

**Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Университет «Дубна»
Филиал «Протвино»
Кафедра «Математики и естественных наук»**

Ф.А. Ёч, А.А. Масликов

**Лабораторные работы
по общей физике.
«Механика»**

Электронное методическое пособие

Рекомендовано
кафедрой математики и естественных наук
филиала «Протвино» государственного университета
«Дубна»
в качестве методического пособия для студентов
направлений
«Автоматизация технологических процессов и производств»,
«Информатика и вычислительная техника»,
«Прикладная информатика», «Физика»

Протвино
2017

ББК 22.3 я 73
Е-95

Рецензент:
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
ФГБУ ГНЦ РФ «Институт физики высоких энергий»
НИЦ «Курчатовский институт»
А.В. Разумов

Ёч Ф.А., Масликов А.А.

Е-95 Лабораторные работы по общей физике. Механика.: учебно-методическое пособие /

Ф.А. Ёч, А.А. Масликов. – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна», филиал «Протвино», 2017. — 67 с.

Данное учебно-методическое пособие рассчитано на студентов изучающих общую физику в рамках комплекса общеобразовательных дисциплин. Пособие составлено авторами на основе опыта преподавания дисциплины «Механика» (лекции, семинары и лабораторные работы) начиная с 2000 г. В течение семестра изучаются различные разделы механики, а также студенты знакомятся с молекулярной физикой и термодинамикой.

При помощи компьютерных технологий результаты измерений на лабораторных установках непосредственно фиксируются компьютером и отображаются на мониторе. Это позволяет избежать утомительных, технических пересчетов измерений результатов в наглядную и удобную для обработки форму, что дает возможность выполнения каждой лабораторной работы во временных рамках двух академических часов.

Предназначено для студентов 2-го курса, обучающихся по направлениям «Автоматизация технологических процессов и производств», «Информатика и вычислительная техника», «Прикладная информатика» и «Физика». Для студентов направления «Физика» представленные в описании работы составляют экспериментальную часть общефизического практикума, дополняющую компьютерный практикум.

ББК 22.3я73
Е-95

ISBN 978-5-7042-2536-2

© Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна», филиал «Протвино», 2017

© Ёч Ф.А., Масликов А.А.

ВВЕДЕНИЕ

Программное обеспечение *L-micro* и работа с ним

Программное обеспечение (программа *L-micro*) для работы с набором «Практикум по физике» прилагается к компьютерному измерительному блоку. Программа позволяет регистрировать сигналы, поступающие от датчиков, отображать их на экране, проводить обработку данных и представлять ее результаты на экране. Программа допускает остановку записи данных в любой момент времени и оперативный просмотр полученных графиков.

ИНСТАЛЛЯЦИЯ ПРОГРАММЫ НА КОМПЬЮТЕРЕ:

Выключите питание компьютера. Подсоедините с помощью *COM*-удлинителя (поставляется вместе с измерительным блоком) компьютерный измерительный блок к *COM*-порту компьютера. Включите измерительный блок в сеть и включите компьютер. Поместите в привод диск с программным обеспечением. Запустите файл *SETUP* в директории *L-micro*. Следуйте инструкциям, выдаваемым программой. После установки программа будет расположена в каталоге *C:\Program Files\L-micro\Физика-практикум*, либо в той директории, которую вы выберете во время инсталляции на указанном Вами диске.

Если программа уже была установлена, и Вам нужно подключить измерительный блок, то сделайте следующее. Выключите компьютер. Подсоедините *COM*-удлинителем компьютерный измерительный блок к *COM*-порту компьютера. Включите измерительный блок и включите компьютер. Запустите «Программу поиска измерительного блока» в меню Пуск или программу *1-check*.

РАБОТА С ПРОГРАММОЙ:

Запустите программу *L-физика-практикум* с рабочего стола или из меню «Пуск».

В первом окне нажмите кнопку «Выбор работы» (нажав на левую кнопку мыши). В окне выбора эксперимента выберите указателем мыши нужный эксперимент и дважды щелкните на его название.

В следующем окне вы можете вызвать на экран краткое описание работы и порядка выполнения опыта, выполнить настройку оборудования (если это предписывается инструкцией по выполнению работы) или сразу перейти к измерениям.

В режиме настройки оборудования вы можете проверить работоспособность датчиков, используемых в опыте, и, если это требуется, настроить датчик.

В режиме проведения эксперимента на экране имеется система координат для построения зависимостей измеряемых величин от времени. На осях нанесены деления, соответствующие данному сценарию эксперимента.

В верхнем правом углу экрана находятся кнопки свертки окна программы и выхода из меню эксперимента. Управляющие кнопки расположены в нижней части экрана. Эти клавиши служат для управления программой в режиме измерений и при работе с полученными данными. В правой части экрана выводятся окна с цифровыми значениями измеряемых физических величин.

Регистрация данных и вывод их на график начинается при нажатии кнопки «Пуск», а останавливается кнопкой «Стоп», которая появляется на месте кнопки «Пуск» при регистрации данных. В режиме измерений окна цифровых индикаторов отображают сигнал от датчиков в текущий момент времени.

Кнопка «Пауза» служит для приостановки вывода графики на экран. При нажатии кнопки «Пауза» измерения не прерываются, останавливается вывод графиков и появляется возможность работы с данными, уже выведенными на экран. После нажатия кнопки «Пауза» она заменяется кнопкой «Далее», нажатие на которую приведет к выводу на экран всех данных, полученных за время после включения паузы и продолжению вывода измеряемых в данный момент значений.

Работа с данными на экране осуществляется после завершения записи данных или в режиме паузы. Щелчком левой клавиши мыши отметьте точку, в которой Вы хотите получить значения измеренных величин. При этом будет вызван курсор, представляющий собой вертикальную линию. Значения переменных, на которые наведен курсор, выводятся соответствующим цветом в окнах в правом верхнем углу экрана. В правом нижнем углу (белым цветом) выводится время от начала эксперимента. Вы можете перемещать курсор, нажав и не отпуская левую кнопку мыши на его линии.

После завершения эксперимента или в режиме паузы можно, нажав и не отпуская левую клавишу мыши, выделить (слева направо) квадрат на части экрана, отведенного под вывод графической информации. После того, как будет отпущена левая кнопка мыши, масштаб изменится так, что выделенный участок графика займет весь экран. Если выделить квадрат справа налево, график вернется к исходному масштабу. Вернуть к исходному масштабу только одну из осей помогут кнопки «Ось OX » и «Ось OY ». Преду-

смотрена возможность, не изменяя масштаба, сдвигать экран. Для этого необходимо нажать правую кнопку мышки и, не отпуская ее, двигать мышку вправо или влево. Сдвиг экрана также поможет рассмотреть график, в случае если часть графической информации попала под окна вывода. Чтобы полностью убрать с экрана индикаторы положения курсора пользуются двойным щелчком мыши. Чтобы вернуть индикаторы на прежнее место, достаточно дважды щелкнуть мышкой.

Лабораторная работа № 1

Соударение шаров

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: проверка закона сохранения энергии с использованием закона сохранения импульса на примере задачи о соударении шаров.

