

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ПОЛИМЕРОВ»

Кафедра физики

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Учебно-методическое пособие
к лабораторным работам № 1 – 11, 1 – 21, 1 – 22
для бакалавров всех факультетов

Санкт-Петербург
2014

УДК 531(07)
ББК 22.3.я2

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА: учебно-методическое пособие к лабораторным работам № 1—11, 1—21, 1—22/сост: В.М.Максимов, С.А.Поржецкий, Д.А.Сухов, А.В.Федоров: под общ. ред. доц. В.М.Максимова, проф. П.М.Валова; СПбГТУРП.- СПб., 2014. – 32 с.

Пособие содержит описание лаборатор-ных работ по механике. Предусмотрено задание по НИРС, выполняемое с использованием компьютера.

Предназначено для студентов всех специальностей дневной, вечерней и заочной форм обучения.

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики СПбГТУРП А.А. Абрамович

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (протокол № 2 от 17 сентября 2014 года).

Утверждено к изданию методической комиссией факультета автоматизированных систем управления технологическими процессами Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (протокол № 4 от 6 ноября 2014 года).

Редактор и корректор В.А.Басова
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2014 г., поз. 77

Подп. к печати . Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.
Печать офсетная. 2,0 печ. л.; 2,0 уч.-изд. л. Тираж 300 экз. Изд. № 77.
Цена "С" . Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, 198095, Санкт-Петер-бург, ул.Ивана Черных, 4.

© Санкт-Петербургский
государственный технологический
университет растительных полимеров,
2014

ТЕМА 1-1. ЗАКОНЫ ДИНАМИКИ. ВИДЫ СИЛ

Динамика изучает причины движения тел, т. е. как взаимодействие между телами влияет на их движение. Механическое движение является относительным. Мы можем говорить о движении тел только по отношению к другим телам. Тело или система тел, относительно которых задается движение всех остальных тел, называется *системой отсчета*.

В основе классической динамики лежат три закона Ньютона, являющиеся обобщением опытных данных.

Первый закон Ньютона: существуют системы отсчета, в которых тело, на которое не действуют никакие другие тела, движется равномерно и прямолинейно или покоится. Такие системы отсчета называются *инерциальными*.

Все законы динамики справедливы только в инерциальных системах отсчета.

В инерциальных системах отсчета ускорение тела может быть вызвано только действием на него каких-либо других тел. Мерой интенсивности взаимодействия тел является *сила*. Поэтому можно сказать, что причиной ускорения тела является действующая на него сила F . Но ускорение тела зависит также от свойств самого тела: одни тела легко изменяют свою скорость при слабом воздействии - говорят, что они обладают малой инерцией; для изменения движения других тел требуется сильное воздействие - эти тела обладают большой инерцией. Мерой инертности является *масса* тела m .

Второй закон Ньютона: ускорение тела прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе тела:

$$a = \frac{F}{m} \quad (1)$$

Этот закон является уравнением движения тела, он определяет, как будет двигаться тело под действием сил. Если на тело действуют несколько сил $F_1, F_2, \dots, F_n$, то под величиной F в формуле (1) понимается их равнодействующая, равная векторной сумме этих сил:

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

Единицей силы в системе СИ является ньютон (Н). *Нью-тон* – это такая сила, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с².

При решении задач динамики следует выяснить, какие силы действуют на тело и от чего они зависят, написать второй закон Ньютона в векторной форме,

при этом его удобно записывать таким образом:

$$ma = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

. Затем следует выбрать оси координат и перейти к проекциям на них. Если имеется несколько тел, то следует это проделать для каждого тела.

Третий закон Ньютона: в природе существует только взаимодействие тел: при этом силы, с которыми действуют друг на друга взаимодействующие тела, равны по величине и противоположны по направлению. Если на тело 1 действует тело 2 с силой $F_{1,2}$, то и тело 1, в свою очередь, действует на тело 2 с силой $F_{2,1}$. Третий закон Ньютона можно представить равенством

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}. \quad (2)$$

Рассмотрим некоторые виды сил.

1. *Гравитационные силы.* Между любыми телами действуют силы притяжения. Две материальные точки притягиваются с силой, прямо пропорциональной произведению их масс m_1 и m_2 и обратно пропорциональной квадрату расстояния r между ними:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (3)$$

где $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м/кг} \cdot \text{с}^2$ - гравитационная постоянная. Формула (3) справедлива также для однородных шаров любых размеров.

Из закона всемирного тяготения следует, что сила тяжести, т.е. сила притяжения к Земле (либо к любой другой планете), пропорциональна массе тела. Следовательно, все тела свободно падают равноускоренно с одинаковым ускорением – ускорением свободного падения g . Из (3) получаем

$$mg = \gamma \frac{mM}{R^2} \quad \text{и} \quad g = \gamma \frac{M}{R^2}. \quad (4)$$

Здесь M и R - масса и радиус Земли. Это выражение верно, если расстояние тела от поверхности Земли много меньше её радиуса, при этом ускорение свободного падения можно считать постоянным. На больших высотах (h) ускорение меньше, и в формуле (4) следует R заменить на $r=R+h$.

2. *Силы упругости* возникают при деформации тел (удлинение или сжатие). Для малых деформаций выполняется *закон Гука*: упругая сила прямо пропорциональна деформации x (удлинению или сжатию) и направлена в противоположную сторону:

$$F = -kx, \quad (5)$$

где k - жесткость тела, измеряемая в Н/м.

3. *Выталкивающая сила. Закон Архимеда:* на всякое тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости (газа), вытесненной телом:

$$F_A = \rho_* g V = m_* g , \quad (6)$$

где ρ_* - плотность жидкости; V - объем вытесненной телом жидкости.

4. *Сила трения скольжения*, возникающая при скольжении одного тела по поверхности другого тела:

$$F_{\text{тр}} = \mu N , \quad (7)$$

где μ – коэффициент трения скольжения; N – сила нормального давления, прижимающая трущиеся поверхности друг к другу. Сила трения направлена вдоль поверхности соприкосновения против относительного движения тела.

5. *Сила сопротивления* действует на тело, движущееся в газе или жидкости. Эта сила направлена против вектора скорости тела относительно среды и тормозит движение. При малых скоростях движения сила сопротивления прямо пропорциональна скорости тела v относительно среды:

$$F = -Kv . \quad (8)$$

Здесь K - коэффициент сопротивления, зависящий от формы, размеров, состояния поверхности тела и свойств среды - её вязкости. Найти величину K для тел сложной формы теоретически крайне сложно, её обычно измеряют. Д.Стокс показал, что силу сопротивления, действующую на небольшой шар радиуса r , который движется в вязкой жидкости с малой скоростью v , математически можно представить в следующем виде:

$$F = 6\pi\eta r v , \quad (9)$$

где η - коэффициент вязкости жидкости, который зависит от природы жидкости и ее температуры.

