

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Т. Ф. ГОРБАЧЕВА»

Кафедра физики

ФИЗИКА.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Лабораторный практикум К-304.5 по дисциплине «Физика»
для технических специальностей и направлений

Составители В. В. Дырдин
А. А. Мальшин
Т. Л. Ким
И. В. Цвеклинская

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 7 от 09.02.2016
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления 20.03.01
Протокол № 8 от 29.02.2016
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
Лабораторная работа № 1 «Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса»	3
Лабораторная работа № 2 «Изучение абсолютно упругого удара»	9
Лабораторная работа № 3 «Изучение основного закона динамики поступательного движения»	16
Лабораторная работа № 4 «Определение момента инерции маятника Максвелла».....	23
Лабораторная работа № 5 «Определение момента инерции маятника Обербека».....	32
Лабораторная работа № 6 «Определение параметров вращательного движения твердых тел».....	39
Список рекомендуемой литературы.....	46

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемый лабораторный практикум представляет собой необходимый перечень лабораторных работ, предусмотренных ФГОС и рабочими программами курса физики в техническом ВУЗе. Выполнение физического практикума направлено на формирование у студентов *профессиональных* компетенций, готовностью выполнять экспериментальные и лабораторные исследования, интерпретировать полученные результаты, составлять и защищать отчеты.

В результате освоения физического практикума по дисциплине «Физика» студент должен: а) *знать* основные физические явления и законы; б) *уметь* выявлять физическую сущность явлений и процессов, выполнять необходимые расчеты; в) *владеть* инструментарием и приборами для проведения необходимых физических измерений и обработкой результатов экспериментальных данных.

Описания лабораторных работ изложены так, чтобы студент смог самостоятельно разобраться в физических закономерностях и технических особенностях установок, на которых выполняются лабораторные работы. На подготовку к выполнению каждой лабораторной работы студент должен затратить 4 часа.

При подготовке к лабораторным работам необходимо внимательно прочесть описание работы, изучить теоретические основы данной работы по литературным источникам, разобраться с принципиальной и монтажной схемами экспериментальной установки и порядком проведения измерений. Составить конспект, содержащий титульный лист определенного образца, рабочие формулы, схему экспериментальной установки и таблицы для записи результатов измерений.

Студент будет допущен к выполнению лабораторной работы после обсуждения с преподавателем цели работы, методики расчета искомых величин и погрешностей их измерений и физической сути проверяемых закономерностей.

По окончании эксперимента нужно обработать полученные результаты, построить соответствующие графики (где это требуется), проанализировать результаты проведенного эксперимента и сделать соответствующий вывод, который должен содержать особенности измерений, расчета и суть физических законов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса

1. Цель работы: а) изучить особенности методики определения коэффициента внутреннего трения методом Стокса.

2. Подготовка к работе: прочитать в [1] § 10.8 и в [2] §§ 31, 32. Для выполнения работы студент должен: а) знать основное уравнение динамики поступательного движения тела; б) уметь рассчитывать силы, действующие на шарик, движущийся в жидкости; в) знать единицы измерения и физический смысл коэффициента внутреннего трения и его зависимость от температуры жидкости и газа; г) знать связь коэффициентов динамической и кинематической вязкости; е) уметь рассчитывать погрешности измерений.

3. Методика измерений и расчета

В трубках различные слои жидкости движутся с разными скоростями, причем, чем дальше слой от стенки сосуда, тем его скорость больше, т. е. при ламинарном течении наблюдается параболический закон изменения скорости. При этом слой жидкости с большей скоростью увлекает рядом находящийся слой, движущийся с меньшей скоростью. Слой же с меньшей скоростью, в свою очередь, действует на слой, движущийся с большей скоростью, и тормозит его. Это возможно в силу обмена импульсом молекул, входящих в эти слои.

При установившемся движении скорости слоев остаются постоянными.

Силу, с которой один слой жидкости действует на другой, называют силой внутреннего трения.

Величина силы внутреннего трения зависит от разности скоростей движения слоев, расстояния между слоями и площади соприкосновения.

Модуль этой силы выражается формулой Ньютона

$$F = \eta \left| \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta x} \right| \Delta S,$$

где F – сила внутреннего трения; ΔS – площадь, на которую действует сила трения; $\Delta \vec{v}$ – разность скоростей слоев, отстоящих на расстоянии, равном Δx ; η – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость).

Коэффициент внутреннего трения может быть определен из наблюдений за движением шарика в вязкой среде под действием силы тяжести.

На шарик (рис. 1), движущийся в вязкой среде действуют:

1. Сила тяжести

$$\vec{F}_T = m \vec{g} = \rho V \vec{g} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \vec{g}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала шарика; V – объем шарика. Сила тяжести направлена вниз (в направлении движения шарика).

2. Выталкивающая сила (сила Архимеда), направленная вверх и равная

$$\vec{F}_A = -m_0 \vec{g} = -\rho_0 V \vec{g} = -\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 \vec{g}, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность жидкости; m_0 – масса вытесненной жидкости; V – объем шарика.

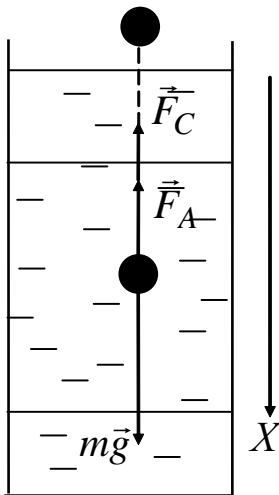


Рис. 1. Схема сил, действующих на движущийся в жидкости шарик

3. Сила сопротивления среды, обусловленная вязкостью жидкости. Согласно формуле, выведенной Стоксом, она пропорциональна скорости v шарика, его радиусу и коэффициенту динамической вязкости (внутреннего трения):

$$F_C = -6 \pi \eta r \vec{v}. \quad (3)$$

Сила сопротивления направлена в сторону, противоположную скорости движения шарика. Эта формула справедлива для твердого шарика, движущегося в жидкости, при условии, что скорость его невелика, а

расстояние до границ жидкости значительно больше диаметра шарика.

Уравнение движения шарика имеет вид

$$\vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_C = m\vec{a}, \quad (4)$$

или в проекции на ось X (см. рис. 1) с учетом равенств (1–4):

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g - 6\pi\eta r v = ma, \quad (5)$$

где a – ускорение на начальном участке движения шарика.

Сила сопротивления $F_C = 6\pi\eta r v$ зависит от скорости и при некотором ее значении движение шарика становится равномерным, т. е. выполняется соотношение

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g - 6\pi\eta r v_0 = 0, \quad (6)$$

здесь v_0 – скорость установившегося равномерного движения, которая определяется по формуле

$$v_0 = \frac{\ell}{t}, \quad (7)$$

где ℓ – расстояние между метками на измерительном цилиндре с маслом; t – время равномерного движения шарика между этими метками.

Из уравнения (6) с учетом (7) находят коэффициент внутреннего трения:

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)g d^2 t}{18 \ell}, \quad (8)$$

где d – диаметр шарика.

4. Экспериментальная часть

4.1. Измерить диаметр шарика пять раз, результаты измерений занести в табл. 1.

4.2. Определить абсолютную погрешность Δd нахождения истинного значения диаметра шарика. Для этого найти:

а) $\langle d \rangle$ – среднее арифметическое пяти измерений:

$$\langle d \rangle = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_5}{5};$$

б) Δd_i – случайную погрешность i -го измерения:

$$\Delta d_i = |\langle d \rangle - d_i|;$$

в) $\sigma_{\langle d \rangle}$ – среднее квадратичное отклонение от среднего арифметического из n измерений ($n = 5$):

$$\sigma_{\langle d \rangle} = \sqrt{\frac{\sum \Delta d_i^2}{n(n-1)}};$$

г) $t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента (для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ при числе измерений $n = 5$, $t_{\alpha, n} = 2,78$);

д) $\Delta d_{\text{сл}}$ – случайную погрешность измеряемой величины:

$$\Delta d_{\text{сл}} = t_{\alpha, n} \sigma_{\langle d \rangle};$$

е) $\Delta d_{\text{пр}}$ – приборную погрешность (для микрометра $\Delta d_{\text{пр}} = 0,01 \text{ мм}$);

ж) Δd – абсолютную погрешность измерений:

$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_{\text{пр}}^2 + \Delta d_{\text{сл}}^2};$$

з) ε_d – относительную погрешность измерений:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{\langle d \rangle} \cdot 100\%.$$

и) записать результат измерений в виде $d = \langle d \rangle \pm \Delta d$.

Результаты расчетов занести в табл. 1.

4.3. Измерить расстояние ℓ между метками на цилиндре (по верхним краям меток).

4.4. Опустить шарик в цилиндр через воронку. Когда шарик окажется на уровне края верхней метки, включить секундомер. Секундомер выключить, когда шарик достигнет верхнего края нижней метки. Следить за тем, чтобы шарик не подходил близко к стенкам сосуда. С помощью магнита извлечь шарик из масла.

4.5. Опыт повторить пять раз. Время движения t_i шарика занести в табл. 2, подобную табл. 1, которую составить самостоятельно. Определить доверительный интервал прямых измерений времени и относительную ошибку ε_t . Записать результат измерений в виде: $t = \langle t \rangle \pm \Delta t$.

