ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ДИНАМИКИ

Цель работы: изучение законов динамики, проверка основного закона динамики вращательного движения.

Приборы и принадлежности: маятник Обербека, штангенциркуль.

ВВЕДЕНИЕ

В основе классической механики лежат три основных постулата, которые являются обобщением опытных фактов и называются законами Ньютона. Первый закон Ньютона, называемый также принципом инерции Галилея, гласит: частица сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других частиц не выведет её из этого состояния. Способность частиц сохранять состояние покоя или прямолинейного равномерного движения называется инертностью. Частица, не изменяющая свою скорость, движется по инерции.

Рассмотрим движение частицы, испытывающей воздействие со стороны других частиц.

Количественной характеристикой механического воздействия является сила, которая записывается так

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}, \tag{1}$$

где $\vec{P}$ - импульс частицы.

Импульсом частицы называется физическая величина, характеризующая состояние частицы и равная

$$\vec{P} = m\vec{v}. \tag{2}$$

Коэффициент пропорциональности m между импульсом и скоростью частицы v называется массой.

Итак, сила равна скорости передачи импульса от частицы к частице.

В классической механике выполняется закон сохранения массы, в соответствии с которым масса частицы не зависит от состояния её движения, являясь её неизменной характеристикой, т.е.

$$m = \sum_{i=1}^{n} m_i = \text{const}. \tag{3}$$

Учитывая (3), получим

$$\frac{d}{dt}\vec{P} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = m\frac{d}{dt}\vec{v} = m\vec{a} = \vec{F}$$

или

$$\vec{F} = m\vec{a}\ . \tag{4}$$

Уравнения (1) и (4) описывают изменение движения частицы и представляют собой уравнение движения. Другое название этих уравнений - второй закон Ньютона. Уравнение (1) является более общим, а выражение (4) справедливо только в рамках классической механики.

Из последней записи второго закона Ньютона видно, что при действии одной и той же силы ускорение частицы тем меньше, чем больше её масса. Значит, частица с большей массой медленнее изменяет свою скорость и является более инертной. Т.о. масса является мерой инертности частиц.

Третий закон ньютона гласит: силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие частицы, равны по величине и противоположны по направлению. Его математическая запись

$$\vec{F}_{12} = \vec{F}_{21}, \tag{5}$$

где $\vec{F}_{12}$ – сила, с которой первая частица действует на вторую; $\vec{F}_{21}$ – сила, с которой вторая частица действует на первую.

Более сложным объектом движения является твёрдое тело. Тело, размерами которого пренебречь нельзя в условии данной задачи, рассматривается как система частиц. На каждую частицу системы воздействуют как внутренние силы, так и внешние. Силы взаимодействия между частицами внутри механической системы называются внутренними. Силы, с которыми на частицы системы действуют внешние тела называются внешними.

Центром масс или центром инерции системы частиц наз. точка С, радиус-вектор которой равен

$$\vec{r}_c = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i}{\sum\limits_{i=1}^{n} m_i}, \qquad (6)$$

где m_i и $\vec{r}_i$ – масса и радиус-вектор одной i-ой частицы.

Поступательное движение центра масс описывает общее уравнение

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}^{\text{вн}}, \qquad (7)$$

где $\vec{P} = m\vec{v}_c$ - импульс тела; $\vec{v}_c$ - скорость центра масс; $\vec{F}^{\text{вн}} = \sum\limits_{i=1}^{n} \vec{F}_i^{\text{вн}}$ - геометрическая сумма всех внешних сил, действующих на систему, называется главным вектором внешних сил.

Т.к. в рамках классической механики m=const , получим

$$\frac{d}{dt}\vec{P} = \frac{d}{dt}(mv_c) = m\frac{d\vec{v}_c}{dt} = m\vec{a}_c = \vec{F}^{\text{вн}},$$

$$m\vec{a}_c = \vec{F}^{\text{вн}}. \qquad (8)$$

На основе равенства (8) можно сформулировать теорему о движении ЦМ: *ЦМ механической системы движется так, как под действием главного вектора внешних сил движется частица, масса которой равна массе всей системы.* Таким образом, поступательное движение тела сводится к движению одной его точки – ЦМ.

Выше рассмотрены случаи, когда внешнее воздействие приводит к изменению поступательного движения тела. Но внешнее воздействие может приводить и к изменению его вращательного движения.