ОБОРУДОВАНИЕ:

Совместное применение законов сохранения энергии и импульса для прямого и центрального упругого удара двух шаров позволяет получить следующие соотношения для скоростей движения первого V_1 и второго V_2 шаров после соударения:

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------|
| • штатив | • электромагнит |
| • перекладина для подвешивания шаров | • измерительный блок L-микро |
| • пластина для установки датчиков | • блок питания |
| • шары из стали - 3 шт. | • штангенциркуль |
| • оптодатчики - 2 шт. | |

$$V_1 = \frac{2m_2V_{02} + (m_1 - m_2)V_{01}}{m_1 + m_2} \quad (1.1)$$

$$V_2 = \frac{(m_1 - m_2)V_{01} + 2m_1V_{01}}{m_1 + m_2} \quad (1.2)$$

где m_1 , m_2 — массы первого и второго шаров, V_{01} , V_{02} — скорости первого и второго шаров до соударения.

В эксперименте, выполняемом в данной лабораторной работе, один из шаров первоначально покоится ($V_{02}=0$), поэтому формулы (1.1) и (1.2) упрощаются:

$$V_1 = \frac{(m_1 - m_2)V_{01}}{m_1 + m_2} \quad (1.3)$$

$$V_2 = \frac{2m_1V_{01}}{m_1 + m_2} \quad (1.4)$$

Если массы шаров одинаковы ($m_1 = m_2$), то соотношения (1.3) и (1.4) принимают вид:

$$V_1 = 0 \quad (1.5)$$

$$V = V_{01} \quad (1.6)$$

То есть в результате столкновения налетающий шар останавливается, а второй шар начинает движение со скоростью, равной скорости первого шара до удара.

Очевидно, что кинетическая энергия системы T до столкновения равна (второй шар в экспериментах первоначально покоится):

$$T = \frac{m \cdot V_{01}^2}{2} \quad (1.7)$$

а кинетическая энергия системы после взаимодействия T' вычисляется по формуле:

$$T' = \frac{m \cdot V^2}{2} + \frac{m \cdot V^2}{2} \quad (1.8)$$

Экспериментальная часть данной лабораторной работы состоит в проверке на простой лабораторной установке законов сохранения импульса и энергии. Проверка заключается в проведении измерений, результаты которых обрабатываются и сравниваются количественно с выводами, следующими из законов сохранения энергии и импульса.

Схема лабораторной установки показана на фотографии (рис. 1.1.) На вертикальной стойке штатива установлен электромагнит и верхняя перекладина. Для удобства подвешивания шаров верхняя перекладина штатива имеет три проточки, расстояние между которыми соответствует суммам радиусов шаров, применяемых в опыте. Специальная крестовина позволяет закрепить верхнюю перекладину в одной плоскости с вертикальной стойкой штатива. На стол укладывается металлическая пластина. На металлической пластине размещаются два оптоэлектрических датчика для регистрации скорости движения шаров до и после удара.

На конце верхней перекладины подвешиваются два шара. В исходном положении один из шаров удерживается электромагнитом. При отключении питания электромагнита шар отпускается и движется по дуге окружности до столкновения со вторым шаром. При этом шар 1 приобретает скорость V_{01} , которая измеряется с помощью первого оптоэлектрического датчика.

Измерение скорости шаров в данной работе осуществляется следующим образом. Оптоэлектрический датчик состоит из опто-

пары — светодиода и фотодиода. Луч света от светодиода попадает на фотодиод. При движении шара мимо датчика луч света на некоторое время перекрывается. Интервал времени t , в течение которого свет был закрыт движущимся шаром, измеряется при помощи компьютерной измерительной системы. Для расчета скорости шара V достаточно разделить его диаметр D на t (при условии, что луч светодиода при движении проходит через центр шара):

$$V = D / t$$

Следует отметить, что скорость V_{01} шара 1 в нижнем положении направлена по горизонтали, а скорость шара 2 до столкновения равна нулю: $V_{02} = 0$. Нити, на которых подвешены шары, имеют такую длину, что центры шаров находятся на горизонтальной прямой, поэтому удар шара 1 по шару 2 можно считать упругим и центральным.

Скорость V_2 шара 2 измеряется непосредственно после удара при помощи второго датчика. При выполнении работы Вам необходимо сначала изучить столкновение стальных шаров одинаковой массы, а затем — стальных шаров разной массы (масса налетающего шара больше массы первоначально покоящегося шара). В последнем случае второй датчик будет последовательно регистрировать сначала пролет малого шара, а затем — большого. Измерения нужно проводить пять раз с каждой парой шаров и результаты вносить в таблицы 1.1 и 1.2. После проведения измерений вычисляется кинетическая энергия системы до и непосредственно после удара. Затем необходимо сравнить полученные результаты с вычисленными по формулам (1.5), (1.6) или (1.3), (1.4).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите лабораторную установку как показано на рис. 1.1. На вертикальную стойку штатива установите электромагнит и муфту с верхней перекладиной так, чтобы верхняя перекладина была перпендикулярна стержню и находилась с ней в одной плоскости. На верхнюю перекладину подвесьте два больших шара. Длина подвеса шаров должна быть ~ 45 см. Следите, чтобы использовались те проточки на верхней перекладине, которые одновременно обеспечивают соприкосновение шаров друг с другом в состоянии покоя и параллельность нитей подвеса. Выровняйте длину нитей и добейтесь того, чтобы центры шаров были на

одной высоте. Шары должны висеть так, чтобы при отклонении одного из них другой оставался неподвижен.

Установите один из датчиков в непосредственной близости от шаров и, перемещая муфту с верхней переключателем вверх-вниз, обеспечьте совпадение высоты оптической оси датчика (высоты расположения свето- и фотодиодов) с высотой, на которой находятся центры шаров. После этого отрегулируйте положение электромагнита. Электромагнит должен удерживать один из шаров, и нить этого шара при этом должна быть натянутой.

2. Датчики включите в первый и второй каналы блока (рис. 1.2). К третьему каналу подключите девятиштырьковый разъем кабеля, идущего от электромагнита. Два однополюсных разъема этого кабеля соедините с выводами блока питания (9В).

3. Запустите программу *L*-физика-практикум, выберите пункт меню «выбор работы» и в появившемся на экране списке выберите лабораторную работу «Соударение шаров».

4. Перед проведением измерений необходимо правильно выбрать положение оптодатчиков. Шары при этом должны неподвижно висеть на нитях. Один из датчиков (он будет регистрировать скорость налетающего шара до удара) устанавливается таким образом, чтобы, с одной стороны, осуществлять измерения как можно ближе к точке соударения, а с другой стороны, чтобы шар полностью пролетел мимо него до удара.

Выберите в программе пункт меню «НАСТРОЙКА». В возникшем окне вы увидите изображение оптоэлектрического датчика. Картинка изменяется, если оптоэлектрический датчик перекрыт.

