

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Факультет фундаментальной подготовки  
Кафедра физики

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ.  
Кинематика и динамика вращательного  
движения**

Лабораторный практикум К-304.2  
по дисциплине «Физика»  
для обучающихся технических специальностей и направлений

Составители Г. К. Кошкина  
И. В. Цвеклинская

Утвержден на заседании кафедры  
Протокол № 9 от 15.05.2018  
Рекомендован к печати  
учебно-методической комиссией  
направления 20.03.01  
Протокол № 12 от 27.06.2018  
Электронная копия находится  
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2018

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Введение</b> .....	2
<b>Лабораторная работа № 1</b> «Изучение поступательного и вращательного движений с помощью маятника Обербека. Часть 1» .....	3
<b>Лабораторная работа № 2</b> «Изучение поступательного и вращательного движений с помощью маятника Обербека. Часть 2» .....	11
<b>Лабораторная работа № 3</b> «Определение параметров движения твёрдых тел на основе законов сохранения».....	18
<b>Лабораторная работа № 4</b> «Определение кинематических и динамических характеристик маятника Максвелла».....	24
<b>Список рекомендуемой литературы</b> .....	34

## 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 отчёты.

В результате освоения физического практикума по дисциплине «Физика» студент должен:

- 1) знать основные физические явления и законы;
- 2) уметь выявлять физическую сущность явлений и процессов, выполнять необходимые расчёты;
- 3) 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 расчёта 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, расчёта и суть физических законов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### Изучение поступательного и вращательного движений с помощью маятника Обербека. Часть 1

**1. Цель работы:** проверка законов кинематики и динамики поступательного и вращательного движения тел и экспериментальное определение кинематических и динамических характеристик этих тел.

**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 характеристики поступательного и вращательного движения твёрдого тела; б) понятия момента силы, момента импульса и момента инерции тела; в) основные уравнения динамики поступательного и вращательного движения.

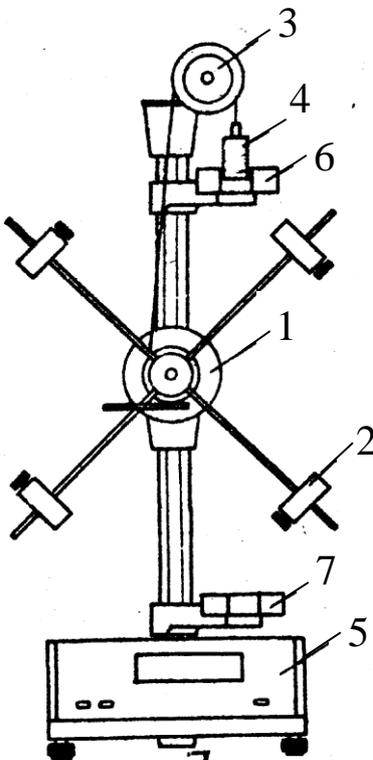


Рис. 1. Схема установки

### 3. Выполнение работы

#### 3.1. Описание установки

Общий вид установки РРМ–06 изображен на рис. 1. Маятник Обербека представляет собой двухступенчатый шкив 1 диаметрами  $d_1$  и  $d_2$  с четырьмя взаимно перпендикулярными стержнями, на которых могут быть укреплены симметрично четыре цилиндрических груза 2 массами  $m_0$ . На шкив (малый или большой) наматывается нить, которая перебрасывается через блок 3. К свободному концу нити подвешивается груз 4 массой  $m$ . Груз, двигаясь поступательно,

разматывает нить, при этом крестообразный маятник совершает вращательное движение 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 фоторезистор. Работа датчиков согласована с работой тормозного электромагнита, который с помощью фрикционной муфты удерживает крестообразный маятник и груз в состоянии покоя.

### 3.2. Методика измерений и расчёта

#### 3.2.1. Поступательное движение груза

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

Согласно второму закону Ньютона имеем

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

и в проекции на ось  $OY$ :

$$ma = mg - T.$$

Так как в процессе движения  $m$ ,  $\vec{g}$  и  $\vec{T}$  остаются неизменными, то  $a = \text{const}$ , т. е. движение груза – прямолинейное и равноускоренное.

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

а) ускорение

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

б) максимальную скорость, приобретаемую грузом в конце движения

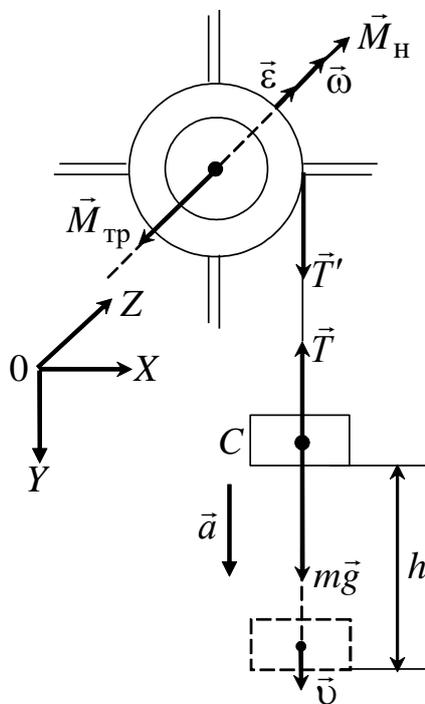


Рис. 2. Схема сил и моментов сил, действующих на груз и шкив маятника

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

Динамические характеристики поступательного движения груза определяются по формулам

а) сила натяжения нити

$$T = m(g - a); \quad (4)$$

б) максимальный импульс груза

$$P = m v; \quad (5)$$

в) максимальная кинетическая энергия груза

$$E_{\text{пост}}^{\text{к}} = \frac{m v^2}{2}; \quad (6)$$

г) потенциальная энергия груза на высоте  $h$

$$E_{\text{п}} = m g h. \quad (7)$$

### 3.2.2. Вращательное движение маятника вокруг неподвижной оси

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

$$J \varepsilon = M_{\text{н}}, \quad (8)$$

где  $J$  – момент инерции маятника относительно оси вращения, проходящей через его центр масс;  $\varepsilon$  – угловое ускорение, которое определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{a_{\tau}}{r}, \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{2h}{rt^2}, \quad (9)$$

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

Угол поворота маятника за время  $t$  равен

$$\varphi_1 = \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad \text{или} \quad \varphi_2 = \frac{h}{r}. \quad (10)$$