Способность силы вращать тело относительно точки или оси характеризуют *моментом силы:*

$$\vec{M} = [\vec{r}, \vec{F}] = \vec{r} \times \vec{F}. \tag{9}$$

Векторное произведение радиуса-вектора точки приложения силы на вектор силы называется *моментом силы относительно неподвижной точки О*. Направление вектора $\vec{M}$ выбирается согласно правилу векторного произведения или правилу правого винта. По правилу векторного произведения вектор $\vec{M}$ перпендикулярен плоскости, в которой лежат вектора $\vec{r}$ и $\vec{F}$ и направлен так, что, если смотреть с конца его, кратчайший поворот от $\vec{r}$ к $\vec{F}$ должен происходить против часовой стрелки.

Модуль вектора $\vec{M}$ равен:

$$M = rF\sin\alpha = \ell F, \tag{10}$$

где $\ell = r\sin\alpha$ – плечо силы, т.е. длина перпендикуляра, опущенного из т. О на линию действия силы.

На рис. 4.1 показаны радиус вектор $\vec{r}$ приложения силы, плечо ℓ силы и направление вектора $\vec{M}$ в случае, когда сила $\vec{F}$ приложена к плоскому телу (например, листу бумаги произвольной формы), находящемуся в плоскости рисунка.

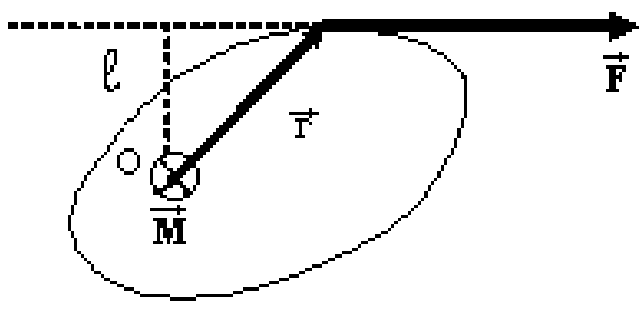

Рис. 4.1

Проекция вектора $\vec{M}$ на некоторую ось z, проходящую через т. O, называется *моментом силы относительно этой оси*

$$M_z = (\vec{r} \times \vec{F})_z = M \cdot \cos\varphi, \tag{11}$$

где φ – угол между вектором $\vec{M}$ и осью Oz

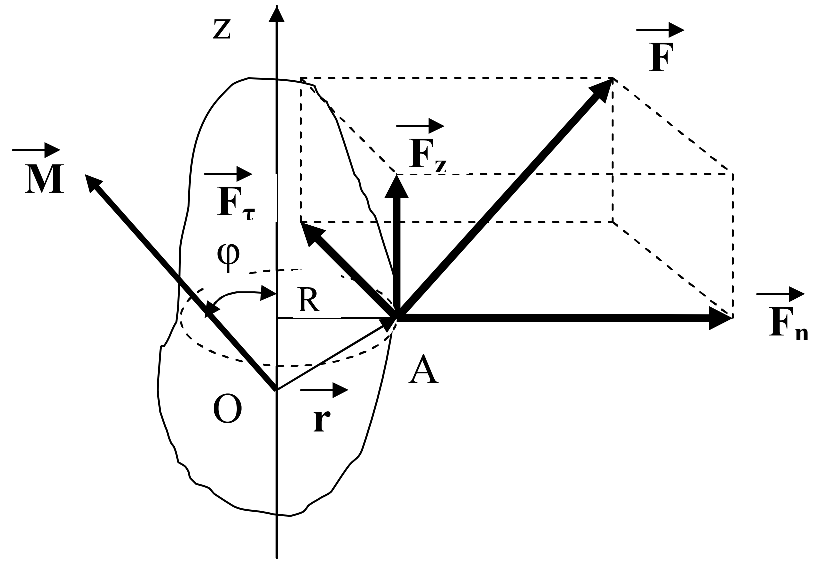

Рис. 4.2

Пусть в точке A тела на рис. 4.2 приложена сила $\vec{F}$. Разложим её на три взаимно перпендикулярные составляющие: $\vec{F}_z$, $\vec{F}_n$, $\vec{F}_\tau$. Получим:

$$\vec{F} = \vec{F}_z + \vec{F}_n + \vec{F}_\tau.$$

$\vec{F}_z$ – составляющая силы $\vec{F}$, параллельная оси z; $\vec{F}_n$ – радиальная составляющая, она перпендикулярна оси z и проходит через ось z; $\vec{F}_\tau$ – касательная составляющая, она направлена по касательной к окружности; окружность проходит через точку приложения силы, причём центр её лежит на оси z, а радиус обозначен буквой R.