Установите первый оптодатчик между электромагнитом и ближайшим к нему шаром вплотную к кромке шара. При этом луч света не должен быть перекрыт, что означает, что шар пролетит мимо датчика до начала взаимодействия с другим шаром. Аналогичным образом поставьте второй датчик в непосредственной близости от второго шара. Этот шар должен перекрыть луч света сразу, как только начнет движение. При установке датчиков можно использовать светодиод, смонтированный на внешней стороне корпуса (красное свечение соответствует перекрытому состоянию датчика). Важно подвесить шарики так, чтобы при прохождении шарика мимо датчика луч излучателя датчика проходил строго по диаметру шариков.

5. Нажмите на экранную кнопку «ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ». Это приведет к тому, что на электромагнит будет подано

напряжение, а окно настройки изменится на окно измерений. Подведите к электромагниту шар и после того, как он прилипнет, успокойте колебания второго шара.

6. При нажатии кнопки «пуск» в нижней части экрана питание электромагнита отключится, и шар начнет двигаться. Обратите внимание на движение налетающего шара после удара. На экране компьютера возникнет три интервала времени. Первый из них соответствует движению налетавшего шара мимо первого датчика, второй отражает время пролета первоначально покоившегося шара мимо второго датчика. Третий интервал времени — это возврат шара к положению равновесия. Он не используется при обработке результатов данного опыта. Повторите опыт 5 раз, записывая результаты в таблицу 1.1.

7. Замените шар, который до удара покоится, шаром меньшей массы, отрегулируйте длину его нити в соответствии с п. 1 и, настроив положения оптодатчиков (см. пп. 4, 5, 6), осуществите еще 5 запусков установки. Результаты опытов данной серии внесите в таблицу 2. Обратите внимание, что в этих опытах налетающий шар после столкновения продолжает движение, и третий интервал времени на экране компьютера соответствует времени его пролета мимо датчика. Для перехода из окна измерений в окно настройки служит кнопка « $\leftarrow$ » в правом верхнем углу экрана.

8. Измерьте диаметры шаров с помощью штангенциркуля и определите скорости движения шаров до и после столкновения. Сопоставьте скорости, полученные в эксперименте, со значениями, рассчитанными на основе формул (1.5), (1.6) — одинаковые шары и (1.3), (1.4) — разные шары. Массы шаров вычисляются исходя из их плотности ($\rho_{\text{стали}} = 7.8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) и диаметра D :

$$M = (1/6) \pi D^3 \rho$$

На основе полученных данных рассчитайте кинетическую энергию системы до и после столкновения и сравните полученные значения. Уменьшение кинетической энергии системы после соударения (если оно имеет место) означает, что в действительности удар не был абсолютно упругим и часть механической энергии перешла в тепловую.

Таблица 1.1

Столкновение двух шаров одинаковой массы

N измерения	t_1, c	t_2, c	$V_{01}, m/c$	$V_2, M/c$	$T, Дж$	$T', Дж$	$T, Дж$
1							
2							
3							
4							
5							
Среднее значение							

Таблица 1.2

Столкновение двух шаров разной массы

N измерения	t_1, c	t_2, c	t_3, c	$V_{01}, m/c$	$V_2, m/c$	$V_1, m/c$	$T, Дж$	$T', Дж$	$T, Дж$
1									
2									
3									
4									
5									
Среднее значение									

Обозначения, принятые в таблицах:

t_1, t_2, t_3 , — интервалы времени, регистрируемые компьютерной измерительной системой.

$V_{01}=D_1/t_1$ — скорость налетающего шара до столкновения (D_1)-диаметр налетающего шара).

$V_2=D_2/t_2$ — скорость первоначально покоящегося шара после столкновения (D_2 -диаметр этого шара).

$V_1=D_1/t_3$ — скорость налетающего шара после столкновения (в опыте с разными шарами).

T — кинетическая энергия системы до столкновения.

T' — кинетическая энергия системы после столкновения.

$T = T - T'$ — изменение кинетической энергии в результате взаимодействия шаров.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Включать в сеть измерительный блок L -микро можно только после его подключения к разъему порта компьютера.

Удары шаров по корпусам оптоэлектрических датчиков недопустимы, поэтому движение шаров следует останавливать сразу после регистрации необходимых интервалов времени.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое энергия? Что такое импульс?
2. В чем заключается закон сохранения механической энергии? Для каких систем он выполняется?
3. Чем отличается абсолютно упругий удар от абсолютно неупругого?
4. Как определить скорости тел после центрального абсолютно упругого удара?
5. Следствием каких законов являются эти выражения?

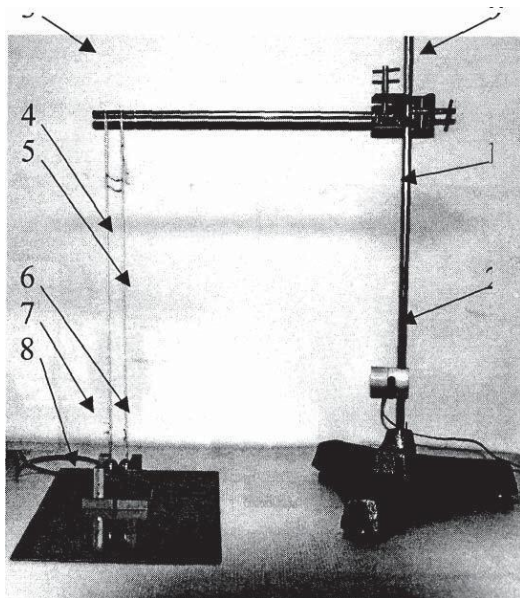


Рис. 1.1 Вид экспериментальной установки

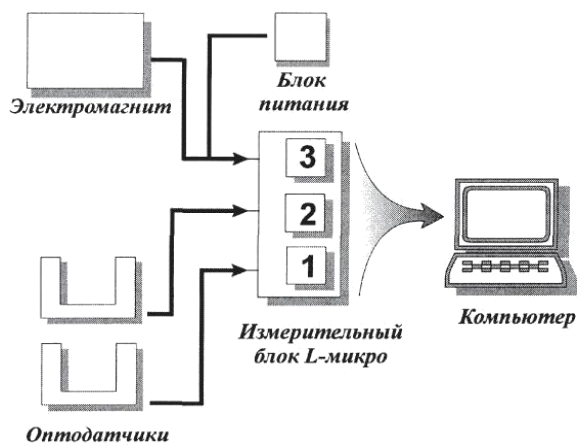


Рис. 1.2 Схема подключения установки

Лабораторная работа № 2

Измерение скорости тела баллистическим маятником

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: измерение скорости шарика с помощью баллистического маятника.

ОБОРУДОВАНИЕ:

- баллистический маятник
- датчик угла поворота
- метательное устройство
- измерительный блок
- металлический шарик
- L*-микро
- штатив универсальный
- линейка

Баллистический маятник представляет собой массивное тело, закрепленное таким образом, что оно может совершать колебания. Тело, скорость которого хотят измерить, неупруго сталкивается с первоначально покоящимся маятником (застревает в нем). После этого маятник отклоняется от положения равновесия и начинает совершать колебания. Ниже будет показано, что измерив угол максимального отклонения баллистического маятника, можно определить скорость, с которой двигалось тело до столкновения с маятником.