Явление *вязкости, или внутреннего трения*, заключается в том, что между слоями жидкости или газа, движущимися с различными скоростями, возникает сила трения, которая стремится ускорить один слой и замедлить другой. Сила трения определяется соотношением:

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot S ,$$

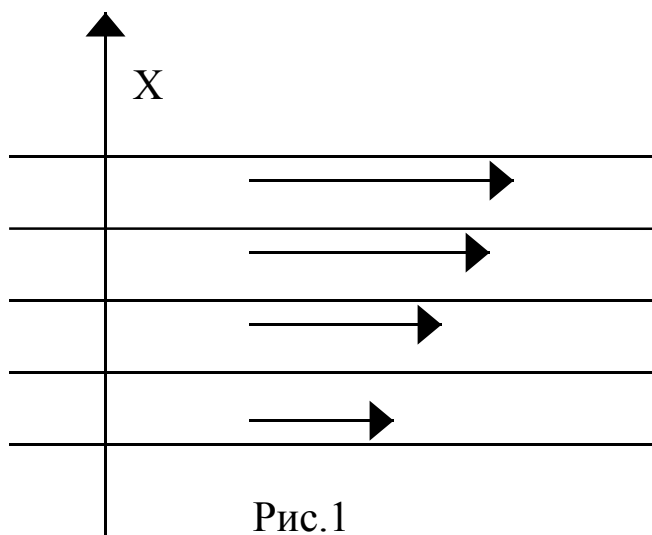


Рис.1

где η - коэффициент вязкости;
 $\frac{\Delta v}{\Delta x}$ - градиент скорости, т.е. изменение скорости на единицу длины в направлении, перпендикулярном скорости слоев (см.рис.1);
 S - площадь

соприкосновения слоев.

Если принять в уравнении (10) градиент скорости $\frac{\Delta v}{\Delta x} = 1$ и площадь соприкосновения слоев $S = 1$, то $F = \eta$. Таким образом, коэффициент вязкости численно равен силе, которую испытывает единица поверхности одного из взаимодействующих слоев жидкости со стороны другого слоя, если градиент скорости между ними равен единице.

Размерность коэффициента вязкости в СИ можно определить из формулы (10):

$$[\eta] = \frac{[F] \cdot [\Delta x]}{[S] \cdot [v]} = \frac{H \cdot m}{m^2 \cdot m / c} = \frac{H \cdot c}{m^2} = \frac{кг \cdot м \cdot с}{с^2 \cdot м^2} = \frac{кг}{м \cdot с}.$$

Значение коэффициента вязкости имеет практический интерес, так как он определяет силу сопротивления движения тел в жидкостях, силу трения в подшипниках скольжения при наличии смазки и т. д.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1-11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы:

1. Изучить движение тела под воздействием нескольких сил.
2. Экспериментально определить коэффициент вязкости глицерина по скорости падения в нем твер-дого шарика (метод Стокса).

Падение шарика в вязкой среде

На шарик массой m , падающий в жидкости (рис.2), действуют три силы: сила тяжести $\vec{m}g$, вы-талкивающая сила (Архимедова сила) F_A , сила вязкого трения F_C . Второй закон Ньютона для движения шарика выражается уравнением

$$\vec{m}g + \vec{F}_A + \vec{F}_C = \vec{m}a \quad (1)$$

Переходя к проекциям на ось X , выбран-ную по направлению ускорения, получим

$$mg - F_A - F_C = ma \quad (2)$$

Так как ускорение $a = dv / dt$, то перепишем (2) в виде

$$m \frac{dv}{dt} = mg - F_A - F_C \quad (3)$$

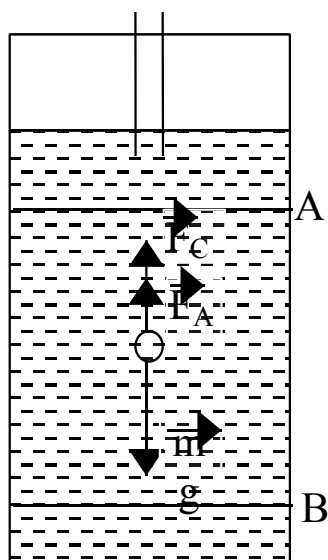


Рис. 2

В формулу (3) подставим выражение для m, F_A, F_c :

$$m = \rho_1 V = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 ;$$

$$F_A = \rho_2 g V = \frac{4}{3} \pi \rho_2 g r^3 ;$$

$$F_C = 6 \pi \eta r v ,$$

где ρ_1 - плотность материала шарика; ρ_2 - плотность жидкости; r - радиус

шарика; $V = \frac{4}{3} \pi r^3$ - объем шарика.

После элементарных алгебраических преобразований получим:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)g}{\rho_1} - \frac{9}{2} \frac{\eta}{r^2 \rho_1} v . \quad (4)$$

Решение этого уравнения определяет зависимость скорости от времени и имеет вид

$$v = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\eta} \left(1 - e^{-\frac{g}{2} \frac{\eta t}{\rho_1 r^2}} \right) . \quad (5)$$

В справедливости этого выражения можно убедиться непосредственной подстановкой (5) в (4).

Зависимость скорости от времени, заданная уравнением (5), показана на рис.3. В начале движения скорость шарика мала, мала и сила трения F_C , которая прямо пропорциональна скорости. Сила тяжести оказывается больше сум-мы сил F_A и F_C , шарик движет-ся вниз с ускорением. Но по мере увеличения скорости шарика сила трения возрастает, ускорение шарика уменьшается, и наступа-ет момент, когда

$$F_C = mg - F_A \quad (6)$$

и ускорение тела обращается в нуль. С этого момента скорость ша-рика перестаёт изменяться, он движется равномерно с некоторой установившей-ся скоростью. Ее значение можно получить из (6). Подставим в (6) выражение для всех сил:

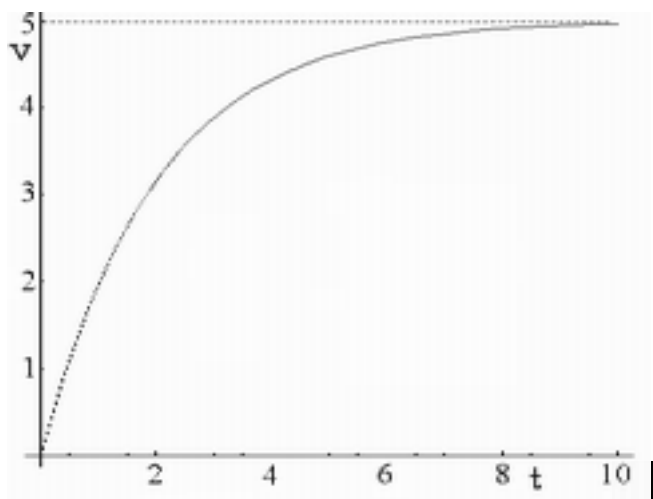


Рис.3

$$6\pi\eta Rv = \frac{4}{3}\pi R^3(\rho_1 - \rho_2)g$$

Отсюда

$$v_{\text{уст}} = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\eta} \quad (7)$$

Это совпадает со значением скорости, получаемым из (5) при $t \rightarrow \infty$.

