

А.Д. Истомин,
Н.Ю. Истомина



ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА НА КРЕСТООБРАЗНОМ МАЯТНИКЕ ОБЕРБЕКА

Северск, 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Северский технологический институт –
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СТИ НИЯУ МИФИ)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой физики
профессор
_____ М.Д. Носков
« ____ » _____ 2024 г.

А.Д. Истомин, Н.Ю. Истомина

**ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬ-
НОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА НА КРЕСТООБРАЗНОМ
МАЯТНИКЕ ОБЕРБЕКА**

Методические указания

по курсу «Физика»
для студентов, обучающихся по направлению
подготовки 13.03.02, 14.03.02, 14.05.04, 15.03.04, 18.05.02.

Северск 2024

УДК 536 (076)
ББК 22.317я73
И 896

Авторы:

Истомин А. Д. – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» СТИ НИЯУ МИФИ;

Истомина Н. Ю. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» СТИ НИЯУ МИФИ.

Рецензент:

Носков М. Д. – доктор физико-математических наук, доцент СТИ НИЯУ МИФИ.

Истомин А.Д.

И 896 Проверка основного закона динамики вращательного движения твердого тела на крестообразном маятнике Обербека: методические указания/ А.Д. Истомин, Н.Ю. Истомина; Северский технологический институт НИЯУ МИФИ – Северск: Издательство СТИ НИЯУ МИФИ, 2024. – 14 с. – Текст: электронный.

В методических указаниях к лабораторной работе рассматриваются основные положения теории динамики вращательного движения абсолютно твердого тела. Рассмотрены связи между кинематическими характеристиками поступательного и вращательного движения. Представлены понятия центра масс тела, момента инерции тела, момента силы. Описаны установка и методика экспериментальной проверки основного уравнения динамики вращательного движения.

Методические указания написаны в соответствии с программой и планом физического лабораторного практикума и могут быть использованы в курсе «Физика» преподавателями кафедры физики и студентами следующих направлений подготовки: 13.03.02, 14.03.02, 14.05.04, 15.03.04, 18.05.02.

Руководство рассмотрено и одобрено на заседании методического семинара кафедры физики (протокол № 3 от «2» апреля 2024 г.).

Издается в соответствии с планом выпуска учебно-методической литературы на 2024г., утвержденным Ученым Советом СТИ НИЯУ МИФИ.

Рег. № 4/24 от 02.04.2024 г.

Редактор М. В. Ворожейкина

© Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Северский технологический институт- филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СТИ НИЯУ МИФИ), 2024

1 Цель работы

Целью работы является экспериментальная проверка основного закона динамики вращательного движения с помощью крестообразного маятника Обербека.

2 Теоретическое введение

Криволинейное движение материальной точки можно разложить на два основных вида движения - поступательное и вращательное. Поступательное движение материальной точки характеризуется длиной пройденного пути S ; линейной скоростью $\vec{v}$; тангенциальным ускорением $\vec{a}_\tau$; нормальным ускорением $\vec{a}_n$. На рисунке 1 показаны кинематические характеристики поступательного движения для точек 1 и 2 траектории AB . Пройденный путь S отсчитывается вдоль траектории. Вектор скорости $\vec{v}$ направлен по касательной к траектории. Тангенциальное ускорение $\vec{a}_\tau$ направлено по касательной к вектору скорости $\vec{v}$. Нормальное или центростремительное ускорение $\vec{a}_n$ направлено к мгновенному центру кривизны траектории.