Применяемый в данной работе баллистический маятник устроен следующим образом (рис. 2.1). В боковую поверхность цилиндра (1) массой M ввинчена тонкая спица (2). Другой конец спицы закреплен в муфте (3) датчика угла поворота (4). Датчик угла поворота укреплен на вертикальной стойке штатива (5). Цилиндр (1) снабжен пластмассовой вставкой (6) для улавливания шарика, налетающего вдоль оси цилиндра. Вставка (6) выполнена в виде конуса с малым углом так, чтобы шарик (7) застревал в цилиндре примерно в его центре масс. Шарик выстреливается пружинным метательным устройством (8).

Рассмотрим взаимодействие шарика с маятником. В момент времени t_1 (рис. 2.2а) шарик подлетает к цилиндру (1) со скоростью v , маятник при этом неподвижен. В момент времени t_2 (рис. 2.2б) шарик уже застрял внутри баллистического маятника, часть кинетической энергии шарика израсходовалась на преодоление сил трения, часть передана баллистическому маятнику, в результате чего он приобретает скорость u . В момент времени t_3 (рис. 2.2в) маятник отклонился на угол α , центр тяжести его поднялся на высоту h , а кинетическая энергия, полученная в результате удара, перешла в потенциальную.

Столкновение шарика с маятником происходит не мгновенно, а в течение интервала времени $t_1 = t_2 - t_1$. Во время столкновения t_1 система не является консервативной, так как совершается работа против силы трения, но она является замкнутой, точнее, по оси удара действуют только внутренние силы и, следовательно, выполняется закон сохранения проекции импульса на направление движения шарика. Этим законом можно воспользоваться и записать:

$$Mv = (M + m) \cdot u \quad (2.1)$$

Здесь mv — импульс шарика до удара, $(M+m)u$ — импульс маятника с застрявшим в цилиндре шариком после удара, (m — масса шарика, M — масса баллистического маятника). Масса спицы мала по сравнению с массой цилиндра, ей можно пренебречь. Из равенства (2.1) определим скорость маятника в момент времени непосредственно после завершения процесса столкновения:

$$u = \frac{m}{M + m} \cdot v \quad (2.2)$$

Интервал времени столкновения t_1 во много раз меньше времени $t_2 = t_3 - t_2$ качания маятника ($t_1 \ll t_2$), поэтому за время столкновения шарик уже остановится относительно цилиндра, сообщив последнему начальную скорость u , а цилиндр еще не успеет сдвинуться на заметную величину. Таким образом, две части процесса превращения энергии происходят последовательно друг за другом, и рассматривать их можно раздельно.

Если в первой части процесса система замкнута, но не консервативна, то во второй части, во время качания, система незамкнута, но консервативна. Действительно, на баллистический маятник с застрявшим в нем шариком действуют сила тяжести $(M+m)g$ и сила упругости спицы — внешние силы по отношению к системе шарик — маятник. Следовательно, система незамкнута, и закон сохранения импульса неприменим. Но сила тяжести консервативна, сила упругой реакции спицы тоже консервативна, значит система шарик - цилиндр является консервативной. Отметим, что есть еще третья сила - сила трения в датчике угла поворота, но эта сила мала, и ею можно пренебречь по сравнению с консервативными силами.

В консервативной системе соблюдается закон сохранения энергии, это значит, что кинетическая энергия, которую приобретает маятник в момент времени t_2 , перейдет в потенциальную энергию поднятой на высоту h массы $(M+m)$ цилиндра с шариком внутри. Кинетическая энергия T в начале движения записывается так:

$$T = (M+m)u_2^2/2 \quad (2.3)$$

Подставив (2.2) в (2.3) и проведя некоторые преобразования, получим:

$$T = \frac{(M+m) \left(\frac{m}{M+m} \right) v^2}{2} = \frac{m^2 v^2}{2(M+m)} \quad (2.4)$$

Потенциальная энергия U поднятого на высоту h маятника равна:

$$U = (M+m)gh \quad (2.5)$$

и на основе закона сохранения энергии можно записать:

$$\frac{m^2 v^2}{2(M+m)} = (M+m)gh \quad (2.6)$$

Решая уравнение (2.6) относительно v , получаем:

$$v = \frac{(M+m)}{m} \cdot \sqrt{2gh} \quad (2.7)$$

Высота поднятия центра масс маятника при известном расстоянии l от точки подвеса до центра масс маятника определяется по углу отклонения α маятника, который измеряется датчиком угла поворота.

На рис. 2.2 в схематически показано поднятие центра масс маятника на высоту h в результате его отклонения на угол α . Из прямоугольного треугольника $OA'C$ следует, что $OC = l \cos \alpha$, $h = AO - OC = l - l \cos \alpha$, или:

$$h = l (1 - \cos \alpha) \quad (2.8)$$

Подставляя (2.8) в (2.7), получим расчетную формулу для определения скорости шарика:

$$v = \frac{M+m}{m} \sqrt{2gl(1-\cos\alpha)} \quad (2.9)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите установку как показано на рис. 2.1. Штатив собирается с длинной вертикальной стойкой (5), в верхней части которой закрепляется датчик угла поворота (4) с муфтой (3). Ось вращения датчика должна быть горизонтальной. В муфту вверните до упора длинную спицу (2), на конце которой закрепите цилиндр баллистического маятника (1). Ось цилиндра должна располагаться в плоскости колебаний маятника. Это направление фиксируется с помощью контргайки, которая находится на спице со стороны цилиндра.

Измерьте расстояние от оси цилиндра баллистического маятника до оси вращения датчика угла поворота. Полученную величину запишите в таблицу 2.2.

2. Подключите измерительный блок L-микро к разъему последовательного порта компьютера. После этого подсоедините его к сети (220 В, 50 Гц) и включите. Разъем датчика угла поворота присоедините к первому каналу измерительного блока (рис. 2.3).

3. Запустите программу *L* физика-практикум, выберите пункт меню «выбор работы» и в появившемся на экране списке выберите лабораторную работу «Измерение скорости тела методом баллистического маятника».

4. Вал датчика угла поворота может делать 10 оборотов вокруг оси. В данной работе используется часть рабочего диапазона датчика, находящаяся на одинаковом удалении (примерно 4 оборота) от границ вращения. Для установки маятника в правильное исходное положение нажмите экранную кнопку «НАСТРОЙКА». На экране появятся показания датчика в градусах. Если измеряемые значения находятся внутри диапазона от -410 до +410 градусов, то Вам нужно, руководствуясь этими цифрами, установить маятник таким образом, чтобы при отклонении его от положения равновесия на 90° измеряемый угол не выходил за указанные границы. Одновременно проверьте правильность установки ловушки. Отклонение маятника после застревания в нем шарика должно приводить к росту значения угла на экране. После выполнения этих операций установите маятник в положение равновесия и нажмите кнопку «ДАЛЕЕ». Это приведет к тому, что отсчет углов в программе будет проводиться от этого значения. (Оно будет принято за нулевое положение датчика.) Цифровой индикатор значения угла отклонения на экране покажет нулевое значение.