$$M_z = (\vec{r} \times (\vec{F}_z + \vec{F}_n + \vec{F}_\tau))_z = (\vec{r} \times \vec{F}_z)_z + (\vec{r} \times \vec{F}_n)_z + (\vec{r} \times \vec{F}_\tau)_z =$$
$$= (\vec{r} \times \vec{F}_\tau)_z = rF_\tau \sin\alpha \cos\varphi = rF_\tau \cos\varphi = RF_\tau,$$

$$M_z = RF_\tau \tag{12}$$

Моменты сил $\vec{F}_z$ и $\vec{F}_n$ перпендикулярны оси z , поэтому их проекции равны 0.

Момент силы относительно оси характеризует способность силы вращать тело вокруг этой оси. Такой поворот может быть вызван только составляющей $\vec{F}_\tau$. Действие этой составляющей силы тем значительней, чем больше плечо R.

Векторное произведение радиуса-вектора частицы на вектор ее импульса называется *моментом импульса частицы относительно т. O*:

$$\vec{L}_i = [\vec{r}_i, \vec{P}_i] = \vec{r}_i \times m_i \vec{v}_i \ . \tag{13}$$

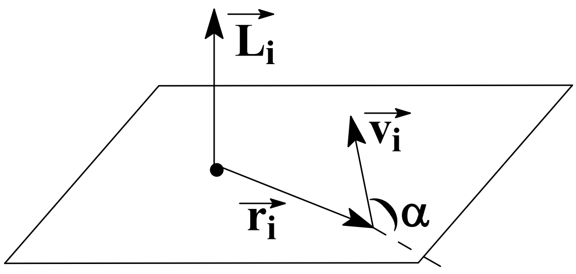

Рис. 4.3

Направление $\vec{L}_i$ находится по правилу векторного произведения или по правилу буравчика. На рис. 4.3 для частицы массой m_i , движущейся со скоростью v_i, момент импульса относительно точки O $\vec{L}_i$ будет перпендикулярен плоскости, в которой лежат $\vec{r}_i$ и $m_i \vec{v}_i$, и направлен вверх согласно правилу векторного произведения. Модуль момента импульса равен:

$$L_i = m_i v_i r_i \sin\alpha \ = m_i v_i \ell_i : \quad \alpha \le \left(\vec{r}_i \ \hat{} \ m_i \vec{v}_i \right),$$

$\ell_i = r_i \cdot \sin\alpha_i$ - плечо момента импульса.

Векторная сумма $\vec{L}_1 + \vec{L}_2 + ... + \vec{L}_n = \vec{L}$ или $\vec{L} = \sum_{i=1}^{n} \vec{L}_i$ называется *моментом импульса системы частиц относительно т. O.*

Векторная сумма моментов внешних сил, приложенных ко всем точкам системы, называется *результирующим или главным моментом внешних сил относительно т. O:*

$$\sum_{i=1}^{n} \vec{M}_i^{BH} = \vec{M}^{BH}.$$

Можно показать, что для системы материальных точек справедливо соотношение

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}^{вн} . \tag{14}$$

Это уравнение называется *уравнением вращательного движения механической системы, т.е. твердого тела, относительно неподвижной точки*.

Проекция вектора $\vec{L}_i$ на некоторую ось z, проходящую через точку O, называется моментом импульса частицы относительно этой оси:

$$L_{iz} = (\vec{r}_i \times \vec{P}_i)_z . \tag{15}$$

Моментом импульса механической системы относительно оси z, проходящей через точку O, называется проекция вектора $\vec{L}$ на эту ось:

$$L_z = \sum_{i=1}^{n} L_{iz} . \tag{16}$$

Пусть тело вращается вокруг неподвижной оси Oz, проходящей через т.O (рис. 4.4). В этом случае вращение происходит только под действием составляющей M_z момента $\vec{M}$ внешних сил относительно точки O и уравнение вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси примет вид:

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z^{вн} , \tag{17}$$

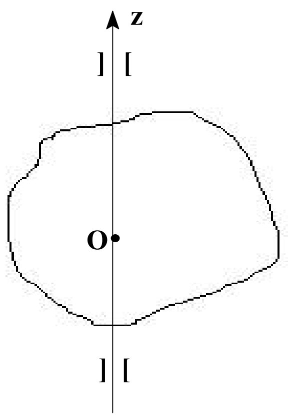

Рис. 4.4

где $M_z^{вн}$ называется главным моментом внешних сил относительно оси Oz, L_z - составляющая момента импульса $\vec{L}$ относительно оси Oz и называется моментом импульса тела относительно оси Oz.

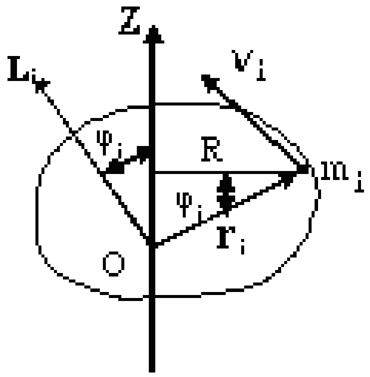

Рис. 4.5

Выделим i-ую частицу твердого тела (рис. 4.5). Если m_i и $\vec{v}_i$ - масса и скорость частицы, а $\vec{r}_i$ - ее радиус-вектор относительно т. O, то момент импульса $\vec{L}_i$ точки равен:

$$\vec{L}_i = \vec{r}_i \times m_i \vec{v}_i,$$

а его модуль:

$$L_i = r_i m_i v_i \sin\alpha_i = r_i m_i v_i .$$

В последнем равенстве учтено то, что векторы $\vec{r}_i$ и $\vec{v}_i$ взаимно перпендикулярны $(\sin(\vec{r}_i \wedge \vec{v}_i) = 1)$. Проекция момента импульса $\vec{L}_i$ на ось Oz , т.е. момент импульса частицы относительно оси, равняется:

$$L_{iz} = L_i \cdot \cos\varphi_i = m_i v_i r_i \cos\varphi_i = m_i v_i R_i = m_i R_i^2 \omega = \omega I_{zi},$$

где $R_i = r_i \cos\varphi_i$ - радиус окружности, по которой движется i-ая частица при вращении тела, $\omega = \dfrac{v_i}{R_i}$ - угловая скорость вращения.

Произведение массы частицы на квадрат ее кратчайшего расстояния до оси вращения называется *моментом инерции частицы относительно этой оси:*

$$I_{zi} = m_i R_i^2 \quad . \tag{18}$$

Момент импульса всего тела относительно оси Oz

$$L_z = \sum_{i=1}^{n} L_{iz} = \omega \sum_{i=1}^{n} L_{iz} = \omega \sum_{i=1}^{n} m_i R_i^2 = \omega I_z .$$

Величина

$$I_z = \sum_{i=1}^{n} m_i R_i^2 \tag{19}$$

называется *моментом инерции тела* относительно этой оси.

Таким образом, момент импульса тела относительно оси запишется в виде:

$$L_z = I_z \omega \quad . \tag{20}$$

Подставим последнее выражение в уравнение вращательного движения тела относительно оси Oz:

$$M_z = \frac{dL_z}{dt} = \frac{d}{dt} I_z \omega = I_z \varepsilon ,$$

$$M_z = I_z \varepsilon \quad . \tag{21}$$

Это уравнение справедливо только в том случае, когда $I_z = \mathrm{const}$. Для абсолютно твёрдого тела это условие выполняется, т.к. расстояния между частицами такого тела не меняются при любых воздействиях. В рамках же классической механики m = const.

Перейдём теперь к векторной записи. Для симметричных однородных тел, ось вращения которых совпадает с осью симметрии, вектор $\vec{L}$ будет направлен так же, как вектор $\vec{\omega}$, а вектор $\vec{M}^{\text{вн}}$ – как вектор $\vec{\varepsilon}$, поскольку момент инерции тела скалярная величина:

$$\vec{L} = I\vec{\omega},$$

$$\vec{M}^{\text{вн}} = I\vec{\varepsilon}.$$

В дальнейшем для упрощения записи индекс z можно опускать при величине I.