Таким образом, измерив скорость равномерного падения шарика, можно определить коэффициент вязкости жидкости

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{v} \quad (8)$$

Движение шарика в нашей работе происходит в стеклянном цилиндре, заполненном испытуемой жидкостью, на стенках цилиндра нанесены метки A и B (см. рис.2). Метка A нанесена на таком расстоянии от поверхности жидкости, что шарик, брошенный в неё, в этом месте движется уже равномерно.

Порядок выполнения работы

1. Измеряют диаметр шарика d микрометром. Вращать барабан микрометра следует очень осторожно, чтобы не смять свинцовый шарик.
2. Бросают шарик в стеклянный цилиндр, при наблюдении глаз должен быть на уровне верхней метки A .
3. Когда шарик доходит до метки A , пускают секундомер и переводят глаз на уровень нижней метки B .
4. Когда шарик доходит до верхнего края метки B , останавливают секундомер и определяют время τ .
5. Приложив линейку к цилиндру, измеряют расстояние l между верхними краями меток A и B .
6. По данным, полученным в пп.4 и 5, вычисляется скорость равномерного падения шарика: $v = l/\tau$, где τ – время падения шарика.
7. Операции, описанные в пп.1-6, проделывают с пятью шариками. Результат всех измерений заносят в таблицу (с. 10), для каждого измерения определяют значение коэффициента вязкости η . При вычислении η следует

переписать формулу (6) в виде

$$\eta_i = k \frac{r_i^2}{\nu_i}, \quad (9)$$

где $k = \frac{2}{9} g(\rho_1 - \rho_2)$ - величина, одинаковая для всех измерений. Поэтому удобно сначала вычислить k , а затем вычислить η по формуле (9). Значения плотностей ρ_1 и ρ_2 задаются в лаборатории.

8. Полученные пять значений η_i рассматриваются как результаты многократных косвенных измерений. Систематической ошибкой η_i пренебрегают. В окончательном результате указывают температуру окружающего воздуха $t^* C$, так как из-за большой зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры всякое его значение имеет смысл только при указании температуры, при которой он был получен.

№ n/n	$\rho_1 =$		$\rho_2 =$		$l =$		$t^* C =$
	$d, \text{ мм}$	$r, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	η_i	$\Delta\eta_i$	$(\Delta\eta_i)^2$	погрешность
1							$\Delta\eta = S_\eta =$
2							
3							
4							
5							
Сред.					$S_\eta^2 =$		$\eta =$

Вопросы и задачи по теме 1-1

1. Предположим, что шарик сделан из вещества более лёгкого, чем жидкость, и вводится в цилиндр снизу. Опишите зависимость скорости шарика от времени движения в жидкости. Представьте эту зависимость в виде графика $v(t)$.

2. Как меняется со временем ускорение шарика, падающего в жидкости? Как выглядит график зависимости $a = f(t)$?

3. В одну и ту же жидкость бросают два шарика одинаковой плотности, причем диаметр одного из них в два раза больше диаметра другого. Найти отношение скоростей шариков.

4. Шарик всплывает с постоянной скоростью в жидкости, плотность которой в 4 раза больше плотности материала шарика. Во сколько раз сила трения, действующая на всплывающий шарик, больше приложенной к шарiku силы тяжести?

5. Шарик массой m падает в жидкости плотностью ρ с постоянной скоростью v . С какой силой нужно тянуть этот шарик, чтобы он поднимался в той же жидкости со скоростью $2v$?

Объём шарика равен V .

6. Два одинаковых шарика связаны невесомой нитью, перекинутой через невесомый блок, причем один из них погружен в сосуд с жидкостью. С какой установившейся скоростью v будут двигаться шарики, если известно, что установившаяся скорость падения одиночного шарика в той же жидкости равна v_0 ? Плотность жидкости $\rho_{\text{ж}}$, плотность материала шариков ρ .

7. Тело падает в воздухе равномерно со скоростью 20 м/с. Найдите ускорение тела при падении со скоростью 10 м/с, при подъеме со скоростью 10 и 20 м/с. Выталкивающей силой можно пренебречь.

8. На тело массой 0,2 кг действуют две взаимно перпендикулярные силы $F_1 = 4H$ и $F_2 = 3H$. Найдите ускорение тела.

9. Найдите ускорение свободного падения на поверхности планеты, масса которой в два раза меньше массы Земли, а радиус в 4 раза меньше.

10. Найдите силу притяжения спутника массой 100 кг к Земле, если спутник вращается по круговой орбите на высоте $h = 0,4R$, где R - радиус Земли. Найдите скорость спутника.

11. Как изменяется ускорение тела при его падении в следующих случаях:
а) тело падает с высоты 3000 км в вакууме; б) тело падает с высоты 1 км в вакууме; в) тело падает с высоты 1 км в воздухе?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Решение основной задачи динамики с использованием ЭВМ (задание для НИРС)

Одной из основных задач динамики является расчет движения тела под действием известных сил. Действующие на тело силы могут зависеть от координаты X , скорости v и времени t . При заданных силах, т.е. известном виде функции $F = F(x, v, t)$, движение тела полностью определяется вторым законом Ньютона и начальными значениями координаты и скорости. В общем случае получить аналитические зависимости $v(t)$ и $x(t)$ невозможно, но с помощью компьютера всегда можно найти численное решение.

Рассмотрим случай прямолинейного движения вдоль оси X . Пусть в некоторый момент времени t тело находится в точке с координатой X и обладает скоростью v . Возьмем достаточно малый промежуток времени Δt - такой, что за это время изменение скорости $\Delta v = a\Delta t$ намного меньше v . Тогда, пренебрегая изменением скорости, можно найти положение X_+ тела через время Δt :

$$X_+ = X + v\Delta t. \quad (1)$$

Аналогично, пренебрегая изменением ускорения $a = F / m$ за время Δt , найдем скорость v_+ через время Δt :

$$v_+ = v + at = v + (F / m)\Delta t \quad (2)$$

Многokrатно повторяя эту процедуру, можно рассчитать зависимости $v(t)$ и $x(t)$ с любой точностью. Перед каждым началом расчета X_+ и v_+ следует вычислить силу, действующую на тело.

