

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ
ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА**

**Методические указания к лабораторной работе № 3
по дисциплине «Физика»**

Уфа 2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ
ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Методические указания к лабораторной работе № 3
по дисциплине «Физика»

Уфа 2015

Составитель Л. В. Рабчук

УДК
ББК

Изучение законов вращательного движения твердого тела: Методические указания к лабораторной работе № 3 по дисциплине «Физика» / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. Л. В. Рабчук. – Уфа, 2015. – 16 с.

Цель методических указаний – закрепление и совершенствование знаний студентов по дисциплине «Физика» и формирование умений их применять для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах, возникающих в последующей профессиональной деятельности выпускников технического университета.

Посвящены изучению и экспериментальному подтверждению основного закона динамики вращательного движения.

Приведена краткая теория, описание лабораторной установки, методика выполнения работы, требования по технике безопасности, форма отчетности, критерии результативности.

Предназначены для студентов, изучающих дисциплину «Физика» по разделу «Механика. Механические колебания. Статистическая физика и термодинамика» на всех реализуемых направлениях подготовки бакалавров и специалистов.

Табл. 2. Ил. 6. Библиогр.: 3 назв.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доц. Осипов В. С.,
канд. физ.-мат. наук, доц. Кузбеков Т. Т.

©Уфимский государственный авиационный
технический университет, 2015

Содержание

Введение	4
1. Цели работы	5
2. Задачи.....	5
3. Теоретическая часть	5
3.1. Основное уравнение динамики вращательного движения	5
3.2. Применение основного уравнения динамики вращательного движения к маятнику Обербека.....	8
4. Экспериментальная установка.....	11
5. Требования по технике безопасности	12
6. Задания.....	12
7. Методика выполнения заданий	12
Контрольные вопросы	15
Требования к содержанию и оформлению отчета	15
Критерии результативности выполнения лабораторной работы	16
Список литературы	16

Введение

Движение твердого тела можно представить как результат суперпозиции поступательного и вращательного движений. При поступательном движении все точки тела движутся по одинаковым траекториям, поэтому поступательное движение твердого тела описывается теми же уравнениями, что и движение любой материальной точки этого тела. Поступательно движутся относительно Земли тело малого размера, брошенное под углом к горизонту, движущийся на автостраде автомобиль, резец токарного станка и т.д. При вращательном движении все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения. Такое движение относительно Земли совершают различные роторы турбин, электромоторов и генераторов, установленных на Земле неподвижно. В работе изучаются законы динамики вращательного движения твердого тела.

В результате выполнения данной лабораторной работы формируются следующие **компетенции**:

- способность демонстрировать базовые знания в области общенаучных дисциплин и готовность использовать основные законы в профессиональной деятельности;

- способность проводить эксперименты по заданной методике, обрабатывать результаты, оценивать их погрешность и достоверность.

Перечисленные компетенции формируются через **умения**:

- работать с измерительными приборами;
- рассчитывать физические величины по экспериментальным данным;

- анализировать результаты опыта;

- оформлять отчет;

а также **владения**:

- теоретическим материалом;

- навыками измерения физических величин по приборам;

- технологией обработки экспериментальных данных.

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

1. ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Экспериментальная проверка основного закона динамики вращательного движения.

2. Определение момента инерции маятника Обербека и момента сил трения.

3. Изучение зависимости момента инерции грузов, симметрично закреплённых на стержнях, от расстояния, на котором находятся центры масс грузов от оси вращения.

2. ЗАДАЧИ

1. Закрепление теоретических знаний по теме «Твердое тело в механике».

