

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

Кафедра физики

В.А. Курочкин

ФИЗИКА

ПОСОБИЕ

по выполнению лабораторной работы М-9

**ПОЛНАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ
ТВЕРДОГО ТЕЛА**

(на установке «Маятник Обербека»)

*для студентов I курса
всех специальностей
всех форм обучения*

Москва - 2013

ББК 53

К93

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. А.А. Куколева

Курочкин В.А.

К93 Физика: пособие по выполнению лабораторной работы М-9 «Полная механическая энергия твердого тела» (на установке «Маятник Обербека»). -М.: МГТУ ГА, 2013 .- 12 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика» по Учебному плану для студентов 1 курса всех специальностей всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 04.10.13 г. и методического совета 22.10.13 г.

Редактор И.В. Вилкова

Подписано в печать 07.02.14 г.

Печать офсетная
0,7 усл.печ.л.

Формат 60x84/16
Заказ № 1707/

0,62 уч.-изд. л.
Тираж 200 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Редакционно-издательский отдел
125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а

© Московский государственный
технический университет ГА, 2013

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА М-9

ПОЛНАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ТВЁРДОГО ТЕЛА

(на установке «Маятник Обербека»)

1. Цель работы

Изучение энергетических характеристик механического движения твёрдого тела; исследование зависимости кинетической энергии вращения твёрдого тела от его момента инерции и угловой скорости вращения; экспериментальная проверка выполнимости законов сохранения и изменения полной механической энергии в системе с вращающимся твёрдым телом.

2. Подготовка к работе

Изучите теоретический материал по учебникам [1–3] и методическому описанию: понятие момента инерции; способы расчёта кинетической энергии абсолютно твёрдого тела при плоском движении; законы сохранения и изменения полной механической энергии. Ознакомьтесь с устройством лабораторной установки, методом косвенного измерения кинетической энергии вращения и способами графической обработки экспериментальных данных. Подготовьте ответы на вопросы для допуска.

3. Краткая теория

В механике твёрдых тел принимается идеализированная модель **абсолютно твёрдого тела** (АТТ) - тела, деформациями которого в данных условиях можно пренебречь.

АТТ, вращающееся вокруг некоторой оси z , можно представить как систему элементарных масс Δm_i (материальных точек), расстояния между которыми неизменны. Эти массы имеют различные линейные скорости \vec{v}_i и одинаковую угловую скорость ω ; при этом

$$v_i = \omega R_i, \quad (1)$$

где R_i - расстояния элементарных масс до оси вращения.

Кинетическая энергия T_{ep} вращающегося АТГ определяется как сумма кинетических энергий T_i всех масс Δm_i

$$T_{ep} = \sum_i T_i = \sum_i \frac{\Delta m_i \cdot v_i^2}{2}. \quad (2)$$

Подставляя соотношение (1) в формулу (2), получаем

$$T_{ep} = \frac{\omega^2}{2} \sum_i \Delta m_i \cdot R_i^2 = \frac{I_z \cdot \omega^2}{2}, \quad (3)$$

где величина $I_z = \sum_i \Delta m_i \cdot R_i^2$ называется **моментом инерции АТГ** относительно выбранной оси z .

Если АТГ совершает **плоское** движение, одновременно свободно вращаясь и двигаясь поступательно, то его кинетическую энергию можно записать как сумму

$$T = \frac{I_c \cdot \omega^2}{2} + \frac{m v_c^2}{2}, \quad (4)$$

где m – полная масса АТГ;

v_c – скорость его центра масс;

I_c – момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс.

При **поступательном** (без вращения) движении АТГ в правой части формулы (4) учитывается только второе слагаемое.

При **вращательном** движении вокруг оси, проходящей через неподвижный центр масс, в правой части формулы (4) следует учитывать только первое слагаемое.