За это время маятник сделает  $N$  оборотов

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

Угловая скорость при равноускоренном вращении маятника за время  $t$  достигает значения

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

Тогда максимальная частота вращения

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{h}{\pi r t}. \quad (13)$$

Динамические характеристики вращательного движения крестообразного маятника определяются по формулам

а) момент силы натяжения нити

$$M_{\text{н}} = T \cdot r; \quad (14)$$

б) момент инерции маятника

$$J = \frac{M_{\text{н}}}{\varepsilon}; \quad (15)$$

в) максимальный момент импульса маятника

$$L = J \omega; \quad (16)$$

г) максимальная кинетическая энергия маятника

$$E_{\text{вращ}}^{\text{к}} = \frac{J \omega^2}{2}. \quad (17)$$

Из формул (1–17) видно, что кинематические и динамические характеристики поступательного и вращательного движений зависят от используемых в эксперименте значений высоты падения груза  $h$ , массы подвешиваемого к нити груза  $m$  и радиуса шкива  $r$ .

### 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, что-

бы 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. При пересечении грузом светового потока верхнего фотоэлектрического датчика 6 включается миллисекундомер 5, который отсчитывает время движения груза. При пересечении грузом светового луча в нижнем фотоэлектрическом датчике 7 отсчёт 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. Перенесите груз в верхнее положение и отожмите клавишу «Пуск», чтобы вновь заблокировать ось вращения маятника. Далее повторите последовательно пункты 3.3.2–3.3.4.

## 4. Экспериментальная часть

### 4.1. *Определение кинематических характеристик поступательного движения груза и вращательного движения крестообразного маятника*

Работа выполняется без грузов  $m_0$  на стержнях маятника.

4.1.1. Штангенциркулем измерьте диаметры шкивов  $d_1$  и  $d_2$  и рассчитайте их радиусы  $r_1$  и  $r_2$ . Измерьте высоту опускания груза  $h$  (остаётся постоянной во всех опытах). Запишите в табл. 1 полученные данные, а также массы грузов  $m_1$  и  $m_2$  (указаны на грузах).

4.1.2. Измерьте время  $t$  движения опускающегося груза, имеющего наименьшую массу  $m_1$ , когда нить намотана на шкив малого радиуса  $r_1$ . Опыт повторите 3 раза. 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 3 раза время его движения.

4.1.4. Намотайте нить на шкив большего радиуса  $r_2$  и определите время движения грузов массой  $m_1$  и  $m_2$ , как в пп. 4.1.2, 4.1.3.

4.1.5. Найдите среднее значение времени  $\langle t \rangle$  и вычислите в каждой серии опытов средние значения кинематических характеристик поступательного движения груза по формулам (2), (3) и вращательного движения маятника по формулам (9, 11–13).

Таблица 1

Результаты измерений времени и расчёта  
кинематических величин

$r$	$m$	№ п/п	$t$	$\langle t \rangle$	$\langle v \rangle$	$\langle a \rangle$	$\langle \varepsilon \rangle$	$\langle \omega \rangle$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\langle \varphi \rangle$	$n$	$N$
м	кг		с	с	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	$\text{с}^{-2}$	$\text{с}^{-1}$	рад	рад	рад	$\frac{\text{об}}{\text{с}}$	об
$r_1 =$	$m_1 =$	1											
		2											
		3											
	$m_2 =$	1											
		2											
		3											
$r_2 =$	$m_1 =$	1											
		2											
		3											
	$m_2 =$	1											
		2											
		3											

4.1.6. Угол поворота  $\varphi$  рассчитайте по формулам (10), а среднее значение возьмите равным  $\langle \varphi \rangle = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$ . Результаты измерений и расчётов занесите в табл. 1.

4.1.7. Проанализируйте, как меняются кинематические характеристики поступательного движения груза и вращательного движения маятника в зависимости от массы груза и радиуса шкива.

#### 4.2. Изучение зависимости углового ускорения от момента силы натяжения нити

4.2.1. В табл. 2 перенесите значения радиусов шкивов  $r_1$  и  $r_2$ , масс грузов  $m_1$  и  $m_2$  из табл. 1.

4.2.2. По формулам (4)–(7) рассчитайте силу натяжения нити  $T$ , импульс  $P$  и кинетическую энергию  $E_{\text{пост}}^{\text{к}}$  груза в конце поступательного движения во всех сериях измерений; потенциальную энергию  $E_{\text{п}}$  груза на максимальной высоте. Результаты расчётов занесите в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчёта динамических характеристик поступательно движущегося груза и вращающегося маятника

$$h = \quad \text{м}$$

$r$	$m$	$T$	$P$	$E_{\text{пост}}^{\text{к}}$	$E_{\text{п}}$	$M_{\text{н}}$	$J$	$\langle J \rangle$	$L$	$E_{\text{вр}}^{\text{к}}$	
м	кг	Н	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$	Дж	Дж	Н·м	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$	Дж	
$r_1 =$	$m_1 =$										
	$m_2 =$										
$r_2 =$	$m_1 =$										
	$m_2 =$										

4.2.3. По результатам расчёта проанализируйте, как зависят динамические характеристики поступательно движущегося груза от его массы и радиуса шкива.

4.2.4. Используя формулы (14)–(17), рассчитайте момент силы натяжения нити  $M_H$ , момент инерции  $J$ , момент импульса  $L$  и максимальную кинетическую энергию  $E_{\text{вр}}^k$  вращающегося маятника. Результаты расчётов внесите в табл. 2.

4.2.5. Постройте график зависимости углового ускорения  $\langle \varepsilon \rangle$  от момента силы натяжения  $M_H$  ( $\varepsilon = f(M_H)$ ). Определите по графику момент инерции маятника  $J_{\text{гр}} = \frac{\Delta M}{\Delta \varepsilon}$ . Сравните с  $\langle J \rangle$  из табл. 2.

**5. Сделайте вывод** о зависимости динамических характеристик от кинематических и о выполнимости основного уравнения динамики вращательного движения.

### **6. Вопросы для самоподготовки**

6.1. Какое движение называют поступательным? Какое движение называют вращательным?

6.2. Кинематические и динамические характеристики поступательно движущегося тела.

6.3. Законы динамики поступательного движения.

6.4. Кинематические характеристики вращательного движения твёрдого тела.

6.5. Связь между угловыми и линейными характеристиками.