Если цифровой индикатор показывает значение около $\pm 410^\circ$ и не реагирует на движение маятника, то Вам следует сделать не-сколько полных оборотов в одну или другую сторону до тех пор, пока цифры на экране не начнут изменяться. При вращении маятника соблюдайте осторожность и не прикладывайте к нему усилий, чтобы не сорвать ограничители на границах диапазона вращения.

5. Нажмите на экранную кнопку «ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ»

6. Зарядите метательное устройство. Утопите шток, толкающий шарик, внутрь цилиндрической части корпуса. При этом Вы сожмете пружину, которая находится внутри корпуса. После этого вложите шарик в желоб так, чтобы он касался конца штока.

7. Нажмите кнопку «ПУСК» в нижней части экрана. Заряженное метательное устройство расположите вплотную к цилиндру баллистического маятника и произведите выстрел (нажмите кнопку на корпусе метательного устройства). Уберите метательное устройство, чтобы маятник мог беспрепятственно двигаться после возврата в положение равновесия. Обратите внимание на то, что ось симметрии метательного устройства, определяющая направление скорости движения шарика, во-первых, должна быть горизонтальной и, во-вторых, находиться в плоскости колебаний баллистического маятника. Только при соблюдении указанных условий удар будет прямым и центральным, то есть будут справедливы соотношения, использованные выше при выводе расчетной формулы.

8. Нажмите кнопку «СТОП» после совершения маятником не-скольких колебаний.

9. После прекращения записи данных на экране компьютера возникает график зависимости угла отклонения от времени. Вам необходимо определить угол максимального отклонения. Для этого, пользуясь мышью, переместите курсор (вертикальную черту на экране) к интересующей Вас точке графика и выпишите численное значение угла, которое высвечивается в верхней правой части экрана.

Чтобы убедиться в том, что потери на трение малы, следует также выписать в таблицу величину отклонения маятника в противоположную сторону.

10. Эксперимент и предварительную обработку данных, описанных в пп. 6-9, следует повторить 5 раз и заполнить таблицу 2.1. Следите, чтобы значение угла отклонения маятника перед выстрелом равнялись нулю. Если значение угла отклонения маятника

перед опытом не равно нулю, его следует поправить рукой или заново провести настройку оборудования в соответствующем режиме работы программы.

Таблица 2.1

Результаты измерения углов отклонения маятника

	α , град.	α' , град.
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

Обозначения, принятые в таблице:

α - угол, соответствующий первому отклонению маятника; α' - угол, соответствующий второму отклонению маятника; 11.

Рассчитайте среднее значение угла отклонения ($\alpha_{\text{ср}}$) и на основании расчетной формулы определите скорость полета шари-ка (таблица 2.2). Необходимые для расчета значения массы маят-ника и шарика приведены в таблице 2.2. Длину подвеса маятника вам следует измерить. Сделайте вывод о том, достаточно ли малы потери энергии при движении маятника

Таблица 2.2

Расчет скорости полета шарика

M , кг	m , кг	l , м	$\alpha_{\text{ср}}$, рад	v , м/с	v , м/с
0.034	0.016				

Обозначения, принятые в таблице:

M - масса баллистического маятника (цилиндра); m - масса шарика;

l - расстояние от оси цилиндра до оси датчика вращения; $\alpha_{\text{ср}}$ - среднее значение угла отклонения;

v - скорость полета шарика;

v - погрешность определения скорости.

12. Подумайте, в чем физические причины некоторого разбро-са углов отклонения, наблюдаемого в эксперименте, и оцените по-грешность определения скорости шарика.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Включать в сеть измерительный блок L-микро можно только после его подключения к разъему последовательного порта компьютера.

Следите за тем, чтобы углы отклонения маятника не выходили за рамки рабочего диапазона датчика угла поворота.

После взвода пружины метательного устройства запрещается направлять его в сторону людей.

Контрольные вопросы

1. Что такое баллистический маятник?
2. Что называется физическим маятником?
3. Что называется математическим маятником?
4. Что такое колебания?
5. В чем заключается закон сохранения механической энергии? Для каких систем он выполняется?
6. Сформулируйте третий закон Ньютона.
7. Следствием каких законов являются выражения скорости тел после центрального абсолютно упругого удара?
8. Найдите опечатку в выводе формулы (2.4).

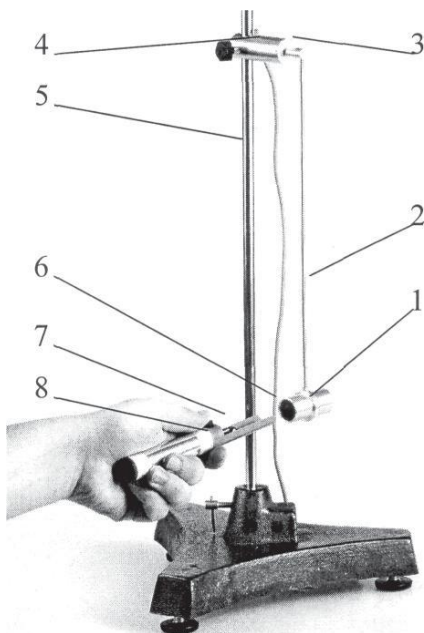


Рис. 2.1 Вид экспериментальной установки

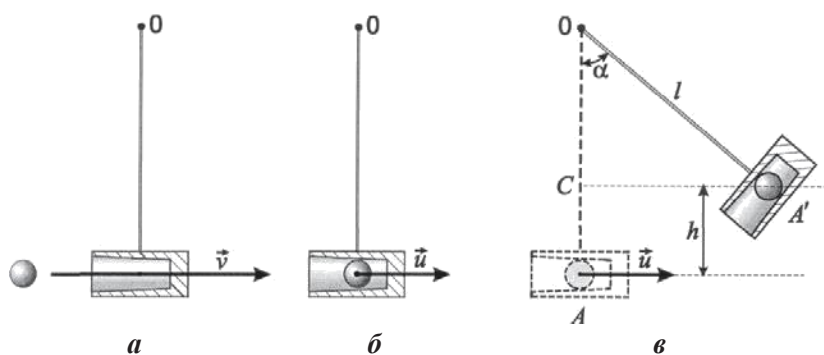


Рис. 2.2 Состояния системы шарик-маятник в различные моменты времени

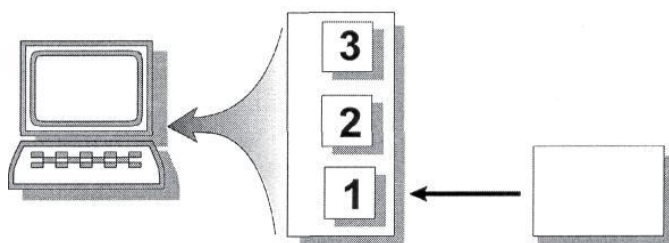


Рис. 2.3 Схема подключения установки

Лабораторная работа № 3

Измерение ускорения свободного падения с помощью математического и физического маятников

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: измерение ускорения свободного падения с помощью математического и физического маятников.