Таблица 1

Результаты измерения диаметра шарика
и расчета погрешностей

№ п/ п	d_i	$\langle d \rangle$	Δd_i	Δd_i^2	$\sum \Delta d_i^2$	$\sigma_{\langle d \rangle}$	$t_{\alpha, n}$	$\Delta d_{\text{сл}}$	$\Delta d_{\text{пр}}$	Δd	ε_d	$\langle d \rangle \pm \Delta d$	
	мм	мм	мм	мм ²	мм ²	мм	$a = 0,95$	мм	мм	мм	%	мм	
1							2,78						
2													
3													
4													
5													

4.6. Вычислить среднее значение коэффициента внутреннего трения по формуле (8), подставив средние значения прямых

измерений диаметра шарика и времени его движения между метками.

4.7. Рассчитать относительную и абсолютную погрешности результата косвенных измерений коэффициента внутреннего трения по формулам:

$$\varepsilon_{\eta} = \sqrt{4\varepsilon_d^2 + \varepsilon_t^2 + \varepsilon_l^2},$$

где $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$; Δl – абсолютная погрешность, которая равна цене деления шкалы линейки, с помощью которой измеряется расстояние, пройденное шариком при установившемся движении,

$$\Delta\eta = \langle \eta \rangle \varepsilon_{\eta}.$$

Результат вычислений записать в виде

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta\eta.$$

4.8. Данные измерений и вычислений занести в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерения коэффициента внутреннего трения

$\langle d \rangle$	l	$\langle t \rangle$	ρ	ρ_0	$\langle \eta \rangle$	ε_{η}	$\Delta\eta$
м	м	с	кг/м ³	кг/м ³	Па · с	%	Па · с

4.9. Сравнить полученное значение коэффициента вязкости со справочным значением.

5. Сделать вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Изучение абсолютно упругого удара шаров

1. Цель работы: изучить способ определения скорости тел до и после удара на основе законов сохранения.

2. Подготовка к работе: прочитать в учебниках [1] §§ 7, 9 и [2] §§ 5.1, 5.2. Для выполнения работы студент должен знать: а) законы Ньютона; б) законы сохранения импульса и энергии; в) применение законов сохранения импульса и энергии для расчета скоростей при центральном упругом ударе; г) понятие неупругого удара, потери энергии при неупругом соударении; д) коэффициент восстановления; е) порядок расчета абсолютных и относительных погрешностей измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Установка для изучения удара шаров (рис. 1) представляет собой основание 1, которое располагается строго горизонтально с помощью регулировочных винтов 2. На основании смонтирована стойка 3 с двумя кронштейнами: верхним 4 и нижним 5. На верхнем кронштейне укреплены подвески 6, к которым на нитях подвешены шары 7. На нижнем кронштейне закреплен электромагнит 8 и две шкалы 9 для измерения углов отклонения шаров. С помощью винта 10 подвески устанавливаются так, чтобы в положении равновесия шары лишь слегка касались друг друга. При этом указатели положения шаров 11 должны находиться над нулевыми делениями шкал, которые можно смещать относительно кронштейна 5. Центральности удара добиваются путем перемещения подвесок нитей вдоль стержней, на которых они укреплены.

Время упругого удара шаров измеряется с помощью микросекундомера.

3.2. Методика расчета скорости шаров

В механике под *ударом* понимают кратковременное взаимодействие тел при их соприкосновении, например, столкновение шаров, удар молота о наковальню или сваю и др.

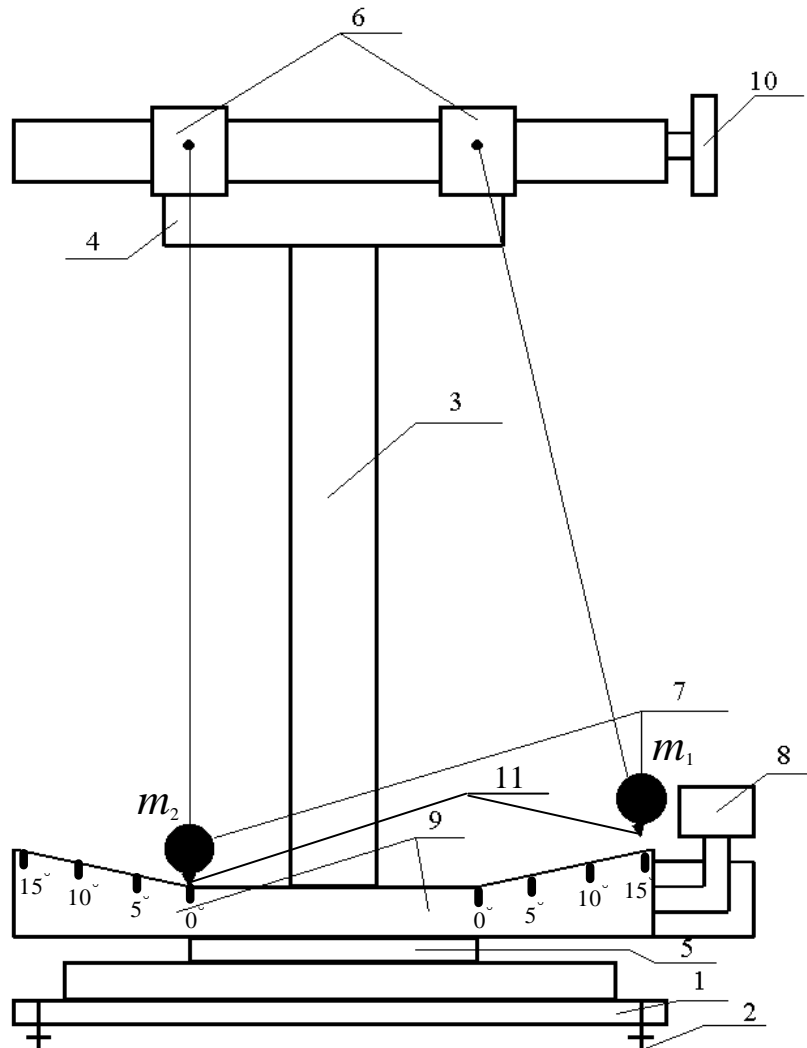


Рис. 1. Экспериментальная установка для изучения упругого удара шаров:

- 1 – основание; 2 – регулировочный винт; 3 – стойка;
 4, 5 – верхний и нижний кронштейны; 6 – подвески;
 7 – шары; 8 – электромагнит; 9 – шкала; 10 – винт;
 11 – указатели положения шаров

Удар называется *абсолютно упругим*, если после удара тела полностью восстанавливают свою первоначальную форму, то есть в телах отсутствует остаточная деформация.

Если правый шар массы m_1 отвести от положения равновесия на угол α (рис. 1) и отпустить его, то проходя через положение равновесия со скоростью v_1 этот шар столкнется с неподвижным шаром массой m_2 .

При взаимодействии шаров массами m_1 и m_2 выполняется закон сохранения импульса, который в проекции на ось X (рис. 2) запишется так:

$$m_1 v_1 = -m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (1)$$

где u_1 и u_2 – скорости шаров после удара.

Закон сохранения механической энергии: кинетическая энергия первого шара перед упругим ударом равна сумме кинетических энергий шаров после упругого удара:

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}. \quad (2)$$

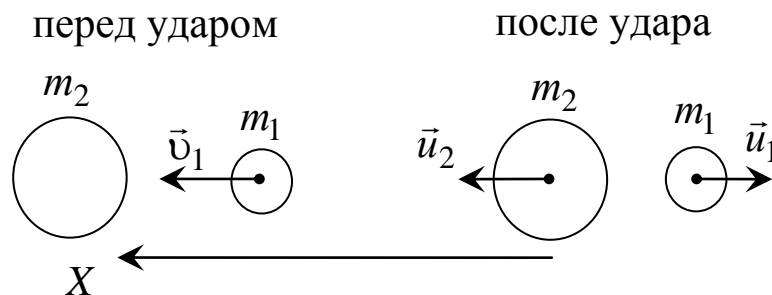


Рис. 2. Схема для расчета скоростей шаров

Решая систему уравнений (1) и (2), можно найти скорости шаров после удара

$$\begin{cases} u_1^T = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v_1; \\ u_2^T = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1, \end{cases} \quad (3)$$

где u_1^T и u_2^T – теоретические скорости шаров после упругого удара.

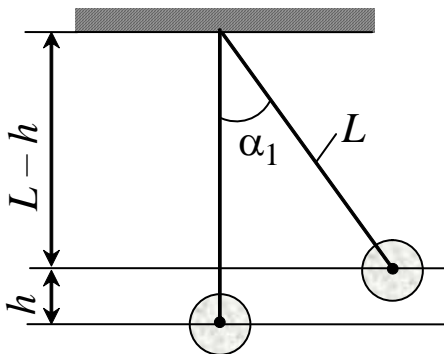
3.3. Расчет скоростей шаров после упругого удара по результатам экспериментальных измерений

Зная максимальный угол отклонения первого шара от положения равновесия до и после удара, можно определить скорость его в момент прохождения положения равновесия перед ударом и после него.

Пусть шар массой m_1 подвешен на нити длиной L и отклонен от положения равновесия на угол α_1 (рис. 3). После удара нить с шаром массой m_1 отклоняется на угол β_1 , а нить с шаром массой m_2 – на угол β_2 .

При отклонении нити на угол α центр масс шара поднимается на высоту h и потенциальная энергия принимает значение $U = mgh = 2mgL \sin^2 \frac{\alpha}{2}$, так как $h = L(1 - \cos \alpha) = 2L \sin^2 \frac{\alpha}{2}$.

