

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра физики

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ**

**Лабораторный практикум К-303.1**  
по дисциплине «Физика»  
для технических специальностей и направлений

Составитель            Т. В. Лавряшина

Утверждены на заседании кафедры  
Протокол № 11 от 15.04.2014

Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
специальности 280700.62  
Протокол № 10 от 15.04.2014

Электронная копия находится  
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Методические рекомендации студентам .....	2
Лабораторная работа № 1 «Расчет погрешностей результатов измерений».....	3
Лабораторная работа № 2 «Изучение законов движения системы связанных тел».....	9
Лабораторная работа № 3 «Изучение поступательного и вращательного движения с помощью маятника Обербека».....	16
Лабораторная работа № 4 «Проверка уравнения динамики вращательного движения».....	22
Лабораторная работа № 5 «Изучение ударного взаимодействия твердых тел».....	29
Вопросы для самоподготовки.....	34
Список рекомендуемой литературы.....	35

## Методические рекомендации студентам

В лабораторный практикум К-303.1 включены лабораторные работы по разделу «Физические основы механики», предусмотренные Государственным образовательным стандартом и рабочей программой дисциплины «Физика» для студентов технических специальностей и направлений.

При выполнении лабораторного практикума студент не только получает элементарные навыки проведения эксперимента, но и учится самостоятельно анализировать физические явления, сопоставлять выводы теории и экспериментальные результаты, выделять главное, понимать роль идеализации, рассчитывать погрешности измерений.

Рекомендации студентам по организации самостоятельной работы в учебных лабораториях включают следующие положения.

1. На каждое занятие согласно графику выполнения лабораторных работ студент приходит подготовленным. На самостоятельную работу студентам по учебному плану отводится 50 % от объема часов, отводимых для изучения дисциплины, в том числе на подготовку к выполнению каждой лабораторной работы около 4 часов.

2. Подготовка включает изучение содержания лабораторной работы, проработку теоретического материала по учебникам и учебным пособиям для самостоятельной работы, заготовку краткого конспекта отчета предстоящей работы. Конспект отчета содержит название и цель работы, рисунок установки, поясняющий идею метода, рабочие формулы и таблицы для занесения в них измеряемых и вычисляемых величин. Конспект отчета может быть выполнен как в рукописном, так и в электронном варианте.

3. Для выполнения работы необходимо получить допуск, объяснив суть используемого метода, устройство установки, порядок измерений, алгоритм вычислений искомых величин и их погрешностей, а также ожидаемый характер исследуемых зависимостей.

4. Результаты эксперимента и отчет, содержащий вывод о проделанной работе, подписываются преподавателем.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### Расчет погрешностей результатов измерений

**1. Цель работы:** освоить методику расчета погрешностей прямых и косвенных измерений.

**2. Приборы и принадлежности:** микрометр, штангенциркуль, измеряемое тело.

**3. Подготовка к работе:** изучить по [2] Приложения, П. 3, данное методическое указание, ответить на вопросы для самоподготовки 1–4.

Для выполнения данной лабораторной работы студент должен: а) знать об измерениях и их погрешностях; б) уметь рассчитывать погрешности прямых и косвенных измерений; в) уметь пользоваться микрометром и штангенциркулем.

#### 4. Выполнение работы

##### 4.1. Виды погрешностей физических величин

Физический эксперимент сопровождается измерениями, при которых неизбежно возникают погрешности, вызывающие отклонение полученного результата от истинного значения измеряемой величины. *Измерением* называется сравнение измеряемой величины с другой величиной, принятой за единицу измерения – *эталоном*.

Различают измерения *прямые* (искомая величина определяется с помощью измерительного прибора) и *косвенные* (физическая величина вычисляется с помощью определенной формулы, в которую входят другие величины, предварительно определенные путем прямых измерений).

Погрешности подразделяют на три группы:

а) *случайные погрешности*, вызываемые многими причинами и непредсказуемо изменяющие свое значение и знак;

б) *систематические погрешности*, сохраняющие величину и знак от опыта к опыту. К ним относятся приборные или инструментальные погрешности;

в) *инструментальные (приборные) погрешности* – это такие погрешности, которые принадлежат данному средству измерений, и определяются половиной цены деления шкалы измерительного прибора.

#### 4.2. Приборы для определения линейных размеров тел

*Штангенциркуль* (рис. 1) состоит из стальной линейки 1, на которой нанесены миллиметровые деления. Эта линейка имеет неподвижную ножку 2. Вторая ножка 3, имеющая зажимной винт 4, может перемещаться вдоль линейки 1. На обойме этой ножки нанесен нониус 5.

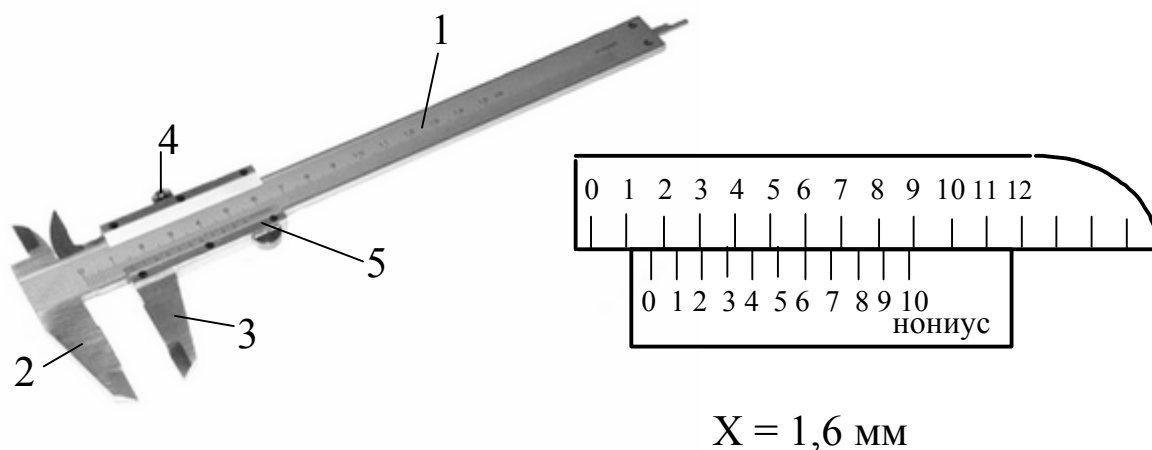
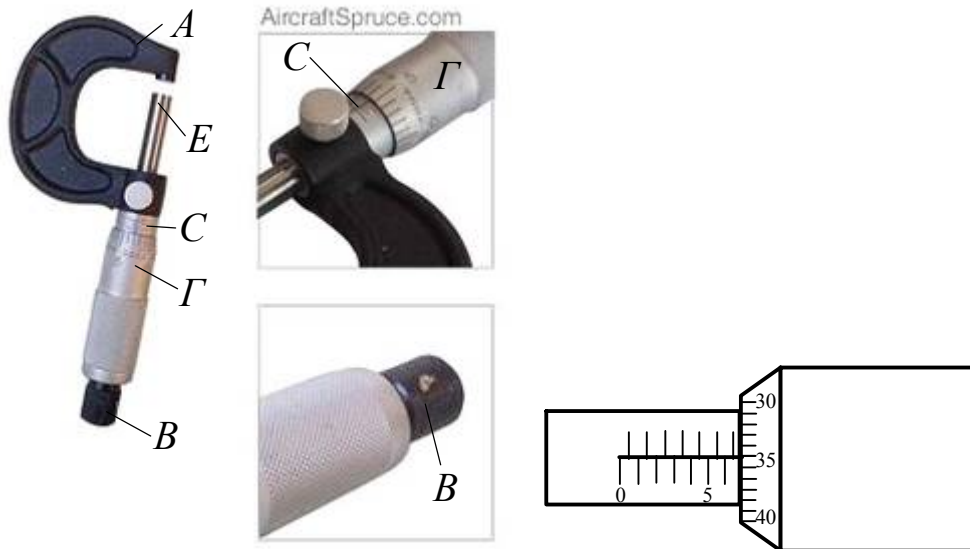


Рис. 1. Штангенциркуль:

- 1 – стальная линейка; 2 – неподвижная ножка;
- 3 – ножка (перемещается вдоль линейки 1);
- 4 – зажимной винт; 5 – нониус

Для измерения штангенциркулем размеров предмета его помещают между ножками 2 и 3, которые сдвигают до соприкосновения с предметом без сильного нажима, и, закрепив винт 4, делают отсчет с точностью до десятых долей миллиметра.

