КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ.

ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

КУЙБЫШЕВ 1977

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ.

ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

КУЙБЫШЕВ 1977

УДК 531.011 531/534

Составители:

ст. преп. *Л. А. Крюкова,* ст. преп. *А. М. Кожевников,* ас. *Ю. Л. Ратис,* ас. *Л. И. Федосова*

Под редакцией доц. *А. И. Федосова*

Утверждена редакционно-издательским советом института 9.01.1976 г.

Работа №2

В механике движением называется изменение положения тела в пространстве с течением времени. Положение тела в пространстве рассматривается относительно других тел, условно принимаемых за неподвижные.

Тело или система тел, относительно которых определяется положение остальных тел, называется системой отсчета.

В качестве пространственной системы отсчета берется произвольное твердое тело, с которым связывают координатные оси. Наиболее часто применяют декартову систему координат (рис. 1). Положение каждой точки в ней можно задать тремя числами: координатами x, y, z, которые являются проекциями радиуса-вектора $\vec{z}$ на координатные оси. Очевидно, что

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k},$$

где $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{z}$ — координатные орты.

При движении материальной точки ее координаты изменяются с течением времени. Любое движение может быть задано в виде следующих 3-х скалярных уравнений:

$$x = f_1(t);$$
$$y = f_2(t);$$
$$z = f_3(t)$$

или одного векторного $\vec{r} = \vec{r}(t)$ называемых кинематическими уравнениями движения.

Материальная точка при своем движении описывает некоторую линию, которая называется траекторией.

Пусть точка движется по некоторой траектории и в момент времени t_1 находится в точке M_1, с радиус-вектором $\vec{r}_1$, а в момент времени t_2 в точке M_2 с радиус-вектором r_2 (рис. 2). Длиной пути ΔS называют дугу $M_1M_2=\Delta\vec{r}$. Если уменьшить Δt, уменьшая тем самым $\Delta\vec{r}$, то при достаточно

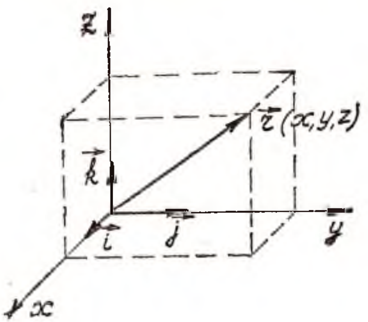

Рис. 1

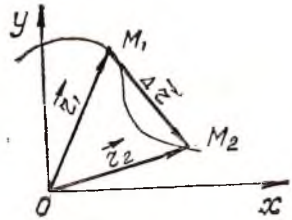

Рис. 2

-малых значениях Δt, отношение $\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}$ практически перестает изменятся как по величине, так по направлению. Предел этого отношения называется скоростью движущейся точки в момент времени t:

$$v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}=\frac{d\vec{r}}{dt}=\dot{\vec{r}}.$$

С уменьшением Δt модуль элементарного перемещения $|\Delta\vec{r}|$ и элементарный путь ΔS мало отличаются друг от друга, т.е.

$$\lim_{\Delta t\to 0}\frac{|\Delta\vec{r}|}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t} \qquad \text{и } v=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{ds}{dt}.$$

Величина, характеризующая изменение скорости во времени называется ускорением

$$\vec{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}=\frac{d\vec{v}}{dt}=\ddot{\vec{r}}, \qquad \frac{d^2s}{dt^2}=|\vec{a}|.$$

В основе классической механики лежат три закона динамики, сформулированные Ньютоном.

Первый закон. Существуют системы отсчета, в которых тело находится в покое или движется равномерно и прямолинейно, если действие на него других всех тел компенсировано. Такие системы отсчета называются инерционными.

Второй закон устанавливает зависимость ускорения от причины, вызывающей его и от свойств самого тела, т. е. от силы и массы. Сила дает количественную характеристику и направления воздействия, оказываемого на данное тело другими телами. Масса является мерой инертности тела в поступательном движении и служит динамической характеристикой. Второй закон Ньютона формулируется следующим образом: ускорение всякого тела прямо пропорционально действующей на него силе $\vec{F}$ и обратно пропорционально массе тела m.

Направление ускорения всегда совпадает с направлением результирующей всех сил, действующих на тело:

$$\vec{a} = k\frac{\vec{F}}{m},$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц, входящих в формулу (в системе СИ $k = 1$).

Второй закон Ньютона можно записать в ином виде:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}, \text{ то } \vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \text{ и } \vec{F}dt = d(m\vec{v}).$$

Векторная величина $m\vec{v} = \vec{P}$ называется импульсом или количеством движения тела. Импульс системы тел $\vec{P} = \sum_{i=1}^{n} m_i\vec{v}_i$.

Второй закон Ньютона, записанный через импульс, имеет вид

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}.$$

Действия тел друг на друга носят характер взаимодействия и если тело N_1 действует на тело N_2 с силой F_{21}, то тело N_2 действует на тело N_1 с силой F_{12} (рис. 3). Опытным путем установлено, что эти силы равны по величине и противоположны по направлению:

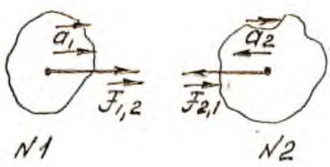

Рис. 3

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

Третий закон Ньютона отражает эти факты. Всякое действие тел друг на друга носит характер взаимодействия: силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела всегда направлены по одной прямой, равны по величине и противоположны по направлению.

Все три закона Ньютона справедливы лишь в инерциальной системе координат. Для системы тел, изолированной от действия внешних сил справедлив закон сохранения импульса:

вектор импульса замкнутой системы тел с течением времени не изменяется

$$\frac{dP}{dt} = 0, \quad \vec{P} = \text{const}.$$

Характеристикой действия силы, связанной с перемещением тел является работа. Элементарная работа равна скалярному произведению силы на перемещение

$$dA = \vec{F}d\vec{r} = F_r dr,$$

где F_r — проекция силы, вызывающей перемещение на направление перемещения. Если известен закон изменения силы, то полная работа на произвольном участке пути найдется интегрированием

$$A = \int_{S_1}^{S_2} F_r dS.$$

Работа — скалярная величина, это одна из мер передаваемого движения. Кинетическая энергия обусловлена скоростью движущегося тела и измеряется той работой, которую способно совершить это тело при его торможении до остановки:

$$dE_к = \vec{F}d\vec{r} = m\vec{a}d\vec{r} = m\frac{d\vec{v}}{dt}d(\vec{v}dt);$$

$$E = \int dE_к = -\int_v^0 mvdv = \frac{mv^2}{2}.$$

Таким образом, кинетическая энергия есть функция состояния ее движения. Потенциальной энергией называется физическая величина, убыль которой для 2-х произвольных точек поля равна работе, совершаемой полем при перемещении тела из начальной точки в конечную независимо от пути перехода. Начало отсчета потенциальной энергии выбирается произвольно.