При переходе из крайнего правого положения в положение равновесия действуют только консервативные силы, поэтому механическая энергия на высоте h равна механической энергии в положении равновесия:



$$\frac{mv^2}{2} = 2mgL \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}.$$

Тогда скорость шара массой m_1 при прохождении положения равновесия равна:

$$v = 2\sqrt{gL} \sin \frac{\alpha_1}{2}. \quad (4)$$

Рис. 3. Расчетная схема определения высоты подъема шара

Таким образом, определив экспериментально углы отклонения шаров α_1 , β_1 и β_2 , можно рассчитать их скорости по формуле (4). Для расчета необходимо угол α_1 заменить на угол β_1 или β_2 .

3.4. Коэффициент восстановления

Важной характеристикой удара является коэффициент восстановления скорости K , равный отношению относительной скорости тел после удара к их относительной скорости перед ударом

$$K = \frac{|\vec{u}_{\text{отн}}|}{|\vec{v}_{\text{отн}}|}. \quad (5)$$

Но

$$\vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 \quad \text{и} \quad \vec{u}_{\text{отн}} = \vec{u}_2 - \vec{u}_1. \quad (6)$$

Тогда

$$K = \frac{u_2 - (-u_1)}{v_1 - v_2} = \frac{u_1 + u_2}{v_1}, \quad (7)$$

т. к. v_2 перед ударом равна нулю.

Для абсолютно упругого удара $K = 1$, а для неупругого удара $K = 0$, так как $\vec{u}_1 = \vec{u}_2$ и $u_{\text{отн}} = 0$.

На практике для всех тел $0 \leq K \leq 1$. Таким образом, расчет коэффициента восстановления в результате реального удара позволяет оценить, насколько удар близок к абсолютно упругому. Например, если $K = 0,95$, то с погрешностью 5 % данный удар можно считать абсолютно упругим.

3.5. Порядок работы на установке

3.5.1. Убедиться в правильности настройки установки:

- а) шары едва касаются друг друга;
- б) центры обоих шаров лежат на одной горизонтальной прямой и в одной плоскости с осью электромагнита;
- в) указатели шаров расположены над нулевыми делениями шкал.

3.5.2. Включить сетевой шнур установки в сеть, нажать клавишу “Сеть” и отклонить шар массой m_1 на угол α_1 . При этом включится электромагнит, который удерживает отклоненный на угол α_1 шар массой m_1 .

3.5.3. Нажать клавишу “Пуск” – электромагнит отключается, шар массой m_1 сталкивается с покоящимся шаром массой m_2 . Время удара фиксируется микросекундомером. Шары после уда-

3.6.4. По формуле (4) рассчитать экспериментальные значения скоростей $u_1^{\text{э}}$ и $u_2^{\text{э}}$ шаров после удара по измеренным значениям β_1 и β_2 .

3.6.5. Сравнить экспериментальные и теоретические скорости шаров после удара.

3.6.6. Найти коэффициент восстановления K по формуле (7):

$$K = \frac{u_1^{\text{э}} + u_2^{\text{э}}}{v_1}.$$

3.6.7. Оценить, насколько удар шаров близок к упругому удару.

3.7. Проверка выполнимости третьего закона Ньютона при упругом ударе шаров

3.7.1. Найти изменение импульсов шаров при ударе в проекции на ось X (рис. 2):

$$\Delta P_1 = -m_1(u_1^{\text{э}} + v_1); \Delta P_2 = m_2 u_2^{\text{э}}.$$

3.7.2. Вычислить среднее значение силы, действующей на каждый из шаров, со стороны другого шара по формулам:

$$\langle F_{12} \rangle = \frac{\Delta P_1}{\langle \tau \rangle} = -\frac{m_1(u_1^{\text{э}} + v_1)}{\langle \tau \rangle}; \langle F_{21} \rangle = \frac{\Delta P_2}{\langle \tau \rangle} = \frac{m_2 u_2^{\text{э}}}{\langle \tau \rangle}.$$

Рассчитайте процентное расхождение данных величин.

3.7.3. Оценить величину механической энергии, перешедшей в другие виды энергии.

$$\Delta W = \frac{m_1 v_1^2}{2} - \left(\frac{m_1 (u_1^{\text{э}})^2}{2} + \frac{m_2 (u_2^{\text{э}})^2}{2} \right).$$

4. Сделать вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Изучение основного закона динамики поступательного движения

1. Цель работы: определить параметры поступательного движения связанной системы грузов при равноускоренном и равномерном движении.

2. Подготовка к работе: изучить в учебниках [1] §§ 3, 5–7 и [2] §§ 1.3, 2.1 – 2.5. Для выполнения работы студент должен знать: а) характеристики движения материальной точки (вектор перемещения, скорость, ускорение); б) основные уравнения динамики равномерного и ускоренного движения; в) понятия массы, силы и импульса; г) методику измерений и расчета; д) расчет погрешностей.

3. Выполнение работы

3.1. Описание лабораторной установки

Схема установки представлен на рис. 1. Машина Атвуда представляет собой два одинаковых цилиндра 1 массой M каждый, привязанные к концам нити, перекинутой через блок 2.

Если на правый цилиндр, находящийся у верхнего кронштейна 3, положить дополнительный груз 4, масса которого m , то система приходит в ускоренное поступательное движение.

При прохождении правым телом среднего кронштейна 5, снабженного фотоэлектрическим датчиком и кольцом, дополнительный груз снимается с цилиндра и включается миллисекундомер.

Дальнейшее равномерное движение механической системы происходит по инерции, и когда правый цилиндр доходит до нижнего кронштейна 6, тоже снабженного фотоэлектрическим датчиком, миллисекундомер выключается.

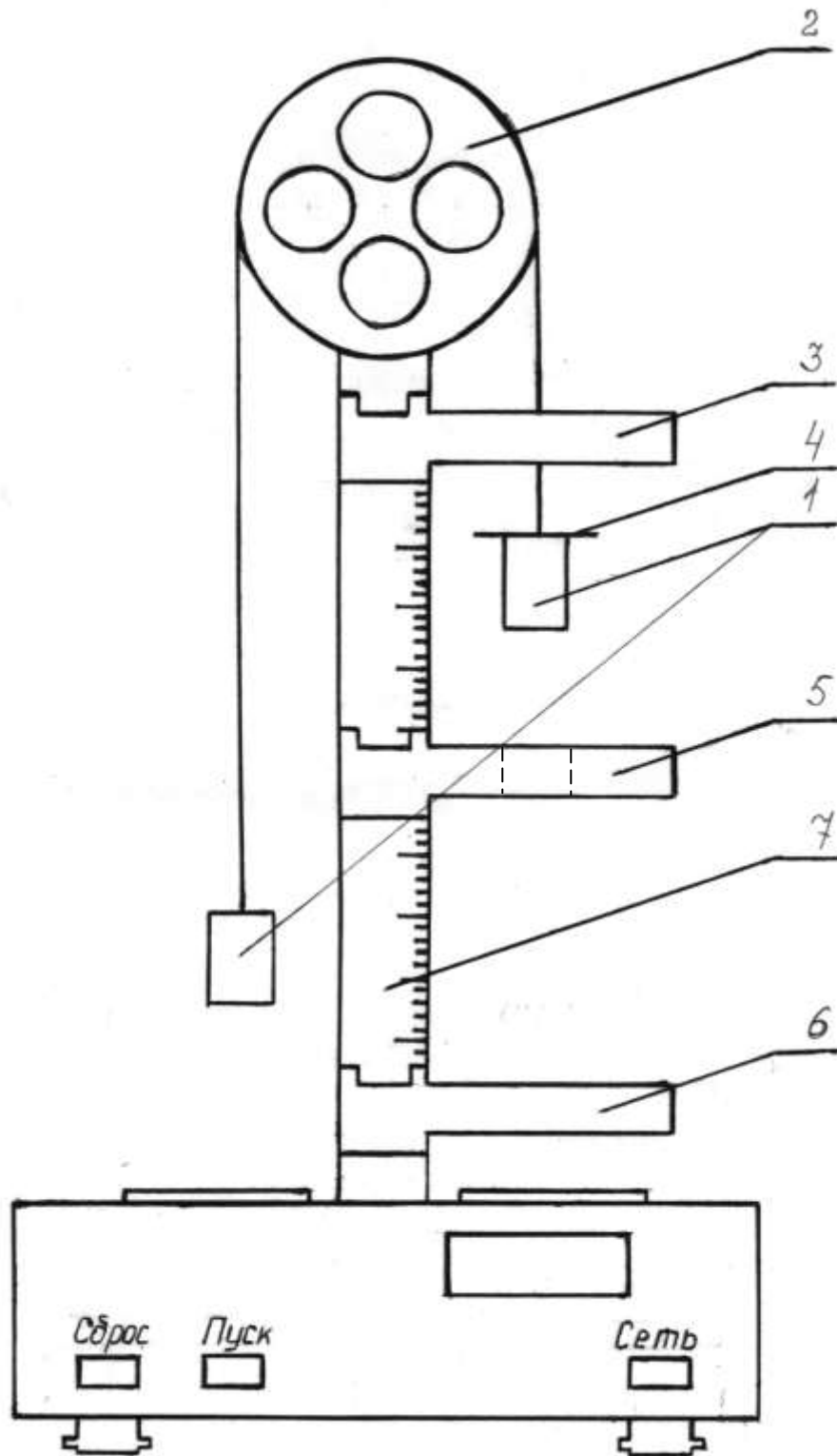


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
 1 – цилиндрические грузы; 2 – блок; 3 – верхний кронштейн;
 4 – дополнительный груз; 5 – средний кронштейн; 6 – нижний
 кронштейн; 7 – стойка

Работа нижнего фотодатчика согласована с работой тормозного электромагнита, который с помощью фрикционной муфты удерживает блок и нить с цилиндрами в состоянии покоя. Стойка 7, на которой укреплены блок и кронштейны, снабжена шкалой, начало которой совпадает с положением нижнего кронштейна.