Для нахождения момента инерции тела его разбивают на малые элементы объемом dV, определяют их массы и расстояния до оси вращения, затем суммируют произведения масс элементов на квадраты их расстояний до оси вращения:

$$I = \sum_{i=1}^{n} m_i R_i^2 \tag{22}$$

или в интегральной форме

$$I = \int_V dmR^2 = \int_V \rho R^2 dV, \qquad (23)$$

где $\rho = \dfrac{dm}{dv}$ - плотность тела, V - его объем.

Моменты инерции твердых тел найдены и сведены в таблицы.

1. Момент инерции тонкого однородного кольца массы m и радиуса R относительно оси, перпендикулярной его плоскости и проходящей через центр кольца:

$$I = \sum_{i=1}^{n} m_i R_i^2 = R^2 \sum_{i=1}^{n} m_i = mR^2 \qquad (24)$$

2. Момент инерции однородного диска (цилиндра) массы m и радиуса R относительно оси, проходящей через центр диска и перпендикулярной его плоскости:

$$I = \frac{mR^2}{2}. \qquad (25)$$

3. Момент инерции шара массы m и радиуса R относительно оси симметрии:

$$I = \frac{2}{5} mR^2. \qquad (26)$$

4. Момент инерции однородного стержня массы m и длины ℓ относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через его середину:

$$I = \frac{1}{12} m\ell^2. \qquad (27)$$

5. Момент инерции стержня массы m и длины ℓ относительно оси, перпендикулярной стержню и проходящей через один из его концов

$$I = \frac{1}{3} m\ell^2. \qquad (28)$$

Для нахождения момента инерции тела относительно оси, не проходящей через центр масс (рис. 4.6), применяется теорема Штейнера:

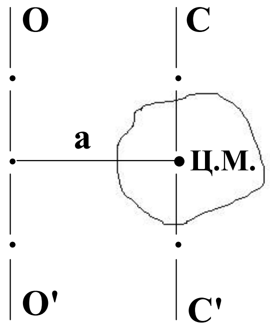

Рис. 4.6

Момент инерции I тела относительно оси O′O равен моменту инерции I_0 тела относительно параллельной ей оси CC′, проходящей через центр масс, сложенному с произведением массы m этого тела на квадрат расстояния a между осями:

$$I = I_0 + ma^2 \tag{29}$$

ОПИСАНИЕ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

Маятник Обербека, изображенный на рис.4.7, представляет собой крестовину из четырех стержней 1, ввернутых в валик, насаженный на горизонтальную ось. На стержнях имеются передвигающиеся шайбы 2, которые можно укреплять винтами на различных расстояниях от оси вращения. На ту же ось насажен второй валик 3, на который наматывается нить 4, перекинутая через блок 5. К нити привязана чашка 6 для груза 7, причем сила тяжести чашки уравновешивает силу трения в подшипниках маятника. Под действием груза 7, опускающегося вдоль стойки со шкалой 8, нить 4, разматываясь, приводит маятник в равноускоренное вращательное движение. Пуск маятника осуществляют пусковой рукояткой 9, которая, будучи в одном крайнем положении, удерживает его в состоянии покоя, а при переводе в другое положение освобождает маятник, одновременно нажимая на клавишу выключателя 10 и тем самым включая электрический секундомер, находящийся в составе измерительной приставки 11. Остановка секундомера происходит автоматически, когда чашка 6 с грузом в конце своего пути ударяет о клавишу концевого выключателя 12, положение которого совмещено с нулевым делением шкалы 8.

В ходе эксперимента определяют линейное ускорение a груза, под действием которого приходит во вращение маятник. Расчет a проводят по измеренному расстоянию S, проходимому грузом за время t:

$$a = \frac{2S}{t^2}. \tag{30}$$

Угловое ускорение ε маятника определяют, используя его связь с линейным ускорением

$$\varepsilon^* = a/r = 2a/d \ , \tag{31}$$

где a - линейное ускорение груза, а также точек поверхности валика, на который намотана нить;

r и d - соответственно радиус и диаметр валика.

Полученное на основе эксперимента угловое ускорение ε^* маятника должно совпадать со значением ε, рассчитанным согласно основному закону вращательного движения через момент силы (34) и момент инерции, который можно найти следующим образом.