В поле **консервативных** сил (т. е. сил, работа которых зависит только от начального и конечного положения тела и не зависит от вида траектории и закона движения) выполняется **закон сохранения полной механической энергии E**

$$E = T + \Pi = const, \quad (5)$$

при этом потенциальная энергия Π в процессе движения может частично или полностью переходить в кинетическую энергию T .

Если на участке траектории $1 \rightarrow 2$ совершается работа **неконсервативных** сил A , то выполняется **закон изменения полной механической энергии E**

$$E_2 - E_1 = (T_2 + \Pi_2) - (T_1 + \Pi_1) = A. \quad (6)$$

В случае сил трения, совершающих отрицательную работу A ,

$$E_2 - E_1 = A < 0. \quad (7)$$

4. Методика проведения эксперимента и описание установки

Внешний вид лабораторной установки показан на рис. 1. Вращающееся твёрдое тело выполнено в виде крестовины 1 с закреплённой горизонтальной осью и перемещаемыми грузами 2. Изменяя расстояния R этих грузов массой M относительно оси, можно изменять полный момент инерции вращающегося тела I_z . Крестовина с грузами приводится во вращение дополнительным грузом 3 на нити 4, намотанной на шкив 5. Изменяя массу m груза 3 и измеряя время его движения t , можно регулировать и определять величину конечной угловой скорости ω крестовины.

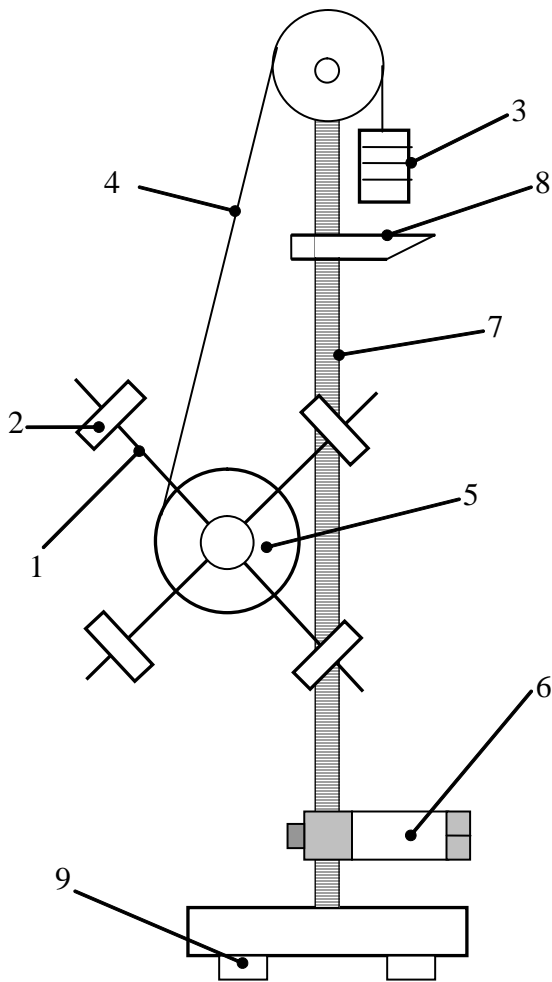


Рис. 1

Время движения t груза 3 измеряется электронным секундомером в момент пересечения грузом светового луча фотодатчика 6. Длина пути h , проходимого грузом 3, определяется по шкале на вертикальной штанге 7.

На рис. 2 представлена **принципиальная схема** лабораторной установки, где указаны параметры, подлежащие **прямым** измерениям.

Кинетическая энергия T_{ep} вращательного движения крестовины 1 с грузами 2 измеряется **косвенно** на основе формулы (3) (в предположении, что все вращающиеся в установке тела являются абсолютно твёрдыми). Для необходимых для этого величин момента инерции I_z и

угловой скорости ω установим приближённые функциональные соотношения:

1. Учитывая, что измерения проводятся при расстояниях R , значительно превышающих собственные размеры грузов 2, принимаем эти грузы за материальные точки, тогда

$$I_z = 4MR^2 + I_0, \quad (8)$$

где I_0 - момент инерции всех остальных вращающихся элементов крестовины – стержней и закрепляющего стержни центрального металлического диска.