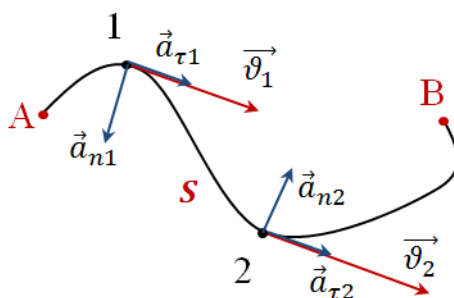


Рисунок 1 – Кинематические характеристики поступательного движения для точек 1 и 2 траектории AB

Вращательное движение по окружности радиусом R характеризуется угловым перемещением тела φ (измеряется в радианах $[\varphi] = \text{рад}$), его угловой скоростью $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ (размерность - $[\omega] = \text{рад/с}$) и угловым ускорением $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ (размерность - $[\varepsilon] = \text{рад/с}^2$). Линейные и угловые кинематические величины, характеризующие движение материальной точки, связаны следующими формулами, записанными в скалярной форме:

$$S = R\varphi, v = \omega R, a_\tau = \varepsilon R, a_n = \omega^2 R \quad (1)$$

Любое твёрдое тело массой m можно представить в виде системы материальных точек. Разобьём твердое тело на N элементарных (малых) фрагментов массами Δm_i (рисунок 2), так что масса твердого тела будет равна

$$m = \sum_i \Delta m_i.$$

Центром масс тела называется точка C , положение которой задаётся радиус-вектором $\vec{r}_C$, определяемым по формуле

$$\vec{r}_C = \frac{\Delta m_1 \vec{r}_1 + \Delta m_2 \vec{r}_2 + \dots + \Delta m_N \vec{r}_N}{\Delta m_1 + \Delta m_2 + \dots + \Delta m_N} = \frac{\sum_i \Delta m_i \vec{r}_i}{\sum_i \Delta m_i} = \frac{\sum_i \Delta m_i \vec{r}_i}{m},$$

где $\vec{r}_i$ – радиус-вектор, определяющий положение каждого фрагмента Δm_i относительно точки C .

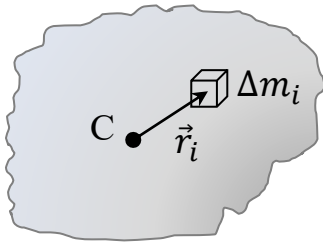


Рисунок 2 – К определению центра масс твердого тела

Если твердое тело (система материальных точек) центральносимметрично, то его центр масс совпадает с центром симметрии. Если же тело осесимметрично, то центр масс лежит на оси симметрии.

Поступательным называется такое движение твердого тела, при котором любая прямая, проведенная в этом теле, перемещается, оставаясь параллельной самой себе [1]. При поступательном дви-

жении все элементарные фрагменты Δm_i твердого тела получают за один и тот же промежуток времени равные по величине и одинаковые по направлению перемещения, вследствие чего скорости и ускорения всех элементарных фрагментов, в каждый момент времени оказываются равными. Следовательно, поступательное движение твердого тела полностью определяется движением центра масс тела C .

Теорема о движении центра масс: центр масс механической системы движется как материальная точка с массой m , равной массе системы, к которой приложена сила, равная равнодействующей внешних сил, приложенных к системе:

$$m \vec{a}_C = \vec{F}_R,$$

где $\vec{a}_C$ – ускорение центра масс C системы; $\vec{F}_R$ – равнодействующая внешних сил, приложенных к системе.

Следовательно, решив задачу о движении центра масс тела, как материальной точки массой m , равной массе всего тела, и на которую действуют все внешние силы, приложенные к телу, можно полностью охарактеризовать поступательное движение всего тела.

Вращательным называется такое движение твердого тела, при котором какие-нибудь две точки, принадлежащие телу (или находящиеся вне тела, но неизменно связанные с ним), остаются во все время движения неподвижными. Прямая, проходящая при этом через две неподвижные точки, называется **осью вращения**.

Так как расстояния между точками твердого тела должны оставаться неизменными, то очевидно, что при вращательном движении все точки, принадлежащие оси вращения, будут неподвижны, а все остальные i – ые точки тела будут описывать окружности радиусом R_i , плоскости которых перпендикулярны к оси вращения, а центры O_i лежат на этой оси.