Определив по шкале положение верхнего кронштейна H_2 (рис. 2) и среднего кронштейна H_1 , можно найти путь равноускоренного движения $L = H_2 - H_1$ и путь равномерного движения H_1 .

3.2. Методика измерений и расчета

Рассмотрим силы, действующие на каждое из тел, входящих в систему (рис. 2). На груз массой M действуют со стороны Земли гравитационная сила $M\vec{g}$, со стороны нити – упругая сила натяжения \vec{F}_1 . На тело массой $(M + m)$ действуют силы $(M + m)\vec{g}$ и \vec{F}_2 соответственно. На основании второго закона Ньютона запишем уравнения:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для левого груза: } M\vec{g} + \vec{F}_1 = M\vec{a}; \\ \text{для правого груза: } (M + m)\vec{g} + \vec{F}_2 = (M + m)\vec{a}. \end{array} \right\} \quad (1)$$

Учитывая, что нить невесома и нерастяжима, а масса блока пренебрежимо мала и трением в блоке можно пренебречь, уравнения (1) в проекциях на ось X примут вид с учетом $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_1'|$, $|\vec{F}_2| = |\vec{F}_2'|$:

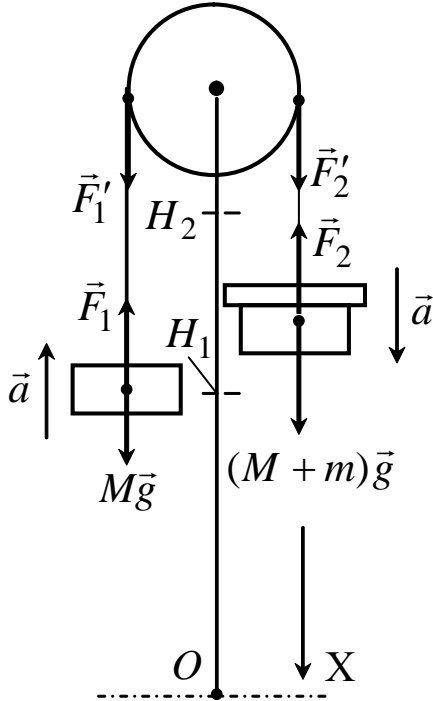
$$\left\{ \begin{array}{l} Mg - F = -Ma; \\ (M + m)g - F = (M + m)a. \end{array} \right. \quad (2)$$

Из полученной системы уравнений найдем «теоретическое» значение ускорения a :

$$a_T = \frac{mg}{2M + m}. \quad (3)$$

Значение скорости в конце участка $(H_2 - H_1)$ определим из кинематических уравнений равноускоренного движения:

$$v = \sqrt{2a(H_2 - H_1)}. \quad (4)$$



После «снятия» дополнительного грузика средним кронштейном движение грузов на участке от среднего до нижнего кронштейна в течение времени t (время, измеряемое электронным секундомером) будет равномерным со скоростью

$$v = \frac{H_1}{t}. \quad (5)$$

Из равенств (4) и (5) находим «экспериментальное» значение ускорения:

$$a_э = \frac{H_1^2}{2(H_2 - H_1)t^2}. \quad (6)$$

3.3. Порядок работы на установке

3.3.1. Установить нижнее основание правого груза на уровне горизонтальной отметки H_2 верхнего кронштейна. Включить сетевой шнур установки в сеть и нажать клавишу «Сеть». При этом включается тормозной электромагнит и тела удерживаются в заданном положении.

3.3.2. Положить на правое цилиндрическое тело дополнительный груз массой m и нажать клавишу «Пуск» – тормозной электромагнит отключается, тела приходят в движение. При пересечении правым телом светового луча в среднем кронштейне начинается отсчет времени равномерного движения, а при пере-

сечении луча света в нижнем кронштейне отсчет времени прекращается, одновременно включается электромагнит.

3.3.3. Нажать на клавишу «Сброс», при этом происходит обнуление показаний миллисекундомера и отключение электромагнита. Вновь привести систему в исходное состояние (п. 3.3.1).

3.3.4. Отжать клавишу «Пуск», при этом включается электромагнит и механическая система фиксируется в исходном состоянии. Далее последовательно повторить пункты 3.3.2–3.3.4.

3.4. Определение ускорения движущегося тела

3.4.1. Провести необходимые измерения времени для пяти разных грузов (грузы используются по одному и в наборе). Опыт с каждым грузом повторить пять раз, вычислить среднее значение времени и использовать его в расчетах. Результаты измерений занести в табл. 1.

3.4.2. Вычислить a_T и $a_э$ по формулам (3) и (6).

3.4.3. Объяснить расхождение между a_T и $a_э$. Найти процентное расхождение ε_a между a_T и $a_э$ для каждого груза:

$$\varepsilon_a = \frac{|a_T - a_э|}{a_T} \cdot 100\% .$$

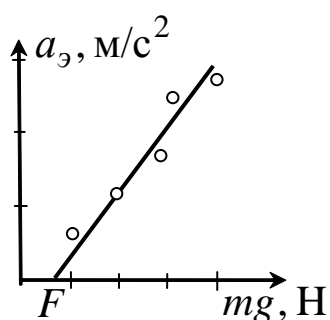


Рис. 3. График зависимости ускорения $a_э$ от силы тяжести mg

3.4.4. Построить график зависимости ускорения $a_э$ от силы тяжести mg (рис. 3). Прямая, проведенная через экспериментальные точки, отсекает на оси абсцисс отрезок, равный F , который учитывает силу трения в оси блока, а также различие сил натяжения нитей по обе стороны

3.4.5. Найти погрешность определения $a_э$, обусловленную случайными и приборными погрешностями.

Приборная погрешность измерения времени $\Delta t_{\text{пр}} = 0,001 \text{ с}$, а длины $\Delta H_2 = \Delta H_1 = 0,001 \text{ м}$.

Таблица 1

Результаты измерения времени
и расчета ускорения системы

$$H_1 = \quad \text{м}; H_2 = \quad \text{м}; ; M = 61 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

	$t,$ с	$\langle t \rangle,$ с	$m,$ кг	$a_T,$ м/с ²	$a_{\text{э}},$ м/с ²	$\varepsilon_a,$ %	$g_{\text{э}},$ м/с ²
1							
2							
3							
4							
5							
1							
2							
3							
4							
5							
1							
2							
3							
4							
5							
1							
2							
3							
4							
5							

Относительную погрешность косвенных измерений a_3 считать по формуле

$$\varepsilon_{a_3} = \sqrt{4\varepsilon_{H_1}^2 + \varepsilon_{H_2}^2 + 4\varepsilon_t^2}.$$

Абсолютная погрешность $\Delta a_3 = \langle a_3 \rangle \cdot \varepsilon_{a_3}$. Результат записать в виде $a_3 = \langle a_3 \rangle \pm \Delta a_3$.

Таблица 2

Расчет погрешностей при измерении
времени для одного из грузиков

№ п/п	t_i	$\langle t \rangle$	Δt_i	Δt_i^2	$\sum \Delta t_i^2$	$\sigma_{\langle t \rangle}$	$t_{\alpha, n}$	$\Delta t_{\text{сл}}$	$\Delta t_{\text{пр}}$	Δt	ε_t	ε_a
	с	с	с	с ²	с ²	с	$a = 0,95$	с	с	с	%	%
1							2,78					
2												
3												
4												
5												

4. Сделать вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Определение момента инерции маятника Максвелла

1. Цель работы: освоить метод определения момента инерции маятника Максвелла.

2. Подготовка к работе: прочитать в учебниках [2] §§ 4.1–4.3, 5.3, [1] §§ 4, 16–18. Для выполнения лабораторной работы студент должен знать: а) основные уравнения динамики поступательного и вращательного движения; б) определения момента силы относительно точки и оси и момента инерции тела; в) теорему Штейнера; г) методику измерений штангенциркулем; д) расчет погрешностей измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание установки

Общий вид установки ФРМ-03 приведён на рис. 1.

Основание 1 оснащено регулируемыми ножками 2, позволяющими произвести выравнивание прибора. В основании закреплена колонка 3, на которой крепятся два кронштейна: неподвижный верхний 4 и подвижный нижний 5. На верхнем кронштейне находятся электромагнит 6, фотоэлектрический датчик 7 и устройство (вороток) 8, для крепления и регулировки бифилярного подвеса маятника.

Нижний кронштейн, вместе с прикреплённым к нему фотодатчиком 9 можно перемещать вдоль колонки и фиксировать в любом положении в пределах шкалы колонки 0–420 мм.

Маятник Максвелла – это диск 11, закреплённый на оси 10, подвешенной на бифилярном подвесе. На диск крепится одно из трёх сменных колец 13, для изменения момента инерции маятника. Маятник с кольцом фиксируется в верхнем исходном положении с помощью электромагнита 6.

Миллисекундомер 14 с цифровой индикацией времени жестко закреплён на основании 1. При нажатии клавиши «Сеть» загораются лампочки фотоэлектрических датчиков и высвечива-

ются нули на индикаторе. Клавиша «Сброс» вызывает сброс всех схем миллисекундомера и подготовку его к измерению.