2. Приобретение навыков проведения физических измерений, умения обработки полученных данных.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Основное уравнение динамики вращательного движения

Моментом силы \vec{M} относительно неподвижной точки O (рис. 3.1) называют векторное произведение радиус-вектора \vec{r} , проведенного из точки O до точки A приложения силы \vec{F} , на вектор силы \vec{F}

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}].$$

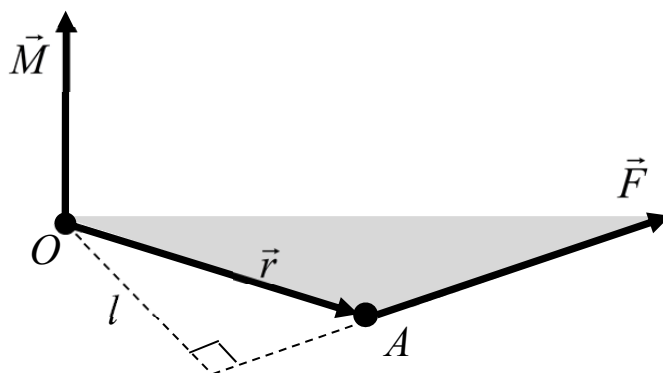


Рис. 3.1. Момент силы \vec{M} относительно неподвижной точки O

Направление вектора \vec{M} совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его вращении от \vec{r} к \vec{F} .

Модуль момента силы равен

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha = F \cdot l,$$

где α – угол между \vec{r} и \vec{F} , $r \cdot \sin \alpha = l$ – плечо силы относительно точки O (т.е. длина перпендикуляра, опущенного из точки O на прямую, вдоль которой действует сила).

Моментом силы относительно неподвижной оси Z или вращательным моментом называют скалярную величину M_z , равную проекции на эту ось вектора момента силы \vec{M} , определенного относительно произвольной точки O данной оси Z (рис. 3.2). Значение M_z не зависит от выбора точки положения O на оси Z .

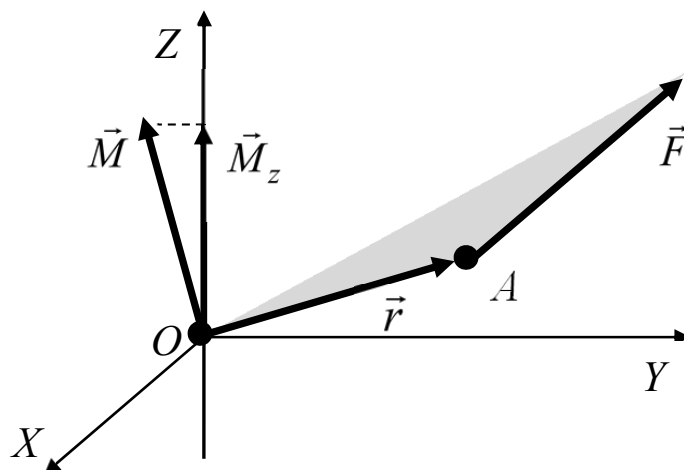


Рис. 3.2. Момент силы \vec{M} относительно неподвижной оси Z

Если векторы \vec{F} и \vec{r} перпендикулярны оси Z , то вектор момента силы относительно данной оси либо сонаправлен с осью Z , либо направлен противоположно оси Z и соответственно

$$M_z = |\vec{M}|$$

или

$$M_z = -|\vec{M}|.$$

Разобьем твердое тело, вращающееся вокруг оси Z , на материальные точки. На рис. 3.3 показана материальная точка массой m_i , расположенная на расстоянии r_i от оси вращения.

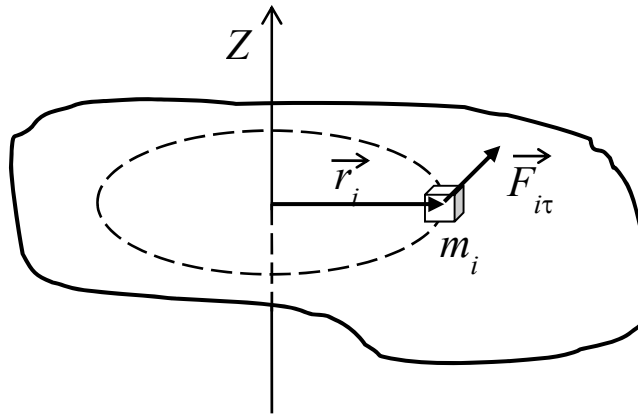


Рис. 3.3

Пусть на нее действует сила \vec{F}_{it} вдоль касательной к траектории движения точки. Запишем второй закон Ньютона в проекции на ось, сонаправленную с \vec{F}_{it} ,