Вращение тела вокруг оси описывается основным уравнением динамики вращательного движения [1, 2]

$$M = J \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где M – момент сил, действующих на тело, равный алгебраической сумме моментов сил, действующих на тело; J – момент инерции тела; ε – угловое ускорение.

Существуют понятия вращающих моментов силы относительно точки и относительно оси [1, 2]. В связи с тем, что в данной лабораторной работе крестообразный маятник вращается относительно оси (п. 3), рассмотрим понятие момент силы относительно оси. На рисунке 3 показано трехмерное твердое тело; плоскость xy , перпендикулярная оси Oz ; вектора и линии в трехмерном пространстве. К точке N приложена сила $\vec{F}$, под действием которой тело вращается относительно оси Oz . Вектор момента $\vec{M}$ действующей на тело внешней силы $\vec{F}$ относительно оси вращения Oz всегда направлен вдоль этой оси (рисунок 3) и определяется по формуле:

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]_z \cdot \vec{k}, \quad (3)$$

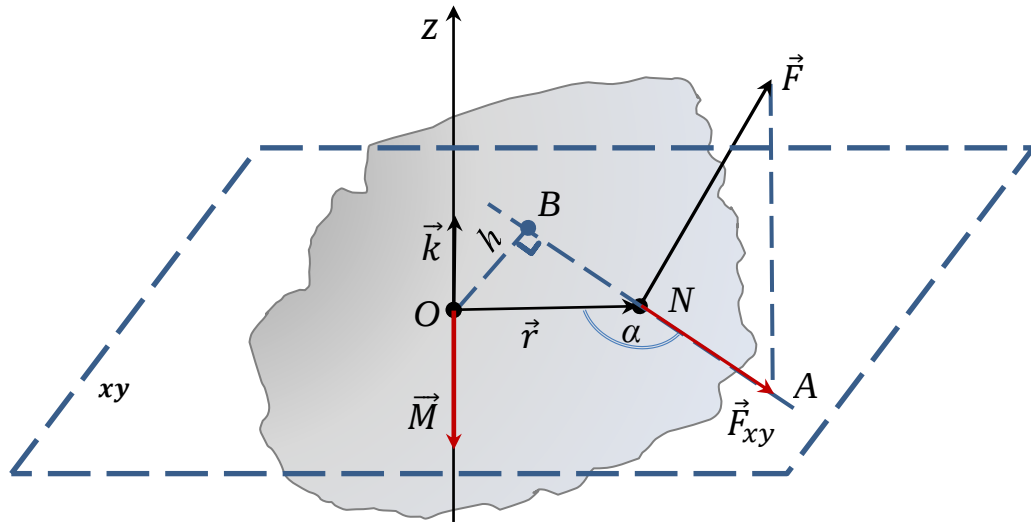
где $\vec{r}$ – радиус-вектор, определяющий положение точки N – точки приложения силы $\vec{F}$; $[\vec{r} \times \vec{F}]_z$ – проекция векторного произведения на ось Oz ; $\vec{k}$ – орт оси Oz .

В скалярной форме формула (3) приобретает вид:

$$M = |\vec{r}| \cdot |\vec{F}| \cdot \sin(\widehat{\vec{r}; \vec{F}_{xy}}), \quad (4)$$

где $\alpha = (\widehat{\vec{r}; \vec{F}_{xy}})$ – угол между векторами $\vec{r}$ и проекцией силы $\vec{F}_{xy}$ на плоскость xy ; $h = |\vec{r}| \cdot \sin \alpha$ – **плечо силы $\vec{F}$** – кратчайшее расстояние между линией действия силы и осью вращения.

Если линия действия силы $\vec{F}$ лежит в плоскости xy , то есть $\vec{F} = \vec{F}_{xy}$, получим соотношение $M = F \cdot h$.