6.6. Момент инерции материальной точки и твёрдого тела относительно неподвижной оси. От чего зависит момент инерции?

6.7. Физический смысл момента инерции тела. Какова размерность момента инерции?

6.8. Как рассчитывается момент инерции твёрдого тела правильной геометрической формы (стержня, диска, обруча) относительно неподвижной оси вращения, проходящей через его центр масс?

6.9. Момент инерции твёрдого тела относительно произвольной оси вращения. Теорема Штейнера.

6.10. Понятие вектора момента силы относительно неподвижной оси вращения.

6.11. Понятие вектора момента импульса относительно неподвижной оси вращения.

6.12. Основной закон динамики вращательного движения и его применение в работе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Изучение поступательного и вращательного движений с помощью маятника Обербека. Часть 2

**1. Цель работы:** а) проверка законов кинематики и динамики поступательного и вращательного движения тел и экспериментальное определение кинематических и динамических характеристик этих тел.

**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 характеристики поступательного и вращательного движения твердого тела; б) понятия момента силы, момента импульса и момента инерции тела; в) основные уравнения динамики поступательного и вращательного движения.

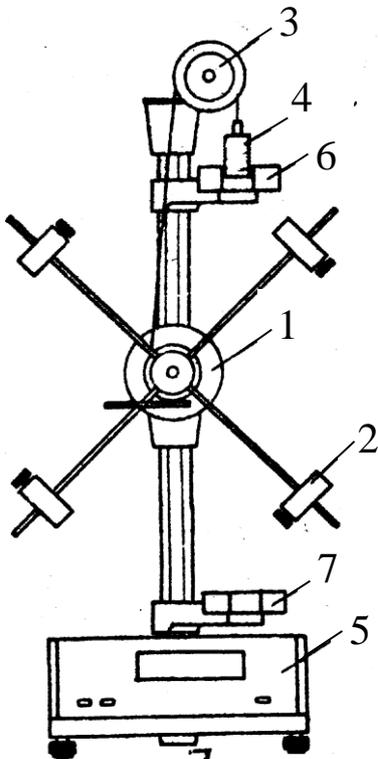


Рис. 1. Схема установки

### 3. Выполнение работы

#### 3.1. Описание установки

Общий вид установки РРМ–06 изображен на рис. 1. Маятник Обербека представляет собой двухступенчатый шкив 1 диаметрами  $d_1$  и  $d_2$

с четырьмя взаимно перпендикулярными стержнями, на которых могут быть укреплены симметрично четыре цилиндрических груза 2 массами  $m_0$ . На шкив (малый или большой) наматывается нить, которая перебрасывается через блок 3. К свободному концу нити подвешивается груз 4 массой  $m$ . Груз, двигаясь поступательно, разматывает нить, при этом крестообразный маятник совершает вращательное движение вокруг неподвижной оси. Время опускания груза с высоты  $h$  измеряется миллисекундомером 5, включение и выключение которого осуществляется через посредство фотоэлектрических датчиков 6 и 7, соответственно, при пересечении грузом светового потока, падающего на фоторезистор. Работа датчиков согласована с работой тормозного электромагнита, который с помощью фрикционной муфты удерживает крестообразный маятник и груз в состоянии покоя.

### 3.2. Методика измерений и расчёта

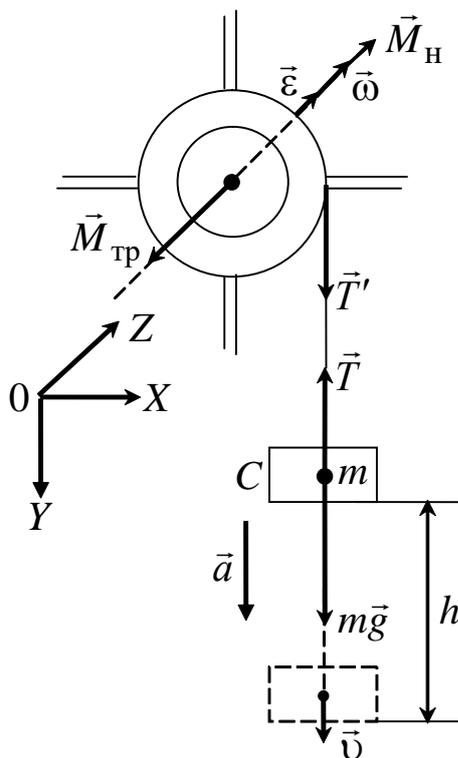


Рис. 2. Схема сил и моментов сил, действующих на груз и шкив маятника

Кинематические характеристики равноускоренного движения можно рассчитать по измеренным значениям высоты опускания груза  $h$  и времени его движения  $t$ .

Максимальная скорость поступательного движения груза

$$v = \frac{2h}{\langle t \rangle} \quad (1)$$

и его ускорение

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

Максимальная угловая скорость вращения маятника Обербека

$$\omega = \frac{2h}{r \langle t \rangle}. \quad (3)$$

и его угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{2h}{r\langle t \rangle^2}, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус шкива.

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

Согласно второму закону Ньютона имеем

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{T}$$

и в проекции на ось  $OY$

$$ma = mg - T.$$

Тогда сила натяжения нити

$$T = m(g - a); \quad (5)$$

а момент силы натяжения

$$M_{\text{H}} = T \cdot r = mr(g - a). \quad (6)$$

Момент силы тяжести маятника относительно оси, совпадающей с осью вращения, равен нулю. Момент силы трения  $\vec{M}_{\text{тр}}$  в нашем случае будет ничтожно мал и мы им пренебрегаем. Тогда основной закон динамики вращательного движения абсолютно твёрдого тела