$$F_{it} = m_i \cdot a_{it}, \quad (3.1)$$

где a_{it} – проекция тангенциального ускорения точки на указанную ось, связанная с проекцией ее углового ускорения ε на ось Z соотношением

$$a_{it} = \varepsilon \cdot r_i. \quad (3.2)$$

Вращательный момент силы, действующий на материальную точку, равен

$$M_i = F_{it} \cdot r_i \quad (3.3)$$

Из (3.1), (3.2) и (3.3) получаем

$$M_i = \varepsilon \cdot m_i \cdot r_i^2. \quad (3.4)$$

Аналогичные по виду уравнения можно записать для всех материальных точек тела, так как угловое ускорение у них одинаковое. Сложив их, получим

$$\sum_i M_i = \varepsilon \sum_i m_i \cdot r_i^2. \quad (3.5)$$

Сумма $\sum_i M_i$ в правой части этого уравнения представляет собой суммарный вращательный момент M всех сил, действующих на тело, а сумма $\sum_i m_i \cdot r_i^2$ в левой части равенства – момент инерции

I тела относительно оси Z . С учетом этого и возможных различий в направлениях как векторов \vec{F}_{it} , так и \vec{r}_i для различных точек тела, из

уравнения (3.5) следует, что

$$\vec{M} = I \cdot \vec{\epsilon} . \quad (3.6)$$

Полученное уравнение (3.6) называют основным уравнением динамики вращательного движения. Из (3.6) следует, что вектор момента силы \vec{M} относительно оси сонаправлен с вектором углового ускорения $\vec{\epsilon}$. При вращении тела вокруг неподвижной оси вектор $\vec{\epsilon}$ направлен вдоль оси вращения, в сторону вектора приращения угловой скорости: при ускоренном движении $\vec{\epsilon}$ сонаправлен с $\vec{\omega}$, при замедленном – противоположен ему (рис. 3.4).

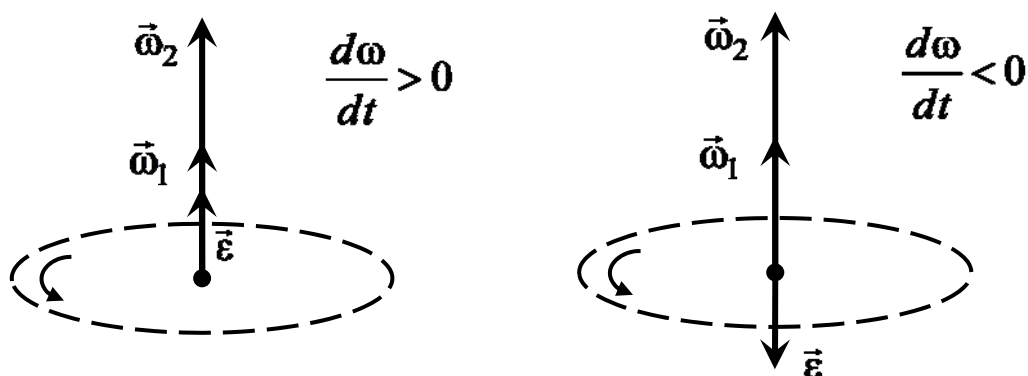


Рис. 3.4. Направление векторов углового ускорения

Сравнивая (3.6) с математическим выражением второго закона Ньютона для поступательного движения тела

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} ,$$

можно заключить, что при вращательном движении роль силы \vec{F} выполняет момент силы \vec{M} , роль массы m – момент инерции I . Следовательно, момент инерции является мерой инертности вращающегося тела.