N – точка трехмерного твердого тела – точка приложения силы $\vec{F}$;

Oz – ось, относительно которой рассчитывается момент силы $\vec{M}$;

$\vec{k}$ – орт оси Oz ;

$\vec{r}$ – радиус-вектор, определяющий положение точки N относительно оси Oz ;

xy — плоскость, проведенная через точку N перпендикулярно оси Oz ;

$\vec{F}_{xy}$ – проекция вектора $\vec{F}$ на плоскость xy ;

AB – линия действия $\vec{F}_{xy}$;

$h = OB$ – отрезок, равный плечу силы $\vec{F}$

Рисунок 3 – К определению момента силы относительно оси Oz

Моментом инерции тела J относительно некоторой оси называется величина, зависящая от суммарной массы тела и от распределения массы по отношению к оси вращения. Момент инерции – величина аддитивная: момент инерции тела равен сумме моментов инерции составляющих его частей. Момент инерции материальной точки относительно оси z равен произведению ее массы m на квадрат расстояния r до оси вращения:

$$J = m \cdot r^2. \quad (5)$$

Пусть твёрдое тело вращается вокруг неподвижной оси z (с угловой скоростью ω , угловым ускорением ε). Разобьём тело на N элементарных (малых) фрагментов массами Δm_i (рисунок 4). Положение каждого фрагмента относительно оси вращения определяется радиус–вектором $\vec{r}_i$. Момент инерции J_i каждого из фрагментов Δm_i относительно оси z можно найти по формуле (5). В силу аддитивности момента инерции, момент

инерции твердого тела будет равен сумме моментов инерции каждого из фрагментов:

$$J = \sum_i^N \Delta m_i r_i^2. \quad (6)$$

Или, переходя в формуле (6) от малых конечных элементов тела Δm_i к бесконечно малым элементам dm , получим формулу:

$$J = \int r^2 dm. \quad (7)$$

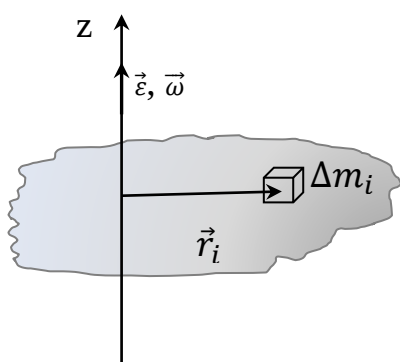
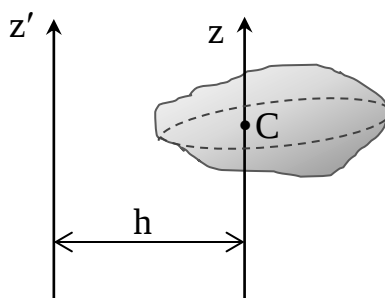


Рисунок 4 – К определению момента инерции твердого тела

Моменты инерции однородных тел, симметричных относительно оси вращения проходящей через центр масс, рассчитываются с помощью выражения (7). В общем случае вычисление момента инерции тела произвольной формы относительно произвольной оси вращения с помощью формулы (7) представляет собой достаточно сложную задачу. Однако, в некоторых случаях, определение момента инерции значительно упрощается, если воспользоваться **теоремой Штейнера** [1, 2]: момент инерции J относи-

тельно произвольной оси равен сумме момента инерции J_C относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр масс тела, и произведения массы тела m на квадрат расстояния h между осями (рисунок 5):

$$J = J_C + m \cdot h^2. \quad (8)$$



C – центр масс тела; z' – неподвижная ось вращения; z – ось вращения, проходящая через точку C ; h – расстояние между осями z' и z

Рисунок 5 – Расположение осей в теореме Штейнера

3 Методика проверки основного уравнения динамики вращательного движения с помощью крестообразного маятника Обербека