*Микрометром* (рис. 2) производят измерения линейных размеров небольших тел с точностью до сотых долей миллиметра.



$$X = 6 + 0,5 + 0,35 = 6,85 \text{ (мм)}$$

Рис. 2. Микрометр:  
*A* – скоба; *EB* – микрометрический винт;  
*C* – полый стержень; *Г* – барабан

Микрометр состоит из полого стержня *C*, жестко соединенного со скобой *A*. В полость стержня ввинчен микрометрический винт *EB*. При повороте микровинта вместе с ним вращается барабан *Г*, перемещаясь при этом поступательно относительно стержня *C*. Наиболее распространен микрометр, у которого цена деления линейной шкалы стержня  $b = 0,5$  мм. Для удобства верхние и нижние риски шкалы стержня *C* сдвинуты относительно друга друга на 0,5 мм, цифры проставлены только у нижней шкалы. Шаг микровинта  $h = 0,5$  мм, цена деления микрометра – 0,01 мм (она указывается).

### 4.3. Расчет погрешностей прямых измерений

4.3.1. Измерьте не менее 5 раз искомую величину  $x$  и получите ряд близких значений  $x_i$

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n .$$

Результаты измерений занесите в табл. 1

*Вычисление погрешностей прямых измерений линейных  
размеров исследуемого тела*

$$\alpha = \quad ; t_{\alpha, n} =$$

№ опыта	$x_i$	$\langle x \rangle$	$\Delta x_i$	$\Delta x_i^2$	$\sigma_{\langle x \rangle}$	$\Delta x_{\text{сл}}$	$\Delta x_{\text{пр}}$	$\Delta x$	$\varepsilon_x, \%$
Формула		(1)	(2)		(3)	(4)		(5)	(6)
1									
2									
3									
...									
$n$									

$\alpha$  – коэффициент надежности, который нужно выбрать самостоятельно ( $\alpha = 0,9; 0,95; 0,99; 0,999$  и т. д.);  $t_{\alpha, n}$  – коэффициент Стьюдента для выбранных значений  $\alpha$  и числа измерений  $n$ .

4.3.2. Вычислите среднее значение  $\langle x \rangle$  измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

где  $x_i$  – результат  $i$ -го измерения;  $n$  – число измерений.

4.3.3. Рассчитайте абсолютную погрешность каждого измерения  $\Delta x_i$  (по модулю):

$$\Delta x_1 = |\langle x \rangle - x_1|, \Delta x_2 = |\langle x \rangle - x_2|, \dots, \Delta x_n = |\langle x \rangle - x_n|. \quad (2)$$

4.3.4. Рассчитайте среднюю квадратичную погрешность отклонения от среднего арифметического  $\sigma_{\langle x \rangle}$ :

$$\sigma_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

Вероятность попадания значений  $x$  в указанный интервал называется *надежностью*  $\alpha$  эксперимента, которая прямо пропорциональна числу измерений  $n$ . При ограниченном числе измерений для достижения достаточно высокой надежности среднюю квадратичную погрешность умножают на поправочный коэффициент  $t_{\alpha, n}$ , значения которого были рассчитаны Стьюдентом.

Следовательно, абсолютная случайная погрешность  $\Delta x_{\text{сл}}$ :

$$\Delta x_{\text{сл}} = \sigma_{\langle x \rangle} t_{\alpha, n}. \quad (4)$$

4.3.5. За *приборную погрешность*  $\Delta x_{\text{пр}}$  примите половину цены деления шкалы используемого измерительного прибора.

4.3.6. *Абсолютная погрешность*  $\Delta x$  рассчитайте по формуле

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сл}}^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2}. \quad (5)$$

4.3.7 *Относительная погрешность*  $\varepsilon_x$  дает более наглядное представление о качестве измерений. Она определяет, сколько процентов от среднего значения  $\langle x \rangle$  составляет абсолютная погрешность

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\%. \quad (6)$$

4.3.8. Ответ для измеряемой величины запишите в виде доверительного интервала:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x, \text{ (размерность).}$$

Если необходимо, измерения и вычисления погрешностей прямых измерений повторите для других величин. Результаты занесите в таблицы, аналогичные табл. 1.

#### 4.4. Расчет погрешностей косвенных измерений

Для расчета абсолютной  $\Delta y$  и относительной  $\varepsilon_y$  погрешностей косвенного измерения величины  $y$ , являющейся функцией нескольких величин  $a, b, c$ , необходимо определить абсолютные



$(\Delta a, \Delta b, \Delta c)$  и относительные  $(\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c)$  погрешности каждой величины по схеме, описанной в п. 4.3.1.

Для искомой величины  $y$ , определяемой по формуле:

$$y = a^\alpha b^\beta c^\gamma,$$

( $\alpha, \beta$  и  $\gamma$  – любые числа) относительная погрешность  $\varepsilon_y$  находится из соотношения

$$\varepsilon_y = \sqrt{\alpha^2 \varepsilon_a^2 + \beta^2 \varepsilon_b^2 + \gamma^2 \varepsilon_c^2}, \quad (7)$$

где относительные погрешности  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  измерены в %.

Тогда абсолютная погрешность  $\Delta y$  косвенных измерений определится по формуле

$$\Delta y = \frac{\varepsilon_y \langle y \rangle}{100\%},$$

где  $\langle y \rangle = \langle a \rangle^\alpha \langle b \rangle^\beta \langle c \rangle^\gamma$ .

Например, измеряется косвенно объем  $V$  цилиндра, диаметр которого  $d$ , высота  $h$ :

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h.$$

Относительная  $\varepsilon_V$  и абсолютная  $\Delta V$  погрешности косвенных измерений объема цилиндра равны:

$$\varepsilon_V = \sqrt{4\varepsilon_d^2 + \varepsilon_h^2}, \quad \Delta V = \frac{\varepsilon_V \langle V \rangle}{100\%}, \quad (8)$$

где  $\langle V \rangle$  – среднее значение объема цилиндра, определяемое соотношением:

$$\langle V \rangle = \frac{\pi \langle d \rangle^2}{4} \langle h \rangle. \quad (9)$$

Результат запишется в виде  $V = \langle V \rangle \pm \Delta V$  (размерность).

## 5. Сделайте выводы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Изучение законов движения системы связанных тел

**1. Цель работы:** экспериментальное определение кинематических и динамических характеристик системы связанных тел.

**2. Оборудование:** экспериментальная установка (стойка с вращающимся столиком), стержень, груз с нитью, секундомер, штангенциркуль, масштабная линейка.

**3. Подготовка к работе:** а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] §§ 2–4, 7–14, 22–24; [2] 1.2, 1.3, 2.2–2.4, 3.2–3.4, 4.1–4.3; [3] §§ 2.2, 2.4; б) ответить на вопросы для самоподготовки 5–15; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы необходимо знать: а) основные кинематические и динамические параметры поступательного и вращательного движения (скорость, ускорение, угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение, масса, сила, момент силы, момент инерции); б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения; в) закон сохранения механической энергии.