3.2. Применение основного уравнения динамики вращательного движения к маятнику Обербека

Справедливость основного уравнения динамики вращательного движения можно проверить с помощью маятника Обербека, который схематично изображен на рис. 3.5.

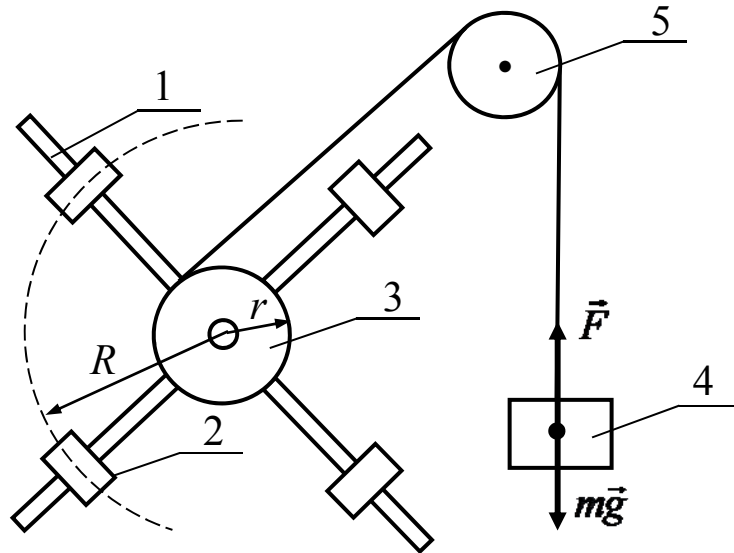


Рис. 3.5

Он состоит из четырех стержней 1 с нанесенными на них делениями, насаженных на втулку под прямым углом друг к другу. На стержни надеваются одинаковые грузы 2, которые могут быть закреплены на разных расстояниях R от оси вращения. На втулку также насажен диск 3 радиусом r . Гири 4, приводящая маятник во вращение, прикреплена к концу нити, которая перекинута через блок 5 и наматывается на диск 3.

Движение гири 4 происходит под действием силы тяжести $m \vec{g}$ (где m – масса гири) и силы натяжения нити \vec{F} . Согласно второму закону Ньютона, уравнение движения гири имеет вид

$$m a = m g - F. \quad (3.7)$$

Ускорение гири a можно найти, зная время t ее опускания и пройденный путь h ,

$$a = \frac{2 h}{t^2}. \quad (3.8)$$

Маятник Обербека вращается под действием момента силы натяжения нити и момента силы трения. Учитывая (3.7) и (3.8), момент силы натяжения относительно оси вращения маятника равен

$$M = F \cdot r = m r \left(g - \frac{2 h}{t^2} \right). \quad (3.9)$$

Тангенциальное ускорение точек на ободе диска 3, удаленных на расстояние r от оси его вращения, равно ускорению гири

$$a_{\tau} = a.$$

Учитывая соотношение, связывающее угловое ускорение и тангенциальное ускорение точек окружности диска,

$$a_{\tau} = \varepsilon \cdot r ,$$

из формулы (3.8) находим

$$\varepsilon = \frac{2 h}{t^2 r} . \quad (3.10)$$

Согласно равенству (3.6), уравнение движения маятника имеет вид

$$\vec{M} + \vec{M}_{\text{тр}} = I \cdot \vec{\varepsilon} ,$$

где \vec{M} – момент силы натяжения нити, $\vec{M}_{\text{тр}}$ – момент силы трения, I – момент инерции маятника.

В проекции на ось вращения

$$M - M_{\text{тр}} = I \cdot \varepsilon , \quad (3.11)$$

откуда

$$M = M_{\text{тр}} + I \cdot \varepsilon . \quad (3.12)$$

Момент инерции I маятника Обербека может быть представлен как сумма моментов инерции I_0 диска со стержнями и момента инерции четырех грузов $I_{\text{гр}}$, закрепленных на стержнях 4 на равных расстояниях от оси вращения.