Крестообразный маятник Обербека [3] представляет собой маховик крестообразной формы, состоящий из четырех стержней, укрепленных на втулке под прямым углом друг к другу (рисунок 6). Вдоль стержней могут перемещаться грузики массой m . На ось втулки насажен блок радиусом r_0 . Вращение маятника происходит вокруг горизонтальной оси, проходящей

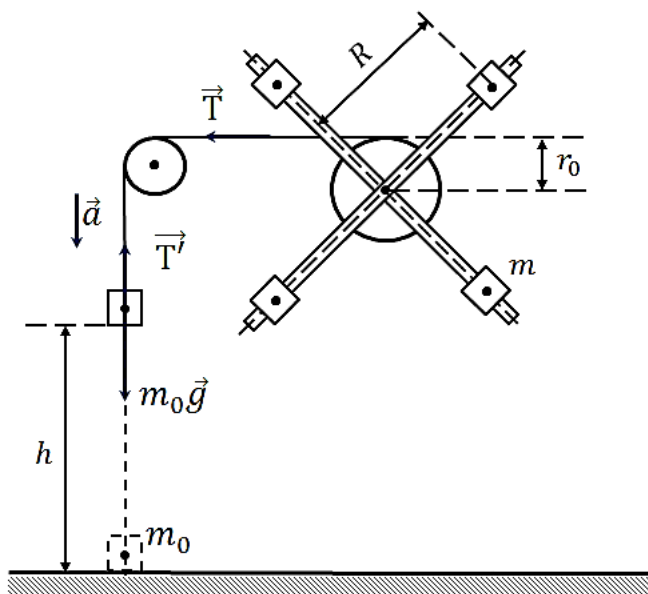


Рисунок 6 – Маятник Обербека

через точку O и перпендикулярной плоскости рисунка. Момент инерции системы относительно оси вращения можно изменять, перемещая грузики m вдоль стержней. Вращающий момент M создается силой натяжения $\vec{T}$ невесомой нерастяжимой нити, намотанной на блок установки, к свободному концу которой подвешивается груз массой m_0 . Блок, изготовлен из алюминия и вращается на бронзовом подшипнике. Все это позволяет в эксперименте пренебречь моментом инерции блока и моментом сил трения, действующих на него.

Рассмотрим движение груза массой m_0 (см. рисунок 6). На него действуют сила тяжести $m_0\vec{g}$ и сила натяжения нити $\vec{T}$. Их равнодействующая сообщает грузу ускорение $\vec{a}$, направленное вниз. Запишем уравнение движения этого груза, спроектировав все векторы на ось, совпадающую с направлением вектора ускорения $\vec{a}$:

$$m_0g - T = m_0a$$

Отсюда сила натяжения нити равна

$$T = m_0 g - m_0 a. \quad (9)$$

Рассмотрим движение блока. Под действием силы натяжения нити $\vec{T}' = -\vec{T}$ нить разматывается и приводит блок во вращательное движение. Модули сил $\vec{T}'$ и $\vec{T}$ равны по третьему закону Ньютона, следовательно, учитывая формулу (9):

$$T' = T = m_0 g - m_0 a. \quad (10)$$

Согласно определению момента силы относительно оси в (4), вращающий момент силы $\vec{T}'$, действующей на блок, равен

$$M = T' \cdot r_0 = (m_0 g - m_0 a) \cdot r_0. \quad (11)$$

С другой стороны, согласно основному уравнению динамики вращательного движения, вращающий момент равен произведению момента инерции J_0 крестообразного маятника и углового ускорения ε . Тогда выражение (11) можно переписать следующим образом:

$$J_0 \varepsilon = m_0 r_0 (g - a). \quad (12)$$

Вектор ускорения груза $\vec{a}$, направленный по касательной к блоку, является тангенциальным. Применяя формулу, связывающую тангенциальное и угловое ускорения (смотрите формулы (1))

$$\varepsilon = \frac{a}{r_0}, \quad (13)$$

уравнение (12) можно переписать в виде:

$$J_0 \frac{a}{r_0} = m_0 r_0 (g - a). \quad (14)$$

Выполнив несложные математические преобразования, из формулы (14) можно выразить тангенциальное ускорение:

$$a = \frac{m_0 g r_0^2}{m_0 r_0^2 + J_0} = \text{const}. \quad (15)$$

Все параметры выражения (15) в условиях эксперимента являются постоянными, поэтому, движение груза массой m_0 является равноускоренным. Тогда из уравнения равноускоренного движения материальной точки [1, 2], тангенциальное ускорение груза можно найти по формуле