## 4. Выполнение работы

### 4.1. Описание установки

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из стойки с укрепленным на ней с помощью подшипника шкивом, радиус которого  $r$ , и столика, жестко связанного со шкивом. Шкив и столик имеют общую ось вращения  $Z$ . На шкив наматывается нить, перекинутая через блок, ко второму концу которой подвешивается груз массой  $m$ . Опускаясь с высоты  $h$ , груз приводит во вращательное движение шкив со столиком. Считая нить нерастяжимой, пренебрегая ее массой и массой блока, можно рассматривать данную систему как систему двух связанных тел. При этом масса  $m$  груза должна быть достаточной для обеспечения равноускоренного движения указанных тел.

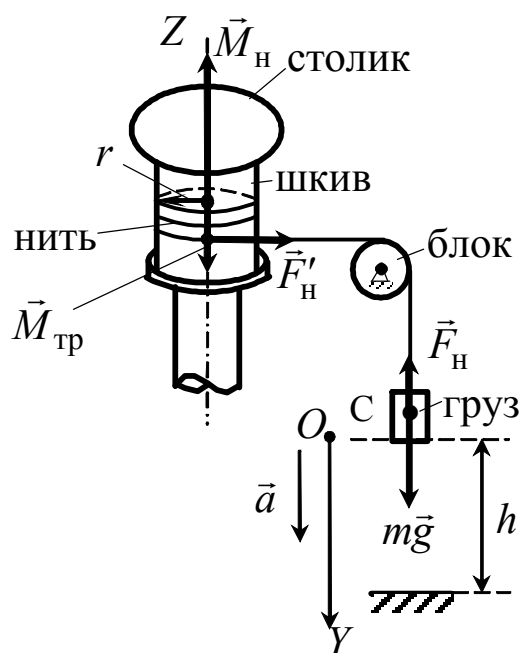


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

## 4.2. Методика измерений и расчета кинематических характеристик

4.2.1. Намотайте на шкив нить, перекиньте её через блок и к свободному концу нити прикрепите груз. С помощью масштабной линейки задайте высоту  $h$  груза относительно выбранного уровня (во всех опытах эта величина должна быть одинаковой). Отпуская груз, заданной массы  $m$ , одновременно включите секундомер, выключите его, когда груз достигнет этого уровня. Определите время  $t$  падения груза не менее 5 раз. Измерьте штангенциркулем диаметр  $D$  шкива, рассчитайте его радиус. Данные измерений занесите в табл. 1.

4.2.2. Для определения скорости груза  $v$  и ускорения  $a$  в конце его поступательного движения направим ось  $OY$  вдоль движения груза (см. рис. 1). Так как начальная скорость груза равна нулю, то проекция  $v_y$  скорости его движения на выбранную ось имеет вид:

$$v_y = a_y t, \quad (1)$$

где  $a_y$  – проекция вектора  $\vec{a}$  ускорения груза;  $t$  – время его движения. Координата  $y$  груза со временем изменяется по уравнению

$$y = \frac{a_y t^2}{2}. \quad (2)$$

Пройденный грузом путь вдоль оси  $OY$  за время  $t$  равен  $\Delta y = h$ . Решая систему уравнений (1) и (2), находим расчетные формулы для конечной скорости груза  $v = v_y$

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

и его ускорения  $a = a_y$

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (4)$$

Все кинематические характеристики рассчитываются по одному разу, используя среднее значение времени  $\langle t \rangle$ .

Таблица 1

*Кинематические характеристики движения груза  
и шкива со столиком*

 $h =$  $r =$  $m =$ 

№ п/п	$t,$ с	$\langle t \rangle,$ с	$v,$ м/с	$a,$ м/с <sup>2</sup>	$\omega,$ с <sup>-1</sup>	$\varepsilon,$ с <sup>-2</sup>	$\varphi,$ рад	$N,$ об
Формула			(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1								
2								
3								
4								
5								

4.2.3. Равноускоренное вращательное движение шкива со столиком происходит под действием силы натяжения нити  $\vec{F}'_H$ , создаваемой грузом. Точки поверхности шкива вращаются с тангенциальным ускорением  $a_\tau$ , равным ускорению  $a$  поступательного движения груза (нить нерастяжима). Равны линейная скорость точек поверхности шкива и скорость  $v$  поступательного движения груза. Вращение столика со шкивом является равноус-

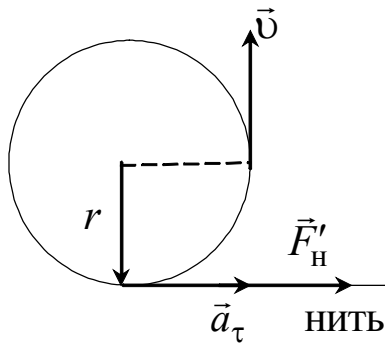


Рис. 2. Поперечное сечение шкива

коренным без начальной угловой скорости. Линейные ( $v$ ,  $a_\tau$ ) и угловые ( $\omega$ ,  $\varepsilon$ ) характеристики в момент времени  $t$  связаны соотношениями

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h}{rt}; \quad (5)$$

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

где  $r$  – радиус шкива.

4.2.4. Используя значения  $t$ ,  $\varepsilon$ ,  $h$  и  $r$ , рассчитайте угол  $\varphi$  поворота радиуса шкива

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

и число  $N$  его оборотов

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

Результаты расчета косвенных измерений занесите в табл. 1.

4.2.5. Положите на столик стержень так, чтобы его центр масс находился на оси вращения  $Z$ . Повторите измерения времени  $t$  падения груза с заданной высоты  $h$ . Вычислите кинематические характеристики груза и столика со стержнем. Результаты занесите в табл. 2 (аналогична табл. 1).

### 4.3. Методика расчета динамических характеристик

Для системы двух связанных тел (шкив со столиком и груз на нити) необходимо записать два динамических уравнения. Поступательное движение груза с ускорением  $\vec{a}$  обеспечивается действием его силы тяжести  $m\vec{g}$  и силы натяжения нити  $\vec{F}_H$ . основное уравнение поступательного движения груза массой  $m$  в этом случае записывается в виде:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_H. \quad (9)$$

Проецируя его на ось  $OY$ , получим формулу для расчета силы натяжения нити

$$F_{\text{н}} = m(g - a). \quad (10)$$

На столик со шкивом действуют момент силы  $\vec{M}_{\text{н}}$  натяжения нити  $\vec{F}'_{\text{н}}$  и момент силы  $\vec{M}_{\text{тр}}$  трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$  в подшипнике шкива (вектор силы трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$  на рис. 1 не приведен). Уравнение динамики вращательного движения шкива со столиком имеет вид:

$$\vec{M}_{\text{н}} + \vec{M}_{\text{тр}} = J_z \vec{\varepsilon}, \quad (11)$$

где  $\vec{M}_{\text{н}} = [\vec{r}\vec{F}'_{\text{н}}]$  – момент силы натяжения нити;  $J_z$  – момент инерции шкива со столиком относительно оси  $Z$ ;  $\vec{\varepsilon}$  – угловое ускорение шкива со столиком.

В проекции на ось вращения  $Z$  (см. рис. 1) уравнение (11) примет вид:

$$M_{\text{н}} - M_{\text{тр}} = J_z \varepsilon. \quad (12)$$

Равноускоренное вращение столика и шкива обусловлено действием момента силы натяжения нити

$$M_{\text{н}} = r F'_{\text{н}},$$

где  $F'_{\text{н}} = F_{\text{н}}$ , так как нить нерастяжима.

Следовательно,

$$M_{\text{н}} = r F_{\text{н}} = r m (g - a). \quad (13)$$

Момент силы трения  $M_{\text{тр}}$  приведен на установке. Тогда момент инерции  $J_z$  шкива со столиком определится соотношением:

$$J_z = \frac{M_{\text{н}} - M_{\text{тр}}}{\varepsilon}. \quad (14)$$

4.3.1. Рассчитайте динамические характеристики груза и столика со шкивом в обеих сериях опытов, используя значения кинематических характеристик, внесенных в табл. 1 и 2.