Если размеры грузов малы по сравнению с расстоянием R от центра масс каждого из грузов до оси вращения, то их можно считать материальными точками. В этом случае момент инерции грузов равен

$$I_{\text{гр}} = 4 m_{\text{гр}} R^2 , \quad (3.13)$$

где $m_{\text{гр}}$ – масса одного груза, закрепленного на стержне.

Тогда момент инерции маятника

$$I = I_0 + I_{\text{гр}} = I_0 + 4 m_{\text{гр}} R^2 . \quad (3.14)$$

Из равенства (3.12) видно, что если сила трения постоянна, то зависимость величины M от ε линейная, графиком которой является прямая. При этом момент инерции I играет роль углового коэффициента k . Таким образом, экспериментальное исследование взаимосвязи между M и ε позволяет найти момент инерции маятника I и момент силы трения $M_{\text{тр}}$. Графиком зависимости момента инерции I маятника Обербека от расстояния R между центром масс каждого из грузов до оси вращения, согласно (3.14), будет парабола.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Общий вид установки с маятником Обербека приведен на рис. 4.1.

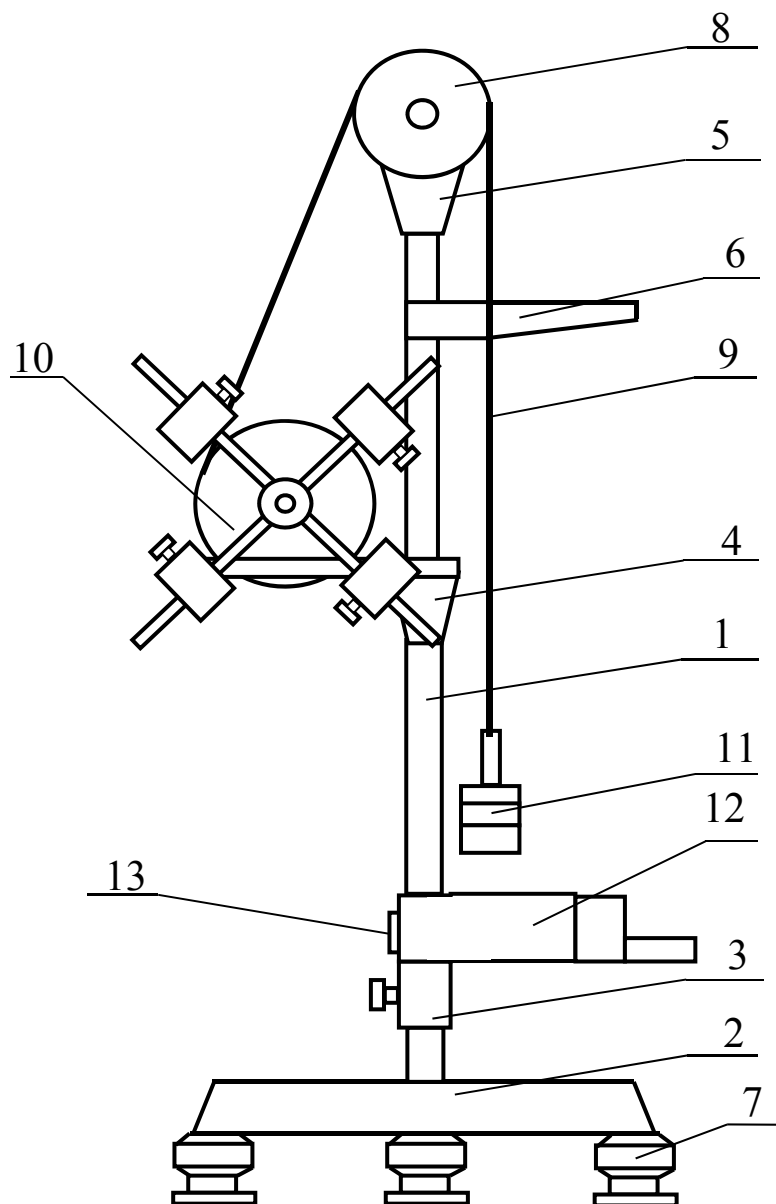


Рис. 4.1.