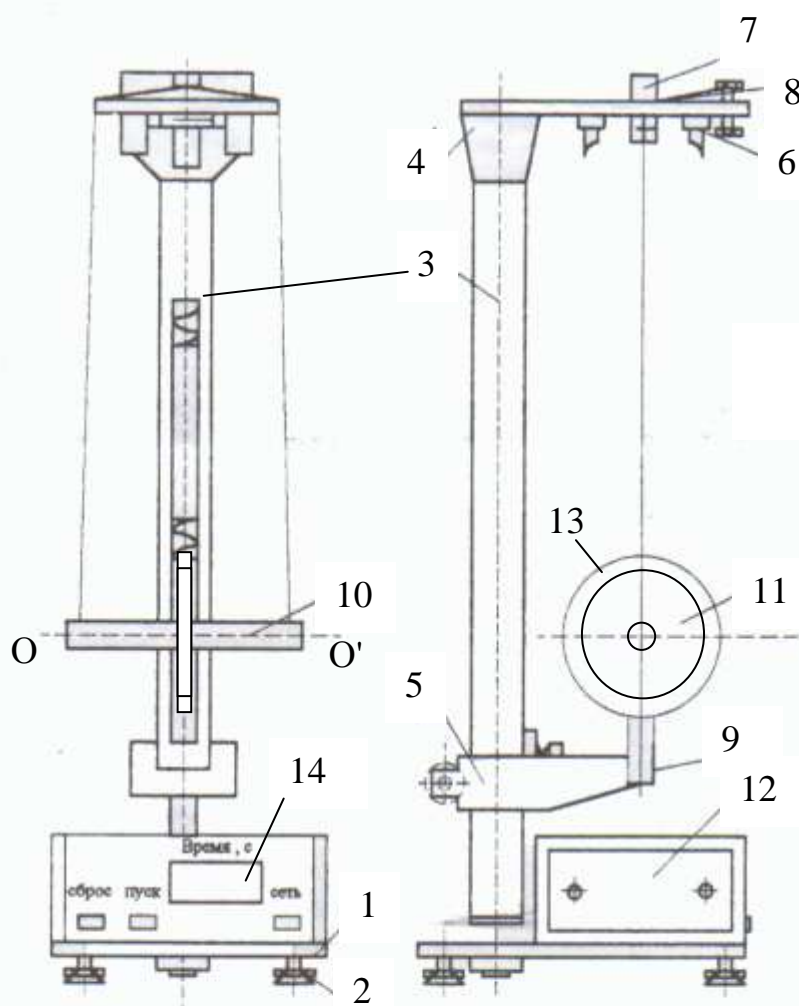


Рис. 1. Общий вид установки
FPM-03:

- 1 – основание установки; 2 – регулируемые ножки; 3 – колонка;
4, 5 – верхний и нижний кронштейны; 6 – электромагнит;
7, 9 – фотоэлектрические датчики; 8 – вороток; 10 – ось;
11 – диск; 12 – корпус прибора; 13 – сменное кольцо;
14 – миллисекундомер; OO' – мгновенная ось вращения

При нажатии клавиши «Пуск» электромагнит обесточивается и маятник, поднятый в верхнее положение, начинает раскручиваться. При пересечении верхнего фотодатчика миллисекундомер производит отсчёт времени. В момент пересечения маят-

ником оптической оси нижнего фотодатчика счёт времени прекращается.

3.2. Методика измерений и расчетов

Маятник Максвелла участвует в 2-х движениях: поступательном движении центра масс и вращательном движении относительно мгновенной оси OO' (см. рис. 2, 3).

3.2.1. Поступательное движение центра масс маятника Максвелла

Поступательное движение центра масс маятника Максвелла происходит под действием силы тяжести $m\vec{g}$ (рис. 2), которая также создает вращающий момент относительно мгновенной оси.

Центр масс маятника, проходя расстояние h (замеряется между верхним 7 и нижним 9 фотодатчиками на рис. 1) за время t , приобретает ускорение

$$a = \frac{2h}{t^2} \quad (1)$$

и максимальную скорость в конце движения

$$v_{\max} = at = \frac{2h}{t}. \quad (2)$$

3.2.2. Вращательное движение маятника Максвелла относительно мгновенной оси OO'

Поскольку момент инерции величина аддитивная, то теоретическое значение момента инерции маятника Максвелла относительно мгновенной оси вращения OO' складывается из моментов инерции диска $J_{\text{д}}$, оси маятника $J_{\text{о}}$ и сменного кольца $J_{\text{к}}$

$$J_{\text{т}} = J_{\text{д}} + J_{\text{о}} + J_{\text{к}}. \quad (3)$$

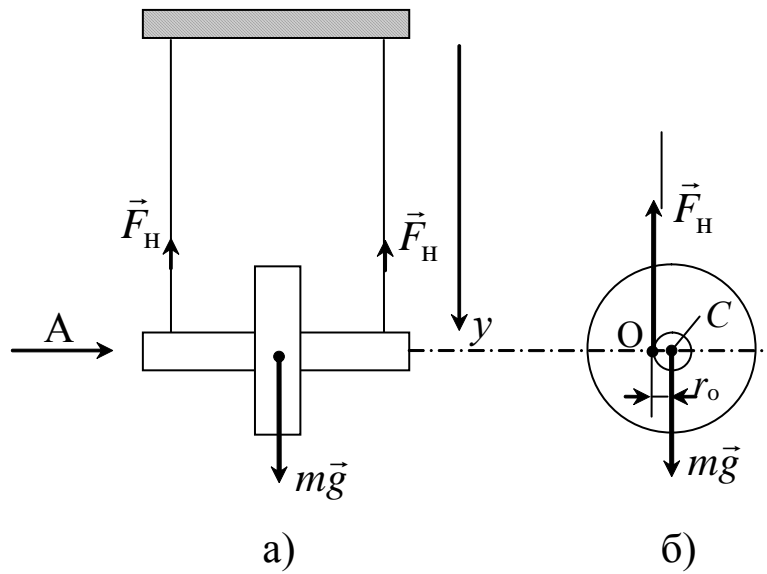


Рис. 2. Схема сил, действующих на маятник Максвелла: а) вид прямо; б) вид А; $m\vec{g}$ – сила тяжести; \vec{F}_H – сила натяжения нити; O – мгновенная ось вращения; C – центр масс маятника; r_o – радиус оси

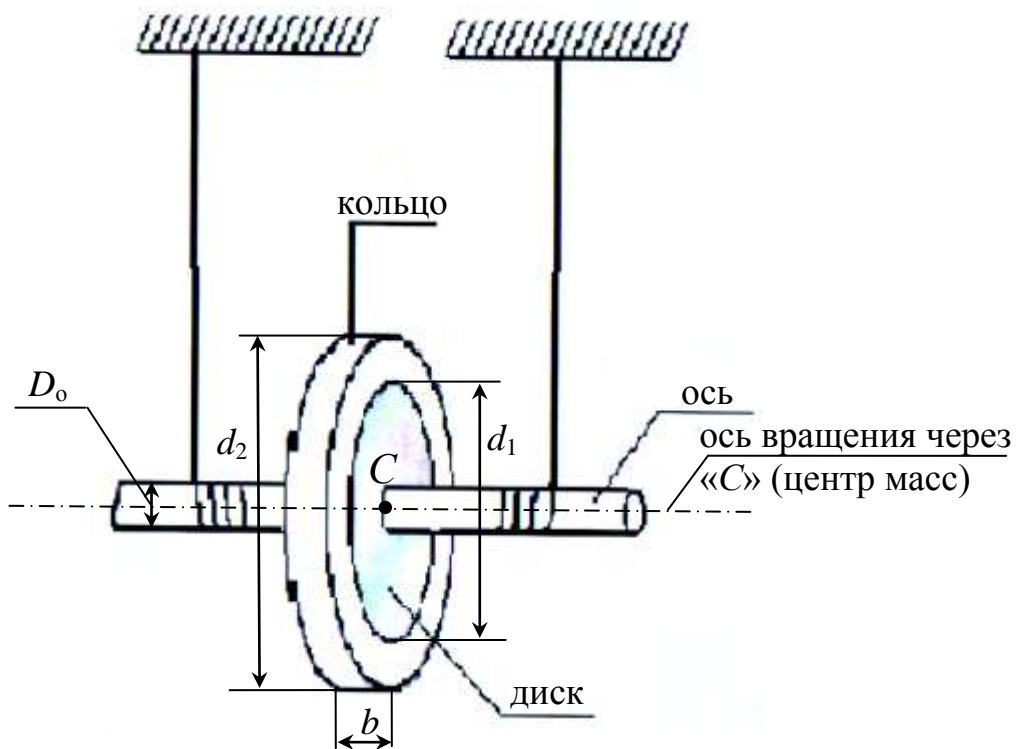


Рис. 3. Схема для расчета моментов инерции оси, диска и кольца

Для каждого элемента маятника:

1) момент инерции диска относительно мгновенной оси вращения OO'

$$J_{\text{д}} = \frac{m_{\text{д}}}{8} d_1^2 + m_{\text{д}} r_0^2, \quad (4)$$

где d_1 – диаметр диска; r_0 – радиус оси вращения;

2) момент инерции оси вращения маятника относительно мгновенной оси OO'

$$J_o = \frac{m_o D_o^2}{8} + \frac{m_o D_o^2}{4} = \frac{3}{8} m_o D_o^2, \quad (5)$$

где m_o – масса оси; D_o – диаметр оси;

3) момент инерции кольца относительно мгновенной оси вращения OO'

$$J_{\text{к}} = J_2 - J_1 + m_{\text{к}} r_0^2, \quad (6)$$

где b , $m_{\text{к}}$ – ширина (см. рис. 3) и масса кольца; J_2 , J_1 – моменты инерции цилиндров диаметрами d_2 и d_1 соответственно.