В качестве примера приведем программу на языке БЕЙСИК для расчета вынужденных колебаний. В этом случае на тело действует суммарная сила

$$F = -kx - rv + F_1 \cos \omega t$$

При $F_1 = 0$ получим свободные затухающие колебания, при $F_1 = 0$, $r = 0$ получим гармонические колебания. Если заменить $-kx$ на $-mg \sin(x/l)$, можно изучать колебания математического маятника при произвольных амплитудах. Положив $k = 0$, $\omega = 0$, $F_1 = (m - m_*)g$, можно исследовать падение шарика в вязкой жидкости. Заменяв строку программы, в которой вычисляется сила, на другую, можно изучать прямолинейное движение под действием любых сил.

Краткие сведения о языке БЕЙСИК и описание программы

Для обозначения переменных могут использоваться заглавные латинские буквы и цифры. Поэтому обозначим массу тела M , коэффициент жесткости K , коэффициент сопротивления R , начальные значения координаты и скорости обозначим $X0$ и $V0$, текущие значения координат и скорости - X и V . Для выполнения арифметических операций следует набрать соответствующую формулу. Арифметические действия обозначаются +; -; * - умножение; / - деление. Порядок действия обычный. Сначала выполняются действия в скобках, первыми выполняются действия умножения и деления, затем - сложения и вычитания. Рассмотрим интервал времени от 0 до T и разобьем его на 100 равных частей, т.е. $\Delta t = T/100$. Тогда формулы (1) и (2) на языке БЕЙСИК запишутся следующим образом:

$$X = X + V * T / 100; \quad (3)$$

$$V = V + F * T / M \quad (4)$$

Формулы (3),(4) следует понимать так: по известным значениям X и V машина рассчитывает новые значения и присваивает эти новые значения переменным X и V . Старые значения при этом забываются. Поэтому знак $=$ называется оператором присваивания. Для печати результатов расчета используется оператор

PRINT T1,X,V.

По этому указанию на экране печатаются значения величин $T1, X, V$.

В программе использован также оператор *PRINT "T1","X","V"*. В этом случае на экране печатаются буквы *"T1","X","V"*. Этот оператор использован для печати заголовка таблицы результатов.

Для ввода значения величины нам потребуется оператор вида *INPUT M*. По этому указанию машина печатает на экране знак ввода. Затем следует набрать значение M и нажать (CR), после чего машина переходит к следующему этапу программы.

Ввод значений удобно организовать следующим образом:

PRINT "M="; INPUT M $M = ?$. В этом случае машина печатает и ждет ввода значения M .

При расчете движения тела вычисления по формулам (1), (2) (соответственно (3), (4)) следует проводить многократно (100 раз) и многократно печатать вычисленные значения. Для этого используется оператор цикла, который состоит из двух частей: оператора

FOR I=0 TO 20 и оператора *NEXT T*.

По данному указанию участок программы, расположенный между этими операторами, вычисляется многократно, каждый раз значение переменной цикла увеличивается на единицу.

Когда 1 оператор достигает значения 20, происходит выход из цикла. Для того чтобы печатать не все 100 значений, а только каждое 5-е, использованы два цикла.

Заканчивается программа оператором *END*.

Все строки программы на языке БЕЙСИК нумеруются. Машина выполняет строки программы в порядке возрастания номеров, если нет особых указаний.

Для того чтобы изменить любую строку, достаточно набрать эту строку заново под тем же номером.

Каждая программа должна иметь название: назовём её NEWTON.BAS, где BAS указывает, что программа написана на языке БЕЙСИК.

Если какие-то величины не используются в задаче, например, $F1$ и W при исследовании свободных колебаний, то соответствующие строки программы можно исключить (строки 45 и 55). Из строки 110 также должны быть исключены эти величины. При предварительном исследовании задачи удобно выводить информацию на экран в форме графика $v(t)$ или $x(t)$. Для этого нужно исключить строку 60 и заменить строку 90 на следующую:

90 PRINT TAB (a + b * x) "*" ,

где a и b - числа, определяющие положение прямой $X=0$ на экране и масштаб по оси X . Ось X графика расположена горизонтально и содержит 80 позиций для печати символа $*$. При $a = 1,5$ прямая $X = 0$ проходит в левой части экрана, в первой позиции. При $a = 40,5$ прямая проходит посередине экрана сверху вниз.

Если X принимает только положительные значения, то следует взять $a = 1,5$; если X изменяется симметрично относительно нуля, то следует взять $a = 40,5$. Множитель b задает масштаб по оси X . Должно быть $b|x_{\max}| \leq 80 - a$.

При больших значениях b график выйдет за пределы экрана, при слишком маленьких b график будет сильно сжат по оси X . Ось времени направлена вертикально вниз, и точки графика печатаются через $\Delta t = T / 20$. Заменяв X на V , можно получить график $V(t)$.

```

10 PRINT "M =" ;\INPUT M
15 PRINT "Xφ =" ;\INPUT Xφ
20 PRINT "Vφ =" ;\INPUT Vφ
25 PRINT "K =" ;\INPUT K
30 PRINT "R =" ;\INPUT R
35 PRINT "F1 =" ;\INPUT F1
40 PRINT "T =" ;\INPUT T
45 PRINT "W =" ;\INPUT W
50 X = Xφ \ V = Vφ \ T1 = 0

```

```

60  PRINT "T","X","V"
80  FOR J = 0 TO 20
90  PRINT T1,X,V
100 FOR J = 1 TO 5
110 F = -K * X - R * V + F1 * cos(W * T1)
120 X = X + V * T / 100
130 V = V + F * T / 100 / M
140 T1 = T1 + T / 100
150 NEXT J
160 NEXT I
200 STOP
500 END

```

Порядок работы

1. Вызов интерпретатора языка БЕЙСИК. Для этого следует набрать
BAS <CR>,

машина ответит *READY*

2. Набор программы. Следует набрать
NEW <CR>.

На экране появится

NEW FILE NAME,

следует набрать название

NEWTON. BAS <CR>.

После этого следует набрать программу. Неправильно набранный символ удаляется нажатием клавиши *DEL* (до того, как нажата клавиша *<CR>*).

Если строка содержит ошибки и *<CR>* уже нажата, то следует всю строку под тем же номером набрать заново.

3. После окончания набора программы следует дать команду
LIST <CR>.

На экране будет распечатан окончательный текст программы.

4. Запуск программы производится командой
RUN <CR>.

Машина выполняет программу. При появлении на экране запроса
M = ?