В общем случае тело может обладать одновременно и кинетической и потенциальной энергией. Сумма их образует полную механическую энергию. Полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют только консервативные силы, остается постоянной, т. е.

$$E_к + U = \text{const}.$$

В этом и заключается существо основного закона механики — закона сохранения механической энергии.

Если в замкнутой системе действуют так же неконсервативные силы (например, силы трения), то происходит рассеяние энергии:

$$dE_к = dA_{дис.} - dU.$$

Использование закона сохранения энергии вместе с законом сохранения импульса позволяет решить многие задачи механики. Рассмотрим применение этих законов к исследованию столкновения двух тел шаровой формы. Столкновение — это взаимодействие тел при их сближении.

При соударении тел происходит их деформация, причем часть кинетической энергии переходит в потенциальную энергию упругой деформации и в другие виды энергий. Если после соударения внутренняя энергия тел не меняется, то соударение называется абсолютно упругим. При этом механическая энергия тел не переходит в другие, немеханические виды энергии.

Абсолютно неупругий удар характеризуется тем, что кинетическая энергия взаимодействующих тел полностью или частично превращается во внутреннюю энергию, потенциальная энергия деформации не возникает, а после удара столкнувшиеся тела имеют одинаковые скорости.

Рассмотрим упругое соударение двух тел с массами m_1 и m_2. Обозначим скорости тел до и после удара соответственно v_{01}; v_{02}; v_1; v_2. Запишем уравнения сохранения импульса и энергии соударяющихся тел

$$m_1\vec{v}_{10} + m_2\vec{v}_{20} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 \;;$$

$$\frac{m_1\vec{v}_{10}^{\,2}}{2} + \frac{m_2\vec{v}_{20}^{\,2}}{2} = \frac{m_1\vec{v}_1^{\,2}}{2} + \frac{m_2\vec{v}_2^{\,2}}{2}.$$

Преобразуем эти уравнения

$$m_1(\vec{v}_{10} - \vec{v}_1) = m_2(\vec{v}_2 - \vec{v}_{20});$$

$$m_1(\vec{v}_{10} - \vec{v}_1)(\vec{v}_{10} + \vec{v}_1) = m_2(\vec{v}_2 - \vec{v}_{20})(\vec{v}_2 + \vec{v}_{20})\,.$$

Если удар центральный, то скорости шаров после соударения будут направлены вдоль той же прямой, вдоль которой двигались центры шаров перед ударом. Решая эти уравнения относительно v_1 и v_2 можно найти

$$\vec{v}_1 = \frac{2m_2\vec{v}_{20} + (m_1 - m_2)\vec{v}_{10}}{m_1 + m_2};$$

$$\vec{v}_2 = \frac{2m_1\vec{v}_{10} + (m_2 - m_1)\vec{v}_{20}}{m_1 + m_2}.$$

Если спроектировать векторы $\vec{v}_{10}$, $\vec{v}_1$, $\vec{v}_2$, $\vec{v}_{20}$ на направление вектора $\vec{v}_{10}$, то получим скалярное значение для v_1 и v_2:

$$v_1 = \frac{\pm 2m_2v_{20} + (m_1 - m_2)v_{10}}{m_1 + m_2};$$

$$v_2 = \frac{2m_1v_{10} \pm (m_2 - m_1)v_{20}}{m_1 + m_2}.$$

Знак — соответствует движению шаров навстречу друг другу, знак + — случаю, когда первый шар догоняет второй.

Нетрудно увидеть, что, если массы шаров равны $m_1 = m_2$, то

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_{20} \text{ и } \vec{v}_2 = \vec{v}_{10},$$

т. е. при соударении шары обмениваются скоростями.

Рассмотрим теперь абсолютно неупругий удар.

Пусть два шара массами m_1 и m_2 имели скорости до удара $\vec{v}_{10}$ и $\vec{v}_{20}$. На основании закона сохранения импульса системы тел

$$m_1\vec{v}_{10} + m_2\vec{v}_{20} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2,$$

но при неупругом ударе оба тела после соударения движутся с одинаковой скоростью $\vec{v} = \vec{v}_1 = \vec{v}_2$ т. е.

$$m_1\vec{v}_{10} + m_2\vec{v}_{20} = (m_1 + m_2)\vec{v}.$$

Так как векторы $\vec{v}_{10}$ и $\vec{v}_{20}$ направлены вдоль одной и той же прямой, то вектор $\vec{v}$ так же направлен вдоль этой прямой, а его численное значение

$$v = \left| \frac{m_1v_{10} \pm m_2v_{20}}{m_1 + m_2} \right|.$$

Кинетическая энергия при неупругом столкновении уменьшается. До удара она равна

$$E_{к_0} = \frac{m_1 \vec{v}_{10}^{\,2}}{2} + \frac{m_2 \vec{v}_{20}^{\,2}}{2},$$

а после соударения

$$E_к = \frac{(m_1 + m_2)\,\vec{v}^{\,2}}{2}$$

изменение кинетической энергии

$$\Delta E_к = E_к - E_{к_0}.$$

Это изменение кинетической энергии идет на работу, совершаемую при неупругой деформации шаров во время удара, которая выделяется в виде тепла и ведет к нагреванию шаров.