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\sum \vec{M}}{J}$$

в проекции на направление оси вращения маятника  $OZ$

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{H}}}{J},$$

откуда получаем

$$J = \frac{M_{\text{H}}}{\langle \varepsilon \rangle}. \quad (7)$$

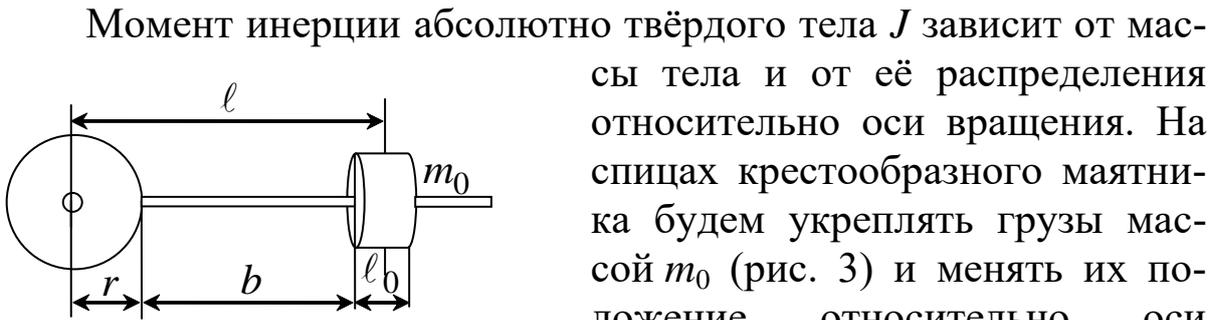


Рис. 3. К расчету момента инерции маятника с грузами массой  $m_0$

Момент инерции абсолютно твёрдого тела  $J$  зависит от массы тела и от её распределения относительно оси вращения. На спицах крестообразного маятника будем укреплять грузы массой  $m_0$  (рис. 3) и менять их положение относительно оси вращения, тем самым изменяя момент инерции маятника Обербека.

Расстояние от оси вращения до центра тяжести груза

$$\ell = r + b + \frac{\ell_0}{2}, \quad (8)$$

где  $b$  – расстояние от шкива до груза;  $\ell_0$  – высота груза.

### 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. При пересечении грузом светового потока верхнего фотоэлектрического датчика 6 включается миллисекундомер 5, который отсчитывает время движения груза. При пересечении грузом светового луча в нижнем фотоэлектрическом датчике 7 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. Перенесите груз в верхнее положение и отожмите клавишу «Пуск», чтобы вновь заблокировать ось вращения маятника. Далее повторяйте последовательно пункты 3.3.2–3.3.4.

#### 4. Экспериментальная часть

##### 4.1. Определение кинематических характеристик поступательного движения груза и вращательного движения маятника Обербека

4.1.1. Измерьте штангенциркулем диаметр  $d$  большего шкива и рассчитайте его радиус  $r$ . Запишите массу  $m$  большего груза (указана на грузе) и высоту  $h$  его опускания. Занесите данные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений и расчётов кинематических характеристик

$$h = \dots \text{м}; r = \dots \text{м}; m = \dots \text{кг};$$

$$\ell_0 = \dots \text{м}; m_0 = \dots \text{кг}$$

№ П/ П	$b$	$\ell$	$t$	$\langle t \rangle$	$\langle v \rangle$	$\langle a \rangle$	$\langle \omega \rangle$	$\langle \varepsilon \rangle$
	м	м	с	с	м·с <sup>-1</sup>	м·с <sup>-2</sup>	с <sup>-1</sup>	с <sup>-2</sup>
1	—	—						
2								
3								
1	0							
2								
3								
1								
2								
3								
1								
2								
3								

4.1.2. Намотайте нить на шкив большего диаметра. К свободному концу нити подвесьте груз массы  $m$ . Измерьте время опускания груза с высоты  $h$  с помощью миллисекундомера. Опыт повторите трижды. Данные занесите в табл. 1.

4.1.3. Измерьте высоту  $\ell_0$  и массу  $m_0$  цилиндрических грузиков и занесите данные в табл. 1.

4.1.4. Укрепите 4 цилиндрических грузика массой  $m_0$  на спицах маятника вплотную к шкиву ( $b = 0$ ). Рассчитайте расстояние  $\ell$  по формуле (8). Намотайте нить на шкив большего диаметра и к свободному концу подвесьте груз массой  $m$ . Зафиксируйте время опускания груза с высоты  $h$  с помощью миллисекундомера и занесите данные в табл. 1. Опыт повторите трижды.

4.1.5. Повторите эксперимент ещё для двух положений грузиков  $m_0$ :

- а) посередине спиц;
- б) на концах спиц.

Грузы располагайте строго симметрично относительно оси вращения и хорошо закрепляйте винтами.

4.1.6. Вычислите кинематические характеристики по формулам (1)–(4) и занесите в табл. 1.

#### 4.2. Изучение зависимости углового ускорения маятника от его момента инерции

4.2.1. В табл. 2 перенесите значения  $b$ ,  $\ell$  и углового ускорения  $\langle \varepsilon \rangle$  из табл. 1.

Таблица 2

Результаты расчета момента инерции маятника  
с грузами на спицах

№ п/п		$b$	$\ell$	$\langle \varepsilon \rangle$	$M_H$	$J$	$\frac{1}{J}$
		м	м	$\text{с}^{-2}$	Н·м	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$\text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$
1	Без грузов на спицах	–	–				
2	С грузами на спицах	0					
3							
4							

4.2.2. Значения момента сил натяжения  $M_H$  рассчитайте по формуле (6).

4.2.3. По формуле (7) рассчитайте момент инерции маятника без грузиков на спицах и для различных положений цилиндрических грузиков на спицах. Результаты расчёта занесите в табл. 2.

4.2.4. Постройте график зависимости  $\langle \varepsilon \rangle = f\left(\frac{1}{J}\right)$ .

4.2.5. Проанализируйте зависимость момента инерции маятника от его массы и от распределения массы относительно оси вращения.

**5. Сделайте вывод** о зависимости динамических характеристик от кинематических и о выполнимости основного уравнения динамики вращательного движения.

### **6. Вопросы для самоподготовки**

6.1. Какое движение называют поступательным? Какое движение называют вращательным?

6.2. Кинематические и динамические характеристики поступательно движущегося тела.

6.3. Законы динамики поступательного движения.

6.4. Кинематические характеристики вращательного движения твёрдого тела.

6.5. Связь между угловыми и линейными характеристиками.

6.6. Момент инерции материальной точки и твёрдого тела относительно неподвижной оси. От чего зависит момент инерции?

6.7. Физический смысл момента инерции тела. Какова размерность момента инерции?

6.8. Как рассчитывается момент инерции твёрдого тела правильной геометрической формы (стержня, диска, обруча) относительно неподвижной оси вращения, проходящей через его центр масс?

6.9. Момент инерции твёрдого тела относительно произвольной оси вращения. Теорема Штейнера.

6.10. Понятие вектора момента силы относительно точки. Момент силы относительно неподвижной оси вращения.