Экспериментальное значение момента инерции стержня определите из соотношения

$$J_z^{\text{экс}} = J_{z2} - J_{z1}, \quad (15)$$

где  $J_{z1}$  – момент инерции столика со шкивом;  $J_{z2}$  – момент инерции столика со шкивом и стержнем на столике.

Результаты измерений занесите в табл. 3.

4.3.2. Для расчета теоретического значения момента инерции стержня относительно оси, перпендикулярной к образующей и проходящей через его центр масс, измерьте штангенциркулем радиус  $R$  стержня и его длину  $\ell$  (масса стержня приведена на установке). С учетом параметров стержня рассчитайте теоретическое значение его момента инерции

$$J_z^{\text{теор}} = m_{\text{ст}} \left( \frac{1}{4} R^2 + \frac{1}{12} \ell^2 \right). \quad (16)$$

Таблица 3

*Динамические характеристики системы связанных тел*

$$m_{\text{ст}} = \quad R = \quad \ell =$$

Характеристики, формула	$F_H$ (10)	$M_H$ (13)	$M_{\text{тр}}$	$J_{z1}$ (14)	$J_{z2}$ (14)	$J_z^{\text{экс}}$ (15)	$J_z^{\text{теор}}$ (16)	$\varepsilon_J$ (17)
	Н	Н·м	Н·м	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	%
Условия опытов								
Без стержня на столике					–			
Со стержнем на столике				–				

4.3.3. Оцените расхождение экспериментального и теоретического значения момента инерции стержня по формуле

$$\varepsilon_J = \frac{|J_z^{\text{экс}} - J_z^{\text{теор}}|}{J_z^{\text{теор}}} \cdot 100\%. \quad (17)$$

#### 4.4. Проверка закона сохранения энергии

4.4.1. Для одного из двух случаев рассчитайте механическую энергию системы связанных тел и работу момента сил тре-

ния. Начальный запас механической энергии системы определяется потенциальной энергией груза массой  $m$ , поднятого относительно нулевого уровня ( $h = 0$ ),

$$W_{\Pi} = mgh. \quad (18)$$

При движении груза эта энергия расходуется на увеличение его кинетической энергии и кинетической энергии вращающегося шкива и столика в первой серии опытов и шкива, столика и стержня на нем во второй серии опытов.

Кинетическая энергия груза в конце поступательного движения:

$$W_{\text{к}}^{\text{пост}} = \frac{mv^2}{2}; \quad (19)$$

кинетическая энергия вращательного движения столика со шкивом

$$W_{\text{к}}^{\text{вращ}} = \frac{J_z \omega^2}{2}. \quad (20)$$

Кроме того, при учете сил трения часть механической энергии затрачивается на работу против этих сил. Работа момента сил трения за время ускоренного вращения столика равна

$$A_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \varphi. \quad (21)$$

Используя соотношения (18)–(21), проверьте, все ли потери механической энергии системы тел учтены. Расчеты занесите в табл.4.

Таблица 4

*Энергетические характеристики системы связанных тел*

Обозначение	$W_{\Pi}$	$W_{\text{к}}^{\text{пост}}$	$W_{\text{к}}^{\text{вращ}}$	$A_{\text{тр}}$
Единицы измерения	Дж	Дж	Дж	Дж
Результаты расчета				

**5. Сделайте вывод.**



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### Изучение поступательного и вращательного движения тел с помощью маятника Обербека

**1. Цель работы:** освоить методику экспериментального определения кинематических и динамических характеристик движущихся тел с помощью маятника Обербека.

**2. Оборудование:** крестообразный маятник (маятник Обербека), набор грузов, нить, секундомер, штангенциркуль, линейка.

**3. Подготовка к работе:** а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] §§ 2–4, 7–14, 22–24; [2] 1.2, 1.3, 2.2–2.4, 3.2–3.4, 4.1–4.3; [3] §§ 2.2, 2.4; б) ответить на вопросы для самоподготовки 5–15; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

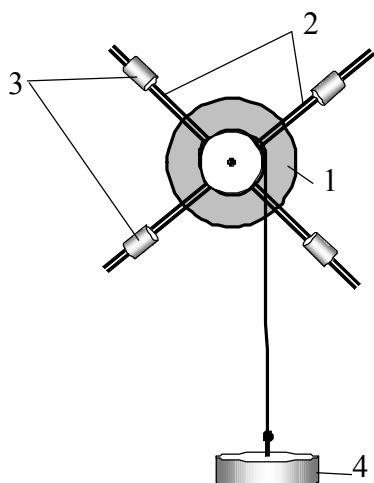


Рис. 1. Схема установки:

- 1 – шкив; 2 – спицы;
- 3 – дополнительные грузы;
- 4 – груз массой  $m$

Для выполнения работы студент должен знать: а) понятия и формулы для расчета скорости, ускорения, угловой скорости, углового ускорения, массы, силы, импульса, момента силы, момента инерции; б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения; в) закон сохранения механической энергии.

## 4. Выполнение работы

### 4.1. Описание лабораторной установки

Маятник Обербека состоит из двухступенчатого шкива 1 и четырех спиц 2, на которые могут крепиться дополнительные грузы 3. (рис. 1). На шкив (малый или большой) наматывается нить, к свободному концу которой подвешивается груз 4 массой  $m$ . При своем падении груз 3 разматывает нить и приводит маятник в ускоренное вращательное движение. После падения груза

на пол нить соскальзывает со шкива, и движение маятника становится равнозамедленным до его остановки под действием момента сил трения в оси маятника.

#### 4.1. Измерения и метод расчета характеристик поступательного движения груза

4.2.1. Намотайте нить на выбранный шкив. Добавочные грузы на спицах маятника отсутствуют. Задайте высоту  $h$  нижнего основания груза относительно «нулевого» уровня ( $h_0 = 0$ ), она во всех опытах должна быть одинаковой (рис. 2). К свободному концу нити подвесьте груз массой  $m$ , измерьте время его движения секундомером. Опыт повторите 5 раз. Определите среднее значение времени  $\langle t \rangle$  движения груза. Данные измерений и вычислений занесите в табл. 1.

Таблица 1

*Результаты измерений и вычислений характеристик поступательного движения груза*

 $h =$  $m =$ 

№ п/п	$t$ , с	$\langle t \rangle$ , с	$v$ , м/с	$a$ , м/с <sup>2</sup>	$F_H$ , Н	$p$ , кг.м/с	$W_P$ , Дж	$W_K$ , Дж
Формула			(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1								
2								
3								
4								
5								

4.2.2. Для определения скорости  $v$  груза и его ускорения  $a$  в конце его поступательного движения без начальной скорости используйте уравнения

$$h = \frac{at^2}{2} \quad \text{и} \quad v = at, \quad (1)$$

из которых скорость груза и его ускорение в конце  $t$  равноускоренного движения определяются соотношениями:

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

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (3)$$

Все характеристики рассчитываются по одному разу, используя среднее значение времени  $\langle t \rangle$ .