При расчете момента инерции маятника Обербека относительно его оси вращения учитывают, что он состоит из нескольких частей, поэтому согласно (22)

$$I = I_0 + 4I_1, \tag{32}$$

где I_0 – момент инерции крестовины маятника без шайб;

I_1 – момент инерции каждой из четырех шайб.

Считая шайбы материальными точками соотношение (32) можно переписать в виде:

$$I = I_0 + 4m_0 r_0^2 \ , \tag{33}$$

где m_0 - масса шайбы;

r_0 - расстояние от центра шайбы до оси вращения.

Для нашей установки:

$$I_0 = (3{,}290 \pm 0{,}005) \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$m_0 = (142{,}0 \pm 0{,}5) \text{г},$$

$$m_0 = (217{,}0 \pm 0{,}1) \text{мм}.$$

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1. Экспериментальное определение углового ускорения.

1. Приводят в исходное положение маятник Обербека, вращая его так, чтобы нить 4 наматывалась на валик 3 и поднимала чашку 6 с грузом до отметки на шкале 3 (рис 4. 7).Пусковую рукоятку 9 переводят в положение "А" (стоп) для удержания маятника в состоянии покоя.

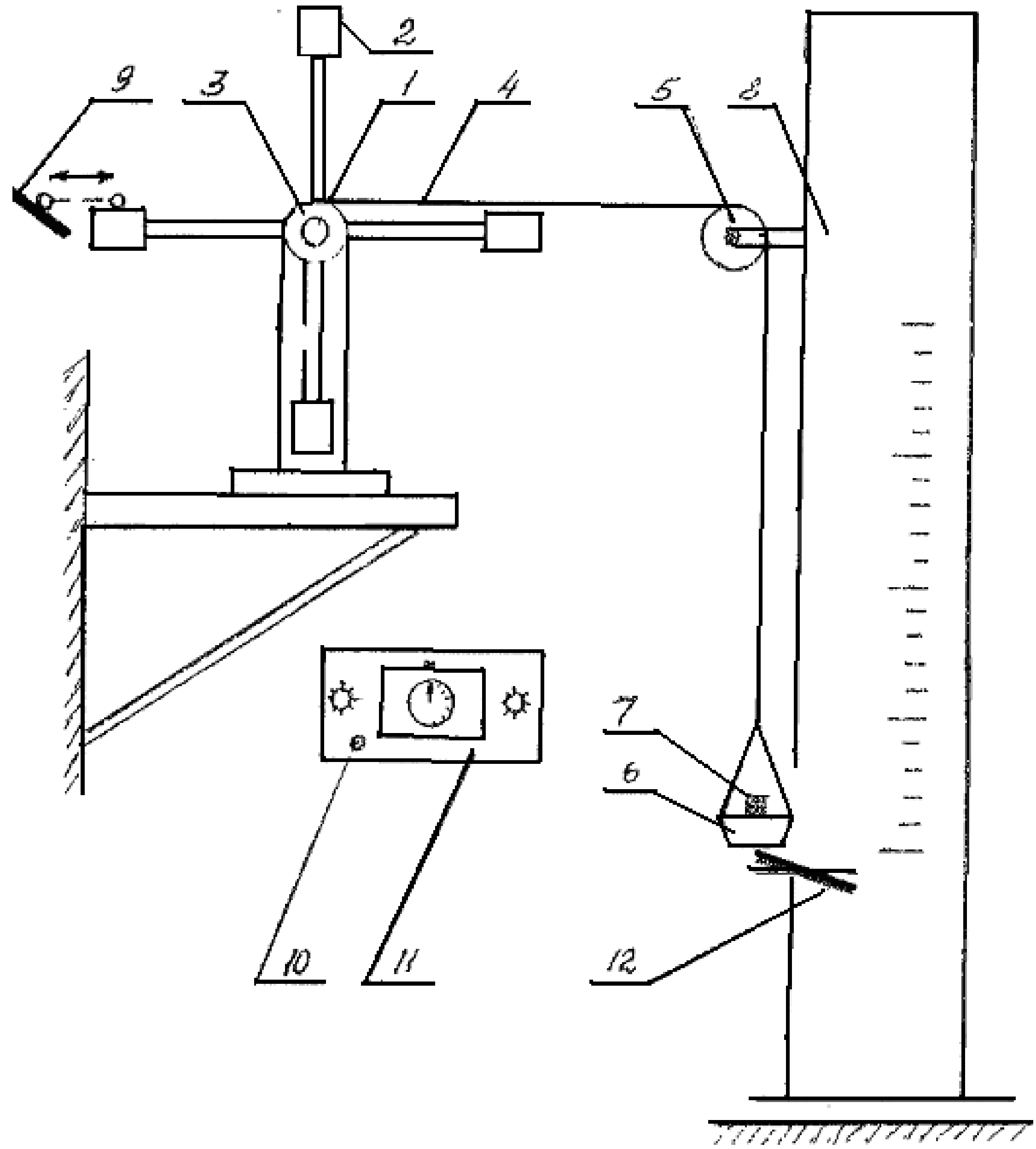

Рис. 4.7

2. Готовят к работе электросекундомер: включают измерительную приставку 11 в электрическую сеть, на панели приставки загорается сигнальная лампочка $Л_1$. Ключ 12 ставят в положение "В", загорается сигнальная лампочка $Л_2$. Нажатием на рычаг "сброс" устанавливают нулевое положение электросекундомера.

3. Переводят рукоятку 9 в положение "В" (пуск), маятник приходит в движение, одновременно автоматически включается электросекундомер.

Отключение электросекундомера происходит автоматически ударом чашки 6 о ключ K_2.

4. Эксперимент по определению t повторяют 5 раз, находят $t_{ср}$.

5. Штангенциркулем измеряют диаметр d валика 3 (один раз). Масса груза m и путь S указаны на установке.

6. Линейное ускорение a вычисляют по формуле

$$a_{ср} = \frac{2S}{t_{ср}^2}. \qquad (34)$$

7. Угловое ускорение ε^* определяют по формуле

$$\varepsilon_{ср}^* = {a_{ср}}/{r} = {4S}/{t_{ср}^2 d}, \text{ где } r = d/2. \qquad (35)$$

Результаты заносят в табл. 4.3.

Таблица 4.3

№ измерения	m, кг	S, м	d, м	t, с	a, $м/с^2$	ε^*, $с^{-2}$