Здесь

$$J_2 = m_2 \frac{d_2^2}{8} = b \frac{\pi d_2^2}{4} \cdot \rho_{1\text{к}} \cdot \frac{d_2^2}{8};$$

$$J_1 = m_1 \frac{d_1^2}{8} = b \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot \rho_{1\text{к}} \cdot \frac{d_1^2}{8},$$

где $\rho_{1\text{к}} = 4,132 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала кольца; m_2 , m_1 – массы цилиндров диаметрами d_2 и d_1 соответственно.

Для экспериментального определения момента инерции маятника Максвелла воспользуемся основным законом динамики вращательного движения. При этом имеем ввиду, что происходит чистое вращение относительно мгновенной оси.

Тогда $J_3 \varepsilon = mgr_0$, где J_3 – экспериментальный момент инерции относительно мгновенной оси; ε – угловое ускорение; mgr_0 – момент силы тяжести маятника относительно мгновенной оси.

Линейное ускорение центра масс можно рассчитать по формуле

$$a = \frac{2h}{t^2}.$$

А угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{a}{r_0} = \frac{2h}{t^2 r_0}, \quad (7)$$

где r_0 – радиус оси вращения маятника.

Момент инерции маятника относительно мгновенной оси вращения можно рассчитать по формуле

$$J_{\varepsilon} = \frac{mgr_0}{\varepsilon} = \frac{mgr_0^2 t^2}{2h}. \quad (8)$$

Масса маятника рассчитывается по формуле

$$m = m_{\text{д}} + m_{\text{о}} + m_{\text{к}},$$

где $m_{\text{д}}$, $m_{\text{о}}$, $m_{\text{к}}$ – масса диска, оси и кольца соответственно.

3.3. Порядок работы на установке

3.3.1. Включите сетевой шнур в сеть и нажмите клавишу «Сеть», при этом включается электромагнит.

3.3.2. Укрепите на диске одно из сменных колец (по указанию преподавателя).

3.3.3. Вращая маятник, приведите его в крайнее верхнее положение (исходное положение), которое зафиксируется электромагнитом.

3.3.4. Нажмите на клавишу «Сброс» и убедитесь в том, что на индикаторе секундомера установлены нули.

3.3.5. Нажмите клавишу «Пуск» и определите время движения маятника Максвелла.

3.4. Определение кинематических характеристик поступательного и вращательного движения центра масс маятника Максвелла

3.4.1. Измерьте высоту h , на которой находится центр масс маятника в крайнем верхнем положении (h остается неизменной).

3.4.2. Рассчитайте массу маятника. Результаты расчета занесите в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета массы маятника

m_d	m_o	m_k	d_2	d_1	m	ρ_{1k}
кг	кг	кг	кг	кг	кг	кг/м ³
						4,132

3.4.3. Определите время t движения маятника Максвелла. Опыт повторите 5 раз.

3.4.4. Найдите среднее значение времени $\langle t \rangle$ и вычислите кинематические характеристики: a , v_{\max} , ω_{\max} .

3.4.5. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений времени и расчета кинематических величин

№ п/п	m	t	a	v_{\max}	ω_{\max}
	кг	с	м/с ²	м/с	рад/с
1					
2					
3					
4					
5					

3.5. Расчет момента инерции маятника Максвелла

3.5.1. Измерьте штангенциркулем диаметры диска, оси маятника, кольца.

3.5.2. Рассчитайте момент инерции $J_{\text{э}}$ маятника Максвелла с одним из сменных колец.

Таблица 3

Значения диаметров элементов маятника

Диаметр диска $D_{\text{д}}$	Диаметр оси $D_{\text{о}}$	Внешний диаметр кольца d_2
М	М	М

3.5.3. Рассчитайте теоретическое значение момента инерции $J_{\text{т}}$, учитывая, что моменты инерции диска, оси в виде однородного цилиндра и сменного кольца вычисляются относительно мгновенной оси по теореме Штейнера.

3.5.4. Результаты расчетов занесите в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета момента инерции маятника Максвелла

№ П/П	m	$J_{\text{э}}$	$\langle J_{\text{э}} \rangle$	$J_{\text{д}}$	$J_{\text{о}}$	$J_{\text{к}}$	$J_{\text{т}}$	ε
	КГ	КГ·М ²	КГ·М ²	КГ·М ²	КГ·М ²	КГ·М ²	КГ·М ²	%
1								
2								
3								
4								
5								

3.5.5. По формуле $\varepsilon = \frac{|J_{\text{т}} - \langle J_{\text{э}} \rangle|}{J_{\text{т}}} \cdot 100$ % рассчитайте относительное расхождение результатов расчета и эксперимента.

3.5.6. Рассчитайте погрешность эксперимента.

4. Сделайте вывод о зависимости ускорения центра масс и силы натяжения нити подвеса маятника от его момента инерции.

5. Вопросы для самоподготовки

5.1. Какое движение называют поступательным?

5.2. Дайте определение кинематических характеристик поступательно движущегося тела: мгновенной скорости, ускорения; средней скорости, ускорения; среднепутевой скорости; скорости в данный момент времени.

5.3. В чем заключается закон динамики поступательного движения твердого тела?

5.4. Дайте определения кинематических характеристик вращательного движения твердого тела: угловой скорости и углового ускорения. Как определить их направление?

5.5. Приведите уравнения связи угловых и линейных характеристик.

5.6. В чем заключается физический смысл момента инерции твердого тела? Какова размерность момента инерции?

5.7. Изменяется ли момент инерции твердого тела при изменении положения оси вращения?

5.8. В чем смысл теоремы Штейнера?

5.9. Дайте определения вектора момента силы относительно точки и оси вращения.

5.10. Как определить кинетическую энергию вращающегося твердого тела?

5.11. Как определить ускорение при скатывании тела с наклонной плоскости без проскальзывания?

5.12. Сколько существует способов расчета параметров скатывания тела с наклонной плоскости без проскальзывания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Определение момента инерции маятника Обербека

1. Цель работы: освоить метод определения момента инерции маятника Обербека на основе законов динамики.

2. Подготовка к работе: изучить необходимые теоретические положения по учебникам [1] §§ 2–4, 16, 18; [2] §§ 4.1, 4.3; [3] §§ 31, 32. Для выполнения работы студент должен знать: а) кинематические и динамические параметры поступательного и вращательного движения твердого тела; б) определения момента силы и момента импульса относительно оси и момента инерции тела; в) основные уравнения динамики поступательного и вращательного движения твердого тела; г) методику измерений штангенциркулем; д) порядок расчета погрешностей.

3. Выполнение работы

3.1. Описание установки

Общий вид установки РРМ–06 изображен на рис. 1. Маятник Обербека представляет собой двухступенчатый шкив 1 радиусами r_1 и r_2 с четырьмя взаимно перпендикулярными стержнями, на которых могут быть укреплены симметрично четыре цилиндрических груза 2 массами m_0 . На шкив наматывается нить, которая перебрасывается через блок 3. К свободному концу нити подвешивается груз 4 массой m . Груз 4, двигаясь поступательно, разматывает нить, при этом крестообразный маятник вращается вокруг неподвижной оси. Время опускания груза с высоты h измеряется миллисекундомером 5, включение и выключение которого осуществляется через посредство фотоэлектрических датчиков 6 и 7 при пересечении грузом светового потока, падающего на фотодатчик. Работа датчиков согласована с работой тормозного электромагнита, который удерживает груз в состоянии покоя при его верхнем положении.

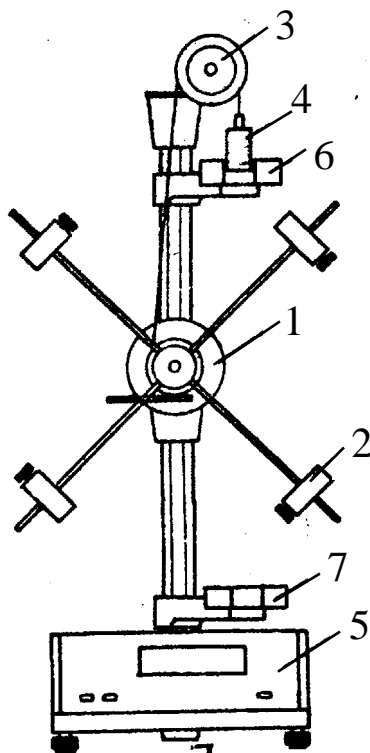


Рис. 1. Схема установки для определения момента инерции маятника Обербека: 1 – двухступенчатый шкив; 2 – грузы; 3 – неподвижный блок; 4 – груз; 5 – миллисекундомер; 6, 7 – фотодатчики

3.2. Методика измерений и расчета

Поступательное движение груза m осуществляется под действием двух сил: силы тяжести $m\vec{g}$ и силы натяжения нити \vec{F}_H (рис. 2).

Согласно второму закону Ньютона имеем

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_H \quad (1)$$

и в проекции на ось Oy :

$$ma = mg - F_H.$$

Так как $a = \text{const}$, то движение груза – прямолинейное и равноускоренное.

При равноускоренном движении по измеренным значениям высоты h и времени движения груза t можно рассчитать:

а) ускорение из формулы $h = \frac{at^2}{2}$:

$$a = \frac{2h}{t^2}; \quad (2)$$

б) максимальную скорость, приобретаемую грузом в конце движения

$$v = at = \frac{2h}{t}, \quad (3)$$

где t – время опускания груза до нижнего датчика.