На вертикальной стойке 1 со шкалой, установленной на основании 2, прикреплены кронштейн 3, две втулки 4 и 5, флажок 6. Основание снабжено регулируемыми ножками 7, обеспечивающими горизонтальную установку прибора.

На верхней втулке 5 закреплен диск 8, через который переброшена нить 9. Один конец нити прикреплен к диску 10, а на другом конце закреплены грузы 11. На кронштейне 3 закреплен фотоэлектрический датчик 12 и находится разъем 13 для

подключения электронного блока ВМ – 1/1, с помощью которого измеряется время движения груза.

5. ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Прежде чем приступить к работе, внимательно ознакомьтесь с заданиями и лабораторной установкой. О замеченных неисправностях сообщите преподавателю или лаборанту.

2. Не загромождайте рабочее место предметами, не относящихся к выполняемой работе.

3. Тщательно закрепляйте грузы на крестовине, чтобы они не слетали при раскручивании маятника.

4. Следите за равномерной намоткой нити на шкив.

5. По окончании работы обесточьте прибор и приведите в порядок рабочее место.

6. ЗАДАНИЯ

1. Проверка зависимости величины углового ускорения ε от величины момента силы натяжения M при постоянном моменте инерции I_0 .

2. Исследование зависимости момента инерции грузов, закреплённых на стержнях, от расстояния между центром масс каждого груза и осью вращения.

7. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ

Задание 1. Проверка зависимости величины углового ускорения ε от величины момента силы натяжения M при постоянном моменте инерции I_0 .

1. Снять грузы со стержней крестовины маятника Обербека.

2. Установить кронштейн с фотодатчиком в нижней части вертикальной стойки таким образом, чтобы гиря с грузами при движении вниз проходила по центру рабочего окна фотодатчика.

3. К концу нити подвесить груз массы m_1 . Установить нижний край груза на определенной высоте, используя красный флажок на вертикальной стойке.

4. Включить электросекундомер. Одновременно нажать на кнопку «ПУСК» и отпустить груз. Происходит растормаживание электромагнита, гиря начинает опускаться, и таймер блока начинает отсчет времени. При пересечении гирей фотоэлектрического датчика

отсчет времени прекратится. Записать показания таймера, т.е. время движения гири t .

5. Определить пройденный грузом путь h – расстояние от нижней плоскости гири в ее верхнем положении до оптической оси фотодатчика.

6. Записав значения h , m , t , нажать клавишу «СБРОС». Для повышения точности измерений опыт повторить еще два раза, не изменяя h .

7. Определить среднее значение времени движения груза.

8. По формуле (3.10) по среднему времени рассчитать угловое ускорение маятника.

9. По формуле (3.9) по среднему времени рассчитать момент силы натяжения.

10. Повторить п.п. 4-9 для грузов с массами m_2 , m_3 , m_4 , m_5 .

11. Все данные занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

m , кг		t , с	$t_{\text{ср}}$, с	r , м	h , м	ε , с ⁻²	M , кг·м ² ·с ⁻²
m_1	1						
	2						
	3						
m_2	1						
	2						
	3						
m_3	1						
	2						
	3						
m_4	1						
	2						
	3						
m_5	1						
	2						
	3						

12. Построить график зависимости $M = f(\varepsilon)$.

13. Из графика найти момент инерции маятника без грузов I_0 и момент силы трения $M_{\text{тр}}$.

Задание 2. Изучение зависимости момента инерции грузов, симметрично закреплённых на стержнях, от расстояния на которых находятся центры масс грузов от оси вращения.

1. Надеть на стержни грузы и укрепить их на одинаковых расстояниях от оси вращения.