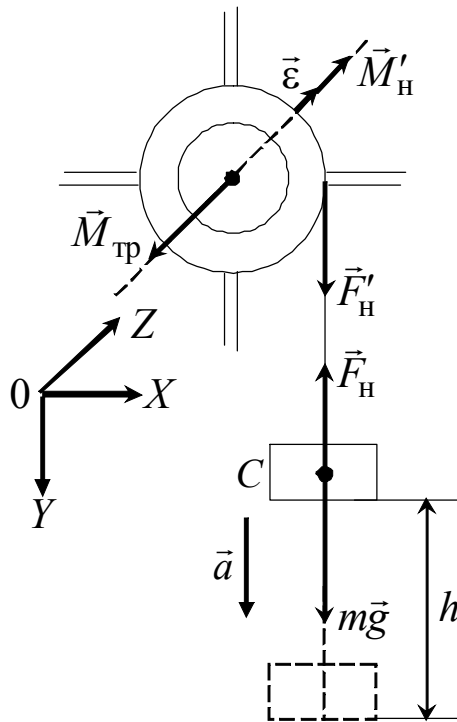


Рис. 2. Схема сил и моментов сил, действующих на груз и шкив маятника

двигущегося груза в проекции на ось  $Y$  зависит от массы груза и скорости его движения

$$p = mv = \frac{2mh}{t}. \quad (5)$$

4.2.4. Рассчитайте потенциальную энергию  $W_{\text{п}}$  груза, поднятого относительно «нулевого» уровня на высоту  $h$  (начальный запас энергии системы связанных тел):

$$W_{\text{п}} = mgh. \quad (6)$$

4.2.3. Определите силу натяжения нити, учитывая, что равноускоренное движение груза происходит под действием силы тяжести  $m\vec{g}$  и силы натяжения нити  $\vec{F}_{\text{н}}$  (рис. 2).

При использовании основного уравнения поступательного движения твердого тела

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{н}} = m\vec{a}$$

расчетная формула для определения силы натяжения нити в проекции на направление движения груза примет вид:

$$F_{\text{н}} = m(g - a). \quad (4)$$

Импульс  $p$  поступательно

и кинетическую энергию  $W_k$  груза в конце его равноускоренного движения

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{2mh^2}{t^2}. \quad (7)$$

Результаты расчета динамических характеристик поступательного движения груза и полученных значений механической энергии занесите в табл. 1. Сравните полученные значения энергий. Должны ли эти значения быть равными?

### 4.3. Метод расчета характеристик вращательного движения крестообразного маятника

Кинематические характеристики вращательного движения крестообразного маятника: угловое ускорение  $\varepsilon$ , угловая скорость  $\omega$ , угол поворота  $\varphi$  и число оборотов маятника за время  $\langle t \rangle$  его вращения в условиях данного эксперимента определяются при использовании полученных ранее кинематических характеристик поступательного движения груза (см. табл. 1).

Так как нить не проскальзывает по поверхности шкива, то ускорение поступательного движения груза и тангенциальное ускорение  $a_\tau$  точек поверхности шкива совпадают  $a_\tau = a$ . Тогда угловое ускорение  $\varepsilon$  с учетом формулы (3) определится соотношением

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{r} = \frac{2h}{rt^2}, \quad (8)$$

а угловая скорость вращения шкива рассчитывается по формуле

$$\omega = \varepsilon t = \frac{2h}{rt}. \quad (9)$$

Угол поворота  $\varphi$  и число оборотов  $N$  за время движения груза определяются соответственно из формул:

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} = \frac{h}{r}, \quad (10)$$

$$N = \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{h}{2\pi r}. \quad (11)$$

Вращение крестообразного маятника происходит под действием момента силы  $\vec{M}_H$  натяжения нити  $\vec{F}'_H$ , направленного вдоль оси вращения в сторону, определяемую правилом правого винта (рис. 3), и момента сил трения  $M_{тр}$  (сила трения на рис. не указана). Момент силы тяжести маятника относительно оси, совпадающей с осью вращения, равен нулю. Момент силы натяжения нити

$$M_H = r F'_H,$$

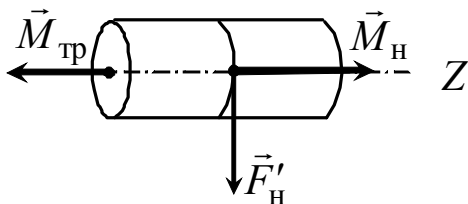


Рис. 3. Схема, поясняющая направления моментов сил натяжения нити и силы трения

где  $F'_H = F_H$ , так как нить нерастяжима,  $r$  – радиус шкива.

Следовательно, момент силы натяжения нити с учетом формулы (4) определится соотношением

$$M_H = r F_H = r m (g - a). \quad (12)$$

Уравнение динамики вращательного движения в проекции на ось вращения крестообразного маятника имеет вид

$$M_H - M_{тр} = J_z \varepsilon, \quad (13)$$

где  $J_z$  – момент инерции маятника относительно оси вращения;  $\varepsilon$  – его угловое ускорение.

Формула (13) позволяет рассчитать момент инерции маятника на основе результатов экспериментального определения моментов действующих сил

$$J_z = \frac{M_H - M_{тр}}{\varepsilon}. \quad (14)$$

Значение момента сил трения  $M_{тр}$  приведено на установке.

4.3.1. Измерьте штангенциркулем диаметр  $D$  шкива, рассчитайте его радиус. Используя результаты измерения высоты  $h$  поднятия груза относительно выбранного уровня и среднее вре-

мя  $\langle t \rangle$  движения груза, рассчитайте кинематические характеристики вращательного движения крестообразного маятника. Результаты занесите в табл. 2.

Таблица 2

*Характеристики вращательного движения крестовины*

$$r = \quad M_{\text{тр}} =$$

Характеристики	$\langle t \rangle$ , с	$\varepsilon$ , с <sup>-2</sup>	$\omega$ , с <sup>-1</sup>	$\varphi$ , рад	$N$ , оборот.	$M_{\text{н}}$ , Н·м	$J_z$ , кг·м <sup>2</sup>	$L_z$ , кг·м <sup>2</sup> /с
Формула		(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(14)	(15)

4.3.2. Рассчитайте динамические характеристики маятника: момент инерции  $J_z$  относительно оси вращения, максимальное значение проекции момента импульса  $L_z$  маятника на ось вращения

$$L_z = J_z \omega. \quad (15)$$

Сравните полученное значение с моментом импульса  $L_z^{\text{гп}}$  груза относительно оси вращения, движущегося поступательно:

$$L_z^{\text{гп}} = m v r.$$

Должны ли совпадать эти значения?

4.3.3. Рассчитайте кинетическую энергию вращающегося маятника

$$W_{\text{к}}^{\text{вращ}} = \frac{J_z \omega^2}{2} \quad (16)$$

и работу  $A_{\text{тр}}$  момента сил трения

$$A_{\text{тр}} = M_{\text{тр}} \varphi. \quad (17)$$

Используя результаты расчетов по формулам (6), (7), (16) и (17), проверьте, все ли потери механической энергии учтены. Результаты расчета занесите в табл. 3.

*Энергетические характеристики системы тел*

Обозначение	$W_{\text{п}}$	$W_{\text{к}}^{\text{пост}}$	$W_{\text{к}}^{\text{вращ}}$	$A_{\text{тр}}$
Единицы измерения	Дж	Дж	Дж	Дж
Результаты расчета				

**5. Сделайте вывод.****ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4****Проверка уравнения динамики вращательного движения**

**1. Цель работы:** освоить методику экспериментального определения кинематических и динамических характеристик поступательного и вращательного движения тел с помощью маятника Обербека.

**2. Оборудование:** маятник Обербека, набор грузов, нить, секундомер, штангенциркуль, линейка.

**3. Подготовка к работе:** а) изучить необходимые теоретические положения по учебникам: [1] §§ 2–4, 7–14, 22–24; [2] 1.2, 1.3, 2.2–2.4, 3.2–3.4, 4.1–4.3; [3] §§ 2.2, 2.4; б) ответить на вопросы для самоподготовки 5–15; в) уметь пользоваться измерительными приборами.

Для выполнения работы студент должен знать: а) понятия скорости, ускорения, угловой скорости, углового ускорения, силы, момента силы, момента инерции; б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения; в) понятия потенциальной энергии, кинетической энергии поступательного и вращательного движений; г) закон сохранения механической энергии.