6.11. Понятие вектора момента импульса относительно неподвижной оси вращения.

6.12. Основной закон динамики вращательного движения и его применение в работе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

**Определение параметров движения твёрдых тел  
на основе законов сохранения**

**1. Цель работы:** а) определение основных кинематических и динамических характеристик и проверка законов вращательного движения; б) определение момента инерции тела с применением законов сохранения момента импульса и механической энергии.

**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 твёрдого тела; г) уметь пользоваться измерительными приборами.

**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 над одним из концов стержня на высоте  $h$ . 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 расстояние  $r$  (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 расчёта

Теоретическое значение момента инерции однородного прямоугольного стержня, вращающегося относительно оси  $OZ$ , проходящей через его центр масс перпендикулярно двум боковым граням, можно рассчитать по формуле

$$J_T = \frac{1}{12} m_{\text{ст}} (\ell_1^2 + \ell_2^2), \quad (1)$$

где  $m_{\text{ст}}$  – масса стержня;  $\ell_1$  – длина стержня;  $\ell_2$  – ширина стержня (рис. 1, а).

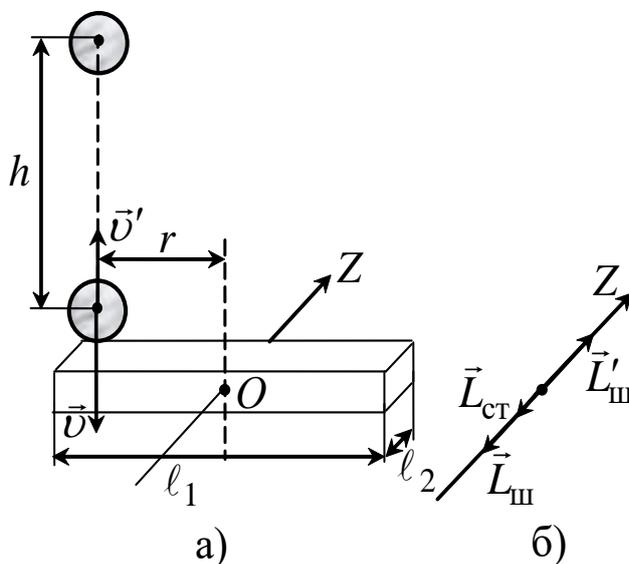


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В данной работе для экспериментального определения момента инерции  $J_{\text{э}}$  стержня используется взаимодействие горизонтально расположенного стержня с падающим с высоты  $h$  металлическим шариком массой  $m$  (рис. 1). Из закона сохранения механической энергии определяем скорость  $v$  шарика перед ударом о стержень:

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

После удара, который рассматривается как абсолютно упругий, шарик отскакивает от стержня вертикально вверх со скоростью  $\vec{v}'$ , а стержень начинает вращаться с начальной угловой скоростью  $\vec{\omega}_0$ .

Начальную угловую скорость  $\omega_0$  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  $\varphi = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{к}}}{2} t$ . Поскольку конечная скорость вращения стержня равна нулю, получаем  $\varphi = \frac{\omega_0}{2} t$ . Отсюда

получаем  $\omega_0 = \frac{2\varphi}{t}$ .

$$\omega_0 = \frac{4\pi N}{t}. \quad (3)$$

Полагая, что система тел «шарик-стержень» квазизамкнута, для неё выполняется закон сохранения момента импульса

$$\vec{L}_{\text{ш}} = \vec{L}_{\text{ст}} + \vec{L}'_{\text{ш}}. \quad (4)$$

Здесь момент импульса шарика перед ударом

$$L_{\text{ш}} = rmv, \quad (5)$$

момент импульса стержня сразу после удара

$$L_{\text{ст}} = J\omega_0, \quad (6)$$

где  $J$  – момент инерции стержня относительно оси вращения  $OZ$ .

Момент импульса шарика сразу после удара

$$L'_{\text{ш}} = r m v', \quad (7)$$

где  $r$  – расстояние от оси вращения стержня до точки соударения шарика со стержнем;  $v'$  – скорость шарика после упругого взаимодействия со стержнем.

В проекции на ось  $OZ$  (рис. 1, б)

$$rmv = J\omega_0 - rmv'. \quad (8)$$

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

$$W_{\text{к}}^{\text{ш}} = W_{\text{к}}^{\text{ст}} + (W_{\text{к}}^{\text{ш}})' \quad \text{или} \\ \frac{mv^2}{2} = \frac{J\omega_0^2}{2} + \frac{mv'^2}{2}. \quad (9)$$

Здесь:

– кинетическая энергия шарика перед ударом

$$W_{\text{к}}^{\text{ш}} = \frac{mv^2}{2}; \quad (10)$$

– кинетическая энергия стержня сразу после удара

$$W_{\text{к}}^{\text{ст}} = \frac{J\omega_0^2}{2}; \quad (11)$$

– кинетическая энергия шарика сразу после удара

$$(W_{\text{к}}^{\text{ш}})' = \frac{mv'^2}{2}. \quad (12)$$

Решая совместно уравнения (8) и (9), получим выражение для экспериментального значения момента инерции стержня:

$$J_{\text{э}} = \frac{mr}{\omega_0} (2v - \omega_0 r). \quad (13)$$

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

$$J\epsilon = \vec{M}_{\text{тр}},$$

где  $\epsilon$  – угловое ускорение стержня

$$\epsilon = \frac{\omega_0}{t}. \quad (14)$$

Тогда момент сил трения в оси равен

$$M_{\text{тр}} = \frac{J_{\text{э}}\omega_0}{t}. \quad (15)$$

Зная момент сил трения, можно определить работу момента этих сил

$$A_{\text{тр}} = \int_0^{2\pi N} M_{\text{тр}} d\varphi = M_{\text{тр}} 2\pi N. \quad (16)$$

## 4. Экспериментальная часть

### 4.1. Определение кинематических характеристик шарика и стержня

4.1.1. 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. Не забудьте убрать пластилин после измерения  $r$ .

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

4.1.3. Измерьте время  $t$  вращения и число оборотов  $N$  стержня после удара до полной остановки. Опыт повторите не менее 5 раз.

4.1.4. Найдите средние значения времени  $\langle t \rangle$  и числа оборотов  $\langle N \rangle$  и по формуле (3) рассчитайте начальную угловую скорость  $\omega_0$  вращения стержня, а по формуле (14) угловое ускорение  $\varepsilon$ . Результаты измерений и расчётов занесите в табл. 1.

