

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 13.03.2023 10:45:42  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра нанотехнологий, общей и прикладной физики



### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ВРАЩЕНИЯ МАХОВОГО КОЛЕСА

Методические указания к выполнению лабораторной  
работы №5 по разделу «Механика»  
для студентов специальности 03.03.02

Курск 2019

УДК 531

Составители: Г.В. Карпова, А.Г. Беседин

Рецензент

Кандидат физико-математических наук *П.А. Красных*

**Определение основных параметров вращательного движения на примере вращения махового колеса:** методические указания к выполнению лабораторной работы №5 по разделу физики «Механика» / Юго-зап. гос. ун-т; сост.: Г.В. Карпова, А.Г. Беседин. - Курск, 2019.- 10 с.: ил.3, табл. 1, Библиогр.: с.10.

Содержит методические рекомендации по выполнению лабораторной работы. Экспериментально исследуются закономерности вращательного движения махового колеса, определяются основные параметры вращательного движения.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы, утвержденной учебно-методическим объединением по специальности Физика.

Предназначены для студентов специальности 03.03.02 дневной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 04.02.19. Формат 60x84/16.

Усл.печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,4. Тираж 100 экз. Заказ 62. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Лабораторная работа №5  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
 ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ  
 ВРАЩЕНИЯ МАХОВОГО КОЛЕСА.**

**Цель работы:** опытным путем изучить закономерности вращательного движения махового колеса.

**Приборы и принадлежности:** маховое колесо с грузом, секундомер, сантиметровая лента, штангенциркуль.

**Краткая теория.**

**Моментом силы  $\vec{F}$**  относительно некоторой точки «О» называется векторная величина  $\vec{M}$ , определяемая векторным произведением:

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}] \quad (1)$$

где  $\vec{r}$  - радиус-вектор, проведенный из точки «О» в точку приложения силы.

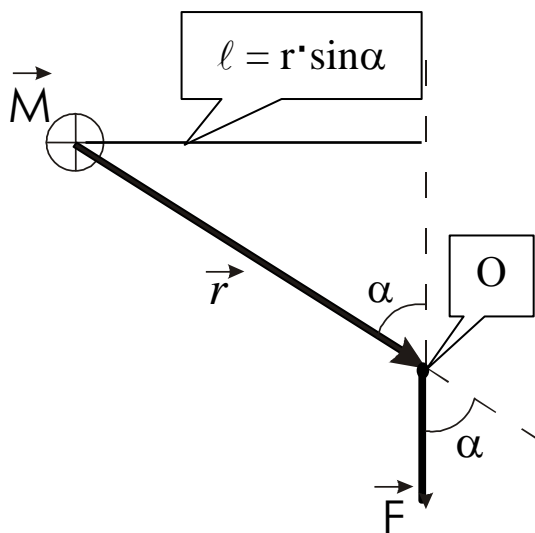


Рис.1.

На рис. 1 вектор момента силы согласно правилу векторного произведения будет направлен от нас за лист. Модуль момента силы определяется выражением:

$$|\vec{M}| = |\vec{r}| |\vec{F}| \sin \alpha \quad (2)$$

где произведение  $|\vec{r}| \sin \alpha = l$  определяет длину перпендикуляра, опущенного из центра вращения «М» на линию действия силы «О», « $\alpha$ » – угол между направлением векторов «F» и «r»

**Момент инерции материальной точки** – скалярная величина, определяемая произведением массы этой точки на квадрат расстояния от этой точки до оси вращения:

$$J = mr^2 \quad (3)$$

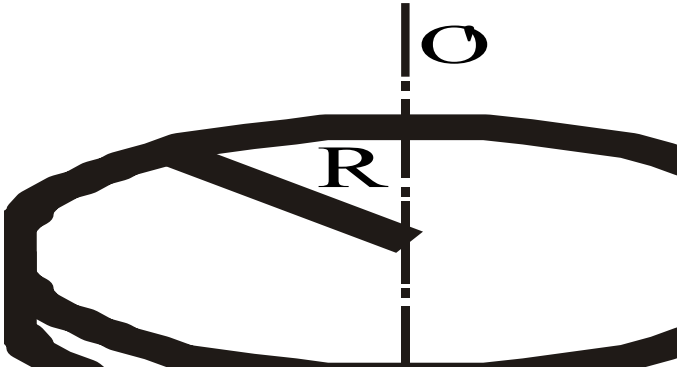


Рис. 2.

Момент инерции сплошного однородного диска (рис.2) относительно оси, проходящей через центр диска перпендикулярно плоскости его оснований, равен:

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \quad (4)$$

где  $m$  – масса диска,  $r$ – его радиус.