ЗАДАНИЕ № 1

СТРОБОТАХОМЕТР. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ

Приборы и принадлежности: установка для определения скорости пули, стробохометр, линейка до 50 см, пульки 5 шт.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Установка для определения скорости пули представлена на рис. 4. Для определения скорости вращения дисков в данной работе используется стробоскопический эффект, который наблюдается при освещении поверхности вращающихся дисков мигающей лампой. Когда частота оборотов вращающихся дисков $\nu_д$ и частота $\nu_л$ вспышек импульсной лампы стробохометра оказываются кратными, диск при визуальном наблюдении кажется неподвижным. Для удобства наблюдения на диске сделана метка — яркая линия, проведенная вдоль радиуса. Если $\frac{\nu_д}{\nu_л} = n$, где n — целое число, то на диске,

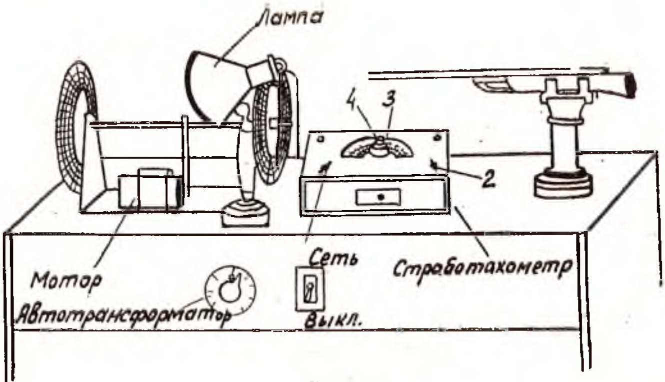

Рис. 4

кажущимся неподвижным, видна одна линия. Максимальная частота вспышек лампы, при которой наблюдается этот эффект, очевидно, равна частоте оборотов диска (за время между двумя вспышками линия возвращается в прежнее положение). Если $\frac{\nu_л}{\nu_д} = n$, где n — целое число, т. е. частота вспышек лампы больше частоты оборотов диска и кратна ей, то на диске, кажущимся неподвижным, при визуальном наблюдении видим вместо одной—n линий. В этом случае $\nu_д = \frac{\nu_л}{n}$.

Если частота вспышек лампы больше или меньше частоты оборотов диска, но не кратна ей, то диск кажется вращающимся, причем скорость вращения метки определяется отношением $\frac{\nu_л}{\nu_д}$.

Частоту вспышек лампы можно менять с помощью регулятора 3 (грубо) и регулятора 4 (плавно) настройки стробо-тахометра, причем величину ее можно читать непосредственно по одной из шкал прибора в зависимости от измеряемого диапазона. Диапазон частоты устанавливается переключателем 2 на передней стенке прибора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с установкой (см. рис. 4). Проверить правильность крепления дисков.
2. Включить тумблер «сеть» на стенке стола.

3. Перевести переключатель 1 из положения «выкл» в положение «сеть». Прогреть прибор в течение 3—4 минут.

4. Вращая регулятор автотрансформатора, задать произвольную скорость вращения мотора.

5. Поставить переключатель 1 в положение «лампа».

6. С помощью регуляторов 3 и 4 найти такую частоту вспышек лампы, при которой на диске видна одна неподвижная метка. Убедиться, что наблюдаемая картина соответствует условию $\nu_л = \nu_д$ (если $\nu_л$ немного больше $\nu_д$, то метка кажется вращающейся в обратную сторону).

7. Записать показание строботахометра и выключить лампу, поставив переключатель 1 в положение «выкл».

8. Зарядить винтовку и выстрелить вдоль оси вращающихся дисков.

9. Остановить вращающиеся диски (выключить мотор). Найти пробоины на дисках, определить их угловое смещение и оттенить карандашом.

10. Повторить в указанной последовательности опыт 5 раз при одной и той же скорости вращения в пределах 1200—2000 об/мин. Результаты измерений записать в таблицу.

№ изм.	Положение пробоин на диске 1 φ_0	Положение пробоин на диске 2 φ_1	Смещение пробоин $\Delta\varphi$(гр)	Расстояние между диском l, м	Скорость вращения мотора n, об/мин.	Скорость полета пули v, м/с	Δv_i	Δv_i^2

11. Выключить установку.

12. Измерить линейкой расстояние между дисками и внести данные в таблицу.

13. Вычислить скорость v по формуле

$$v = l\frac{6n}{\Delta\varphi}, \tag{1}$$

где l — расстояние между дисками, м;

n — угловая скорость, об/мин;

$\Delta\varphi$ — угол °C;

v — скорость, м/с.

14. Вычислить среднюю скорость $\bar{v}$, относительную и абсолютную погрешности ε_v и Δv по формулам:

$$\bar{v} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} v_i}{n};\ n = 5; \tag{2}$$

$$\Delta v = t_{\alpha,n}\cdot\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}(v_i - \bar{v})^2}{n(n-1)}}, \tag{3}$$

где $t_{\alpha,n}$ — коэффициент Стьюдента

$\alpha = 0{,}97;$ $$\varepsilon_{\bar{v}} = \frac{\Delta\bar{v}}{\bar{v}}. \tag{4}$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется средней скоростью тела?
2. Что такое мгновенная скорость тела?
3. Объясните принцип работы стробoтахометра.
4. Как связаны угловая и линейная скорости точки, движущейся по окружности?
5. Какими эффектами мы пренебрегаем при расчете скорости пули?
6. Запишите основную расчетную формулу.
7. Каковы диапазоны шкал стробoтахометра, используемого в данной работе?
8. Каковы характерные скорости пули?
9. Как изменятся результаты, если изменить погрешности, вызываемые сопротивлением воздуха, конечностью размеров установки, жесткостью дисков?
10. Опишите схему обработки результатов измерений.

ЗАДАНИЕ № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ И СРЕДНЕЙ СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ШАРОВ

Описание прибора

При выполнении измерений собирается схема (рис. 5). Два равных шара A и B подвешены на проводящих нитях. Для сохранения их в отклоненном положении установлены электромагниты M_1 и M_2, питающиеся поочередно от батареи ε_2 через перекидной ключ K_2. Для определения времени соударения шаров собирается цепь, состоящая из источника питания ε_1; конденсатора C; перекидного ключа K_1 и баллистического гальванометра G с ключом K_3.

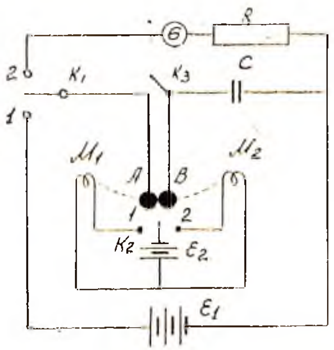

Рис. 5

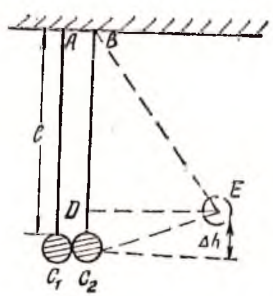

Рис. 6

Если отвести шар 2 от положения равновесия на угол α (рис. 6), а затем отпустить его, то шары столкнутся. Считая удар в этом случае абсолютно упругим и, используя формулу

$$v = \left| \frac{m_1 v_{10} \pm m_2 v_{20}}{m_1 + m^2} \right|$$

для изменения скорости 1-го шара при ударе получим:

$$\Delta v = v_2. \tag{1}$$

Если измерить время взаимодействия шаров τ, то из закона изменения импульса

$$F\tau = m\Delta v \tag{2}$$

можно определить среднюю силу взаимодействия шаров при соударении

$$F = \frac{mv^2}{\tau}. \tag{3}$$

Скорость второго шара в момент соударения можно определить из опыта, используя формулу

$$v_2 = 2\sin\frac{\alpha}{2}\sqrt{gl}\ , \tag{4}$$

где l — длина нити;

α — угол отклонения второго шара от положения равновесия (для данной установки угол α — величина постоянная).