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (16)$$

где h - высота падения груза; t - время падения.

Проверка основного уравнения динамики вращательного движения (2) с помощью крестообразного маятника Обербека проводится в ходе следующих экспериментов.

В первом эксперименте, основной закон динамики вращательного движения экспериментально подтверждается проверкой соотношения:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{M_1}{M_2} \quad \text{при } J_0 = \text{const}. \quad (17)$$

Изменение значения вращающего момента M_i (где $i = 1; 2$) добиваются с помощью увеличения массы падающего груза m_0 (см. формулы (9 - 12)).

Во втором случае, основной закон динамики вращательного движения (2) экспериментально подтверждается проверкой соотношения:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{J_2}{J_1} \quad \text{при } M = \text{const}. \quad (18)$$

При этом, значение момента инерции крестообразного маятника J_i (где $i = 1; 2$) изменяют, меняя положение цилиндрических грузиков массой m на стержнях.

4 Безопасность труда

При выполнении работ **необходимо**:

- 1) надежно закреплять грузики на стержнях маятника во избежание их срыва при быстром вращении;
- 2) убрать все предметы с платформы крестообразного маятника. (стержни при вращении могут сбить предметы с платформы маятника и причинить увечье или повредить находящиеся поблизости приборы);
- 3) находиться на безопасном расстоянии от вращающегося маховика.

5 Приборы и принадлежности

- 1) Крестообразный маятник,
- 2) два грузика массой m_0 для изменения силы натяжения нити,
- 3) четыре грузика массой m для изменения момента инерции маховика,
- 4) секундомер,
- 5) штангенциркуль,
- 6) линейка.

6 Порядок работы

6.1 Проверка зависимости углового ускорения от величины вращающего момента при неизменном моменте инерции

6.1.1 Измерить штангенциркулем диаметр шкива, найти его радиус r_0 и занести в таблицу 1.

6.1.2 Значение массы груза m_0 записать в таблицу 1. Подвесить груз массой m_0 к концу нити.

6.1.3 Слегка натягивая одной рукой нить, а другой рукой поворачивая крестовину, намотать нить на шкив. Нужно следить за тем, чтобы нить накручивалась в горизонтальном положении и ложилась на поверхность шкива туго и слоями.

6.1.4. Придерживая рукой за стержень, установить крестовину так, чтобы нижнее основание груза m_0 находилось на высоте h . Значение параметра h подбирается (задается преподавателем) так, чтобы груз m_0 не цеплялся при падении за столик. Измерение высоты падения h груза m_0 производится с помощью вертикальной линейки. Записать в таблицу 1 значение параметра h .

Таблица 1 – Проверка соотношения $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{M_1}{M_2}$, при $J = const$

опыт	измерение	r_0 , м	m_0 , кг	h , м	t , с	$t_{\text{ср.}}$, с	a , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	ε , $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	T , Н	M , Н · м	J_0 , кг · м ²	$J_{0,\text{ср.}}$, кг · м ²	$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$	$\frac{M_1}{M_2}$
1	1													
	2													
	3													
2	1													
	2													
	3													

6.1.5 Измерить секундомером время t падения груза (остановить секундомер нужно в фиксируемый на слух момент, когда груз ударится об пол). Записать время t падения груза в таблицу 1.

6.1.6 Повторить п.п. 6.1.5 2 раза.