2. Считаем все действующие на движущиеся тела силы постоянными, а нить 4 – нерастяжимой и невесомой. Тогда согласно кинематике равноускоренного движения груз 3 на пути h за время t достигнет скорости

$$v = a_0 t = \frac{2h}{t}; \quad (9)$$

а конечная угловая скорость ω крестовины будет равна

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h}{rt}, \quad (10)$$

где a_0 - ускорение;

r - радиус шкива 5.

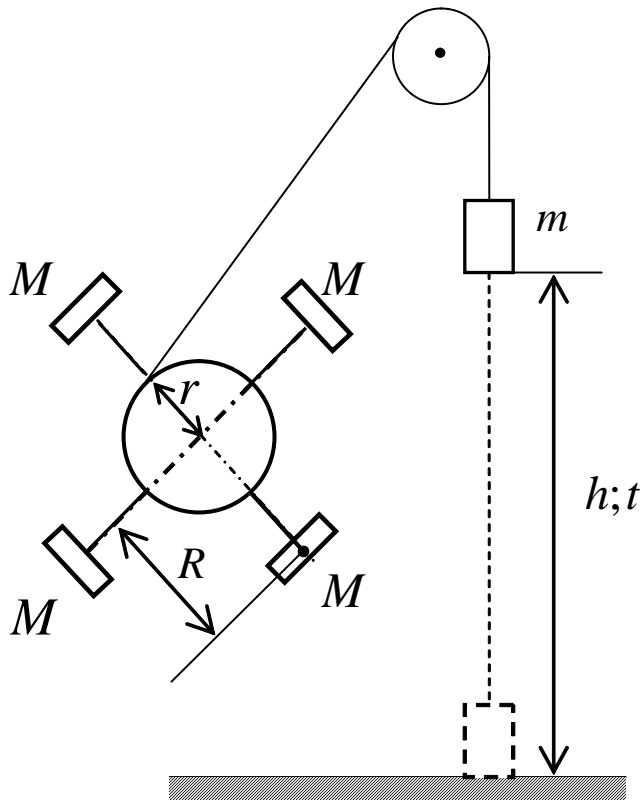


Рис. 2

Для экспериментальной проверки законов (5), (6) установим соответствующие количественные соотношения между косвенно измеряемыми энергетическими параметрами.

В момент начала движения полная механическая энергия системы E_1 равна потенциальной энергии Π_1 груза 3 (относительно нижнего положения, где значение Π_2 принимается равным нулю)

$$E_1 = \Pi_1 = mgh. \quad (11)$$

К моменту остановки движения полная механическая энергия системы E_2 представляет собой сумму конечных значений кинетической энергии вращения крестовины и кинетической энергии поступательного движения груза 3

стержней и кинетической энергии поступательного движения груза 3

$$E_2 = T_{ep} + \frac{mv^2}{2} = \frac{I_z \omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2}, \quad (12)$$

где v - конечная скорость груза 3;

ω - конечная угловая скорость вращения крестовины.

Подставляя величины E_1 и E_2 в формулу (7), получаем соотношение, подлежащее экспериментальной проверке

$$E_2 - E_1 = T_{ep} + \frac{mv^2}{2} - mgh = A < 0. \quad (13)$$

Величина A определяется графическим методом при специальном выборе условий измерения, обеспечивающих постоянство этой величины. Предполагается, что силы трения совершают работу в основном на оси вращения крестовины. Так как нагрузка на ось со стороны грузов 2 при их перемещениях остаётся неизменной, то величина A должна зависеть только от величины полного угла поворота крестовины при движении груза 3 на пути h . Поэтому, проводя измерения при условии $h = const$, можно считать величину A в равенстве (13) постоянной.