Время соударения определяется по разряду конденсатора. Зная начальный заряд конденсатора q_0 и количество электричества q, протекшего через гальванометр за время удара, можно вычислить время соударения по формуле:

$$\tau = CR\ln\frac{q_0}{q_0-q}\ ,$$

так как отклонения n указателя баллистического гальванометра пропорциональны заряду, протекшему через рамку, то

$$\tau = cR\ln\frac{n_0}{n_0-n}\ , \tag{5}$$

где n_0 — показание гальванометра при полном разряде конденсатора;

n — при частичном разряде конденсатора за время соударения шаров.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить обмотку электромагнита M_1 (ключ K_2 в положении 1) и подвести к нему шар А.

2. Поставить ключ K_1 в положение 1 и, замкнув ключ K_3, зарядить конденсатор.

3. Перевести ключ K_1 в положение 2 и записать величину отброса светового зайчика гальванометра — n_0. Повторить эту

операцию 5 раз, а результаты измерений n_0 записать в таблицу.

№ измерения	C	R	α	n_0	Δn_{0i}	Δn_{0i}^2	n	Δn_i	Δn_i^2	$\bar{\tau}$	$\bar{F}$
1											
2											
3											
4											
5											
Среднее значение											

4. Вновь зарядить конденсатор, после чего ключ K_3 разомкнуть, а ключ K_1 поставить в положение 2.

5. Быстро перебросить ключ K_2 в положение 2. После соударения шар А остановится, а шар В отклонится к электромагниту M_2. За время соударения конденсатор С частично разрядится и гальванометр даст отброс n.

6. Операции 4 и 5 повторить 5 раз и результаты занести в таблицу. Вычислить значения $\bar{\tau}$ и $\bar{F}$.

7. Вычислить абсолютные погрешности времени и силы соударения шаров по формулам:

$$\Delta\tau = \frac{CR}{\bar{n}_0 - \bar{n}}\sqrt{\left(\frac{\bar{n}}{\bar{n}^0}\right)^2 \Delta n_0^2 + \Delta n_0^2 + \Delta n^2}\,; \quad \Delta F = \frac{mv_2}{\bar{\tau}^2}\Delta\tau.$$

Погрешности Δn_0 и Δn найти для $\alpha = 0{,}95$, используя коэффициенты Стьюдента:

$$\Delta n_0 = \sigma_{\bar{n}_0} \cdot t\,(\alpha,\ N), \text{ где } \sigma_{\bar{n}_0} = \sqrt{\frac{\sum\limits^{N} (\Delta n_{0i})^2}{N\,(N-1)}}$$

(при выводе формулы для ΔF учтено, что погрешности Δm, $\Delta\alpha$ и Δl на порядок меньше погрешности $\Delta\tau$).

8. Найти относительные погрешности

$$\varepsilon_\tau = \frac{\Delta\tau}{\bar\tau}; \ \varepsilon_F = \frac{\Delta F}{\bar F}.$$

9. Окончательный результат записать в виде:

$$\tau = \bar\tau \pm \Delta\tau; \ F = \bar F \pm \Delta F.$$

ЛИТЕРАТУРА

Кортнев А. В., Рублев Ю. В., Куценко А. Н. Практикум по физике. М., «Высшая школа», 1963.

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1, М., «Наука», 1970. Под редакцией В. И. Ивероновой. Физический практикум, механика и молекулярная физика. М., «Наука», 1967.

Яворский Б. М., Детлаф А. А., Милковская Л. Б. Курс физики. Т. 1, М., «Высшая школа», 1963.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите законы сохранения энергии и импульса для абсолютно упругого удара.
2. Чем отличается упругий удар от неупругого?
3. От чего зависит средняя сила соударения шаров?
4. От чего зависит длительность соударения упругих шаров?
5. Как происходит перераспределение энергии при абсолютно неупругом ударе?
6. Получите формулу для изменения скорости одного из шаров при ударе.
7. Укажите факторы, влияющие на точность значения силы, получаемой в данной работе.
8. Как определяется доверительный интервал?

ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ. МОМЕНТ СИЛЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ТОЧКИ

Пусть О — точка, относительно которой определяется момент силы $\bar F$ (рис. 7), $\bar r$ — радиус-вектор, проведенный из О в точку приложения силы А. Моментом силы $\vec F$ относительно точки О называется физическая величина, равная векторному произведению радиуса-вектора $\vec r$ на силу $\vec F$:

$$\vec M = (\vec r\ \vec F).$$

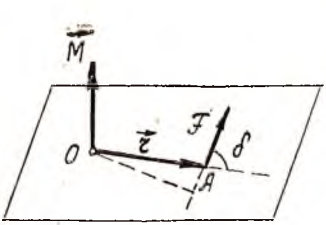

Рис. 7

Вектор $\vec{M}$ перпендикулярен плоскости, в которой лежат вектора $\vec{F}$ и $\vec{r}$, его направление определяется правилом векторного произведения (правилом правого винта). Модуль момента силы равен

$$M = rF\sin\delta, \qquad (2)$$

где δ — угол между радиус-вектором и силой.

В декартовой системе координат момент силы может быть вычислен по формуле

$$\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x & y & z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} \qquad (3)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — орты координатных осей;

x, y, z — координаты точки А;

F_x, F_y, F_z — проекции силы $\vec{F}$ на координатные оси.

МОМЕНТ СИЛЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ

Пусть дана произвольная ось l и сила $\vec{F}$. Моментом M_l силы $\vec{F}$ относительно оси l называется проекция на эту ось момента силы относительно любой точки этой оси

$$M_l = M\cos\varphi,$$

где φ — угол между моментом силы $\vec{M}$ и осью l (рис. 8).