Если представить массу диска как  $m = \rho V$ , где  $\rho$  - плотность вещества диска,  $V$  – его объем и учесть, что  $V = \pi \cdot R^2 h$ , где  $h$  – толщина диска, получим:

$$J = \frac{1}{2}\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h \cdot R^2 = \frac{1}{2}\rho \cdot \pi \cdot R^4 \cdot h, \quad (5)$$

так как  $R = \frac{D}{2}$ , где  $D$  – диаметр диска, имеем:

$$J = \frac{1}{32}\rho \cdot \pi \cdot D^4 \cdot h \quad (6)$$

**Угловая скорость** характеризует быстроту изменения угла поворота  $\varphi$  с течением времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

**Угловое ускорение**, определяющее быстроту изменения угловой скорости, есть:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

Рассмотренные величины связаны соотношением:

$$\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = J \cdot \vec{\varepsilon} \quad (9)$$

где  $\sum_{i=1}^n \vec{M}_i$  - сумма моментов внешних сил, действующих на тело. Так как угловое ускорение можно записать как первую производную,  $\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$ , то уравнение (9) можно преобразовать как:

$$\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = J \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad \text{или} \quad \sum_{i=1}^n \vec{M}_i = \frac{d(J\vec{\omega})}{dt} \quad (10)$$

Это соотношение называется основным уравнением динамики вращательного движения твердого тела.

Векторная величина  $\vec{L} = J\vec{\omega}$  - момент импульса твердого тела.

### Описание установки.

Установка, с помощью которой проводится исследование, состоит из массивного махового колеса, радиус которого « $R_K$ »

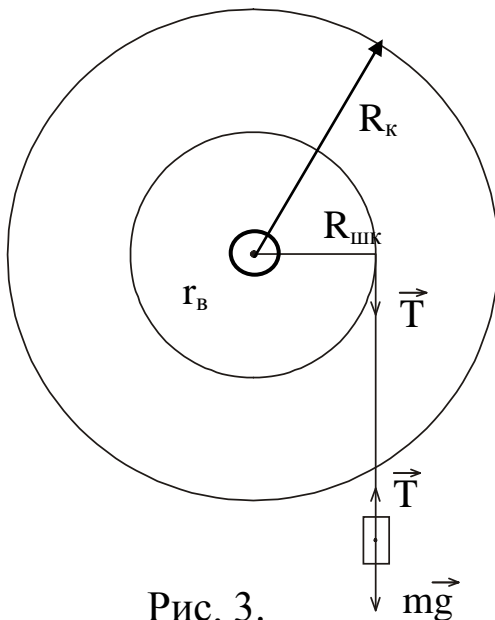


Рис. 3.

и насаженного на вал радиусом « $r_B$ » и отсчетной вертикальной шкалы с делениями, укрепленной на стене. Вал установлен на шарикоподшипниках. Шкив радиуса  $R_{шк}$ , на который наматывается нить с грузом массой « $m$ », насажен на вал. Под действием груза нить разматывается и приводит маховое колесо в равноускоренное вращательное движение. Положение груза « $m$ » отмечается по шкале с делениями.

### Методика определения параметров вращательного движения.

Для определения параметров вращательного движения махового колеса грузу сообщают запас потенциальной энергии ( $m \cdot g \cdot h_1$ ), поднимая его за счет вращения колеса на высоту ( $h_1$ ). Освободив колесо, измеряют время

(t) опускания груза до нижней точки. Выключив секундомер, отмечают высоту ( $h_2$ ), на которую поднимается груз (по инерции) от нижней точки. Экспериментальные расчетные формулы получают исходя из того, что запас потенциальной энергии груза, переходит в кинетическую энергию его поступательного движения, в кинетическую энергию вращательного движения махового колеса и работу по преодолению силы трения в подшипниках.

$$mgh_1 = \frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + A_{1mp} \quad (11)$$

Воспользуемся соотношениями угловых и линейных характеристик в форме выражений.

$$V = a \cdot t \quad ; \quad h_1 = \frac{at^2}{2} \quad ; \quad V = \frac{2h_1}{t} \quad ; \quad \omega = \frac{V}{R} \quad ; \quad \omega = \frac{2h_1}{Rt} \quad (12)$$

Подставляя соотношения (12) в формулу (11) получим выражение для расчета момента инерции махового колеса.

$$J = mR_{шк}^2 \left( g \cdot t^2 \cdot \frac{h_2}{h_1(h_1 + h_2)} - 1 \right) \quad (13)$$

где  $m$  – масса груза,  $R_{шк}$  – радиус шкива,  $t$  – время опускания груза.