нужно ввести значение данной величины и нажать $\langle CR \rangle$, после этого выполнение программы будет продолжено. Если в строке обнаружены ошибки (неверно набраны операторы, недопустимые обозначения переменных и др.), то выполнение программы прерывается, и на экране появляется сообщение об ошибке. После этого следует набрать команду *LIST*, проверить данную строку и, набрав заново, исправить её. Затем надо начать выполнение программы сначала.

5. Работа с программой.

В программу введен оператор *STOP*. Он останавливает выполнение программы, при этом в памяти машины сохраняются значения всех переменных. После остановки можно, подавая команды с клавиатуры, изменить значения любых переменных и продолжать вычисление программы, начиная с любой строки программы. Приведём несколько примеров.

1) Изменение значений исходных данных.

Если по результатам расчета вы обнаружили, что некоторые исходные данные вас не удовлетворяют, например, при выбранном R колебания затухают слишком быстро, то удобно заменить их следующим образом:

$$R = 0.5 \setminus GO\ TO\ 50\ \langle CR \rangle.$$

После этой команды переменная R принимает новое значение 0.5, и программа выполняется со строки 50. Таким образом, можно заменить значение любой переменной, особенно часто приходится подбирать значение T .

2) Продолжение расчётов на следующем интервале времени.

Если на выбранном интервале времени T не укладывается весь интересующий вас процесс, то вычисления можно продолжить на следующем интервале командой:

$$GO\ TO\ 80\ \langle CR \rangle.$$

При этом программа выполняется со строки 80, т.е. повторяется цикл вычисления X и V . Начальными данными являются конечные результаты предыдущего расчёта.

В приведенной программе расчёта выводятся значения только X и V . Можно дополнить программу вычислением других физических величин,

зависящих от X и V . Например, для вычисления энергии $E = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2}$ при колебательном движении нужно в строке 60 добавить " E " а в строке 90 - E и вставить строку

$$E = K * X^2 / 2 + M * V^2 / 2.$$

Здесь X^2 обозначает X^2 .

Чтобы получить график зависимости E от t , нужно в строке 90 в ТАВ заменить X на E и добавить строку 135.

Приведем ряд задач, решение которых может быть получено с применением ЭВМ. Задачи даются в общем виде, числовые значения величин выбираются по указанию преподавателя.

1. Тело массой m движется под действием силы $F = F_0 - rV$, где F_0, r - известные постоянные величины, значения V_0, X_0 заданы.

а) построить графики $X(t)$ и $V(t)$;

б) найти установившееся значение скорости V_m ;

в) через какое время скорость тела V станет равной αV_m ($\alpha = 0,1; 0,2; \dots; 0,9$)?

г) определить величину работы силы F за время, которое нужно для достижения скорости $V = 0,5V_m$.

д) чему равна работа силы F в течение времени t после достижения V_m ?

2. Шарик падает в вязкой среде. Даны его радиус, плотность материала, плотность среды, коэффициент вязкости среды, значения V_0, X_0 . Ответить на вопросы а), б), в), г), д) предыдущей задачи. Рассмотреть случаи, когда $v_0 \uparrow \uparrow mg$ и $V_0 = \uparrow \downarrow mg$.

3. Исследовать колебания математического маятника

$$F = -mg \sin(X/l)$$

для случая, когда величина $\alpha = X/l$ не является малой величиной, т.е.

$\sin \varphi \neq \varphi$. Построить графики $X(t)$ для различных амплитуд колебаний,

задавая различные начальные условия V_0, X_0 . Рассмотреть затухающие колебания маятника, учитывая силу сопротивления.

4. Металлическому шарiku в вязкой среде сообщают начальную скорость V_0 , направленную вертикально вверх. Известны значения плотности шарика и жидкости, коэффициент вязкости жидкости.

Определить:

а) на какую высоту поднимется шарик над точкой бросания?

б) сколько времени он будет двигаться вверх до остановки?

в) сколько времени будет затрачено на возвращение в исходную точку?

г) какую скорость будет иметь шарик в момент возвращения в исходное положение?

5. Ракета запущена вертикально вверх с поверхности Земли

с начальной скоростью V_0 . Рассчитать зависимость высоты подъема $X(t)$ и скорости ракеты $V(t)$ от времени. Найти максимальную высоту подъема и скорость на заданной высоте h . Учитывать изменение силы притяжения с ростом высоты. Построить график зависимости $V(t)$.

ТЕМА 1-2. ДИНАМИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Твердое тело - это тело, взаимное расположение частей которого не изменяется в течение всего времени движения. Ограничимся рассмотрением вращательного движения твердого тела во-круг неподвижной оси, когда траектории отдельных точек тела представляют собой окружности с центрами на оси вращения.

Линейные характеристики движения - пройденный путь S , линейная скорость $v = dS / dt$, тангенциальное ускорение $a_\tau = dv / dt$ - различны для разных точек вращающегося тела, поэтому используют угловые параметры движения - угол поворота φ , угловую скорость ω и угловое ускорение ε , которые одинаковы для всех точек вращающегося твердого тела.

Угловая скорость ω равна углу поворота за единицу времени $\omega_{cp} = \Delta\varphi / \Delta t$, где $\Delta\varphi$ - угол поворота тела за время Δt . При неравномерном вращении эта формула дает среднюю скорость на интервале Δt .

При неравномерном вращении мгновенная угловая скорость определяется соотношением

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (1)$$

Угловое ускорение ε характеризует изменение угловой скорости за единицу времени и задается выражением

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

Связь между линейной и угловой скоростью точки имеет вид

$$v = \omega r \quad (3)$$

где r - радиус описываемой точкой окружности.

Взяв производную от левой и правой частей (3) и учитывая, что $a_\tau = dv / dt$ - тангенциальное (касательное) ускорение точки, получим

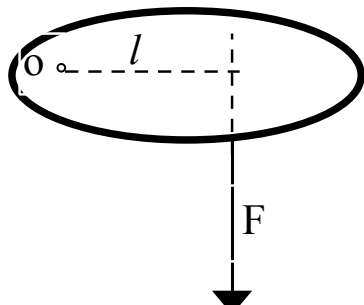
$$a_\tau = \varepsilon r \quad (4)$$

Динамика изучает влияние взаимодействия тел на их движение. Если на тело не действуют никакие другие тела, то оно движется равномерно и прямолинейно или покоится. Действие других тел приводит к изменению скорости тела, т.е. к появлению ускорения. Основным законом динамики

материальной точки является второй закон Ньютона $a = \frac{F}{m}$, где сила F - мера воздействия других тел на данное тело. Ускорение тела зависит также от свойств самого тела, его инерции. Масса тела m является мерой его

инертности.