Таблица 1

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

$$h = \dots \text{м}; \quad r = \dots \text{м}$$

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

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

4.2.1. По формуле (13) рассчитайте экспериментальное значение момента инерции  $J_э$  стержня относительно неподвижной оси, проходящей через его центр масс.

Значение массы шарика  $m$  приведено в паспорте установки.

4.2.2. Теоретическое значение момента инерции стержня  $J_т$  рассчитайте по формуле (1). Значение массы стержня  $m_{ст}$  приведено в паспорте установки. Линейные размеры стержня  $l_1$  и  $l_2$  измерьте с помощью линейки или штангенциркуля.

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

$$\varepsilon = \frac{|J_т - J_э|}{J_т} \cdot 100 \% .$$

4.2.4. Момент импульса шарика  $L_{ш}$  перед ударом относительно оси вращения рассчитайте по формуле (5), а момент импульса стержня  $L_{ст}$  относительно неподвижной оси сразу после удара – по формуле (6).

4.2.5. Определите кинетическую энергию  $W_k^{ш}$  шарика перед ударом (10) и начальную кинетическую энергию  $W_k^{ст}$  стержня после удара (11).

4.2.6. Определите момент сил трения в оси вращения по формуле (15). 4.2.7. Рассчитайте работу сил трения в оси по формуле (16).

4.2.8. Результаты расчётов динамических характеристик шарика и стержня занесите в табл. 2.

Таблица 2

Расчёт динамических характеристик шарика и стержня

$$m = \dots \text{кг}; m_{ст} = \dots \text{кг}; \ell_1 = \dots \text{м}; \ell_2 = \dots \text{м}$$

$J_э$	$J_T$	$\varepsilon$	$L_{ш}$	$L_{ст}$	$W_1^{ш}$	$W_1^{ст}$	$M_{тр}$	$A_{тр}$
кг · м <sup>2</sup>	кг · м <sup>2</sup>	%	кг · м <sup>2</sup> /с	кг · м <sup>2</sup> /с	Дж	Дж	Н · м	Дж

**5. Сделайте вывод** о возможности применения законов сохранения момента импульса и механической энергии системы «шарик – стержень» для определения момента инерции стержня.

### 6. Вопросы для самоподготовки

6.1. Момент инерции материальной точки и твёрдого тела относительно неподвижной оси. От чего зависит момент инерции?

6.2. Физический смысл момента инерции тела. Какова размерность момента инерции?

6.3. Как рассчитывается момент инерции твёрдого тела правильной геометрической формы (стержня, диска, обруча) от-

носителем неподвижной оси вращения, проходящей через его центр масс?

6.4. Момент инерции твёрдого тела относительно произвольной оси вращения. Теорема Штейнера.

6.5. Понятие вектора момента силы относительно неподвижной оси вращения.

6.6. Основной закон динамики вращательного движения и его применение в работе

6.7. Момент импульса материальной точки, твёрдого тела.

6.8. Закон сохранения момента импульса.

6.9. Закон сохранения механической энергии. Приведите обоснование возможности применения закона сохранения механической энергии для системы «шарик – стержень».

6.10. Как определить кинетическую энергию вращающегося твёрдого тела?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Определение кинематических и динамических характеристик маятника Максвелла

**1. Цель работы:** применение законов кинематики и динамики поступательного и вращательного движения для определения кинематических и динамических характеристик маятника Максвелла.

**2. Подготовка к работе:** прочитать в учебниках [1] §§ 4.1–4.3, 5.3, [2] §§ 4, 16–19. Для выполнения лабораторной работы студент должен знать: а) кинематические характеристики поступательного и вращательного движения твёрдого тела; б) основные уравнения динамики поступательного и вращательного движения; в) понятия момента силы и момента инерции тела; г) закон сохранения механической энергии.

### 3. Выполнение работы

#### 3.1. Описание установки

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

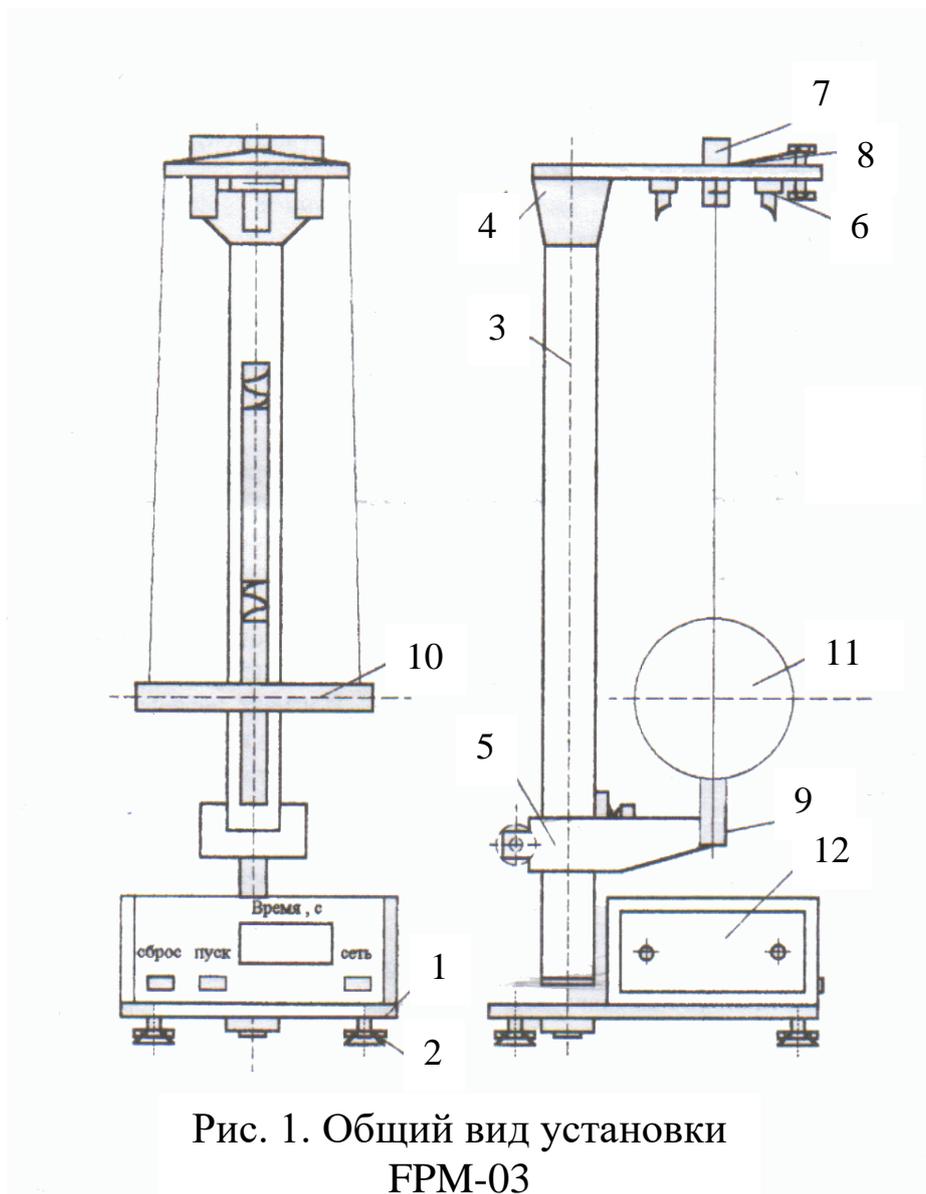
Основание 1 оснащено регулируемыми ножками 2, позволяющими произвести выравнивание прибора. В основании закреплена колонка 3, на которой крепятся два кронштейна: неподвижный верхний 4 и подвижный нижний 5. На верхнем кронштейне находятся электромагнит 6, фотоэлектрический датчик 7 и устройство (вороток)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