Проекция момента силы на ось может быть найдена как скалярное произведение единичного вектора оси $\vec{l}_0$ и момента $\vec{M}$

$$M_l = \vec{l}_0(\vec{r}\,\vec{F}). \qquad (4)$$

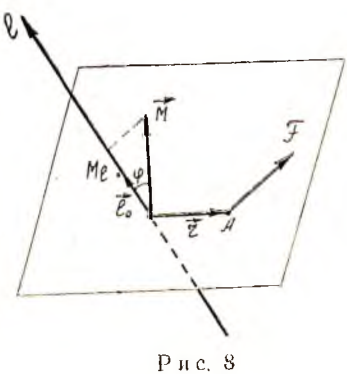

Рис. 8

Смешанное произведение трех векторов выражается через определитель третьего порядка

$$M_l = \begin{vmatrix} \cos\alpha, & \cos\beta, & \cos\gamma \\ x, & y, & z \\ F_x, & F_y, & F_z \end{vmatrix}, \qquad (5)$$

где α, β, γ — углы, которые ось l составляет с координатными осями (направляющие углы).

Известно, что смешанное произведение равно нулю, когда все три вектора лежат в одной плоскости, следовательно, момент силы относительно оси равен нулю, когда ось и сила лежат в одной плоскости. Отсюда следует: если линия действия силы пересекает ось или параллельна ей, то момент силы относительно этой оси равен нулю.

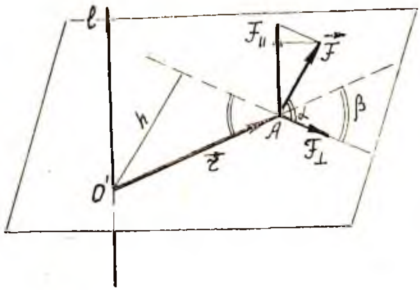

Рис. 9

Момент силы относительно оси может быть вычислен следующим образом: проведем через A (точку приложения силы) плоскость перпендикулярную оси, которая пересечет ось в точке O^1 (рис. 9). Силу разложим на две составляющих: параллельную и перпендикулярную оси. Момент силы $\vec{F}_{\parallel}$ относительно оси равен нулю. Следовательно, момент силы $\vec{F}$ относительно оси равен моменту относительно этой оси, перпендикулярно составляющей $\vec{F}_{\perp}$:

$$\mathrm{mom}_l \vec{F} = \mathrm{mom}_l \vec{F}_{\perp}. \qquad (6)$$

Момент силы $\vec{F}_{\perp}$ относительно точки O направлен по оси l (направление вращения и ось составляют левый винт), поэтому

$$M_l = \pm \,/\, \mathrm{mom}_0 \vec{F}_{\perp} \,/ \qquad (7)$$

и, следовательно,

$$M_l = \pm\, rF \sin\beta, \qquad (8)$$

так как $r \sin \beta = h$ (h — плечо силы),

то $$M_l = \pm hF_{\perp} = \pm hF \cos \alpha. \qquad (9)$$

МОМЕНТ ИМПУЛЬСА

Момент импульса можно определить аналогично моменту силы. Моментом импульса относительно материальной точки О называется физическая величина, равная векторному радиусу-вектору $\vec{r}$ на импульс $\vec{p}$ материальной точки:

$$\vec{L} = (\vec{r}\ \vec{p}) = \vec{r}\ m\vec{v}.$$

Моментом импульса системы материальных точек называется сумма моментов импульсов отдельных точек:

$$\vec{L} = \sum_i \vec{L}_i = \sum_i \vec{r}_i\ m\vec{v}_i. \qquad (10)$$

Моментом импульса относительно оси l называется физическая величина, равная проекции на эту ось момента импульса относительно любой точки оси (рис. 10)

$$L_l = \vec{l}_0 m \vec{r}\ \vec{V}.$$

Аналогично (9) запишем

$$L_l = \pm hmV_{\perp}.$$

где $V_{\perp}$ — составляющая скорости перпендикулярная оси.

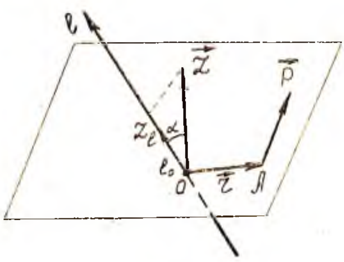

Рис. 10

Рис. 11

Вычислим момент импульса твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, относительно этой оси. Разобьем тело на малые части, так, чтобы каждую часть можно было считать материальной точкой (рис. 11).

Момент импульса тела будет равен

$$L_l = \sum_i \Delta m_i r_i^2 w = w \sum m_i r_i^2. \qquad (11)$$

Величина

$$I = \sum_i \Delta m_i r_i^2 \qquad (12)$$

называется моментом инерции тела относительно оси вращения.

Итак, для твердого тела момент импульса относительно неподвижной оси

$$L = I w.$$

Поскольку все члены в сумме (12) положительны, момент инерции тела не может быть равен нулю. Так как для твердого тела все расстояния r_i не изменяются, то момент инерции твердого тела относительно неподвижной оси есть величина постоянная и положительная.

Рассмотренные вычисления будут тем более точными, чем меньше части, на которые мы разбиваем тело. Переходя к пределу, получим

$$I_l = \lim_{m_i \to 0} \sum \Delta m_i r_i^2 = \lim_{\Delta V_i \to 0} \sum \rho \Delta V r_i^2.$$

Такой предел в математике называется интегралом по объему и обозначается как

$$I_l = \int_{(V)} r^2 dm, \qquad (13)$$

где индекс V под знаком интеграла обозначает суммирование по всему объему.

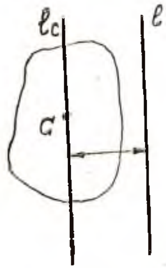

Рис. 12

ТЕОРЕМА ГЮЙГЕНСА-ШТЕЙНЕРА

Пусть даны две параллельные оси, одна из которых проходит через центр инерции тела (рис. 12). Момент инерции тела относительно оси l равен сумме момента инерции этого тела относительно оси l_c, параллельной оси вращения и проходящей через центр масс и произведению массы тела на квадрат расстояния между этими параллельными осями:

$$I_l = I_{l_c} + ma^2. \qquad (14)$$

Соотношение (14) называется теоремой Гюйгенса-Штейнера.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Основное уравнение динамики может быть получено из теоремы об изменении момента импульса тела относительно оси вращения:

скорость изменения момента импульса равна сумме моментов внешних сил, действующих на тело

$$\frac{dL_l}{dt} = M_l . \qquad (15)$$

где M_l — сумма моментов внешних сил относительно оси вращения.

Подставим в (15) величину $L_l = I_l w$, тогда получим

$$I_l \frac{d\omega}{dt} = M_l$$

или

$$I_l \varepsilon = M_l,$$

где ε — угловое ускорение.