Для вращательного движения твердого тела выполняются законы, аналогичные законам Ньютона, т.е. если на тело не действуют никакие другие тела, то оно вращается равномерно либо покоится.



Действие других тел приводит к изменению скорости вращения, т.е. к появлению ускорения. Мерой воздействия других тел является сила, но вращательное действие силы зависит не только от ее величины и направления, но и от точки приложения силы. Вращательное действие силы характеризуется моментом силы. *Момент силы* относительно оси O равен произведению силы на плечо (рис. 4):

$$M = Fl, \quad (5)$$

где l - плечо силы, равное кратчайшему расстоянию от оси вращения до линии, вдоль которой действует сила. Если на тело действует несколько сил, то характер его вращения будет определяться алгебраической суммой всех приложенных моментов. В частном случае, когда алгебраическая сумма моментов этих сил относительно оси вращения равна нулю, тело будет находиться в равновесии. Момент силы положителен, если сила вращает тело по часовой стрелке, и отрицателен в обратном случае.

Угловое ускорение ε вращающегося тела определяется приложенным к нему моментом силы и инертными свойствами тела, и для вращательного движения выполняется закон, аналогичный второму закону Ньютона – *основной закон динамики вращательного движения: угловое ускорение тела прямо пропорционально моменту сил, действующих на тело, и обратно пропорционально моменту инерции тела:*

$$\varepsilon = \frac{M}{J}. \quad (6)$$

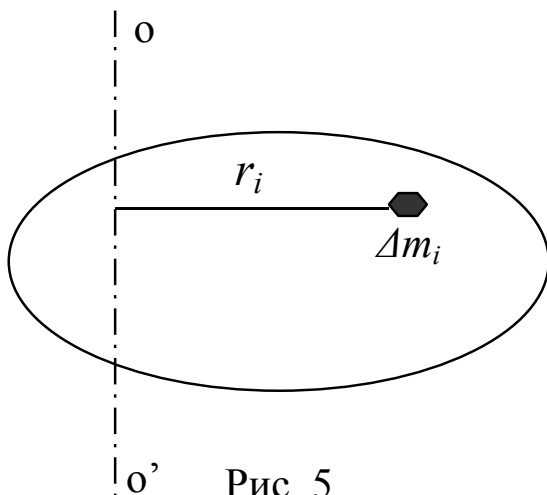


Рис. 5

Мерой инертности тела при вращательном движении является *момент инерции J* . Он зависит не только от массы, но и от ее распределения относительно оси вращения. Момент инерции материальной точки относительно оси пропорционален ее массе и квадрату расстояния до оси. Для вычисления момента инерции тела разобьем его на малые части, такие, чтобы каждую часть можно было принять за материальную точку (рис. 5). Тогда момент инерции тела будет равен сумме моментов инерции всех этих частей, т. е.

$$J = \Delta m_1 r_1^2 + \Delta m_2 r_2^2 + \dots + \Delta m_i r_i^2 + \dots + \Delta m_n r_n^2 = \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2, \quad (7)$$

где $\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_i, \dots, \Delta m_n$, - массы этих частей, а r_i - расстояние от i -й частицы до оси вращения (рис. 5).

Единица измерения момента инерции в СИ - $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент инерции тела зависит от его массы, размеров, формы и положения оси. Момент инерции диска (сплошного цилиндра) относительно оси, перпендикулярной к его плоскости и проходящей через его центр (оси симметрии),

$$J_g = \frac{mR^2}{2}, \quad (8)$$

где m - масса диска; R - его радиус.

Момент инерции толстого кольца относительно оси симметрии

$$J_K = \frac{m(R_1^2 + R_2^2)}{2}, \quad (9)$$

где m - масса кольца; R_1 - внутренний радиус кольца; R_2 - наружный радиус кольца.

Для тонкостенного обруча (кольца) $R_1 \approx R_2 = R$, поэтому формула (9) примет вид:

$$J_{\text{обр}} = mR^2. \quad (10)$$

Момент импульса: при вращательном движении тела каждая его частица с массой Δm_i описывает окружность радиуса r_i , имея при этом линейную скорость $v_i = \omega r_i$, где ω - угловая скорость вращения, общая для всех точек тела. Известно, что величина $m v$ есть импульс тела. Величина $L = m v r$ называется *моментом импульса* материальной точки. Тогда момент импульса, вращающего тело, равен сумме моментов импульсов отдельных его частиц:

$$L = \sum_{i=1}^n \Delta m_i v_i r_i = \sum_{i=1}^n \Delta m_i \omega r_i r_i = \omega \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2 = J \omega.$$

Итак, момент импульса вращающегося тела

$$L = J \omega. \quad (11)$$

Учитывая, что $\varepsilon = d\omega/dt$, и считая момент инерции тела постоянным, можно переписать уравнение (6) в виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M \quad \text{или} \quad \frac{dL}{dt} = \frac{d(J\omega)}{dt} = M, \quad (12)$$

т. е. изменение момента импульса тела за единицу времени равно сумме моментов сил, действующих на тело.

Закон сохранения момента импульса: если суммарный момент импульса внешних сил $M = 0$, то $d(J\omega)/dt = 0$, откуда

$$L = J\omega = \text{const},$$

т. е. в этом случае полный момент импульса постоянен.

Этот результат можно распространить на любую изолированную систему взаимодействующих тел, он выражает закон сохранения момента импульса

$$\sum_{i=1}^n J_i \omega_i = \text{const} \quad (13)$$

Если суммарный момент всех внешних сил, действующих на систему, равен нулю, то момент импульса системы сохраняется.

Закон изменения момента импульса (12) является более фундаментальным, чем основной закон динамики вращательного движения (6). Для абсолютно твердого тела ($J = \text{const}$) они эквивалентны, но если момент инерции изменяется, то выполняется только (12).

Кинетическая энергия вращающегося тела не равна $mV^2/2$, так как скорости разных точек тела различны. Чтобы найти кинетическую энергию вращающегося тела, разобьем тело на мелкие части. Тогда кинетическая энергия тела равна сумме кинетических энергий всех его частей. Так как каждую часть можно принять за материальную точку, то кинетическая энергия i -й части

$$\Delta W_{\text{кин},i} = \frac{\Delta m_i v_i^2}{2} = \frac{\Delta m_i r_i^2 \omega^2}{2}.$$

Угловая скорость ω одинакова для всех частей твердого тела. Тогда

$$W_{\text{кин}} = \sum_{i=1}^n \Delta W_{\text{кин},i} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta m_i r_i^2 \omega^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2 = \frac{J\omega^2}{2}, \quad \text{т. е.}$$

$$W_K = \frac{J\omega^2}{2}. \quad (14)$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № I-2I

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: экспериментальное определение момента инерции твердого тела методом крутильных колебаний.