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

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

Миллисекундомер 12 с цифровой индикацией времени жестко закреплен на основании 1. При нажатии клавиши «Сеть» загораются лампочки фотоэлектрических датчиков и высвечиваются нули на индикаторе. Клавиша «Сброс» вызывает сброс всех схем миллисекундомера и подготовку его к измерению.

При нажатии клавиши «Пуск» электромагнит обесточивается и маятник, поднятый в верхнее положение, начинает раскручиваться. Миллисекундомер производит отсчёт времени. В момент пересечения маятником оптической оси нижнего фотодатчика счёт времени прекращается.



### 3.2. Методика измерений и расчёта

Маятник Максвелла участвует в 2-х движениях: поступательном движении центра масс и вращательном движении относительно оси, проходящей через центр масс.

#### 3.2.1. Поступательное движение центра масс маятника Максвелла

Поступательное движение центра масс маятника Максвелла происходит под действием силы тяжести  $m\vec{g}$  и силы натяжения нити  $\vec{T}$ .

Согласно второму закону Ньютона

$$m\vec{a} = m\vec{g} + 2\vec{T}.$$

В проекциях на ось  $y$

$$ma = mg - 2T.$$

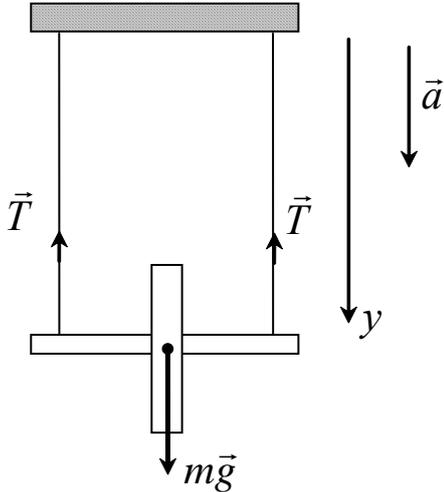


Рис. 2. Схема сил, действующих на маятник Максвелла

Центр масс маятника, проходя расстояние  $h$  за время  $t$ , приобретает ускорение

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

и максимальную скорость в крайнем нижнем положении

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

Динамические характеристики поступательного движения центра масс маятника рассчитываются по формулам

а) сила натяжения нити

$$T = \frac{m}{2}(g - a); \quad (3)$$

б) потенциальная энергия маятника на высоте  $h$

$$E_{\text{п}} = mgh; \quad (4)$$

в) кинетическая энергия маятника в нижней точке

$$E_{\text{к}}^{\text{пост}} = \frac{mv^2}{2}. \quad (5)$$

### 3.2.2. Вращательное движение маятника Максвелла относительно оси, проходящей через центр масс

Поскольку момент инерции величина аддитивная, то теоретическое значение момента инерции маятника Максвелла  $J_{\text{Т}}$  относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости диска, складывается из моментов инерции диска  $J_{\text{Д}}$ , оси маятника  $J_{\text{О}}$  и сменного кольца  $J_{\text{К}}$

$$J_T = J_D + J_O + J_K. \quad (6)$$

Момент инерции каждого элемента маятника можно вычислить по формулам

$$J_D = \frac{m_D}{8} (D_D^2 + D_O^2), \quad (7)$$

$$J_O = \frac{m_O D_O^2}{2}, \quad (8)$$

$$J_K = \frac{m_K}{8} (D_K^2 + D_D^2), \quad (9)$$

где  $m_O, D_O, m_K, D_K, m_D, D_D$  – масса и диаметр оси, изготовленной в виде однородного цилиндра, масса и диаметр сменного кольца, масса и диаметр диска, соответственно.

Для определения экспериментального значения момента инерции маятника Максвелла воспользуемся законом сохранения механической энергии, согласно которому механическая энергия замкнутой консервативной системы остаётся постоянной.

Проведём нулевой уровень потенциальной энергии через нижнее положение маятника, соответствующее нулю шкалы на вертикальной стойке. При поднятии маятника массой  $m$  в верхнее положение на высоту  $h$ , он будет обладать потенциальной энергией  $E_{\text{п}}$ . В этом положении маятник фиксируется с помощью электромагнита.

При отключении электромагнита и запуске миллисекундомера (нажата клавиша «Пуск») маятник начинает раскручиваться. Его потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию поступательного движения центра масс  $E_{\text{к}}^{\text{пост}}$  и кинетическую энергию вращательного движения относительно оси, проходящей через центр масс

$$E_{\text{к}}^{\text{вращ}} = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (10)$$

где  $J_{\text{э}}$  – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости диска;  $\omega$  – угловая скорость вращательного движения маятника в нижней точке.