Произведение момента инерции тела относительно оси l на угловое ускорение равно сумме моментов всех внешних сил относительно той же оси, действующих на тело. Это утверждение является основным законом динамики вращательного движения.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Пусть твердое тело вращается вокруг оси l, разобьем его на элементарные массы Δm, тогда линейная скорость i-ой массы (рис. 13) равна $v_i = r_i w$, кинетическая энергия массы Δm_i равна

$$\Delta T_i = \frac{\Delta m_i V_i^2}{2} = \frac{1}{2} \Delta m_i r_i^2 w^2.$$

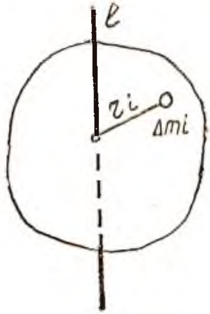

Рис. 13

Кинетическая энергия тела

$$T = \sum_i \Delta T_i = \frac{1}{2} w \sum \Delta m_i r_i^2;$$

$$T = \frac{1}{2} I w^2 .$$

Полная кинетическая энергия тела состоит из суммы кинетических энергий поступательного и вращательного движения:

$$T = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I w^2 .$$

ЗАДАНИЕ № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАХОВОГО КОЛЕСА И СИЛЫ ТРЕНИЯ В ОПОРАХ

Приборы и принадлежности: установка с набором грузов, штангенциркуль, секундомер.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Маховое колесо А, насаженное на вал В, способно под действием груза Р вращаться на опорах C_1 и C_2. Высота опускания груза измеряется вертикальной линейкой, а время—секундомером (рис. 14).

К моменту опускания груза Р с высоты h_1, до уровня Д—Д система, состоящая из груза и махового колеса приобретает кинетическую энергию. По закону сохранения энергии

$$mgh_1 = \frac{mv^2}{2} + \frac{Iw^2}{2} + fh_1 , \qquad (1)$$

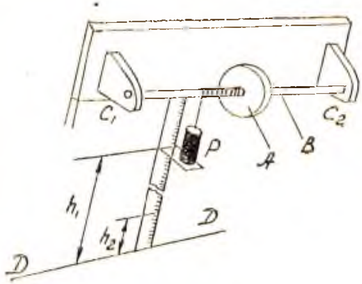

Рис. 14

где f — суммарная сила трения в опорах C_1 и C_2;

m — масса груза P;

I — момент инерции колеса и вала;

v и ω — линейная и угловая скорости движения соответствующих тел к моменту достижения грузом P наинизшего в этом опыте уровня Д—Д.

При наличии силы трения груз P поднимается на высоту $h_2 < h_1$:

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + fh_2 = mgh_2. \tag{2}$$

Из (1) и (2) уравнений получим

$$f = mg\,\frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}. \tag{3}$$

После замены в (1) силы трения по (3), v и ω через h_1, t и радиус r вала B для момента инерции махового колеса найдем (выкладки проделать самостоятельно)

$$I = mr^2\left(gt^2\,\frac{h_2}{h_1(h_1+h_2)} - 1\right), \tag{4}$$

где t — время опускания груза с высоты h_1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Наматывая на вал B шнур, поднять груз на высоту h_1.

2. Отпустить груз и, одновременно включив секундомер, измерить время t падения груза с высоты h_1.

3. Наблюдая за дальнейшим движением системы найти высоту h_2 поднятия груза.

4. С одним и тем же грузом и при одинаковых значениях h_1 провести 5 измерений.

5. Измерить в разных местах радиус r вала и по формулам (3) и (4), по средним значениям найти силу трения $\overline{f}$ и момент инерции $\overline{I}$.

6. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

№ измерения	h_1	m	r	Δr_i	Δr_i^2	$S_{\bar{r}}$	h_2	Δh_2	Δh_2^2	$S_{\bar{h}_2}$	t	Δt_i	Δt_i^2	$S_{\bar{t}}$
1														
2														
3														
4														
5														
Среднее значение														

7. Используя формулы

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i ;$$

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n\,(n-1)}}$$

для $\alpha = 0{,}95$ (одинакового для трех случаев) определить доверительные интервалы:

$$\Delta r = t_{\alpha,n}\, S_{\bar{r}} ; \quad \Delta t = t_{\alpha,n}\, S_{\bar{t}} ; \quad \Delta h_2 = t_{\alpha,n}\, S_{\bar{h}_2} .$$

8. По формулам

$$\Delta I = \sqrt{4\, m^2 \bar{r}^2 \left(\frac{g \bar{t}^2\, \bar{h}_2}{h_1^2 + h_1 \bar{h}_2} - 1 \right)^2 \cdot \Delta r^2 + \ldots}$$

$$\overline{\ldots + \frac{m^2 \bar{r}^4 g^2 \bar{t}^2}{(h_1^2 + h_1 \bar{h}_2)^2} \left(4\, h_2^2\, \Delta t^2 + \frac{\bar{t}^2 h_1^4\, \Delta h_2^2}{(h_1^2 + h_1 \bar{h}_2)^2} \right)} ;$$

$$\Delta f = \frac{2\, m g h_1}{(h_1 + \bar{h}_2)}\, \Delta h_2$$

найти абсолютные погрешности для момента инерции I и силы трения f.

9. Вычислить относительные погрешности

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta f}{f}, \qquad \varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I}.$$

10. Определить искомые величины

$$f = \bar{f} \pm \Delta f; \qquad I = \bar{I} \pm \Delta I.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется моментом инерции материальной точки тела?
2. Получите расчетную формулу для силы трения.
3. Получите расчетную формулу для момента инерции.
4. Дайте характеристику различным видам трения.
5. Какова причина возникновения сил трения?
6. Что произойдет с моментом инерции вращающихся частей установки при увеличении массы груза P?
7. Изменится ли момент инерции махового колеса, если увеличить диаметр вала в области опор C_1 и C_2?
8. Тяжелый груз P опускается длительное время. Будет ли сила трения за первую секунду равна силе трения за последнюю секунду движения?
9. Если изменить радиус колеса A не меняя его массы, изменится ли ускорение, с которым опускается груз P?

ЗАДАНИЕ № 4

ТРИФИЛЯРНЫЙ ПОДВЕС. ИЗМЕНЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ

Приборы и принадлежности: трифилярный подвес, секундомер, масштабная линейка и штангенциркуль, образцы грузов для измерения момента инерции.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Трифилярный подвес схематически изображен на рис. 15. Он может совершать крутильные колебания вокруг оси OO_1. Радиус верхнего (неподвижного) диска — r, а нижнего (подвижного) — R; длина нитей подвеса — l.