## 4. Выполнение работы

### 4.1. Описание установки

Маятник Обербека состоит из двухступенчатого шкива 1 (рис. 1) с четырьмя взаимно перпендикулярными стержнями 2. На стержнях могут быть закреплены четыре цилиндрических груза 3 массой  $m_0$ . На шкив (малый или большой) наматывается нить, к свободному концу которой подвешивается груз массой  $m$ . При падении груз разматывает нить и приводит маятник в ускоренное вращательное движение.

### 4.2. Измерения и методика расчета характеристик поступательного и вращательного движения

Поступательное движение груза  $m$  происходит под действием силы тяжести  $m\vec{g}$  и силы натяжения нити  $\vec{F}_H$  (рис. 1). Второй закон Ньютона для этого случая запишется в виде:

$$m\vec{g} + \vec{F}_H = m\vec{a},$$

а в проекции на направление движения груза

$$ma = mg - F_H.$$

Движение груза – прямолинейное с постоянным ускорением, так как в процессе движения  $m$ ,  $\vec{g}$ ,  $\vec{F}_H$  не изменяются. Тогда сила натяжения нити определяется по формуле

$$F_H = m(g - a), \quad (1)$$

а ускорение  $a$  и скорость  $v$ , в конце равноускоренного движения определяются соответственно по формулам

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

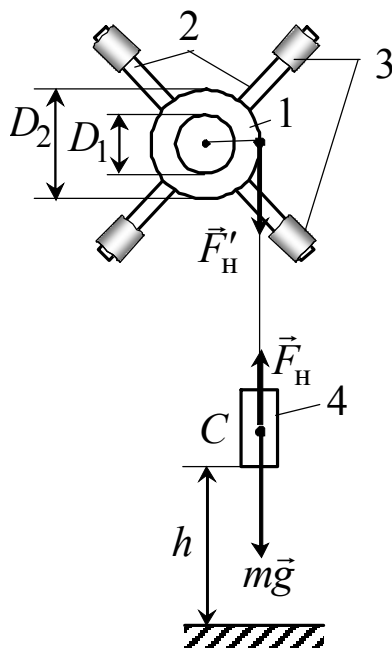


Рис. 1. Схема установки:  
1 – двухступенчатый вал;  
2 – стержни; 3 – грузы  $m_0$ ;  
4 – груз массой  $m$



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

4.2.1. Добавочные грузы  $m_0$  со спиц маятника снимите. Штангенциркулем измерьте диаметры  $D_1$  и  $D_2$  двухступенчатого шкива, рассчитайте их радиусы  $r_1$  и  $r_2$ . Результаты занесите в табл. 1.

4.2.2. Запишите массу грузов  $m_1$  и  $m_2$  (указаны на грузах).

4.2.3. Намотайте нить на шкив радиуса  $r_1$ . Высота  $h$  нижнего основания груза над поверхностью во всех опытах должна быть одинаковой. К свободному концу нити подвесьте сначала груз массой  $m_1$ , затем груз массой  $m_2$ . Измерьте время движения грузов секундомером.

4.2.4. Намотайте нить на шкив радиуса  $r_2$  и проделайте опыты с обоими грузами.

4.2.5. Используя экспериментальные данные, по формулам (2) и (3) рассчитайте кинематические характеристики поступательного движения грузов скорость  $v$  и ускорение  $a$ .

Таблица 1

*Результаты измерений и вычислений кинематических характеристик*

$h =$

$r$	$m$	$t$	$v$	$a$	$\varepsilon$	$\omega$	$\varphi$
м	кг	с	м/с	м/с <sup>2</sup>	с <sup>-2</sup>	с <sup>-1</sup>	рад
$r_1 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						
$r_2 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						

4.2.6. Кинематические характеристики вращательного движения крестовины угловую скорость  $\omega$  и угловое ускорение  $\varepsilon$  определите по соотношениям

$$\omega = \frac{2h}{rt} \quad \text{и} \quad \varepsilon = \frac{2h}{rt^2}. \quad (4)$$

4.2.7. Используя значения  $h$  и  $r$ , рассчитайте угол  $\varphi$  поворота шкива

$$\varphi = \frac{h}{r}. \quad (5)$$

Результаты расчета занесите в табл. 1.

### 4.3. Расчет динамических характеристик

Равноускоренное вращение маятника обусловлено действием момента силы натяжения нити

$$M_{\text{н}} = rF'_{\text{н}},$$

где  $F'_{\text{н}} = F_{\text{н}}$ , так как нить нерастяжима.

Следовательно, с учетом формулы (1) получим выражение для определения момента силы натяжения

$$M_{\text{н}} = rF_{\text{н}} = r m (g - a). \quad (6)$$

Момент силы тяжести маятника относительно оси  $Z$ , совпадающей с осью вращения, равен нулю. Кроме того, при вращении маятника действует сила трения, момент  $\vec{M}_{\text{тр}}$  которой направлен противоположно  $\vec{M}_{\text{н}}$  (рис. 2).

Уравнение динамики вращательного движения в проекции на направление оси вращения маятника имеет вид

$$M_{\text{н}} - M_{\text{тр}} = J_z \varepsilon, \quad (7)$$

где  $J_z$  – момент инерции маятника относительно оси  $Z$ ;  $\varepsilon$  – его угловое ускорение.

Формула (7) позволяет рассчитать момент инерции маятника на основе ре-

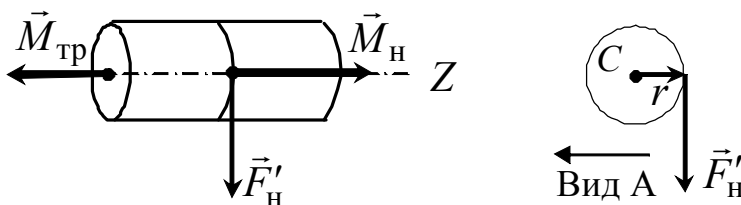


Рис. 2. Схема, поясняющая направления моментов сил натяжения нити и силы трения

зультатов экспериментального определения моментов действующих сил:

$$J = \frac{M_{\text{н}} - M_{\text{тр}}}{\varepsilon} = \frac{M}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где  $M = M_{\text{н}} - M_{\text{тр}}$  - значение результирующего момента сил. Значения моментов сил трения  $M_{\text{тр}1}$  (нить намотана на шкив радиуса  $r_1$ ) и  $M_{\text{тр}2}$  (нить намотана на шкив радиуса  $r_2$ ) приведены на установке.

4.3.1. Пользуясь данными табл. 1, рассчитайте динамические характеристики груза и маятника Обербека. Определите среднее значение момента инерции маятника без грузов на спицах

$$\langle J_z \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n J_{zi}}{n}. \quad (9)$$

Результаты расчета динамических характеристик груза и маятника занесите в табл. 2.

Таблица 2

*Динамические характеристики груза и маятника*

$$M_{\text{тр}1} = \quad M_{\text{тр}2} = \quad M_{\text{тр}3} =$$

$r$	$m$	$F_{\text{н}}$	$M_{\text{н}}$	$M$	$\varepsilon$	$J_z$	$\langle J_z \rangle$
м	кг	Н	Н·м	Н·м	с <sup>-2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>
$r_1 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						
$r_2 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						

4.3.2. Поместите на спицы маятника дополнительные грузы массой  $m_0$  и, меняя положение этих грузов относительно оси вращения, измените момент инерции маятника. Значение момента инерции маятника  $\langle J_z \rangle$  без дополнительных грузов на спицах определено в табл. 2.