Опытная проверка полученного соотношения (13) проводится в следующем порядке:

1. Вводится обозначение для полной кинетической энергии системы

$$T = T_{ep} + \frac{mv^2}{2}. \quad (14)$$

2. Формула (13) представляется в следующем виде

$$T = mgh + A. \quad (15)$$

3. При задаваемых и неизменных величинах R и h проводятся косвенные измерения величин T в зависимости от массы m груза 3 (с использованием формул (3), (8), (9), (10)).

4. Строится график зависимости $T(mh)$. Согласно формуле (15), этот график должен иметь вид прямой линии $y = ax + b$ ($y = T; x = mh$) с коэффициентом наклона, равным ускорению свободного падения

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta(T)}{\Delta(mh)} = g, \quad (16)$$

и отрезком, отсекаемым на отрицательном участке оси ординат, равным работе сил трения

$$b = A. \quad (17)$$

Сравнивая опытное значение g с табличной величиной $g = 9,8 \frac{M}{c^2}$, можно сделать выводы о соответствии результатов эксперимента теоретическому закону (6).

5. Порядок выполнения работы

5.1 Подготовка установки к работе.

5.1.1. С помощью регулировочных винтов 9 установить штангу со шкалой 7 в вертикальное положение. При этом штанга должна быть параллельна нити свободно висящего груза 3, а при опускании груз 3 должен проходить по центру отверстия фотодатчика 6, не задевая его стенок.

5.1.2. Включить установку в сеть 220 В (выполняет лаборант). При этом кнопка электромагнита на задней панели секундомера должна находиться в выключенном состоянии.

5.2. Измерение зависимости времени t_i опускания груза 3 от его массы m_i при неизменных расстояниях R и h .

5.2.1. Записать в верхнюю строку табл. 2 значения R и h , указанные в табл. 1 для вашей бригады.

5.2.2. Освободив закрепляющие винты на грузах 2, установить центры этих грузов на заданных одинаковых расстояниях R от оси вращения крестовины (величина R отсчитывается от **центров** грузов по количеству сантиметровых делений на стержнях крестовины с добавлением радиуса центрального металлического диска, равного 2 см). После установки закрепить грузы винтами.

5.2.3. Установить фиксатор 8 на необходимую высоту h , отсчитываемую от линии луча фотодатчика 6 до верхней кромки фиксатора. Повернуть фиксатор возможно ближе к грузу 3, но так, чтобы он не касался груза при его вертикальном движении.

5.2.4. Установить первую, указанную во второй строке табл. 2, полную массу m груза 3, помещая при необходимости на его платформу дополнительные диски (массы платформы и дисков указаны на их поверхностях).

5.2.5. Вращая крестовину против часовой стрелки и наматывая при этом нить на шкив 5, совместить на глаз **нижнюю** поверхность груза 3 с **верхней** кромкой фиксатора. Придерживая крестовину, включить электромагнит кнопкой на задней панели секундомера и отпустить заторможенную крестовину.

5.2.6. Нажать кнопку «Пуск» на передней панели секундомера и после автоматической остановки груза 3 записать показание времени t_1 на шкале секундомера в табл. 2.

5.2.7. Не изменяя массы m груза 3, повторить измерения по пунктам 5.2.4 – 5.2.6 ещё дважды и записать результаты в табл. 2.

5.2.8. Не изменяя величин R и h , произвести аналогичные пунктам 5.2.4 – 5.2.6 трёхкратные измерения времени t_i для шести других значений m_i , указанных во второй строке табл. 2. Полученные данные занести в табл. 2.

6. Обработка результатов измерений и оформление отчёта

6.1. Для величин h и m , записанных соответственно в первой и второй строках табл. 2, рассчитать величины произведений mh . Записать результаты в табл. 2.

6.2. По данным табл. 2. рассчитать средние значения времени $\langle t \rangle$ для всех семи значений m . Занести величины $\langle t \rangle$ в табл. 2.

6.3. Рассчитать величины момента инерции I_z (формула (8)), конечной скорости v груза 3 (формула (9)) и конечной угловой скорости крестовины ω (формула (10)) (значения r и I_0 указаны на стенде, величина M - на поверхностях грузов 2). Результаты записать в табл. 2.

