерции маятника I_1 .

Эти величины могут быть найдены в отдельном опыте. Для крутильных колебаний, которые совершает маятник, выражение для периода колебаний T имеет следующий вид

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{C}} \quad (5)$$

Измеряя периоды колебаний для различных моментов инерции маятника, можно определить искомые величины I_1 и C формуле (4).

Если на стержне маятника на расстоянии R_1 , от оси вращения поместить два одинаковых груза одинаковой массой M , то момент инерции системы будет равен

$$I_1 = I_0 + 2MR_1^2, \quad (6)$$

где MR_1^2 - момент инерции вращения одного груза относительно оси вращения, I_0 - момент инерции маятника без грузов. Период колебаний маятника в этом случае будет

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{C}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + 2MR_1^2}{C}}, \quad (7)$$

Если грузы расположить на расстоянии R_2 от оси вращения, то период соответственно:

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{C}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_0 + 2MR_2^2}{C}} \quad (8)$$

Из уравнений (7) и (8) с учетом (6) получим формулы для расчета постоянная кручения проволоки C и моменты инерции маятника без груза I_0 и с грузом I_1 :

$$C = \frac{8\pi^2 M (R_2^2 - R_1^2)}{T_2^2 - T_1^2} \quad (9)$$

$$I_0 = \frac{2M (R_2^2 T_1^2 - R_1^2 T_2^2)}{T_2^2 - T_1^2} \quad (10)$$

Для уменьшения погрешности, с которой определяется величина I_0 , расстояния и следует взять заметно отличающимися друг от друга. Лучше взять R_1 возможно ближе к оси вращения, а R_2 на максимальном расстоянии от нее.

$$I_1 = \frac{T_1^2}{T_2^2 - T_1^2} 2M (R_2^2 - R_1^2) \quad (11)$$

Подставляя полученные выражения (10) и (11) в уравнение (4), получаем окончательную формулу для вычисления скорости полета пули:

$$V = \frac{4\pi M}{ml} \varphi_0 \frac{T_1}{T_2^2 - T_1^2} (R_2^2 - R_1^2) \quad (12)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Запишите массы грузов и пули ($m = \underline{\hspace{2cm}}$, кг; $M = \underline{\hspace{2cm}}$, кг).
2. Произвести регулировку положения основания при помощи регулировочных опор.
3. Установить риску на одной из мишеней маятника против нулевого деления шкалы, для чего разверните нижний подвес в требуемом направлении.
4. Убедиться, что маятник находится в положении равновесия
5. Максимально приблизить грузы, расположенные на стержне, к оси вращения маятника и зафиксировать их положение винтами. Записать значения ($R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, м) положение грузов относительно оси вращения.

6. Нажать кнопку «сеть» милисекундомера, при этом должны загореться лампочки и цифровые индикаторы. Через 1-2 минуты прибор готов к работе.
7. Зарядить пусковое устройство, для чего одну из его подвижных ручек повернуть вверх и вложить пулю, затем вернуть эту ручку в исходное положение. Потянуть обе подвижные ручки на себя до щелчка

Таблица 1

№	l , м	φ_0 , град	φ_0 , рад	T_1 , с	T_2 , с	V , м/с	I_0 , кг·м ²	I_1 , кг·м ²	C , Н·м/рад
1									
2									
3									
4									
5									

8. Убедившись, что маятник находится в состоянии покоя, произвести «выстрел», для чего одну из подвижных ручек опустить вниз.

9. По шкале определить максимальный угол отклонения маятника. Результат записать в таблицу 1. Значение φ_0 перевести в радианы $\left(\varphi_{рад} = \frac{\pi\varphi}{180}\right)$ и записать в таблицу 1.

10. Определить прицельное расстояние l – расстояние от оси вращения до места прилипания пули и записать в таблицу 1.

11. Произвести 5 выстрелов и определить среднее значение угла отклонения маятника.

12. Для измерения периода колебаний T_1 отклонить маятник на небольшой угол (10-15 градусов). Нажать клавишу «сброс». При этом на световом табло высвечиваются нули. Отпустить маятник. После подсчета измерителем числа колебаний времени 9 полных колебаний нажать клавишу «стоп». При этом прибор автоматически совершит отсчет времени 10 полных колебаний. Результаты измерений числа колебаний n и времени колебаний t занести в таблицу 1. Измерения повторить 5 раз.

13. Переместить грузы M на большее расстояние от оси вращения. Записать значения положения грузов ($R_2 = \dots$, м).

14. Определить период колебаний маятника T_2 при новом положении грузов согласно пункту 12. Измерения повторить 5 раз. Результаты измерений занести в таблицу 1.

15. Определить по формулам (9) - (12) постоянную кручения проволоки C , моменты инерции маятника без груза I_0 и с грузом I_1 и скорость пули V и запишите в таблицу 1.

16. Заполните таблицу 2.

Таблица 2

$\langle l \rangle =$	$\langle l^2 \rangle =$	$\langle \varphi_0 \rangle =$	$\langle \varphi_0^2 \rangle =$	$\langle T_1 \rangle =$	$\langle T_1^2 \rangle =$	$\langle T_2 \rangle =$	$\langle T_2^2 \rangle =$
-----------------------	-------------------------	-------------------------------	---------------------------------	-------------------------	---------------------------	-------------------------	---------------------------

17. Определить относительную ошибку в определении скорости полета пули по формуле

$$S_{\langle V \rangle} = \sqrt{\left(\frac{S_{\langle \varphi_0 \rangle}}{\langle \varphi_0 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{S_{\langle T_1 \rangle}}{\langle T_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{S_{\langle T_2 \rangle}}{\langle T_2 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{S_{\langle l \rangle}}{\langle l \rangle}\right)^2}$$

$$S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}{n-1}}, \text{ где } x - l, \varphi_0, T_1 \text{ и } T_2 \text{ соответственно.}$$

18. Записать результат в виде: $V = \langle V \rangle \pm S_{\langle V \rangle} \langle V \rangle$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон сохранения момента количества движения.
2. Сформулируйте второй закон динамики вращательного движения.
3. Какие колебания называются гармоническими?

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики т.5, ч.1. Атомная физика. М. «Наука», 1980 г. и др. издания.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. 11-е изд., стер. - М.: 2006.— 560 с. Учебное пособие
3. Детлаф А.А и Яворский Б.М. Курс физики. М. Высшая школа. 2002.