6.1.7 Рассчитать среднее значение времени $t_{\text{ср.}}$ падения груза m_0 . Записать значение $t_{\text{ср.}}$ в таблицу 1.

6.1.8 Определить линейное ускорение груза a (см. (16)) и угловое ускорение маховика ε (см. (13)). Значения записать в таблицу 1.

6.1.9 Рассчитать силу натяжения нити T (см. (10)) и вращающий момент M (см. 11)). Значения записать в таблицу 1.

6.1.10 Вычислить момент инерции J_0 маховика без грузиков на стержнях, воспользовавшись основным уравнением динамики вращательного движения (2):

$$J_0 = \frac{M}{\varepsilon}$$

Значение записать в таблицу 1.

6.1.11 Повторить п.п. 6.1.3 - 6.1.10, изменив массу m_0 падающего груза.

6.1.12 Рассчитать $J_{0, \text{ср}}$. Значение записать в таблицу 1.

6.1.13 Рассчитать отношения значений угловых ускорений $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ и моментов сил M_1/M_2 , полученных в ходе двух опытов. Значения записать в таблицу 1.

6.1.14 Проверить правильность соотношения (17) для этого подсчитать величину расхождения численных значений $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ и M_1/M_2 , выраженную в процентах от большего из этих значений.

6.2 Проверка зависимости углового ускорения от величины момента инерции при неизменном вращающем моменте

Проводятся опыты аналогичные п.5.1, но теперь при двух различных положениях грузиков m на стержнях. Изменение положения грузиков на стержнях приводит к изменению момента инерции J маятника. Массу груза m_0 на нити оставляют неизменной, вращающий момент приложенных сил не меняется $M = \text{const}$.

6.2.1 Значение массы подвижного грузика m записать в таблицу 2.

6.2.2 Измерить штангенциркулем диаметр втулки, найти его радиус r ($r < r_0$). Значение записать в таблицу 2.

6.2.3 Расстояния L от втулки до грузика, заданные преподавателем для опыта 1 и опыта 2, записать в таблицу 2.

6.2.4 Измерить штангенциркулем длину ℓ цилиндрического грузика. Значение записать в таблицу 2.

6.2.5 Узнать у преподавателя количество k грузиков (два или четыре), необходимых для проверки соотношения (18). Закрепить указанное количество грузиков на стержнях симметричным образом. Для этого нужно предварительно установить их на расстоянии L от втулки прибора. Сбалансируйте всю систему таким образом, чтобы, будучи оставленной в любом положении, крестовина находилась в состоянии равновесия. Для полной симметрии системы каждый из грузиков должен быть ориентирован относительно своего стержня одинаковым образом. Для этого грузики необходимо

установить так, чтобы их зажимные винты были обращены в одну сторону и перпендикулярны плоскости крестовины.

Таблица 2 – Проверка соотношения $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{J_2}{J_1}$, при $M = const$

опыт	измерение	m , кг	r , м	L , м	ℓ , м	R , м	h , м	t , с	$t_{\text{ср.}}$, с	a , $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$	ε , $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	J , кг · м ²	$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$	$\frac{J_2}{J_1}$
1	1													
	2													
	3													
2	1													
	2													
	3													

6.2.6 Рассчитать расстояние R от оси до центров масс грузиков m по формуле (см. рисунок 6):

$$R = r + L + \ell/2.$$

6.2.7 Выполнить п.п. 6.1.4 – 6.1.8. При выполнении п.п. 6.1.4 – 6.1.8 измеренные и рассчитанные значения записывать в таблицу 2.

6.2.8 Рассчитать момент инерции J маховика с помощью теоремы Штейнера (8):

$$J = J_0 + k \cdot m \cdot R^2$$

где значение $J_0 = J_{0,\text{ср}}$ необходимо взять из таблицы 1; k – количество грузиков, закрепленных на спицах маховика ($k = 2$, если закреплено 2 грузика; $k = 4$, если закреплено 4 грузика)

6.2.9 Выполнить п.п. 6.2.5 – 6.2.8.