в) силу натяжения нити

$$F_H = m(g - a) = m\left(g - \frac{2h}{t^2}\right). \quad (4)$$

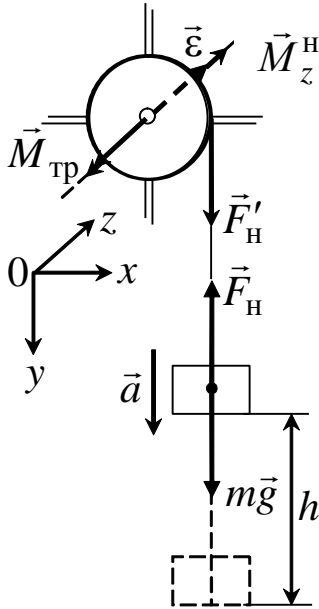


Рис. 2. Схема сил, действующих при движении груза и моментов сил трения и натяжения нити

Вращение крестообразного маятника происходит под действием момента \vec{M}_H силы натяжения нити \vec{F}'_H , направленного вдоль оси вращения по правилу правого винта (см. рис. 2). Действием момента сил трения в оси шкива $\vec{M}_{тр}$ будем пренебрегать. Согласно основному закону динамики вращательного движения абсолютно твердого тела, записанного в проекциях на ось $0z$, имеем

$$J_z \varepsilon_z = M_z^H, \quad (5)$$

где J_z – момент инерции маятника относительно оси вращения z ; ε – угловое ускорение, которое определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{r} = \frac{2h}{rt^2}, \quad (6)$$

где r – радиус шкива; a_τ – тангенциальное ускорение точек на ободе шкива ($a_\tau = a$, так как нет проскальзывания нити по поверхности шкива).

Угол поворота маятника за время t равен

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{h}{r}. \quad (7)$$

За это время маятник сделает N оборотов

$$N = \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (8)$$

Угловая скорость достигнет максимального значения:

$$\omega = \varepsilon t = \frac{2h}{rt}, \quad (12)$$

а частота вращения

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{h}{\pi r t}. \quad (10)$$

Момент силы натяжения нити

$$M_z^H = r \cdot F_H, \quad (11)$$

где r – радиус шкива.

Тогда из основного уравнения динамики вращательного движения $J_z \cdot \varepsilon_z = M_z^H$ можно определить момент инерции маятника Обербека

$$J_z^3 = M_z^H / \varepsilon_z. \quad (12)$$

3.3. Порядок работы на установке

3.3.1. Не включая прибор в сеть, вращением маятника против часовой стрелки намотайте нить на один из шкивов так, чтобы груз находился чуть выше верхнего фотоэлектрического датчика. Включите сетевой шнур установки в сеть и нажмите клавишу «Сеть», при этом включается тормозной электромагнит, удерживающий груз в заданном положении.

3.3.2. Нажмите клавишу «Пуск» – тормозной электромагнит отключается, груз начинает опускаться, миллисекундомер отсчитывает время движения груза. При пересечении грузом светового луча в нижнем фотоэлектрическом датчике отсчет времени прекращается, одновременно включается тормозной электромагнит.

3.3.3. Нажмите клавишу «Сброс», при этом происходит обнуление показаний миллисекундомера и отключение тормозного электромагнита.

3.3.4. Переведите груз в верхнее положение вновь путем вращения маятника против часовой стрелки и отожмите клавишу «Пуск», чтобы вновь заблокировать ось вращения маятника. Далее повторяйте последовательно пункты 3.3.2–3.3.4.

4. Последовательность проведения измерений

4.1. Работа выполняется без грузов m_0 на стержнях маятника

4.1.1. Проведите измерения радиуса r шкива (по указанию преподавателя) и высоты h .

4.1.2. Измерьте время t движения опускающегося груза, имеющего наименьшую массу m_1 . Опыт повторите 5 раз. Результаты измерений занесите в табл. 1.

4.1.3. Замените груз массой m_1 на груз большей массы m_2 и, не изменяя радиуса шкива, измерьте 5 раз время его движения до нижнего датчика.

4.1.4. Используя формулы (4), (11), рассчитайте момент силы натяжения нити M^H , момент инерции J вращающегося маятника по формулам (6) и (12). Результаты расчетов внесите в табл. 1.

4.1.5. Угол поворота φ рассчитайте по формулам (7), а среднее значение возьмите равным $\langle \varphi \rangle = \frac{\langle \varphi_1 \rangle + \langle \varphi_2 \rangle}{2}$. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений времени и расчета характеристик маятника Обербека без грузов на стержнях

r	m	№	t	v	a	ε	ω	φ_1	φ_2	n	N	F_H	M_z^H	I_z	
м	кг	п/п	с	м/с	м/с ²	с ⁻²	с ⁻¹	рад	рад	сб/с	об	Н	Н·м	кг·м ²	
$r =$	$m_1 =$	1													
		2													
		3													
		4													
		5													
	Средние значения														
	$m_2 =$	1													
		2													
		3													
		4													
		5													
	Средние значения														

4.2. Работа выполняется с грузами m_0 на стержнях маятника

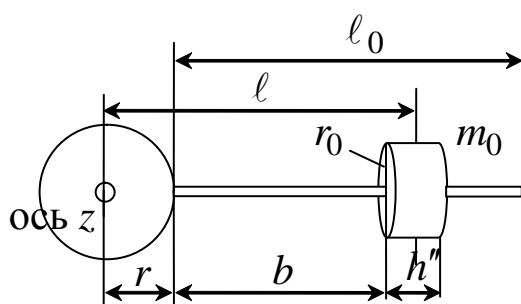


Рис. 3. К расчету момента инерции маятника с грузами массой m_0

4.2.1. На стержнях симметрично укрепите цилиндрические грузы массой m_0 на одинаковых расстояниях b от шкива (рис. 3). Затем намотайте на шкив нить с грузом. Измерьте время движения груза 5 раз. Рассчитайте характеристики маятника Обербека по формулам (2)–(12). Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 2.

Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментальных измерений и расчетов характеристик маятника с грузами на стержнях

№ п/п	b	ℓ	t	ν	a	ε	F_H	M_z^H	I_z^{Θ}
	м	м	с	м·с ⁻¹	м·с ⁻²	с ⁻²	Н	Н·м	кг·м ²
1									
2									
3									
4									
5									
Среднее значение									

4.2.2. Рассчитайте теоретический момент инерции маятника Обербека (рис. 3) по формулам:

$$I_{\text{шк}} = \frac{m_{\text{шк}} \cdot r^2}{2}; \quad I_{\text{ст}} = \frac{m_{\text{ст}} \cdot \ell_0^2}{12} + m_{\text{ст}} \left(\frac{\ell_0}{2} + r \right)^2;$$

$$I_{\text{гр}} = \left(\frac{m_0 \cdot r_0^2}{4} + \frac{m_0 \cdot h''^2}{12} \right) + m_0 \ell^2; \quad \ell = \frac{h''}{2} + b + r;$$

$$I_z^T = I_{\text{шк}} + 4I_{\text{ст}} + 4I_{\text{гр}},$$

где $m_{\text{шк}}$ – масса шкива (если она неизвестна, то ее нужно определить следующим образом: $m_{\text{шк}} = \pi r^2 \cdot h'_{\text{шк}} \cdot \rho$, где $h'_{\text{шк}}$ – длина образующей шкива; ρ – плотность материала шкива); $m_{\text{ст}}$ – масса стержня; m_0 – масса груза (при необходимости они определяются аналогично $m_{\text{шк}}$); r – радиус шкива; ℓ_0 – длина стержня; ℓ – расстояние от центра масс груза до оси вращения.

Результаты расчета параметров маятника Обербека

$m_{\text{шк}}$	r	$h'_{\text{шк}}$	$m_{\text{ст}}$	ℓ_0	ℓ	h	b	m_0
КГ	М	М	КГ	М	М	М	М	КГ

4.2.3. Найдите расхождение теоретического и экспериментального значений момента инерции маятника Обербека относительно горизонтальной оси z :

$$\varepsilon = \frac{|I_z^{\text{T}} - I_z^{\text{Э}}|}{I_z^{\text{T}}} 100 \text{ \%}.$$

4.2.4. Рассчитайте погрешность измерений.

5. Сделайте вывод.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Определение параметров вращательного движения твердых тел

1. Цель работы: изучение метода определения момента инерции массивного стержня.

2. Подготовка к работе: прочитать в [2] §§ 4.2, 4.3, 5.2, 5.3, [1] §§ 16–19. Для выполнения лабораторной работы студент должен знать: а) основные кинематические и динамические характеристики вращательного движения; б) законы сохранения момента импульса и механической энергии; в) основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела; г) методику измерений и расчетов; д) расчет погрешностей измерений.

3. Выполнение работы

3.1. Описание экспериментальной установки

Стержень, момент инерции которого надо определить, укреплен на неподвижной горизонтальной оси, проходящей через центр масс стержня. Стальной шарик удерживается электромагнитом на высоте h над одним из концов стержня. При выключении электромагнита шарик, свободно падая с высоты h , приобретает скорость v и упруго ударяется о горизонтально расположенный стержень в точке, отстоящей от оси вращения на расстоянии r (рис. 1). Место удара определяют по небольшой вмятине в тонком слое пластилина, предварительно нанесенном на стержень. Число оборотов N , которое сделает стержень до полной остановки, определяют по насаженному на ось картонному кругу, разделенному на 10 частей.