Положение грузов на спицах задается расстоянием  $\ell$  между центрами масс барабана  $B$  маятника и груза  $m_0$  (рис. 3)

$$\ell = d/2 + c + b/2. \quad (10)$$

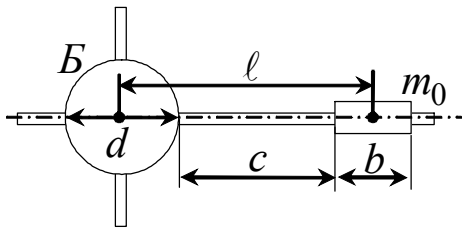


Рис. 3. Расположение добавочного груза на спице

Рекомендуется располагать грузы  $m_0$  сначала вплотную к барабану  $B$  (положение 1), затем посередине спиц (положение 2) и на конце спиц (положение 3). Грузы следует надежно закреплять на спицах.

4.3.3. Намотайте нить на шкив радиуса  $r_2$ , прикрепите к нити груз массой  $m_2$ , добавочные грузы закреплены в положении 1. Высоту  $h$  груза над поверхностью стола не изменяйте. Измерьте время движения груза и занесите его во вторую строчку табл. 3.

Таблица 3

*Зависимость углового ускорения от момента инерции маятника*

№ п/п	$\ell$	$t$	$\varepsilon$	$M_H$	$M$	$J_z$
	м	с	с <sup>-2</sup>	Н·м	Н·м	кг·м <sup>2</sup>
1	—	*	*	**	**	***
2						
3						
4						

\* – берется из табл. 1, четвертая строка;

\*\* – берется из табл. 2, четвертая строка;

\*\*\* – берется из табл. 2 среднее значение  $\langle J_z \rangle$ .

4.3.4. Повторите измерение времени для 2-го и 3-го положений добавочных грузов. Рассчитайте угловое ускорение  $\varepsilon$ , мо-

мент силы натяжения нити  $M_H$ , результирующий момент сил  $M = M_H - M_{трз}$  и момент инерции маятника для каждого опыта.

#### 4.4. Проверка уравнения динамики вращательного движения

Проверить основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела можно следующим образом:

а) анализируя зависимость  $\varepsilon = f(M)$  при неизменном моменте инерции маятника  $J_z$ ;

б) анализируя зависимость  $\varepsilon = f(J_z)$  при неизменном моменте сил.

Обработку результатов совместных измерений проводят графическим методом. При построении графиков в данной работе используют декартову систему координат. На координатных осях обозначают величины и единицы их измерения. Масштабные величины (можно разные) наносятся на осях равномерно, начало координат и масштаб выбираются так, чтобы была использована вся площадь графика. Точки соединяются плавной кривой (в случае линейной зависимости – прямая) так, чтобы они находились по обе стороны на одинаковом расстоянии от линии графика. Графики должны быть выполнены на миллиметровой бумаге или с помощью компьютера.

4.4.1. По результатам табл. 2 постройте график  $\varepsilon = f(M)$ . Определите по графику момент инерции маятника

$$J_{z\text{граф}} = \frac{\Delta M}{\Delta \varepsilon}.$$

4.4.2. Постройте график  $\varepsilon = f(J_z)$ . Учтите, что момент внешних сил в этой серии опытов примерно постоянный.

4.4.3. Сделайте вывод: а) о влиянии условий опытов на значения кинематических и динамических характеристик; б) о выполнении уравнения динамики вращательного движения.

#### 5. Сделайте вывод.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

**Изучение ударного взаимодействия твердых тел**

**1. Цель работы:** определение момента инерции стержня на основе законов сохранения момента импульса и механической энергии.

**2. Оборудование:** закрепленный на горизонтальной оси стальной стержень, стальной шарик, электромагнит, секундомер, штангенциркуль, измерительная линейка.

**3. Подготовка к работе:** прочитать в [1] §§ 9, 13; [2] §§ 5.2–5.3; ответить на вопросы для самоподготовки 16–21.

Для выполнения работы студент должен знать: а) понятия и формулы для расчета физических величин таких как скорость, ускорение, угловая скорость, угловое ускорение, масса, сила, момент силы, импульс, момент импульса, момент инерции; б) уравнения кинематики и динамики поступательного и вращательного движения; в) законы сохранения момента импульса и механической энергии; г) уметь пользоваться измерительными приборами.

**4. Выполнение работы****4.1. Описание лабораторной установки**

Стальной прямоугольный стержень может вращаться с малым трением вокруг горизонтальной оси, проходящей через его центр масс. Это вращение происходит за счет кинетической энергии шарика массой  $m$ , свободно падающего с высоты  $h$ , на которой он удерживается электромагнитом (рис.1). При выключении электромагнита шарик приобретает скорость  $v$  и ударяется о горизонтально расположенный стержень в точке, отстоящей от оси вращения на расстоянии  $r$ . Место упругого удара определяют по небольшой вмятине в тонком слое пластилина, нанесенном на стержень. Число оборотов  $N$  стержня, которое он сделает до полной остановки, определяется с помощью закрепленного на стене лимба.

#### 4.1. Методика измерений и расчета кинематических характеристик

4.1.1. Измерьте высоту  $h$  падения шарика (расстояние от наконечника электромагнита до стержня в его горизонтальном положении с поправкой на диаметр  $d$  шарика). Масса  $m$  шарика приведена на установке.

4.1.2. Укрепите шарик на электромагните, стержень расположите горизонтально. Шарик должен падать на конец стержня, покрытый тонким слоем пластилина. Выключите электромагнит.

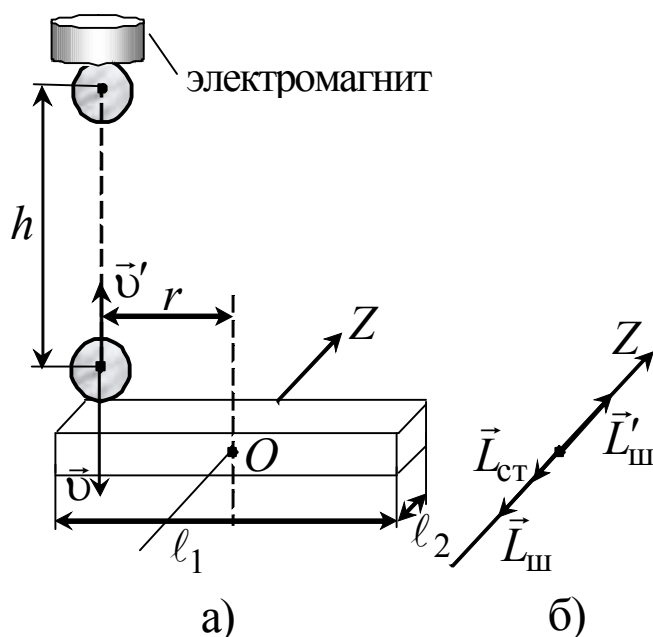


Рис. 1. Схема установки (а) и направления векторов момента импульса шарика и стержня (б):  $\vec{L}_{\text{ш}}$  – до удара;  $\vec{L}_{\text{ст}}$  и  $\vec{L}'_{\text{ш}}$  – после удара

4.1.3. Для определения времени  $t$  вращения стержня секундомер включите после удара шарика о конец стержня и выключите его в момент полной остановки стержня. Определите число  $N$  оборотов стержня за этот промежуток времени.

4.1.4. Измерьте расстояние  $r$  от места удара шарика о стержень до оси вращения (место удара определяется по вмятине в слое пластилина на конце стержня).

4.1.5. Опыт повторите не менее пяти раз. Рассчитайте скорость  $v$  шарика перед ударом

$$v = \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

По средним значениям времени  $\langle t \rangle$  и числа оборотов  $\langle N \rangle$  определите начальную угловую скорость  $\omega_0$  стержня

$$\omega_0 = \frac{4\pi\langle N \rangle}{\langle t \rangle} \quad (2)$$

и его угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_t - \omega_0}{\Delta t} = -\frac{\omega_0}{t}. \quad (3)$$

Данные измерений и расчетов занесите в табл. 1.