ОБОРУДОВАНИЕ:

- штатив
- перекладина со скобой
- перекладина для подвешивания шара
- математический маятник-шарик Ø 18 мм на нити
- пластина для установки датчика
- оборотный маятник
- оптоэлектрический датчик
- измерительный блок L-микро
- линейка

Периоды колебаний математического и физического маятников зависят от ускорения свободного падения g . Период колебаний T математического маятника равен:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3.1)$$

где l - длина нити математического маятника, точнее, расстояние от точки подвеса до центра шарика. В случае физического маятника

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{mgl}} \quad (3.2)$$

где m - масса физического маятника, l - расстояние от оси вращения до его центра масс, J момент инерции физического маятника относительно оси вращения.

Таким образом, для определения g с помощью математического маятника достаточно измерить его период колебаний T и длину l , после чего рассчитать ускорение свободного падения g по формуле:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \quad (3.3)$$

которая следует из (3.1).

Проводить измерения g с помощью произвольного физического маятника, опираясь на формулу (3.2), достаточно затруднительно, т. к. при этом необходимо знать точное значение его момента инерции, положение центра масс и массу. Однако, существует

прибор, называемый обратным маятником, при использовании которого задача определения ускорения свободного падения сводится к измерению периода колебаний и некоторого расстояния между элементами конструкции обратного маятника.

Обратный маятник является физическим маятником, который устроен следующим образом (см. рис. 3.1). На стержне (1) закрепляются два груза (2, 3). Стержень имеет две оси вращения (4, 5), расположенные по разные стороны от центра масс системы. Оси вращения для уменьшения трения выполняют в виде треугольных призм из твердого материала, которые следует устанавливать на специальную опору.

Обратный маятник регулируется таким образом, чтобы период его колебаний при установке на одной призме равнялся периоду колебаний его на другой призме. Регулировка производится путем изменения взаимного расположения грузов и призм на стержне.

Выведем формулу периода колебаний обратного маятника. Согласно теореме Штейнера момент инерции J маятника относительно произвольной оси вращения равен:

$$J = J_c + ml^2 \quad (3.4)$$

где J_c - момент инерции относительно оси вращения, проходящей через центр масс, m - масса маятника, а l - расстояние от оси вращения до центра масс. После подстановки (3.4) в (3.2) формула для периода колебаний физического маятника примет вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_c + ml^2}{mgl}} \quad (3.5)$$

Поскольку обратный маятник имеет равные периоды колебаний на обеих призмах (осях), на основании (3.5) можно записать:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_c + ml^2}{mgl_1}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{J_c + ml^2}{mgl_2}} \quad (3.6)$$

Здесь l_1 и l_2 - расстояния от центра масс маятника до ребра первой и второй призмы соответственно.

Возведем формулы (3.6) в квадрат и умножим на знаменатели правых частей:

$$T^2 mgl_1 = 4\pi^2 (J_c + ml^2)$$

$$T^2 mgl_2 = 4\pi^2 (J_c + ml^2_2)$$

Вычтем из первого равенства второе и сократим на m :

$$T^2 mgl_1 - T^2 mgl_2 = 4\pi^2 m l^2_1 - 4\pi^2 m l^2_2$$

Применим формулу разности квадратов в правой части:

$$T_2 g (l_1 - l_2) = 4\pi^2 (l_1 - l_2)(l_1 + l_2) \quad (3.7)$$

Если в (3.7) $l_1 - l_2 \neq 0$, что означает несимметричность расположения призм относительно центра масс маятника, то сокращая на $(l_1 - l_2)$, получаем:

$$T_2 g = 4\pi^2 (l_1 + l_2) \quad (3.8)$$

Поскольку призмы расположены по разные стороны от центра масс, то $l_1 + l_2 = l_0$, где l_0 расстояние между соответствующими ребрами призм (осями колебаний). На основании (3.8) легко записываются выражение для периода колебаний обратного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}} \quad (3.9)$$

и формула для определения g :

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2} \quad (3.10)$$

Еще раз подчеркнем, что в случае $l_1 = l_2$ (симметричное расположение осей колебаний относительно центра масс маятника), формулы (3.9) и (3.10) не являются справедливыми. Величина периода колебаний в этом случае зависит не только от l_0 и g , но и от момента инерции маятника.

В данной лабораторной работе с помощью оптоэлектрического датчика измеряется промежуток времени между двумя ближайшими прохождениями груза маятника через положение равновесия, т. е. непосредственно измеряется половина периода колебаний.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключите измерительный блок L-микро к разъему последовательного порта компьютера. После этого подсоедините его к сети (220 В, 50 Гц) и включите. Оптоэлектрический датчик подключается к первому разъему измерительного блока (рис. 3.3).

2. Для проведения опыта с математическим маятником соберите установку как показано на рис. 2. Штатив собирается с длинной вертикальной стойкой, к которой крепится перекладина. Перекладина имеет проточки для фиксации нити, на которой подвешен шарик. На конце перекладины подвешивается нить с маятником. Датчик устанавливается на металлический лист. Высота расположения перекладины подбирается такой, чтобы центр шарика находился на одной высоте с излучателем и приемником датчика. Оптическая ось датчика должна приблизительно совпадать с положением равновесия маятника.

3. Выберите пункт меню «измерение ускорения свободного падения», нажмите на экране кнопку «проведение измерений»

4. Отклоните маятник от положения равновесия, так чтобы плоскость его колебаний была перпендикулярна плоскости корпуса датчика.

5. Нажмите кнопку «пуск» для начала регистрации данных

6. После совершения маятником пяти полных колебаний запись данных прекращается, а на экране остаются значения полупериодов колебаний. Разница между $T_1/2$ и $T_2/2$ объясняется тем, что оптическая ось оптоэлектрического датчика не точно совпадает с положением равновесия маятника. Измеренные значения полупериодов колебаний вносятся в таблицу, где рассчитываются периоды колебаний маятников.

7. Измерьте период малых колебаний математического маятника. Для этого проведите измерения периода при различных амплитудах колебаний и определите величину начального отклонения, при котором период перестает зависеть от амплитуды (в рамках точности измерительной системы). Заполните данными (полупериоды малых колебаний, полученные в одном из запусков) таблицу 3.1.

8. Определите расстояние от центра шарика до точки подвеса и впишите его в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Математический маятник

$l, м$	$(T/2)_1, с$	$(T/2)_2, с$	$T, с$	$T_{ср}, с$

9. Для проведения измерений с оборотным маятником на стойке штатива зажимается перекладина со скобой, предназначенной для фиксации опор оборотного маятника (рис. 3.2). Оборотный маятник вставляется в прорезь скобы таким образом, чтобы плоскость его колебаний совпадала с направлением прорези. При движении маятник должен перекрывать луч света в оптоэлектрическом датчике, установленном на металлическом листе. Необходимо, чтобы оптическая ось датчика примерно совпадала с положением равновесия маятника. Высота расположения оси маятника регулируется перемещением перекладины со скобой по вертикальной стойке штатива.

10. Поскольку опыт проводится в рамках того же компьютерного сценария, что и эксперимент с математическим маятником, для начала записи данных достаточно нажать кнопку «пуск».