Описание установки и метода крутильных колебаний

Одним из способов опытного определения момента инерции тела является метод крутильных колебаний, применяемый в настоящей работе. Если груз, подвешенный на упругой нити или проволоке, закрутить на некоторый угол и отпустить его, то груз начнет совершать крутильные колебания. Колебания происходят благодаря упругим свойствам закручивавшейся нити, такая система представляет собой крутильный маятник.

При закручивании нити возникает вращающий момент сил, пропорциональный углу поворота φ :

$$M = -f\varphi,$$

где f - модуль кручения проволоки.

Период колебаний T крутильного маятника можно найти по аналогии с пружинным маятником, период колебаний которого

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

При крутильных колебаниях роль массы тела играет момент инерции J , а роль коэффициента жесткости пружины k играет модуль кручения нити f . Таким образом, период крутильных колебаний маятника

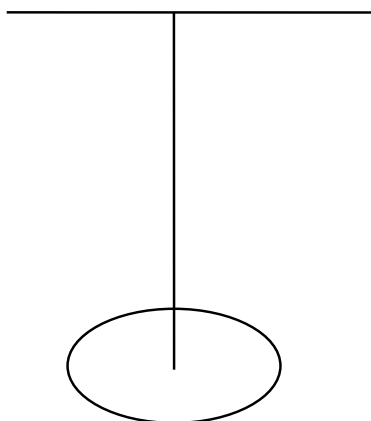


Рис.6

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{f}} \quad (1)$$

Из (1) следует, что если известен модуль кручения проволоки, то измерив период крутильных колебаний тела, подвешенного на ней, легко определить момент инерции тела. Но модуль кручения зависит от длины проволоки и его трудно сохранить постоянным. Поэтому целесообразно измерять его в процессе работы. Для этого достаточно иметь тело с известным моментом инерции, например, диск. Измерив период крутильных колебаний этого диска, можно рассчитать модуль кручения.

В настоящей работе к стержню, жестко укрепленному в стене, прикреплена проволока, на нижнем конце которой закрепляется диск,

имеющий момент инерции J_g . Если закрутить диск на некоторый угол и отпустить его, то диск будет совершать крутильные колебания с периодом

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J_g}{f}} \quad (2)$$

Если на диск наложить исследуемое тело (кольцо) с моментом инерции J_x и снова закрутить его на некоторый угол, то система диск-тело будет совершать крутильные колебания с периодом

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{J_g + J_x}{f}} \quad (3)$$

Исключая из уравнений (2), (3) неизвестный модуль кручения f и решая их относительно J_x , получим

$$J_x = J_g \frac{T_2^2 - T_1^2}{T_1^2} \quad (4)$$

Измерив T_1 , T_2 и учитывая, что $J_g = mR^2 / 2$, можно определить момент инерции испытуемого тела.

Порядок выполнения работы

1. Подвесьте диск, закрутите его на угол $\varphi = 60 - 120^\circ$ и отпустите. Пропустив несколько колебаний, включите секундомер и отсчитайте время десяти колебаний диска t_l . Полным колебанием считается такое, в котором диск из крайнего, например, левого положения возвращается снова в левое положение. Время десяти колебаний следует измерять до десятых долей секунды, а период колебаний - до сотых долей секунды. Следует учитывать, что случайная погрешность измерения времени не превышает десятых долей секунды. Поэтому, если два измерения времени отличаются на секунду и более, то измерения должны быть переделаны. Период колебания диска определяется 5 раз, результаты вносятся в табл.1.

Таблица 1

№ п/п	T_1, c	ΔT_1	$(\Delta T_1)^2$	Погрешности и окончательный результат
1 . . . 5				$S_{\bar{T}} = \dots$ $\Delta T_1 = 0.01 \text{ c}$ $\Delta \bar{T} = \dots$
Среднее		$S_{\bar{T}}^2 = \dots$		$\bar{T} \pm \Delta \bar{T} = \dots$

2. Положите на диск испытуемое тело и таким же способом, как в п.1, определите период T_2 колебаний системы диск-тело, значения T_2 занесите в табл.2, аналогичную табл.1.

3. Масса диска m_g приведена на установке. Запишите ее в табл.2.

4. Измерьте штангенциркулем радиус диска R_g , запишите его значение в табл.2.

5. Вычислите момент инерции диска J_g и его погрешность.

Таблица 2

Обозначение величины	R_g , м	m_g , кг	J_g , кг·м ²
Результат измерения			
Погрешность			

6. Вычислите момент инерции тела по формуле (4).

Определите погрешность J_X по общим правилам определения погрешности косвенных измерений.

Вопросы и задачи к лабораторной работе I-21

1. Почему описанный в работе метод крутильных колебаний можно применять только для определения момента инерции тел правильной формы, масса которых распределена симметрично относительно оси вращения?

2. Период крутильных колебаний диска равен 2 с. Чему равен период колебаний диска с наложенным на него концентрическим кольцом, если момент инерции кольца в 3 раза больше момента инерции диска?

3. Два сплошных диска, сделанные из разных материалов с плотностями ρ_1 и ρ_2 ($\rho_2 = 2\rho_1$), имеют одинаковую массу и толщину. Найти отношение их моментов инерции относительно осей симметрии.

4. На упругой нити подвешен диск. Некоторая сила, приложенная к поверхности диска, закручивает нить на угол φ . Эта же сила, приложенная в положении равновесия, сообщает диску ускорение ε . Найти период крутильных колебаний диска.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1-22

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: 1) проверка основного закона динамики вращательного движения; 2) определение момента инерции используемого в установке диска.

Описание установки

Установка представляет со-бой диск, насаженный на горизонтальную ось. Диск имеет два шкива с радиусами R_1 и R_2 . На один из шкивов навивается нить (см. рис.7). К концу нити подвешивается груз массой m . Груз натягивает нить, которая в свою очередь приводит во вращение диск.