1						
2						
3						
4						
5						
Среднее значение						

<u>**Задание 2.**</u> Теоретический расчет углового ускорения.

1. Угловое ускорение ε рассчитывают по основному закону динамик вращательного движения твердого тела

$$\varepsilon = M/I.$$

2. Вращающий момент M рассчитывают по формуле $M = F \cdot r = m(g - a)r$, которая с учетом соотношения r=d/2 запишется в виде

$$M = md(g - a)/2. \tag{36}$$

3. Момент инерции I определяют согласно (33). По результатам расчетов ε и ε^* делают выводы.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

<u>Задание 1</u>

1. Относительную ошибку определения углового ускорения ε^* вычисляют по относительным ошибкам измерения величин S, d, t по формуле

$$\varepsilon^* = \sqrt{(\delta S)^2 + (\delta d)^2 + (2\delta t)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S_{ср}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d_{ср}}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta t}{t_{ср}}\right)^2}\ . \tag{37}$$

2. Оценивают приборные ошибки прямых измерений величин S, d, t по данным нашей установки

$$S=1\ м;\ \Delta S = 0{,}01\ м;\ \delta S = 1\%;$$

$$d=34\ мм;\ \Delta d = 0{,}05\ мм;\ \delta d = 0{,}15\%;$$

$$t=10\ с;\ \Delta t = 0{,}1\ с;\ 2\delta t = 2\%.$$

Относительными ошибками δd и δS пренебрегают вследствие их малости.

3. Оценивают абсолютную ошибку определения времени t

$$\Delta t = \sqrt{(\Delta t_{случ})^2 + (\Delta t_{сист})^2}\ . \tag{38}$$

Определяющей здесь является случайная ошибка, следовательно;

$$\Delta t = \Delta t_{сл} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta t_i)^2}{n(n-1)}}\ . \tag{39}$$

4. Абсолютную ошибку определения углового ускорения ε^* рассчитывает по формуле

$$\Delta\varepsilon^* = \varepsilon_{ср}\delta\varepsilon^*, \tag{40}$$

где

$$\delta\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{2\Delta t_{сл}}{t_{ср}}\right)^2} = \frac{2\Delta t_{сл}}{t_{ср}} = \frac{2}{t}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\Delta t_i)^2 / n(n-1)}.$$

Результаты измерения времени t_i заносят в табл. 4.4, вычисляют $\delta\varepsilon^*$, $\Delta\varepsilon^*$.