11. Убедитесь, что опоры маятника установлены в сопряженных точках. Для этого измерьте период его малых колебаний на одной из опор, затем переверните маятник и, перемещая перекладину по вертикальной стойке штатива, снова подберите высоту расположения оси качания. Еще раз измерьте период его малых колебаний и сопоставьте с величиной периода колебаний, полученной ранее.

12. Определите амплитуды колебаний, при которой их еще можно считать малыми, т.е. найдите область амплитуд колебаний, где в рамках точности эксперимента период не зависит от амплитуды. Для этого установите маятник на одну из опор и, так же как для математического маятника, проведите измерение периодов при различных амплитудах колебаний.

13. Внесите значение полупериодов малых колебаний, полученные в одном из экспериментов, в таблицу 3.2. Измерьте расстояние между остриями опор маятника (l_0) и также впишите его в таблицу 3.2.

14. Положите маятник горизонтально на какой-либо острый предмет (например, ребро линейки) и найдите приблизительно

положение центра масс - точку, опираясь на которую маятник будет в равновесии. Проверьте, выполняется ли условие $l_1 \neq l_2$.

Таблица 3.2

Оборотный маятник

l , м	$(T/2)_1$, с	$(T/2)_2$, с	T , с	$T_{\text{ср}}$, с

Обозначения, принятые в таблицах:

l - длина маятника (приведенная длина в случае физического маятника);

$T_1/2$ и $T_2/2$ - полупериоды колебаний;

$T = T_1/2 + T_2/2$ - период колебаний маятника;

$T_{\text{ср}}$ - среднее значение периода колебаний.

15. Определите ускорение свободного падения на основе данных, полученных для математического и оборотного маятников. Оцените погрешность в том и другом случае. Подумайте, в силу каких причин оборотный маятник обеспечивает существенно более высокую точность измерения g .

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Включать в сеть измерительный блок L-микро можно только после его подключения к разъему последовательного порта компьютера.

Осторожно обращайтесь с оборотным маятником. Не допускайте падений и ударов маятника, это может нарушить его регулировку.

Контрольные вопросы

1. Что такое вес тела? В чем отличие веса тела от силы тяжести?
2. Что такое колебания?
3. Что такое свободные колебания?
4. Что такое гармонические колебания?

5. Дайте определения амплитуды, фазы, периода, частоты, циклической частоты колебания.
6. Что называется физическим маятником?
7. Что называется математическим маятником?
8. Запишите формулы для периодов колебаний физического и математического маятников.
9. Что такое приведенная длина физического маятника?

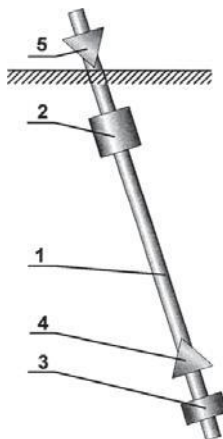


Рис. 3.1 Схема экспериментальной установки

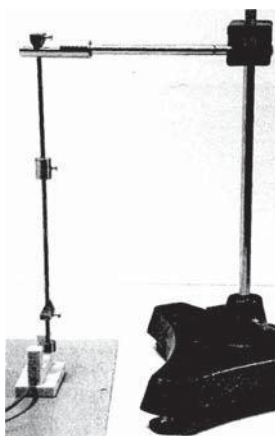


Рис. 3.2 Вид экспериментальной установки

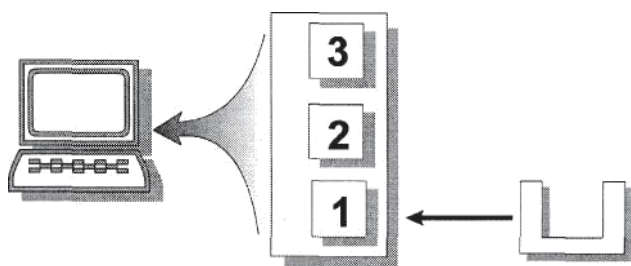


Рис. 3.3 Схема подключения установки

Лабораторная работа № 4

Изучение закона сохранения момента импульса

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение динамики вращательного движения и закона сохранения момента импульса на примере системы с изменяющимся моментом.

ОБОРУДОВАНИЕ:

- основание штатива
- датчик угловой скорости с муфтой
- стержни (длинные) - 2 шт.
- грузы - 2шт.
- ограничители хода грузов - 2 шт.
- рукоятка для раскрутки системы
- линейка
- измерительный блок L -микро

Момент импульса при вращении относительно неподвижной оси равен произведению момента инерции J на угловую скорость ω . Закон сохранения момента импульса записывается в виде: $J\omega = \text{const}$ т.е. произведение момента инерции относительно неподвижной оси на угловую скорость относительно этой оси есть величина постоянная для механических систем, на которые не действуют моменты внешних сил или в которых главный момент внешних сил относительно оси вращения равен нулю. Экспериментальной проверке этого соотношения и посвящена данная лабораторная работа.

Механическая система с переменным моментом инерции схематически показана на рис. 4.1. Длинный тонкий стержень может вращаться в горизонтальной плоскости, вокруг оси, проходящей через его центр. На стержне имеется два груза, которые свободно скользят по нему. С помощью специального приспособления стержень приводится во вращение при минимальном удалении грузов от оси. После освобождения грузов они скользят по стержню до установленных заранее упоров. Момент инерции системы при этом возрастает, а вращение замедляется. Угловая скорость системы контролируется компьютерной измерительной системой. Измерение геометрических характеристик дает возможность определить начальное и конечное значения момента инерции. Таким образом, можно рассчитать моменты импульса в начальном состоянии (при максимальной скорости вращения) и в конечном состоянии (после разлета грузов) и сравнить их.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите экспериментальную установку как показано на рис. 4.2 и 4.3. Вкрутите стойку датчика угловой скорости в датчик. Возьмите основание штатива и закрепите датчик угловой скорости как показано на рис 4.2. В муфту (3), установленную на оси датчика, вверните два стержня (4), предварительно надев на них ограничители хода грузов (6) и сами грузы (5). Раскрутка грузов производится специальной рукояткой (7), которая одновременно фиксирует начальное положение грузов. Устройство для раскрутки надевается на муфту датчика угловой скорости.

2. Подключите измерительный блок L-микро к разъему последовательного порта компьютера и к сети (220 В 50 Гц). Кабель датчика угловой скорости включите в разъем первого канала измерительного блока (рис. 4.4).

3. Вызовите программу L-физика-практикум, нажмите на экранную кнопку «Выбор работы» и в появившемся на экране списке экспериментов, выберите лабораторную работу «Закон сохранения момента импульса». В экране настройки нажмите кнопку «проведение измерений».

4. Приступите к выполнению опыта. Для этого необходимо:

а. Зафиксировать положение грузов с помощью устройства для раскрутки, установленного на муфту датчика. С помощью линейки измерить расстояние r от оси вращения до центров масс грузов и внести его в таблицу 4.2.

б. Установить резиновые шайбы на определенном расстоянии от центра вращения системы.