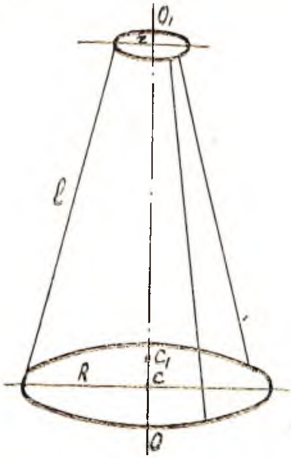

Рис. 15

Упражнение 1.
Определение момента инерции ненагруженной платформы

1. Измерить радиус платформы R, радиус верхнего диска r, и длину l. Масса платформы указана на установке.

2. Привести платформу в движение нажатием рычага, укрепленного над верхним диском.

3. Измерить секундомером время (τ) 50 колебаний (N) и определить их период $T = \frac{\tau}{N}$. Все измерения произвести три раза и результаты занести в табл. 1.

Таблица 1

№ измерений	m	R	r	l	N	τ	T	I	ΔI	$(\Delta I)^2$
1										
2										
3										
Среднее значение										

4. По формуле

$$I = \frac{mgRr}{4\pi^2 l} T^2, \tag{1}$$

где m — масса ненагруженной платформы, произвести расчет момента инерции нижнего диска. Результаты внести в табл. 1.

Упражнение 2. Определение момента инерции исследуемого тела

1. Положить исследуемое тело на платформу так, чтобы его центр тяжести оказался на оси вращения О.

2. Определить период колебаний нагруженной платформы T_1 согласно п. 2 и п. 3 упр. 1. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

№ измерений	N_1	r_1	T_1	I_0	I_1
1					
2					
3					
Среднее значение					

3. Определить массу исследуемого тела m_0.

4. Вычислить момент инерции нагруженной платформы I_0 по формуле

$$I_0 = \frac{(m + m_0)\, g r R}{4 \pi^2 l} T_1^2. \tag{2}$$

5. Вычислить момент инерции исследуемого тела I_1 относительно оси вращения, проходящей через его центр массы по формуле

$$I_1 = I_0 - I. \tag{3}$$

Упражнение 3. Измерение момента инерции тела с последующей проверкой результата по теореме Штейнера

1. Поставить на платформу два одинаковых цилиндра массы m_2 и радиуса r_2 каждый, расположив их симметрично относительно оси вращения на известном расстоянии (а) от нее (положение грузов отмечено на платформе).

2. Определить момент инерции цилиндров I_2, используя методику упр. 1 и упр. 2.

3. Результаты опыта проверить теоретически, рассчитав $I_2^{\text{теор}}$ по формуле

$$I_2^{\text{теор}} = 2\left(\frac{m_2 r_2^2}{2} + m_2 a^2\right). \qquad (4)$$

УКАЗАНИЕ

Для всех трех упражнений произвести расчет средних значений, абсолютных и относительных погрешностей согласно формулам:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\,;$$

$$\Delta\overline{x} = t_{\alpha n}\cdot\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}{n(n-1)}}\,; \qquad (5)$$

$$\varepsilon_{\overline{x}} = \frac{\Delta\overline{x}}{\overline{x}}\,,$$

где x_i — i-ое значение измеряемой физической величины x;

n — число измерений;

$t_{\alpha n}$ — коэффициент Стьюдента ($\alpha = 0{,}97$).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение момента инерции точки и твердого тела относительно данной оси.
2. Чему равен момент инерции цилиндра относительно оси, совпадающей с осью цилиндра?
3. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела с закрепленной осью.
4. Как используется теорема Штейнера в настоящей работе?
5. Запишите выражение для кинетической энергии твердого тела.
6. Обруч и цилиндр одинакового радиуса и массы катятся без скольжения с одинаковой скоростью. Какое из этих тел обладает большой кинетической энергией?
7. Запишите дифференциальное уравнение, описывающее малые колебания.
8. Запишите общее решение этого уравнения.
9. Как зависит частота собственных колебаний трифилярного подвеса от его момента инерции?
10. Опишите схему обработки результатов измерений.

ЗАДАНИЕ № 5

ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Приборы и принадлежности: массивная металлическая линейка с отверстиями (маятник), секундомер, масштабная линейка или штангенциркуль, приспособление для подвешивания маятника.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

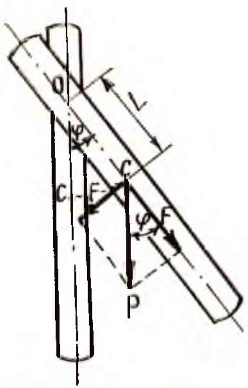

Рис. 16

Установка изображена на рис. 16. В качестве подвеса используется стальная трехгранная призма. При выполнении работы следует избегать перекоса маятника, так как это увеличивает погрешность измерения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить длину l всего маятника.

2. Повесить маятник на трехгранную призму, выбрав для этого произвольное отверстие на нем.

3. Измерить расстояние L от оси вращения до центра тяжести маятника.

4. Определить период колебаний T маятника при малых амплитудах (угол отклонения 2—3 градуса). Для этого при помощи секундомера измерить время τ 100 колебаний, и определить их период $T = \frac{\tau}{N}$, где $N = 100$.

5. Полученные данные записать в таблицу.

6. Измерения провести 3 раза при одном и том же значении L.

7. Определить $\overline{T}$, ΔT и ε_T по формулам

$$\overline{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} T_i \quad \text{при } n = 3;$$

$$\Delta T = t_{\alpha n}\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{n}(T_i-\bar{T})^2}{n(n-1)}} ;$$

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta T}{\bar{T}} ,$$

где $t_{\alpha n}$ — коэффициент Стьюдента; $\alpha = 0{,}97$.

Таблица

№ измерения	l	L	r_i	T_i	ΔT_i	$(\Delta T)^2$	$\bar{q}$
1							
2							
3							
Среднее значение							

8. Определить среднее значение ускорения силы тяжести $\bar{q}$, абсолютную Δq и относительную ε_q погрешности измерения по формулам:

$$\bar{g} = \frac{4\pi^2}{T^2}\left(\frac{l^2}{12L} + L\right) ;$$

$$\varepsilon_g = 2\,\varepsilon_T ;$$

$$\Delta g = \bar{g}\,\varepsilon_g .$$

9. Вычислить приведенную длину l_n физического маятника

$$l_n = \frac{l^2}{12L} + L.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется моментом инерции материальной точки относительно оси?
2. Что такое момент инерции твердого тела относительно оси?
3. Сформулируйте и запишите теорему Штейнера.
4. Запишите дифференциальное уравнение, описывающее свободные малые колебания.
5. Запишите решение этого уравнения.