2. Измерить расстояние R от оси вращения до центра масс одного из грузов на крестовине.

3. К концу нити подвесить груз массы m_1 .

4. Три раза подряд измерить время падения груза и по среднему времени по формулам (3.10) и (3.9) рассчитать угловое ускорение ε и момент силы натяжения нити M .

5. Вычислить момент инерции маятника с грузами на крестовине

$$I = \frac{M - M_{\text{гр}}}{\varepsilon}.$$

6. Определить момент инерции грузов относительно оси вращения по формуле

$$I_{\text{гр}} = I - I_0,$$

где I_0 – момент инерции маятника без грузов.

7. Не меняя груз массой m_1 , подвешенный на нити, повторить п. 2-6 для шести различных положений грузов на крестовине, изменяя расстояние R от оси вращения до центра масс каждого груза с шагом 2 см.

8. Занести все данные в табл. 7.2.

Таблица 7.2

N	h , м	r , м	R , м	t , с	$t_{\text{ср}}$, с	ε , с ⁻²	M , кг·м ² ·с ⁻²	I , кг·м ²	$I_{\text{гр}}$, кг·м ²	$I_{\text{теор.}}$, кг·м ²
1										
2										
3										
4										
5										
6										

9. Рассчитать и записать в табл. 7.2 теоретически ожидаемые значения моментов инерции грузов, находящихся на расстояниях R от оси вращения по формуле

$$I_{\text{теор}} = 4m_{\text{гр}}R^2,$$

где $m_{\text{гр}}$ – масса одного из закрепленных грузов.

10. На одном рисунке построить графики экспериментально полученной и теоретически ожидаемой зависимости момента инерции грузов, закреплённых на стержнях, от квадрата расстояния между центром масс каждого из грузов и осью вращения $I_{\text{гр}} = f(R^2)$. Проанализировать возможные причины несовпадения графиков.

Контрольные вопросы

1. Что называют моментом инерции материальной точки относительно оси? Что называют моментом инерции твердого тела относительно оси?

2. Каков физический смысл момента инерции тела?

3. Что называют моментом силы относительно точки O ? Что называют моментом силы относительно оси?

4. Как определяют направление векторов углового ускорения, момента силы?

5. Как формулируется основной закон динамики вращательного движения?

6. Каким образом в данной работе можно изменять вращающий момент, действующий на маятник Обербека?

7. Моменты каких сил и как рассчитываются в работе?

8. Как экспериментально оценить момент сил трения?

9. Как получить зависимость момента инерции грузов от расстояния до оси вращения?

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Название и номер лабораторной работы.

2. Цель работы.

3. Краткую теорию.

4. Основные формулы для выполнения расчетов.

5. Таблицы с результатами измерений и вычислений.

6. Графики зависимостей $M = f(\varepsilon)$ и $I_{\text{гр}} = f(R^2)$.

7. Найденные из графика $M = f(\varepsilon)$ значения момента инерции маятника без грузов I_0 и момента силы трения $M_{\text{тр}}$.

8. Вывод по результатам работы.

Критерии результативности выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа считается выполненной, если студент:

- правильно выполнил экспериментальную и расчетную части работы;
- составил отчет, соответствующий предъявляемым к нему требованиям;
- сформулировал выводы о проделанной работе;
- подготовил ответы на все контрольные вопросы.

Список литературы

1. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 1. – СПб.: Издательство «Лань», 2011.
2. *Детлаф А. Н., Яворский Б. М.* Курс физики. – М.: Academia, 2009.
3. *Трофимова Т. И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 2012.

Составитель РАБЧУК Людмила Васильевна

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ
ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Методические указания к лабораторной работе № 3
по дисциплине «Физика»

Подписано в печать 2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать плоская. Гарнитура Nimes New Roman.
Усл. печ. л. 1,1. Усл.-кр.-отг. 1,1. Уч-изд.л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Редакционно-издательский комплекс УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12