

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПУЛИ.

ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК.

ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторным работам
1-12, 1-15

Методические указания содержат краткое описание методов экспериментального определения ускорения силы тяжести и скорости пули. Работы знакомят студентов с методами постановки экспериментальных исследований, экспериментальными установками, методиками обработки экспериментальных данных. Приведены контрольные вопросы и рекомендуемая литература.

Методические указания предназначены для студентов всех факультетов дневного и вечернего отделений.

Составители: Д. Ф. Китаев, П. Я. Нечаев,
В. Н. Градов

Рецензенты: Б. Н. Федоров, Ю. М. Дубинкин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПУЛИ

Цель работы: определение средней скорости полета пули, выпущенной из пневматической винтовки методом вращающихся дисков (методом Поля).

Приборы и принадлежности: установка для определения скорости полета пули, строботахометр, линейка, пуля.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ

Схема установки представлена на рис. 1. Тонкий валик с закрепленными на нем двумя бумажными дисками 1 и 3, имеющими градусную сетку, приводится во вращение электромотором 2. Питание электромотора производится от сети переменного тока через автотрансформатор, позволяющий менять число оборотов двигателя. Регулировочная ручка автотрансформатора 11 выведена на вертикальную панель лабораторного стола.

Пневматическая винтовка 5 закреплена в специальном держателе так, чтобы ось ее ствола была параллельна оси валика с дисками. Кроме винтовки и кронштейна с валиком на лабораторном столе установлены импульсная лампа 4 и блок строботахометра 6.

Сущность метода измерения заключается в следующем: пуля, летящая параллельно оси вращения, пробивает оба диска. За время полета пули между дисками Δt последние успевают повернуться на некоторый угол $\Delta\phi$, который определяется как разность угловых координат пробойн на дисках.

Средняя скорость полета пули v определяется по формуле

$$v = \frac{l}{\Delta t}, \quad (1)$$

где l — расстояние между дисками.

Воспользовавшись соотношениями $\omega = \Delta\phi/\Delta t$ и $\omega = 2\pi n$, где n — число оборотов дисков в единицу времени, а ω — угловая скорость вращения, можно преобразовать формулу (1) к виду

$$v = \frac{2\pi nl}{\Delta\phi}. \quad (2)$$

Учитывая, что $\Delta\phi$ измеряется в градусах, а n — в оборотах в минуту, формулу (1) удобно записать в следующей окончательной форме:

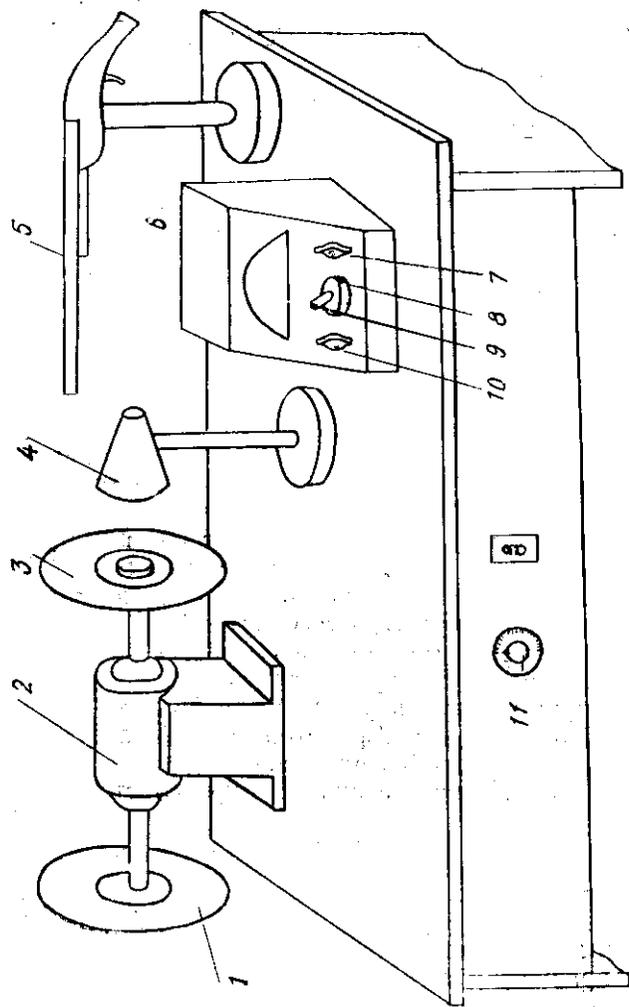


Рис. 1

$$v = \frac{6nl}{\Delta\varphi} \quad (3)$$

Для определения скорости вращения дисков в данной работе используется стробоскопический эффект, который наблюдается при освещении вращающихся дисков мигающей лампой. Когда отношение частоты оборотов дисков v_d к частоте вспышек импульсной лампы v_l строботачометра оказывается равным целому числу, диски при визуальном наблюдении кажутся неподвижными. Для удобства наблюдения на диске сделана метка — яркая линия, проведенная вдоль радиуса. Если $v_d/v_l = m$, то на диске, кажущемся неподвижным, будет видна одна линия.

Максимальная частота вспышек лампы, при которой еще будет наблюдаться этот эффект, очевидно, равна частоте оборотов диска, т. е. при $m = 1$. При других соотношениях между v_d и v_l невозможно наблюдать четкое неподвижное изображение метки, хотя возможны и такие отношения частот v_l, v_d , для которых на дисках видны неподвижные симметричные группы из 2, 3, 4 и т. д. линий.

Частоту вспышек лампы можно менять с помощью регулятора 8 (грубо) и регулятора 9 (плавно) настройки строботачометра. Число оборотов диска в минуту фиксируется на одной из шкал прибора в зависимости от положения переключателя диапазонов на панели прибора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с установкой, отметить карандашом все предыдущие пробойны, зарядить винтовку.
2. Измерить расстояние между дисками при помощи линейки.
3. Включить тумблер «Сеть» на стенке стола, перевести переключатель 10 из положения «Выкл.» в положение «Сеть». Прогреть прибор в течение 3—4 минут.
4. Вращая регулятор автотрансформатора, задать произвольную скорость вращения двигателя.
5. Поставить переключатель 10 в положение «Лампа». Вращая регуляторы 8 и 9, найти такую частоту вспышек лампы, при которой на диске видна только одна неподвижная метка. Чтобы убедиться в этом, следует подбирать частоту, начиная с максимальной, постепенно ее уменьшая. Если v_l немного больше v_d , то метка кажется вращающейся в обратную сторону. Записать показание строботачометра.
6. Выстрелить вдоль оси вращающихся дисков.
7. Выключить двигатель и лампу переключателем 10. После

остановки найти и отметить пробойны на дисках, определить их угловые координаты φ_1 и φ_2 и занести в таблицу.

8. Повторить в указанной последовательности опыт пять раз при одной и той же скорости вращения двигателя в пределах 1200—2000 об/мин.

№ п/п	l , м	φ_1 , град.	φ_2 , град.	$\Delta\varphi$, град.	n , об/мин	v , м/с	Δv_i	Δv_i^2
1								
2								
3								
4								
5								

Внимание! Если при выстреле пули застряла в стволе, следует, не заряжая новой пули, повторить выстрел. Если и в этом случае результата не будет, необходимо выключить установку и обратиться к лаборанту. Категорически запрещается повторный выстрел новой пулей!

ПОРЯДОК ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Вычислить скорость пули по формуле (3).
2. Вычислить среднее значение скорости пули \bar{v} и оценить доверительный интервал скорости Δv , считая, что систематическими погрешностями можно пренебречь.
3. Окончательный результат представить в виде:

$$v = \bar{v} \pm \Delta v;$$

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100\%.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется средней скоростью тела? Мгновенной скоростью?
2. Объясните метод определения числа оборотов дисков.
3. Как связаны угловая и линейная скорости точки, движущейся по окружности?
4. Получите расчетную формулу для скорости пули.
5. Какими эффектами мы пренебрегаем при измерении скорости пули этим методом?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Савельев И. В. Курс общей физики. — М.: Наука. — Т. 1. — § 3, 5.

ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Цель работы: изучение некоторых свойств физического маятника и определение ускорения силы тяжести.

Приборы и принадлежности: физический маятник с отверстиями, секундомер, масштабная линейка, штатив с трехгранной призмой.

ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Физический маятник — твердое тело, способное совершать под действием силы тяжести колебания вокруг горизонтальной оси, не проходящей через центр масс тела.

Простейшим примером физического маятника может служить однородный металлический стержень прямоугольного сечения с отверстиями (рис. 1). Отверстия в стержне делают для подвешивания маятника на трехгранную призму, которая выполняет роль оси, вокруг которой маятник может совершать колебания. Эту ось принято называть точкой подвеса.

Движение маятника описывается основным уравнением динамики вращательного движения вокруг неподвижной оси:

$$I \frac{d\bar{\omega}}{dt} = \sum_{i=1}^n \bar{M}_i, \quad (1)$$

где I — момент инерции маятника относительно точки подвеса;
 $\bar{\omega}$ — угловая скорость;
 t — время;

$\sum_{i=1}^n \bar{M}_i$ — векторная (геометрическая) сумма моментов всех внешних сил, действующих на маятник.

Так как согласно определению $\bar{\omega} = d\bar{\varphi}/dt$, то уравнение (1) можно представить в виде

$$I \frac{d^2\bar{\varphi}}{dt^2} = \sum_{i=1}^n \bar{M}_i, \quad (2)$$

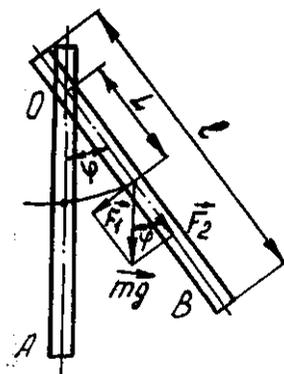


Рис. 1

где $\bar{\alpha}\varphi$ — угол отклонения маятника от положения равновесия.

Следует иметь в виду, что векторы $\bar{\varphi}$, $\bar{\omega}$, \bar{M} являются так называемыми псевдовекторами или, иначе, осевыми векторами, аксиальными векторами.

Так как колебания маятника происходят в фиксированной плоскости, то векторы $\bar{\varphi}$, $\bar{\omega}$ и \bar{M} направлены вдоль оси вращения, поэтому уравнение (2) может быть представлено в скалярной форме:

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \sum_{i=1}^n M_i. \quad (3)$$

В общем случае кроме силы тяжести на маятник могут действовать разнообразные силы, и, следовательно, моменты этих сил. В нашем случае внешними силами, действующими на колеблющийся маятник, являются: а) составляющая силы тяжести; б) сила сопротивления воздуха; в) сила трения в точке подвеса.

Как вы убедитесь из опыта, маятник совершает до ста и более колебаний без заметного затухания. Из этого следует, что моменты сил сопротивления воздуха и трения в точке подвеса существенно меньше момента составляющей силы тяжести.

Поэтому уравнение (3) можно написать в виде

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M, \quad (4)$$

где M — момент составляющей силы тяжести.

Согласно теореме Гюйгенса—Штейнера момент инерции маятника

$$I = \frac{ml^2}{12} + mL^2, \quad (5)$$

где (см. рис. 1) m — масса физического маятника; L — расстояние от центра тяжести маятника до оси вращения; l — длина всего маятника.