6.4. По формулам (3) и (14) определить опытные значения кинетической энергии вращения T_{ep} и полной кинетической энергии системы T . Полученные данные занести в табл. 2.

6.5. В соответствии с формулой (15) построить график зависимости $y = T$ от $x = mh$ и, используя метод наименьших квадратов (МНК), определить коэффициент наклона графика, равный ускорению свободного падения g , и величину работы сил трения A (формулы (16) и (17)). Для этого открыть на рабочем столе лабораторного компьютера папку «Обработка результатов ЛР» и файл «Расчёт $y = ax + b$ МНК». Результаты расчёта опытных величин g и A в стандартной форме и относительную погрешность $\delta_g = \frac{\Delta g}{g}$ записать в нижнюю строку табл. 2.

6.6. Сравнивая опытное значение g с табличной величиной ускорения свободного падения $g = 9,8 \frac{м}{с^2}$, и учитывая результаты количественной оценки работы сил трения A , сделать выводы о соответствии результатов эксперимента теоретическому закону (6).

Таблица 1

Номер бригады	1	2	3	4
$R, м$	0,14	0,13	0,12	0,11
$h, м$	0,28	0,26	0,24	0,22

Таблица 2

	$R, м =$		$h, м =$		$I_z, кг \cdot м^2 =$		
$m, кг$	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06
$mh, кг \cdot м$							
$t, с$							
$\langle t \rangle, с$							
$v, м \cdot с^{-1}$							
$\omega, с^{-1}$							
$T_{вр}, Дж$							
$T, Дж$							
$g \pm \Delta g = \dots м \cdot с^{-2} \quad \delta_g = \dots \% \quad A \pm \Delta A = \dots Дж$							

7. Вопросы к допуску

7.1. Определите понятие абсолютно твёрдого тела (АТТ). От каких параметров АТТ зависит кинетическая энергия его вращения вокруг неподвижной оси? Каким образом влияет форма АТТ на величину его кинетической энергии? Как рассчитывается кинетическая энергия АТТ при его плоском движении?

7.2. Дайте определение полной механической энергии E . При каких условиях эта энергия сохраняется? Каким образом изменяется величина E при воздействии неконсервативных сил?

7.3. Что представляет собой вращающееся твёрдое тело в лабораторной установке? Каким образом приближённо рассчитывается момент инерции этого тела? Почему можно считать его вращение равноускоренным?

7.4. Укажите параметры движения тел в установке, подлежащие прямым измерениям. На основе каких зависимостей косвенно измеряется кинетическая энергия вращения?

7.5. Какой вид имеет зависимость косвенно измеряемой кинетической энергии вращения крестовины от параметров m и h груза 3? При каких условиях измерения работу сил трения можно считать постоянной в процессе измерения?

7.6.. Докажите на основе формул (3), (8), (9), что отношение кинетической энергии груза 3 к кинетической энергии вращательного движения $T_{вр}$ крестовины 1 с грузами 2 составляет порядка $r^2/4R^2$, если приближённо считать, что

$m \approx M$ и $I_z \approx 4MR^2$. Оцените величину этого отношения при $r = 0,035\text{ м}$ и $R = 0,14\text{ м}$.

7.7. Поясните графический метод определения опытной величины ускорения свободного падения g и работы сил трения A . Какой вид должен иметь график зависимости $T(mh)$ при пренебрежимо малой величине A ?

7.8. На основании каких экспериментальных данных можно судить о соответствии результатов эксперимента теоретическому закону изменения полной механической энергии?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1998. - Т.1.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1990.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1989.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы.....	3
2. Подготовка к работе.....	3
3. Краткая теория.....	3
4. Методика проведения эксперимента и описание установки.....	5
5. Порядок выполнения работы.....	8
6. Обработка результатов измерений и оформление отчета.....	9
7. Вопросы к допуску.....	10
Литература.....	11