6. Зависит ли частота малых колебаний от их амплитуды?
7. Напишите формулу для периода колебаний физического маятника.
8. Каков физический смысл приведенной длины физического маятника?
9. Запишите дифференциальное уравнение, описывающее колебания математического маятника (груз m на нити длиной l) в случае, когда колебания не малы.
10. Опишите последовательность обработки результатов измерения.

ЗАДАНИЕ № 6

МАЯТНИК ОБЕРБЕКА

Приборы и принадлежности: маятник Обербека, секундомер, метровая линейка.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Маятник Обербека (рис. 17) представляет собой крестовину из четырех стержней, прикрепленных ко втулке с осью. На стержни одеваются одинаковые грузы m , которые могут быть закреплены на разных расстояниях от оси вращения. Два шкива с различными радиусами r_1 и r_2 насажены на ось вращения маятника. На один из шкивов наматывается нить, перекинутая через блок. На конце нити подвешивается груз массой m_1. Под действием груза m_1 нить разматывается и приводит маятник в равноускоренное вращательное движение. На линейке, расположенной вертикально, укреплены две платформы для фиксации грузов А и В.

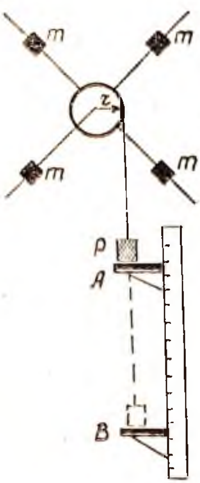

Рис. 17

Момент силы M, под действием которого маятник приводится во вращательное движение, определяется по формуле

$$M = F_н r, \qquad (1)$$

где $F_н$ — сила натяжения нити;

r — радиус шкива.

Силу натяжения нити найдем из второго закона Ньютона

$$P - F_н = ma,$$

где $P = m_1 q$ — сила тяжести,

тогда $$F_н = m_1 g - m_1 a = m_1 (g - a) :$$

момент силы $$M = m_1 (g - a) r . \qquad (2)$$

Ускорение a, с которым падает груз, определяется из формулы пути

$$a = \frac{2h}{t^2}, \qquad (3$$

где h — высота, с которой падает груз m_1;

t — время падения груза m_1.

С таким ускорением a движутся все точки на окружности шкива с радиусом r, поэтому угловое ускорение, с которым вращается шкив, равно

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{r} = \frac{2h}{t^2 r} . \qquad (4)$$

Подставив (3) в (2), получим

$$M = m_1 \left(g - \frac{2h}{t^2}\right) r . \qquad (5)$$

Зная момент силы и угловое ускорение, можно определить момент инерции

$$I = \frac{M}{\varepsilon} . \qquad (6)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Закрепить все четыре груза на одинаковом расстоянии от оси вращения.
2. Измерить штангенциркулем радиус шкива.
3. Наматать на шкив ровным слоем нить.
4. Подвесить к концу нити груз m_1 и поставить его на верхнюю платформу.
5. Отпустив платформу, измерить время t и высоту h — падения груза. Опыт проделать 10 раз.
6. По формуле (6) определить момент инерции маятника.
7. Перемотать нить на шкив другого диаметра и повторить все измерения для того же груза m.

8. Результаты занести в таблицу.

№ изм.	r_i	Δr_i	Δr_i^2	$S_{\bar r}$	m_1	h	Δh	t_i	Δt_i^2	$S_{\bar t}$	I	ΔI	Δt	ε_I

9. Подсчитать абсолютную и относительную погрешности следующим образом:

определить среднее значение для r, t

$$\bar r = \frac{\sum_{i}^{n} r}{n}; \quad S_{\bar r} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta r_i^2}{n(n-1)}}; \quad \bar t = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n}; \quad S_{\bar t} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i^2}{n(n-1)}};$$

для доверительной вероятности $\alpha = 0{,}95$ по таблице найти коэффициенты Стьюдента $t(\alpha, n)$ и определить доверительный интервал

$$\Delta r = S_{\bar r}\, t(\alpha, n);$$

$$\Delta t = S_{\bar t}\, t(\alpha, n)$$

(для h величина абсолютной погрешности определяется как приборная погрешность, $\Delta h = 0{,}5$ см);

определить величину абсолютной погрешности для момента инерции по формуле

$$\Delta I = \sqrt{\left[2m\bar{r}\left(\frac{g\bar{t}^2}{2\bar{h}} - 1\right)\Delta r\right]^2 + \left(\frac{m\bar{r}^2 g\bar{t}}{\bar{h}}\Delta t\right)^2 + \left(\frac{m\bar{r}^2 g\bar{t}^2}{2\bar{h}^2}\Delta h\right)^2};$$

найти относительную погрешность

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\ \%.$$

10. Окончательный результат записать в виде

$$I = \bar{I} \pm \Delta I.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как выражается связь между параметрами поступательного и вращательного движения?
2. Дайте определение момента инерции материальной точки.
3. Чему равен момент инерции тела?
4. Что называется моментом силы относительно точки?
5. Напишите основной закон динамики для вращательного движения.
6. Сформулируйте и запишите момент импульса материальной точки.
7. Чему равен момент импульса тела?
8. Как определить направление вектора момента импульса?
9. Как вычислить момент силы относительно оси?
10. Запишите выражение для теоремы об изменении импульса относительно оси.

ЛИТЕРАТУРА

Майсова Н. Н. Практикум по курсу общей физики. М., «Высшая школа», 1970.

Практикум по физике. Под редакцией проф. В. Н. Ивероновой. М., «Наука», 1962.

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1, М., «Наука», 1973.

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 1, М., «Наука», 1974.

Составители:

Людмила Алексеевна Крюкова,
Алексей Михайлович Кожевников,
Юрий Леонидович Ратис,
Лидия Ивановна Федосова

ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ.
ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Лабораторная работа

Редактор И. М. Чулкова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Т. В. Полякова

Сдано в набор 12.5.1977 г. Подписано в печать 27.6.1977 г.
Формат $60\times84^1/_{16}$. Бумага оберточная белая. Физ. п. л. 2,25. Усл. п. л. 2,09.
Тираж 2000 экз. Бесплатно. Заказ № 443.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.