6.2.10 Рассчитать отношения значений угловых ускорений $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ и моментов инерций J_2/J_1 , полученных в ходе двух опытов. Значения записать в таблицу 2.

6.2.11 Проверить правильность соотношения (18) для этого подсчитать величину расхождения численных значений $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ и J_2/J_1 , выраженную в процентах от большего из этих значений.

7 Обработка результатов и оценка погрешности измерений

7.1 Заполнить таблицу 3 для непосредственно измеряемых величин r_0 , h и t . Абсолютные погрешности отсчета непосредственно измеряемых величин принять равной цене наименьшего деления прибора, с помощью которого производилось измерение.

7.2 В формуле (13) угловое ускорение ε маховика представить через непосредственно измеряемые величины r_0 , h и t .

7.3 С помощью грубого метода оценки погрешности [4], вывести формулу для вычисления относительной погрешности $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$.

Таблица 3 – Абсолютные погрешности прямых измерений

Измеряемая величина	Единица измерения	Средство измерения	Цена деления	Абсолютная погрешность отсчета

7.4 По данным таблицы 1 – 3 вычислить относительную погрешность измерения $\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$ и абсолютную погрешность $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{отн}} \cdot \varepsilon$ для углового ускорения ε .

7.5 Записать вывод. В выводе указать процент выполнения соотношений $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{M_1}{M_2}$, при $J = \text{const}$ (п.п 6.1.14) и $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{J_2}{J_1}$, при $M = \text{const}$ (п.п 6.2.11). Результат вычисления углового ускорения привести в виде:

$$\varepsilon = (\varepsilon \pm \Delta\varepsilon) \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$$

8 Контрольные вопросы

- 1) Какое движение твердого тела называется поступательным?
- 2) Сформулируйте определение центра масс системы.
- 3) Какое движение твердого тела называется вращательным? Какие величины характеризуют вращение твердого тела?
- 4) В каких единицах измеряются угловое перемещение, угловая скорость, угловое ускорение?
- 5) Какое вращение тела называется равномерным, равноускоренным?
- 6) Угловое ускорение и его связь с линейным ускорением.

- 7) Почему нельзя допускать раскачивание груза, подвешенного на нити, при его движении вниз?
- 8) Сформулируйте основной закон динамики вращательного движения.
- 9) Определение момента силы относительно оси и плеча силы. Единицы измерения момента силы.
- 10) Определение момента инерции тела. Единицы измерения момента инерции тела.
- 11) Сформулировать и записать теорему Штейнера.
- 12) По какой формуле рассчитывается в данной работе момент инерции маятника без грузиков на крестовине и с грузиками?
- 13) Каким образом можно изменить величину момента инерции крестообразного маятника?
- 14) Определение вращающего момента относительно оси. Единицы измерения вращающего момента.
- 15) Каким образом при выполнении работы можно изменить величину вращающего момента?
- 16) Вывести формулу для вычисления вращающего момента, приложенного к маятнику.
- 17) Какое соотношение связывает угловое ускорение вращающегося тела с вращающим моментом, действующим на тело, при неизменном моменте инерции? Как можно проверить это соотношение в данной работе?
- 18) Как связано угловое ускорение вращающегося тела с его моментом инерции при постоянном вращающем моменте?
- 19) Вывести формулы для вычисления относительной погрешности измерения углового ускорения $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ и абсолютной погрешности $\Delta\varepsilon$.

Литература

- 1) Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1. – М.: Наука, 1982. – 432 с.
- 2) Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т2. – М.: Наука, 1979. – 552 с.
- 3) Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1977. – 720 с.
- 4) Руководство к лабораторным занятиям по физике/Под ред. Л.Л. Гольдиш. – М.: ГРФМЛ, 1973. – 688 с.