На основании закона сохранения механической энергии имеем:

$$E_{\text{П}} = E_{\text{К}}^{\text{пост}} + E_{\text{К}}^{\text{вращ}} \text{ или}$$

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}. \quad (11)$$

Отсюда

$$J_{\text{э}} = \frac{mv^2}{\omega^2} \left( \frac{2gh}{v^2} - 1 \right) = \frac{m}{\omega^2} (2gh - v^2). \quad (12)$$

Угловая скорость  $\omega$  связана с линейной скоростью  $v$  соотношением

$$v = \omega R.$$

Радиус  $R$  оси маятника вместе с намотанной на нее нитью бифилярной подвески выразим через ее диаметр  $D$ . Запишем выражение для конечной угловой скорости с учетом (2)

$$\omega = \frac{2v}{D} = \frac{4h}{Dt}, \quad (13)$$

здесь  $D$  – диаметр оси маятника вместе с намотанной на неё нитью бифилярной подвески

$$D = D_{\text{О}} + 2D_{\text{Н}}, \quad (14)$$

где  $D_{\text{О}}$  – диаметр оси маятника, 10 мм;  $D_{\text{Н}}$  – диаметр нити подвеса, 0,5 мм.

Масса маятника  $m$  определяется по формуле

$$m = m_{\text{О}} + m_{\text{Д}} + m_{\text{К}}. \quad (15)$$

### 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. Вращая маятник, приведите его в крайнее верхнее положение (исходное положение), которое зафиксировается электромагнитом. Следите, чтобы нить бифилярного подвеса наматывалась на ось маятника виток к витку.

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

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

3.3.5. Для изменения момента инерции маятника на его диск насадите поочередно три сменных кольца.

### *3.4. Определение кинематических и динамических характеристик поступательного движения центра масс маятника Максвелла*

3.4.1. По формуле (15) рассчитайте массу маятника, используя паспортные данные. Результаты расчёта занесите в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчёта массы маятника

$m_D$	$m_O$	$m_K$			$m$		
		1	2	3	1	2	3
кг	кг	кг	кг	кг	кг	кг	кг

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

3.4.3. Определите время  $t$  движения маятника Максвелла. Опыт повторите 3 раза с каждым из колец.

3.4.4. Найдите среднее значение времени  $\langle t \rangle$  и вычислите для каждой серии опытов кинематические характеристики по формулам (1) и (2).

3.4.5. По формулам (3)–(5) рассчитайте динамические характеристики поступательного движения центра масс маятника.

3.4.6. Из паспорта к установке в табл. 3 перенесите значения диаметров диска, оси маятника, нити, колец. Рассчитайте  $D$  по формуле (14).

3.4.7. По формуле (13) рассчитайте угловую скорость  $\omega$  вращательного движения маятника в каждой серии опытов.

3.4.8. Результаты измерений и расчётов занесите в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений времени и расчёта кинематических и динамических характеристик поступательного и вращательного движения  
 $h = \dots \text{м}$

№ П/П	$m$	$t$	$\langle t \rangle$	$\langle a \rangle$	$\langle v \rangle$	$\omega$	$T$	$E_{\text{П}}$	$E_{\text{К}}^{\text{пост}}$	$E_{\text{К}}^{\text{вращ}}$
	кг	с	с	м/с <sup>2</sup>	м/с	с <sup>-1</sup>	Н	Дж	Дж	Дж
1										
2										
3										
1										
2										
3										
1										
2										
3										

### 3.5. Расчёт момента инерции маятника Максвелла

3.5.1. Используя формулу (12), определите экспериментальное значение момента инерции  $J_{\text{э}}$  маятника Максвелла с каждым из сменных колец.

3.5.2. По формуле (6) рассчитайте теоретическое значение момента инерции  $J_{\text{т}}$ , учитывая, что момент инерции диска, оси в виде однородного цилиндра и сменного кольца, относительно оси, проходящей через их центр масс, вычисляются по формулам (7)–(9) соответственно.

Таблица 3

Значения диаметров элементов маятника

$D_{\text{Д}}$	$D_{\text{О}}$	$D_{\text{Н}}$	$D$	$D_{\text{К}}$
м	м	м	м	м

Таблица 4

## Результаты расчёта момента инерции маятника

№ п/п	$m$	$J_{\text{э}}$	$J_{\text{Д}}$	$J_{\text{О}}$	$J_{\text{К}}$	$J_{\text{Т}}$	$\varepsilon$
	кг	кг×м <sup>2</sup>	%				
1							
2							
3							
1							
2							
3							
1							
2							
3							

3.5.3. По формуле  $\varepsilon = \frac{|J_{\text{Т}} - J_{\text{э}}|}{J_{\text{Т}}} \cdot 100$  % рассчитайте относительную погрешность.

3.5.4. Результаты расчётов занесите в табл. 4.

3.5.5. По формуле (10) рассчитайте кинетическую энергию вращательного движения маятника в крайней нижней точке. Занесите в табл. 2.

3.5.6. Проверьте выполнение закона сохранения механической энергии (11).

**4. Сделайте вывод** о зависимости момента инерции маятника от его массы и от распределения массы относительно оси вращения, а также 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? Какое движение называют вращательным?

5.2. Кинематические и динамические характеристики поступательно движущегося тела.

5.3. Законы динамики поступательного движения.

5.4. Кинематические характеристики вращательного движения твёрдого тела.

5.5. Связь между угловыми и линейными характеристиками.

5.6. Момент инерции материальной точки и твёрдого тела относительно неподвижной оси. От чего зависит момент инерции?

5.7. Физический смысл момента инерции тела. Какова размерность момента инерции?

5.8. Как рассчитывается момент инерции твёрдого тела правильной геометрической формы (стержня, диска, обруча) относительно неподвижной оси вращения, проходящей через его центр масс?

5.9. Момент инерции твёрдого тела относительно произвольной оси вращения. Теорема Штейнера.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова, Т. И. Курс физики: учеб. пособие для инж. - тех. специальностей вузов / Т. И. Трофимова. – 10-е изд., испр. – Москва: Высшая школа, 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 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)

Составители

Кошкина Галина Кронидовна  
Цвеклинская Ирина Валентиновна

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ.  
Кинематика и динамика вращательного  
движения**

Лабораторный практикум К-304.2  
по дисциплине «Физика»  
для технических специальностей и направлений

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 23.07.2018. Формат 60×84/16.  
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 1,8  
Тираж 50 экз. Заказ  
КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.  
Полиграфический цех КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.