Таблица 4.4

№ измерения	t_i, с	$\Delta t_i = t_i - t_{ср}$	Δt^2_i	$\delta\varepsilon^*$	$\Delta\varepsilon^*$
1					
2					
3					
4					
5					
	$t_{ср}$		$\sum_{i=1}^{n}(\Delta t_i)^2$		

Окончательный результат записывают в виде

$$\varepsilon^* = (\varepsilon^*_{ср} \pm \Delta\varepsilon^*)\ с^{-2}.$$

<u>Задание 2.</u>

1. Согласно (36) и (33) угловое ускорение ε теоретически определяют по формуле

$$\varepsilon = M / I = \frac{m(g-a)d/2}{I_0 + 4m_0 r_0^2}.$$

2. Относительную ошибку определения углового ускорения ε вычисляет по формуле:

$$\delta\varepsilon = \sqrt{(\delta M)^2 + (\delta I)^2} = \sqrt{(\delta m)^2 + [\delta(g-a)]^2 + (\delta d)^2 + (\delta I)^2}\ . \qquad (41)$$

3. Оценивают приборные ошибки прямых измерений величин m, g, a, d, которые для нашей установки равны

m=100 г, $\Delta m = 0{,}1$ г; $\delta m = \Delta m / m$;

d=34 мм, $\Delta d = 0{,}05$ мм; $\delta d = \Delta d / d$;

g=9/8 $м/с^2$, $\Delta g = 0{,}05$; $\delta(g-a) = \frac{\sqrt{(\Delta g)^2 + (\Delta a)^2}}{g-a} = \frac{\Delta g}{g-a}$, т.к. a<<g.

4. Относительными ошибками величин m, d пренебрегают вследствие их малости, и равенство записывают в виде

$$\delta\varepsilon = \sqrt{(\delta g)^2 + (\delta I)^2}\ , \qquad (42)$$

где

$$\delta I = \frac{\sqrt{(\Delta I_0)^2 + \left[\Delta\left(4m_0 r_0^2\right)^2\right]}}{I_0 + 4m_0 r_0}\ . \qquad (43)$$

5. По данным нашей установки рассчитывают

$I_0 = 3{,}29 \cdot 10^{-3}$ $кг \cdot м^2$; $\Delta I_0 = 5{,}0 \cdot 10^{-6}$ $кг \cdot м^2$; $\delta I_0 = \frac{\Delta I_0}{I_0}$;

$m_0 = 142$ г; $\Delta m_0 = 0{,}1$ г; $\delta m_0 = \frac{\Delta m_0}{m_0}$;

$r_0 = 217$ мм; $\Delta r_0 = 1$ мм; $2\delta r_0 = 2\frac{\Delta r_0}{r_0}$;

$$\Delta\left(4m_0 r^2\right) = 4m_0 r_0^2 \delta\left(4m_0 r_0^2\right); \qquad (44)$$

$$\delta\left(4m_0 r_0^2\right) = \sqrt{(\delta m_0)^2 + (2\delta r_0)^2}\ . \qquad (45)$$

Величиной ΔI_0 в равенстве (43) можно пренебречь. Получим

$$\delta I = \frac{\Delta\left(4m_0 r_0^2\right)}{I_0 + 4m_0 r_0^2} \ . \qquad (46)$$

6. По формуле (42) вычисляют $\delta\varepsilon$

7. Окончательный результат записывают в виде

$$\varepsilon = \left(\varepsilon_{ср} \pm \Delta\varepsilon\right) \ c^{-2},$$

где

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{ср}\delta\varepsilon .$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова цель работы?

2. Что называется моментом силы относительно точки и относительно оси, в каких единицах он измеряется и что характеризует?

3. Как записывается основной закон динамики при поступательном и вращательном движении?

4. Что называется моментом импульса относительно точки и оси и в каких единицах он измеряется?

5. Как определяется момент инерции материальной точки и твердого тела, в каких единицах он измеряется?

6. Как в работе определяется момент силы, линейное, и угловое ускорение, момент инерции маятника Обербека?

7. Каков порядок выполнения работы?

8. Теорема Штейнера и её применение.