Из рис. 1 видно, что момент силы тяжести

$$M = -mgL \cdot \sin \varphi. \quad (6)$$

При малых φ имеем $\sin \varphi \approx \varphi$, поэтому

$$M = -mgL \varphi. \quad (7)$$

Подставляя (5) и (7) в (4) и сокращая на m , получим

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{gL}{\frac{l^2}{12} + L^2} \varphi = 0. \quad (8)$$

Очевидно, множитель при φ в уравнении (8) имеет единицу

измерения, равную s^{-1} , то есть обратную времени, поэтому обозначим

$$\omega^2 = \frac{gL}{\frac{l^2}{12} + L^2}. \quad (9)$$

С учетом (9) уравнение (8) примет вид

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \omega^2 \varphi = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) является обыкновенным линейным однородным дифференциальным уравнением второго порядка.

Нетрудно доказать, что решением уравнения (10) является функция

$$\varphi(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (11)$$

где $\varphi(t)$ — угол отклонения маятника в момент времени t ;

A — амплитуда колебаний;

ω — круговая частота;

φ_0 — начальная фаза.

Значения A и φ_0 определяются начальными условиями задачи.

Согласно определению круговой частоты имеем

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (12)$$

Подставляя в уравнение (12) значение ω из уравнения (9) и решая полученное уравнение относительно ускорения свободного падения, имеем

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} \left(\frac{l^2}{12L} + L \right). \quad (13)$$

Уравнение (13) интересно тем, что в правой его части все параметры: T , L и l легко можно определить путем несложных измерений. Поэтому уравнение (13) может служить рабочим уравнением для экспериментального определения ускорения силы тяжести.

Более наглядно уравнение (13) может быть получено следующим образом. Период колебаний физического маятника определяется формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgL}}, \quad (14)$$

где I — момент инерции маятника, определяемый уравнением (5). Решая совместно уравнения (5) и (14) относительно g , получаем уравнение (13).

Существуют и другие способы определения ускорения силы тяжести, но рассматриваемый здесь является наиболее простым и по точности определения величины g не уступает им.

Из уравнения (13) видно, что ускорение силы тяжести не зависит ни от фазы, ни от амплитуды колебаний. Но это утверждение справедливо только для тех колебаний, которые подчиняются уравнению (10), а движение маятника описывается этим уравнением приближенно — мера приближения определяется сделанным допущением $\sin \varphi \approx \varphi$.

Если период колебаний не зависит от амплитуды, то такие колебания называются изохронными. Очевидно, колебания физического маятника при выполнении условия $\sin \varphi \approx \varphi$ должны быть изохронными.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для определения ускорения силы тяжести представлена на рис. 1, где физический маятник изображен в двух положениях: в положении равновесия A и в состоянии максимального отклонения от положения равновесия B . В качестве подвеса (точка O на рисунке) используется стальная трехгранная призма, расположенная в верхней части штатива (на рисунке штатив не показан).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить длину всего маятника l и три расстояния L_1, L_2, L_3 от центра тяжести маятника до оси вращения (точка O на рис. 1).

2. Подвесить маятник на трехгранную призму при максимальном значении L_1 . Убедиться в том, что верхняя грань призмы касается стержня по всей его толщине и колебания маятника происходят строго в одной плоскости. Отклонить маятник на угол $\varphi = 5-7^\circ$ от положения равновесия и определить с помощью секундомера время τ $N = 50$ колебаний. Если три значения τ в трех опытах при одном и том же угле $\varphi = 5-7^\circ$ не отличаются более чем на $1-2\%$, то можно ограничиться тремя опытами. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	N	$L_i, \text{ м}$	$l_{\text{пр}i}, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$\bar{T}, \text{ с}$
1	50					
2	50					
3	50					

3. Последовательно подвесить маятник на трехгранную призму при значениях L_2 и L_3 и по методике, изложенной выше (см. п. 2), при $\varphi = 5-7^\circ$ определить время τ $N = 50$ колебаний. При одном значении L опыт повторить три раза. Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	N	$L_i, \text{ м}$	$l_{\text{пр}i}, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$\bar{T}, \text{ с}$
1	50					
2	50					
3	50					

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Для всех опытов определить период T колебаний маятника по формуле

$$T = \tau/N. \quad (15)$$

Полученные результаты занести в табл. 1 и 2.