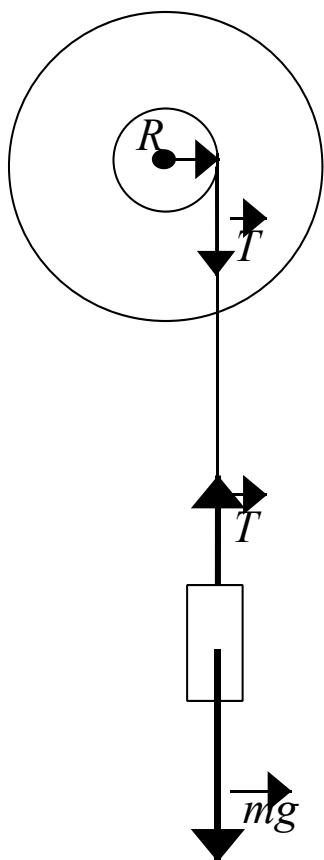


Рис. 7

Основной закон динамики вращательного движения выражается формулой

$$\varepsilon = \frac{M}{J} \quad (1)$$

Момент, при-водящий во вращение диск, создается силой натяжения нити T

$$M = TR$$

(В данном случае плечо силы равно радиусу шкива R). Сила натяжения нити не пропорциональна весу груза и зависит от ускорения, с которым падает груз. Ее можно найти из второго закона Ньютона для груза (в проекци-ях на ось X) $ma = mg - T$, откуда

$$M = TR = m(g - a)R, \quad (2)$$

где a -ускорение, с которым движется груз.

При расчете мы пренебрегли силами трения. Для того чтобы рассчитать величину момента силы, нужно знать ускорение a , с которым опускается груз. Путь при равноускоренном движении без начальной скорости

$$S = \frac{at^2}{2}, \text{ где } t - \text{ время движения. Отсюда}$$

$$a = \frac{2S}{t^2} \quad (3)$$

Угловое ускорение находится из соотношения

$$\varepsilon = a / R \quad (4)$$

Значения R_1 , R_2 , массы грузов m и S задаются в лаборатории. Время движения груза t измеряется электрическим секундо-мером, который включается и выключается автоматически с помощью реле. В начале опыта диск удерживается электромагнитом. Переключатель K разрывает цепь электромагнита и одновременно включает электрический секундомер. В нижней части шкалы имеется платформа, о которую уда-ряется груз, при этом

автоматически выключается секундомер.

Порядок выполнения работы

1. Включают в сеть секундомер и выпрямитель, питающий электромагнит.
2. Навивают нить на шкив, прикрепляют к нити груз m_1 и устанавливают его у верхней (нулевой) отметки.
3. Нажимают на кнопку, отпускающую диск и включающую секундомер.
4. После удара груза о платформу снимают показания секундомера, после чего возвращают стрелки на нуль нажатием рычажка с правой стороны секундомера. Измерение времени падения груза повторяют два раза и результаты записывают в таблицу. Если результаты отличаются более, чем на 5 %, то измерения следует выполнить снова. Для расчетов используют среднее значение двух измерений времени.
5. Измерения проделывают со вторым и третьим грузом m_2 и m_3 .
6. Таким же образом проделывают опыты с тремя грузами на шкиве другого радиуса. Результаты всех измерений S заносятся в табл.1.

Таблица 1

№ п/п	m кг	R м	t_1 с	t_2 с	t_{cp} с	a м/с ²	ε с ⁻¹	M Н.м
1								
·								
·								
6								

7. Выполняют расчеты величин a , ε , M , результаты заносят в табл.1. Строят график зависимости $\varepsilon = f(M)$.

8. Момент инерции диска определяют по формуле $J = M / \varepsilon$ для всех шести измерений и заносят в табл.2. Результат и погрешности рассчитывают как для многократных косвенных измерений.

Таблица 2

№ п/п	J_i , кг·м ²	ΔJ_i	$(\Delta J_i)^2$	Погрешности и результат

1 . . . 5				$S_{\bar{J}} = \dots$ $\Delta J_{сист} = 0$ $\Delta \bar{J} = \dots$
Среднее		$S_{\bar{J}}^2 = \dots$		$\bar{J} \pm \Delta \bar{J} = \dots$

Задачи по теме 1-2

1. Найти угловое ускорение диска массой 2 кг и радиусом 0,1 м под действием силы $F = 3H$, приложенной к концу радиуса и составляющей угол $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ с радиусом.

2. На концах и в центре невесомого стержня закреплены три материальные точки массами $m_1 = 0,5 \text{ кг}$, $m_2 = 0,3 \text{ кг}$, $m_3 = 0,2 \text{ кг}$. В этих же точках действуют силы $F_1 = 2 \text{ Н}$, $F_2 = 5 \text{ Н}$ и $F_3 = 3 \text{ Н}$. Длина стержня 2 м. Ось проходит на расстоянии 0,6 м от левого конца. Найдите угловое ускорение стержня.

3. Найдите скорость груза в данной установке после падения с высоты S , используя закон сохранения энергии.

4. В установке (с. 27) момент инерции маховика - $0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, масса груза - $0,2 \text{ кг}$, радиус шкива - $0,1 \text{ м}$. Найдите ускорение груза и силу натяжения, если на маховик действует момент сил трения $0,05 \text{ Нм}$.

5. Стержень закреплен на горизонтальной оси, проходящей через его конец. Найдите ускорение другого конца стержня, при угле отклонения 30° , 45° , 60° .

6. Два диска свободно вращаются вокруг вертикальной оси в противоположные стороны, делая по 15 об./мин. Затем верхний диск падает на нижний, и они начинают вращаться с одинаковой скоростью. Найдите эту скорость вращения. Диски сделаны из одного материала и имеют одинаковую толщину. Радиус нижнего диска $R_2 = 1,4 \cdot R_1$, где R_1 - радиус верхнего диска.

7. Стержень расположен горизонтально, и через один его конец проходит горизонтальная ось. Стержень отпустили. Найдите скорость второго конца стержня при прохождении положения равновесия. Используйте закон сохранения энергии.

8. Тело равномерно вращается вокруг горизонтальной оси. В каких случаях скорость вращения тела увеличится:

а) на тело подействовала сила, приложенная слева от оси и направленная вниз;

б) на тело подействовала сила, приложенная справа от оси и направленная вниз;

в) на тело подействовала сила, приложенная снизу от оси и направленная влево?

г) уменьшился момент инерции тела.

Библиографический список

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т.1. Механика, молекулярная физика, колебания и волны: учебное пособие для вузов. Изд. 7-е, стер. – СПб., «Лань», 2007.-352с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики: Т.1, М., Астрель, 2006.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - Изд.7-е. М., 2008.

Тема 1-1.Законы динамики. Виды сил.....	3
Лабораторная работа № 1 – 11. Определение коэффициента вязкости по методу Стокса.....	7
Вопросы и задачи по теме 1 – 1.....	11
Приложение. Решение основной задачи динамики с использованием компьютера (задание для НИРС).....	12
Тема 1 –2. Динамика вращательного движения.....	19
Лабораторная работа № 1 – 21. Определение момента инерции твёрдого тела методом крутильных колебаний.....	23
Лабораторная работа № 1 – 22. Изучение основного закона динамики вращательного движения.....	27
Задачи по теме 1 – 2.....	30
Библиографический список.....	31