3.2. Методика измерений и расчета

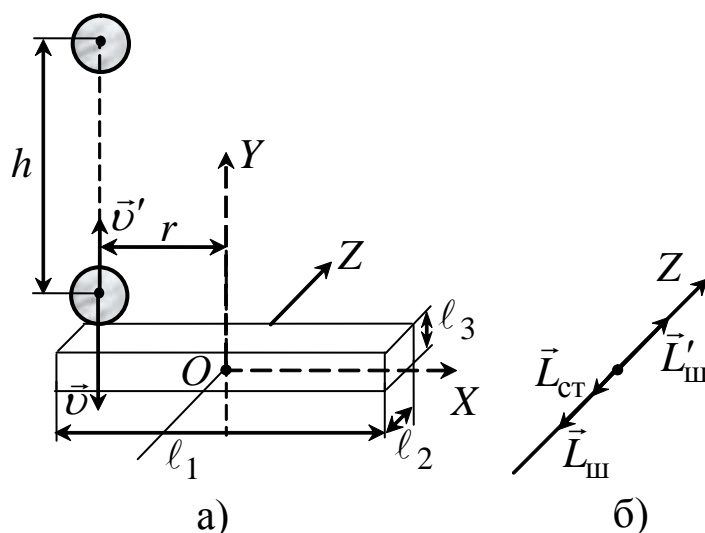


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Момент инерции тела относительно оси Z , масса которого распределена по объему непрерывно, вычисляют путем интегрирования следующим образом:

$$\begin{aligned}
J_z^T &= \rho \iiint_V (x^2 + y^2) dx dy dz = \rho \iiint_V x^2 dx dy dz + \rho \iiint_V y^2 dx dy dz = \\
&= \rho \int_{-\frac{\ell_1}{2}}^{\frac{\ell_1}{2}} x^2 dx \int_{-\frac{\ell_3}{2}}^{\frac{\ell_3}{2}} dy \int_{-\frac{\ell_2}{2}}^{\frac{\ell_2}{2}} dz + \rho \iiint_V y^2 dx dy dz = \frac{1}{12} m_{\text{ст}} (\ell_1^2 + \ell_3^2). \quad (1),
\end{aligned}$$

где $m_{\text{ст}} = \rho \ell_1 \ell_3 \ell_2$ – масса стержня; ℓ_1, ℓ_3, ℓ_2 – параметры стержня; ρ – объемная плотность стержня.

В данной работе для экспериментального определения момента инерции стержня используется взаимодействие горизонтально расположенного стержня с падающим с высоты h металлическим шариком массой m (рис. 1, а). Перед ударом скорость v шарика равна

$$v = \sqrt{2gh}. \quad (2)$$

После удара, который рассматривается как абсолютно упругий, шарик отскакивает от стержня вертикально вверх со скоростью v' , а стержень начинает вращаться с начальной угловой скоростью ω_0 .

Полагая, что моменты внешних сил, действующих на систему, равны нулю, можно утверждать, что при этом выполняется закон сохранения момента импульса системы:

$$\vec{L}_{\text{ш}} = \vec{L}_{\text{ст}} + \vec{L}'_{\text{ш}}, \quad (3)$$

где $\vec{L}_{\text{ш}}$ – момент импульса шарика до удара; $\vec{L}'_{\text{ш}}$ – момент импульса шарика после удара; $\vec{L}_{\text{ст}}$ – момент импульса стержня после удара, которые направлены по оси Z по правилу правого винта (см. рис. 1, б).

Подставим в (3) выражение для каждой составляющей и получим

$$r m v = J_z \omega_0 - r m v', \quad (4)$$

где J_z – момент инерции стержня относительно оси Z .

Так как удар шарика о стержень – упругий, то также выполняется закон сохранения механической энергии, согласно которому

$$\frac{m\nu^2}{2} = \frac{J\omega_0^2}{2} + \frac{m\nu'^2}{2}, \quad (5)$$

где $\frac{m\nu^2}{2}$ – кинетическая энергия шарика перед ударом; $\frac{J\omega_0^2}{2}$ – кинетическая энергия вращающегося стержня после удара; $\frac{m\nu'^2}{2}$ – кинетическая энергия шарика после удара.

Выражая из уравнения (4) ν' и подставляя полученное выражение в (5), получим формулу для экспериментального определения момента инерции стержня относительно оси Z :

$$J_z^3 = \frac{mr}{\omega_0} (2\nu - \omega_0 r). \quad (6)$$

Начальную угловую скорость ω_0 вращения стержня можно определить, измеряя число оборотов N , которое он сделает за время t от начала вращения до полной остановки.

Угол поворота стержня $\varphi = 2\pi N$. Для равнозамедленного вращательного движения $\varphi = \frac{\omega_0 - \omega_k}{2} t = \frac{\omega_0}{2} t$, т. к. конечная угловая скорость равна нулю. Приравнивая два выражения для φ , получаем

$$\omega_0 = \frac{4\pi N}{t}. \quad (7)$$

Вращение стержня после удара происходит в условиях действия на него единственного момента сил – момента сил трения в оси $\vec{M}_{\text{тр}}$. С учетом этого основное уравнение динамики вращательного движения запишется в виде

$$J\varepsilon = M_{\text{тр}},$$

где J – момент инерции стержня; ε – угловое ускорение стержня

$$\varepsilon = \frac{\omega_0 - \omega_k}{t} = \frac{\omega_0}{t}. \quad (8)$$

Тогда момент сил трения в оси равен

$$M_{\text{тр}} = \frac{J\omega_0}{t}. \quad (9)$$

Зная момент сил трения, можно определить работу этих сил

$$A_{\text{тр}} = \int_0^{2\pi N} M_{\text{тр}} d\varphi = M_{\text{тр}} 2\pi N. \quad (10)$$

3.3. Определение кинематических характеристик шарика и стержня

3.3.1. Установите стержень строго горизонтально. Измерьте расстояние h от магнита до точки удара шарика о стержень. Расстояние r от оси вращения до точки соударения со стержнем измерьте с помощью линейки. Предварительно нанесите на стержень тонкий слой пластилина для определения места удара.

3.3.2. По формуле (2) рассчитайте скорость v шарика перед ударом о стержень.

3.3.3. Измерьте время t вращения и число оборотов N (с точностью до 0,1) стержня после удара. Опыт повторите не менее 5 раз.

3.3.4. Найдите средние значения времени $\langle t \rangle$ и числа оборотов $\langle N \rangle$ и по формуле (7) рассчитайте начальную угловую скорость ω_0 , а по формуле (8) угловое ускорение ε . Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 1.

3.4. Определение динамических характеристик движения шарика и стержня

3.4.1. По формуле (6) рассчитайте экспериментальное значение момента инерции $J_z^{\text{э}}$ стержня относительно неподвижной оси.

Рассчитайте массу шарика $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$, где ρ – плотность стали, равная $7,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

3.4.2. Теоретическое значение момента инерции стержня J_z^T рассчитайте по формуле (1). Значение массы стержня $m_{\text{ст}}$ приведено в паспорте установки (или рассчитайте по линейным размерам и плотности стали). Линейные размеры стержня l_1 и l_3 измерьте с помощью линейки или штангенциркуля.

Таблица 1

Результаты измерения времени и числа оборотов стержня и расчета кинематических характеристик шарика и стержня

$h =$ м

№ п/п	t	N	r	v	ω_0	ε
	с	об	м	м/с	рад/с ⁻¹	рад/с ⁻²
1						
2						
3						
4						
5						
Средние значения						

3.4.3. Сравните экспериментальное $J_э$ и теоретическое J_T значения момента инерции стержня и рассчитайте относительное расхождение между ними в процентах:

$$\varepsilon = \frac{|J_z^T - J_z^э|}{J_z^T} \cdot 100\% .$$

3.4.4. Момент импульса шарика $L_{\text{ш}}$ перед ударом относительно центра вращения рассчитайте по формуле $L_{\text{ш}} = r m v$, а момент импульса стержня $L_{\text{ст}}$ относительно неподвижной оси сразу после удара – по формуле $L_{\text{ст}} = J \omega_0$.

3.4.5. Определите кинетическую энергию $W_k^{\text{ш}}$ шарика перед ударом и начальную кинетическую энергию $W_k^{\text{ст}}$ стержня после удара (см. формулу (5)).

3.4.6. Определите момент сил трения в оси вращения по формуле (9). Значение момента инерции стержня примите равным экспериментальному значению $J_z^{\text{э}}$.

3.4.7. Рассчитайте работу сил трения в оси по формуле (10).

3.4.8. Результаты расчетов динамических величин шарика и стержня занесите в табл. 2.

Таблица 2

Расчет динамических характеристик шарика и стержня

$J_z^{\text{э}}$	$J_z^{\text{т}}$	ε	$L_{\text{ш}}$	$L_{\text{ст}}$	$W_1^{\text{ш}}$	$W_1^{\text{ст}}$	$M_{\text{тр}}$	$A_{\text{тр}}$
$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2}$	%	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	Дж	Дж	Н · м	Дж

$$m_{\text{ст}} = \quad \text{кг}; \quad l_1 = \quad \text{м}; \quad l_3 = \quad \text{м}$$

3.4.9. Рассчитайте погрешность определения $J_z^{\text{э}}$ и $A_{\text{тр}}$.

4. Сделайте вывод.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 10-е изд., испр. – Москва : Высш. шк., 2005. – 560 с.

2. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для студентов вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 4-е изд., испр. – Москва : Изд. Центр «Академия», 2003. – 720 с.

3. Савельев, И. В. Курс физики : учеб. пособие. В 3 т. Т. 1 : Механика. Молекулярная физика. 5-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург : Лань, 2016. – 356 с.

http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=71762

Составители

Дырдин Валерий Васильевич
Мальшин Анатолий Александрович
Ким Татьяна Леонидовна
Цвеклинская Ирина Валентиновна

ФИЗИКА.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

Лабораторный практикум К-304.5
по дисциплине «Физика»
для технических специальностей и направлений

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 18.04.2016. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Уч.-изд. л. 2,5
Тираж 44 экз. Заказ

КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28
Издательский центр КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 а