Таблица 1

*Результаты измерений и расчета кинематических характеристик шарика и стержня*

$h =$                        $m =$                        $r =$

№ п/п	$t$	$\langle t \rangle$	$N$	$\langle N \rangle$	$v$	$\omega_0$	$\varepsilon$
	с	с	обор.	обор.	м/с	с <sup>-1</sup>	с <sup>-2</sup>
1							
2							
3							
4							
5							

#### 4.2. Определение динамических характеристик шарика и стержня

При кратковременном взаимодействии (ударе) систему тел «шарик – стержень» можно считать *квазизамкнутой* и применить к ней закон *сохранения момента импульса*. Вектор момента импульса шарика относительно точки  $O$  перед ударом равен

$$\vec{L}_{\text{ш}} = [\vec{r}, m\vec{v}], \quad (4)$$

где  $r$  – расстояние от места удара шарика до оси вращения стержня;  $m$  – масса шарика;  $v$  – скорость шарика перед ударом (1).

Стержень до удара шарика покоится, поэтому его момент импульса равен нулю. После упругого соударения шарик отска-



квивает от стержня вертикально вверх со скоростью  $\vec{v}'$  и моментом импульса  $\vec{L}'_{ш}$

$$\vec{L}'_{ш} = [\vec{r}, m\vec{v}'], \quad (5)$$

а стержень начинает вращаться относительно оси  $Z$  с начальной угловой скоростью  $\omega_0$  (2), приобретая момент импульса  $\vec{L}_{ст}$

$$\vec{L}_{ст} = J_z \vec{\omega}_0, \quad (6)$$

где  $J_z$  – момент инерции стержня относительно оси вращения  $Z$ . Направления векторов указанных моментов импульса приведены на рис.1, б.

Из закона сохранения момента импульса системы тел «шарик – стержень» следует

$$[\vec{r}, m\vec{v}] = J_z \vec{\omega}_0 + [\vec{r}, m\vec{v}']. \quad (7)$$

Закон сохранения момента импульса в проекции на ось  $Z$  запишется в виде:

$$r m v = J_z \omega_0 - r m v'. \quad (8)$$

Полагая удар шарика о стержень *абсолютно упругим*, а систему «шарик – стержень» *консервативной*, применяем к ней закон сохранения механической энергии (потенциальная энергия системы относительно уровня, проходящего через точку  $O$ , не изменяется):

$$\frac{m v^2}{2} = \frac{J_z \omega_0^2}{2} + \frac{m v'^2}{2}, \quad (9)$$

где  $m v^2 / 2$  и  $m v'^2 / 2$  – кинетическая энергия шарика до удара и после него, соответственно;  $J_z \omega_0^2 / 2$  – начальная кинетическая энергия стержня. Решая систему уравнений (8) и (9), получаем расчетную формулу для *момента инерции стержня*:

$$J_z = \frac{mr}{\omega_0} (2v - \omega_0 r). \quad (10)$$

4.2.1. Рассчитайте динамические характеристики системы: момент импульса  $L_{ш}$  шарика до удара, момент импульса  $L_{ст}$

стержня после удара, момент инерции  $J_z$  стержня, определенный экспериментально. Результаты запишите в табл. 2.

4.2.2. Измерьте параметры стержня  $l_1$  и  $l_2$  (см. рис. 1, а), масса стержня  $m_{\text{ст}}$  приведена на установке.

4.2.3. Рассчитайте теоретическое значение момента инерции  $J_z^{\text{теор}}$  стержня по формуле

$$J_z^{\text{теор}} = \frac{1}{12} m_{\text{ст}} (l_1^2 + l_2^2). \quad (11)$$

Таблица 2

*Расчет динамических характеристик шарика и стержня*

$m_{\text{ст}} =$

$l_1 =$

$l_2 =$

$L_{\text{ш}}$	$L_{\text{ст}}$	$J_z$	$J_z^{\text{теор}}$	$\varepsilon_J$	$W_{\text{к}}^{\text{ш}}$	$W_{\text{к}}^{\text{ст}}$	$A_{\text{тр}}$	$M_{\text{тр}}$
кг·м <sup>2</sup> /с	кг·м <sup>2</sup> /с	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	%	Дж	Дж	Дж	Н·м

4.2.4. Рассчитайте отклонение результатов экспериментального определения (10) и теоретического расчета (11) момента инерции стержня:

$$\varepsilon_J = \frac{|J_z^{\text{теор}} - J_z|}{J_z^{\text{теор}}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

4.2.5. Определите кинетическую энергию  $W_{\text{к}}^{\text{ш}}$  шарика перед ударом и кинетическую энергию  $W_{\text{к}}^{\text{ст}}$  стержня после удара.

4.2.6. Рассчитайте работу момента сил трения

$$A_{\text{тр}} = \Delta W_{\text{к}}^{\text{ст}} = \frac{J_z \omega_0^2}{2} \quad (12)$$

и момент сил трения  $M_{\text{тр}}$ , действующий на стержень при его вращении:

$$M_{\text{тр}} = \frac{A_{\text{тр}}}{\varphi}. \quad (13)$$

**5. Сделайте вывод.**

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Какие погрешности называют случайными и систематическими? Как поступают с грубыми погрешностями?
2. От чего зависят надежность и абсолютная погрешность  $\Delta x_{\text{сл}}$ ?
3. Как определяется приборная погрешность  $\Delta x_{\text{пр}}$  и как рассчитать абсолютную погрешность прямых измерений?
4. Как рассчитывается относительная погрешность косвенных измерений?
5. Какое движение называют поступательным? Вращательным? Приведите кинематические уравнения этих движений.
6. Как определяются векторы скорости  $\vec{v}$  и ускорения  $\vec{a}$  при поступательном движении?
7. Как записывается основной закон динамики поступательного движения.
8. Как определяются векторы угловой скорости  $\vec{\omega}$  и углового ускорения  $\vec{\epsilon}$  при вращательном движении? Как направлены эти векторы?
9. Как связаны кинематические характеристики при поступательном и вращательном движении?
10. Для каких точек вращающихся твердых тел тангенциальное ускорение  $a_{\tau}$  одинаково?
11. Как определяется момент силы натяжения нити относительно оси вращения?
12. Каков физический смысл момента инерции? Приведите пример расчета момента инерции какого-либо тела.
13. Как изменится момент инерции стержня или добавочных грузов на спицах, если изменить положение их центра масс относительно оси вращения?
14. Как записывается уравнение динамики вращательного движения?
15. Можно ли применять закон сохранения механической энергии при наличии диссипативных сил?
16. Каков характер движения стержня и шарика? Запишите кинематические уравнения этих движений.

17. Как определяется момент импульса материальной точки относительно неподвижной точки и относительно оси?

18. Как определяется момент импульса твердого тела относительно оси вращения?

19. Как формулируется закон сохранения момента импульса для системы взаимодействующих тел?

20. Как записывается закон сохранения момента импульса для системы взаимодействующих тел «шарик – стержень»?

21. Как записывается закон сохранения энергии системы тел «шарик – стержень»? Почему в это уравнение не входит потенциальная энергия тел системы?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И. В. Курс физики : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техн. и технолог. направлениям и специальностям : в 3 т. Т. 1 : Механика. Молекулярная физика. – 4-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – 352 с.

[http://e.lanbook.com/books/element.php?p11\\_cid=25&p11\\_id=509](http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=509)

2. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Академия, 2007. – 720 с.

3. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стереотип. – Москва : Академия, 2007. – 560 с.

Составитель

Лавряшина Таисия Васильевна

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ**

**Лабораторный практикум К-303.1**  
по дисциплине «Физика»  
для технических специальностей и направлений

Рецензент В. В. Дырдин

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 03.06.2014. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Уч.-изд. л. 2,00  
Тираж 50 экз. Заказ

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