Когда груз дойдет до нижней точки, маховое колесо, вращаясь по инерции, начинает наматывать нить на шкив, в результате чего груз снова начинает подниматься. Но так как существуют силы трения в опорах, то он поднимается на высоту  $h_2 < h_1$ . При этом кинетическая энергия вращательного движения колеса и поступательного движения груза перейдет в потенциальную энергию и работу против сил трения в опорах вала, то есть

$$\frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} = mgh_2 + A_{2mp}$$

где  $A_{2тр}$  – работа против сил трения, совершаемая при движении груза вверх или  $mgh_2 = \frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} - A_{2mp} \quad (14)$

Убыль потенциальной энергии груза равна работе по преодолению силы трения в подшипниках.

$$mgh_1 - mgh_2 = A_{1mp} + A_{2mp} = F_{mp} (l_1 + l_2) \quad (15)$$

$l_1, l_2$  – пути, проходимые трущимися участками вала при движении груза вниз и вверх соответственно.

$$l_1 = 2\pi r n_1; \quad l_2 = 2\pi r n_2 \quad (16)$$

где  $n_1, n_2$  – число оборотов, которое вал сделал при движении груза вниз и вверх соответственно,  $r$  – радиус вала.

При этом шкив тоже сделал ( $n_1$ ) и ( $n_2$ ) оборотов за те же промежутки времени. Длину смотанной и намотанной нити (нить можно считать упругой и нерастяжимой), равную соответственно высоте опускания  $h_1$  и поднятия  $h_2$  груза, можно определить по формуле:

$$h_1 = 2\pi \cdot R_{шк} \cdot n_1; \quad h_2 = 2\pi \cdot R_{шк} \cdot n_2 \quad (17)$$

Из соотношения (17) следует, что

$$n_1 = \frac{h_1}{2\pi \cdot R_{шк}}; \quad n_2 = \frac{h_2}{2\pi \cdot R_{шк}} \quad (18)$$

Подставляя выражения (19) в (15) получаем:

$$l_1 = h_1 \frac{r}{R_{шк}}; \quad l_2 = h_2 \frac{r}{R_{шк}} \quad (19)$$

Подставляя соотношения (19) в формулу (15), получаем выражение для силы трения в подшипниках.

$$F_{mp} = mg \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 + h_2)} \cdot \frac{R_{шк}}{r} \quad (20)$$

Вращательный момент создаётся силой натяжения нити

$T = m \cdot (g - a)$ , плечом этой силы является радиус шкива  $R_{шк}$ :

$$M_T = m(g - a)R_{шк} \quad (21)$$

Противодействующий – тормозящий момент создаёт сила трения  $F_{тр}$ , а плечом этой силы является,  $r$  – радиус вала, где проявляют действие силы трения качения. Поэтому можно записать выражение:  $M_{тр} = F_{тр}r$  или





<c								
p>								

7. Рассчитать экспериментальное значение момента инерции махового колеса по формуле (13):

$$J_{\text{э}} = mR_{\text{шк}}^2 \left( g \cdot t^2 \cdot \frac{h_2}{h_1(h_1 + h_2)} - 1 \right)$$

При этом подставлять средние значения величин  $h_2$  и  $t$ .

8. Произвести расчет теоретического значения момента инерции махового колеса  $J_T$ . Для этого, необходимо измерить диаметр махового колеса  $D$ , его толщину  $h$ , и зная плотность вещества, из которого сделано маховое колесо – сталь ( $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ), подставить эти значения в формулу (6).

9. Сравнить полученные значения моментов инерции махового колеса, то есть найти относительную погрешность полученных результатов лабораторной работы по формуле (24).

$$\varepsilon = \frac{|J_T - J_{\text{э}}|}{J_T} \cdot 100\% \quad (23)$$

Сделать вывод.

10. Определить силу трения в опорах по формуле (20):

$$F_{\text{тр}} = mg \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 + h_2)} \cdot \frac{R_{\text{шк}}}{r}$$

При этом подставляются средние значения  $\langle h_2 \rangle$ ,  $\langle R_{\text{шк}} \rangle$ ,  $\langle r \rangle$ .

11. Рассчитать момент силы натяжения нити по формуле:

$$M_T = R_{\text{шк}} \cdot T$$

с учетом того, что сила натяжения

$$T = m(g - a) = m \left( g - \frac{2h_1}{t^2} \right) \quad (24)$$

имеем 
$$M_T = R_{\text{шк}} \cdot m \left( g - \frac{2h_1}{t^2} \right) \quad (25)$$

12. Рассчитать момент силы сопротивления по формуле:  $M_c = r \cdot F$

13. Сравнить моменты силы натяжения и силы сопротивления. Сделать выводы.

14. Определить работу по преодолению сил трения по формуле  $A_{тр} = mg(h_1 - h_2)$  (26)

### Контрольные вопросы.

1. Каков физический смысл момента инерции?
2. От чего зависит величина момента инерции?
3. В каких единицах измеряется момент инерции?
4. Как рассчитать момент инерции однородного диска?
5. Для чего используется закон сохранения механической энергии в этой работе?
6. Сформулируйте и напишите математическое выражение момента силы,
7. Сформулируйте и напишите математическое выражение основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела.

### Библиографический список:

1. Трофимова Т. И. Курс общей физики [Текст]: учеб. пособие / М.: Высш. шк., 2002. – 542с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики Т.1. Механика [Текст]: учеб. пособие / И. В. Савельев; СПб.: Лань, 2007. – 320 с.