2. Определить среднее значение периода \bar{T} для всех серий опытов:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i. \quad (16)$$

Полученные результаты занести в табл. 1 и 2.

3. Вычислить значения приведенной длины маятника для всех значений $L: L_1, L_2, L_3$.

4. По результатам табл. 1 определить среднее значение ускорения силы тяжести \bar{g} :

$$\bar{g} = \frac{4\pi^2}{T^2} \left(\frac{l^2}{12L} + L \right). \quad (17)$$

5. Определить относительную ε_g и абсолютную Δg погрешности определения среднего значения ускорения силы тяжести:

$$\varepsilon_g = \sqrt{\varepsilon_\tau^2 + \varepsilon_{\text{пр}}^2}; \quad (18)$$

$$\Delta g = \varepsilon_g \bar{g}, \quad (19)$$

где ε_τ и $\varepsilon_{\text{пр}}$ — относительные погрешности определения времени и приведенной длины маятника.

Значения ε_τ и $\varepsilon_{\text{пр}}$ определить по формулам:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta T}{T} = \frac{t_{\alpha, n}}{T} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T)^2}{n(n-1)}}; \quad (20)$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\Delta l_{\text{пр}}}{l_{\text{пр}}} = \frac{t_{\alpha, n}}{l_{\text{пр}}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{\text{пр}i} - l_{\text{пр}})^2}{n(n-1)}}, \quad (21)$$

где $t_{\alpha, n}$ — коэффициент Стьюдента, можно взять: $\alpha = 0,95$;
 n — число серий измерений.

7. Окончательный результат записать в форме

$$g = \bar{g} \pm \Delta g. \quad (22)$$

8. Сравнить табличное значение ускорения силы тяжести $g = 9,807 \text{ м/с}^2$ с доверительным интервалом:

$$(\bar{g} - \Delta g) - (\bar{g} + \Delta g). \quad (23)$$

9. По результатам табл. 2 построить и проанализировать зависимость периода колебаний T от расстояния между точкой подвеса и центром масс $L: T = f(L)$.

Преобразовать уравнение (17) к виду

$$T^2 L = \frac{4\pi^2}{g} \frac{l^2}{12} + \frac{4\pi^2}{g} L^2 \quad (24)$$

и построить график функции $T^2 L = f(L^2)$.

Проанализировать этот график.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определения физического и математического маятников.
2. Напишите формулы для периодов колебаний физического и математического маятников.
3. При каких упрощающих предположениях выведена рабочая формула (13)?
4. Выведите рабочую формулу (13) для определения ускорения силы тяжести опытным путем.
5. Какие колебания физического маятника можно считать гармоническими, изохронными?
6. Сформулируйте и запишите теорему Гюйгенса—Штейнера.
7. Напишите дифференциальное уравнение гармонических колебаний, вызываемых составляющей силы тяжести; напишите решение этого уравнения.
8. Дайте анализ уравнения (13) с точки зрения уменьшения погрешности определения ускорения силы тяжести.
9. Найти по графику $T^2 L = f(L^2)$ величины $g/4\pi^2$ и $l^2/12$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деглаф А. А., Яворский Б. М., Милковская Л. Б. Курс физики. — М.: Высшая школа, 1973. — Т. 1. — С. 146—155.
2. Савельев И. В. Курс общей физики. — М.: Наука, 1977. — Т. 1. — С. 182—186.

Составители: Дмитрий Федорович Китаев,
 Петр Яковлевич Нечаев,
 Виталий Николаевич Градов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПУЛИ ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Редактор Т. К. Кретнина
 Техн. редактор Н. М. Каленюк
 Корректор Н. С. Купрянова

Сдано в набор 11.03.88 г. Подписано в печать 28.04.88 г.
 Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.
 Печать высокая. Гарнитура литературная.
 Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,6. Т. 2000 экз.
 Заказ 513. Бесплатно.
 Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
 авиационный институт им. академика С. П. Королева,
 г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. ЭОЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.