с. Включить режим регистрации данных компьютером. Для этого нажать кнопку «пуск» (Отметим, что запись данных осуществляется в течение 5 секунд с момента нажатия на кнопку «пуск»)

д. Раскрутить систему грузов с помощью рукоятки и резко поднять ее вверх, чтобы позволить грузам сдвинуться до резиновых шайб, ограничивающих их движение по стержням

е. После завершения записи данных на экране возникнет график зависимости угловой скорости вращения системы от времени. Вам следует определить начальное (ω_1) и конечное (ω_2) значения угловой скорости. Для этого передвиньте курсор мыши в интересующие Вас точки графика и щелкните левой кнопкой мыши. Вертикальная черта (маркер) переместится к соответствующей точке графика и цифровой указатель в правом верхнем углу экрана покажет вам мгновенное значение угловой скорости в этой точ-

ке. Впишите значение угловой скорости в таблицу 1. Отметим, что начальной скоростью вращения системы следует считать макси-мальное значение угловой скорости. Участок возрастания угловой скорости на графике соответствует раскрутке системы, а участок, где угловая скорость убывает - разлету грузов, т. е. движению в отсутствие внешних сил. (Моментом силы трения в датчике пренебрегаем.)

г. С помощью линейки измерить и внести в таблицу 4.2 координаты центров масс грузов после разлета (r_1 , r_2). Грузы могут не дойти до упоров или отойти от них после удара, т.е. оказаться на разных расстояниях от оси вращения.

5. Измерения необходимо провести при различных конечных положениях грузов, каждый раз проводя 2-3 запуска системы.

6. Обработка результатов эксперимента производится следующим образом:

а. Момент инерции стержней и муфты, находящейся на оси датчика угловой скорости, сопоставим по величине с моментом инерции подвижных грузов, поэтому его необходимо учитывать при обработке данных эксперимента. Расчет момента инерции подвижной части установки (без грузов) выполняется в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Расчет моментов инерции установки

m_1 , кг	m_2 , кг	R , м	I , МДж	J_M , кг·м ²	J_c , кг·м ²	$J = J_0 + 2J_M + J_c$, кг·м ²
0.0025	0.03	0,012				

Обозначения, принятые в таблице:

m_1 - масса муфты на оси датчика угловой скорости; m_2 - масса стержня;

R - радиус муфты;

l - длина стержня (от внешнего края муфты);

$$J_M = \frac{1}{2} m_1 R^2 \quad \text{— момент инерции муфты;} \quad (4.1)$$

$$J_c = m_2 \cdot \left(R^2 + Rl + \frac{l^2}{3} \right) \quad \text{— момент инерции стержня} \quad (4.2)$$

находится с помощью теоремы Штейнера

$$J_c = m_2 \cdot \left(R + \frac{l}{2} \right)^2 + m_2 \frac{l^2}{12} = m_2 \cdot \left(R^2 + Rl + \frac{l^2}{4} + \frac{l^2}{12} \right) = m_2 \cdot \left(R^2 + Rl + \frac{l^2}{3} \right),$$

где $R + \frac{l}{2}$ расстояние от центра масс спицы до центра вращения,

$\frac{l^2}{12}$ момент инерции тонкого стержня при вращении относительно оси, проходящей через его центр инерции.

б. С помощью таблицы 4.2 рассчитайте моменты инерции грузов при различном удалении от оси. Для всех опытов вычислите моменты импульса системы в начальном и конечном состояниях и сопоставьте полученные значения друг с другом. Проанализируйте причины, которые приводят к некоторым отличиям в полученных результатах.

Таблица 4.2

Расчет моментов экспериментальных моментов импульса

$N_{\text{д}}$	m	r	r_1	r_2	ω_1	ω_2	J_1	J_2	$L_1 = (J_1 + J_0) \cdot \omega_1$	$L_2 = (J_2 + J_0) \cdot \omega_2$
	кг	м	м	м	с ⁻¹	с ⁻¹	кг·м ²	кг·м ²	кг·м ² · с ⁻¹	кг·м ² · с ⁻¹
0.068										

Обозначения, принятые в таблице:

m - масса груза;

r - радиус центров масс грузов до разлета;

r_1 - радиус центров масс одного из грузов после разлета;

r_2 - радиус центров масс другого груза после разлета;

ω_1 - угловая скорость системы до разлета грузов;

ω_2 - угловая скорость системы после разлета грузов.

Моменты инерции грузов в начальном и конечном состояниях рассчитываются следующим образом. Момент инерции цилиндрического груза при вращении относительно оси, проходящей через его центр инерции и перпендикулярной оси симметрии цилиндра, равен:

$$J_{\text{гр}} = \frac{m}{12} (3R_1^2 + 3R_2^2 + H^2) \quad (4.3)$$

где R_1 -внешний радиус цилиндрического груза, R_2 -радиус отверстия в цилиндрическом грузе, H - длина цилиндрического груза. В работе используются грузы со следующими размерами: $R_1=0.007\text{м}$, $R_2=0.0015\text{м}$, $H=0.02\text{ м}$.

Согласно теореме Штейнера моменты инерции грузов до разлета J_1 и после разлета J_2 равны:

$$J_1 = 2 \left(mr^2 + J_{\text{гп.}} \right) \quad (4.4)$$

$$J_2 = m \left(r_1^2 + r_2^2 \right) + 2J_{\text{гп.}} \quad (4.5)$$

$L_1=(J_1+J_0)\omega_1$ - момент импульса системы до разлета грузов;
 $L_2=(J_2+J_0)\omega_2$ - момент импульса системы после разлета грузов.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Включать в сеть измерительный блок L-микро можно только после его подключения к разъему последовательного порта компьютера.

Перед раскруткой системы убедитесь в правильной установке ограничителей хода грузов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое движение называется поступательным? Какое движение называется вращательным?
2. Что называется угловой скоростью? Что называется угловым ускорением? Как определяются их направления? Какова связь между линейными и угловыми величинами?
3. В чем заключается закон сохранения импульса?
4. Что называется центром масс системы материальных точек?
5. Что такое момент инерции тела?
6. Что такое момент импульса материальной точки? Что такое момент импульса твердого тела? Как определяется направление момента импульса?
7. В чем заключается физическая сущность закона сохранения момента импульса?
8. Как вывести формулы (4.1-4.3) для моментов инерции, зная определение момента инерции материальной точки относительно фиксированной оси?

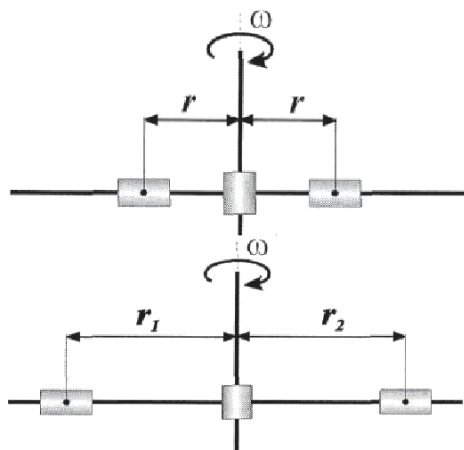


Рис. 4.1 Схема экспериментальной установки

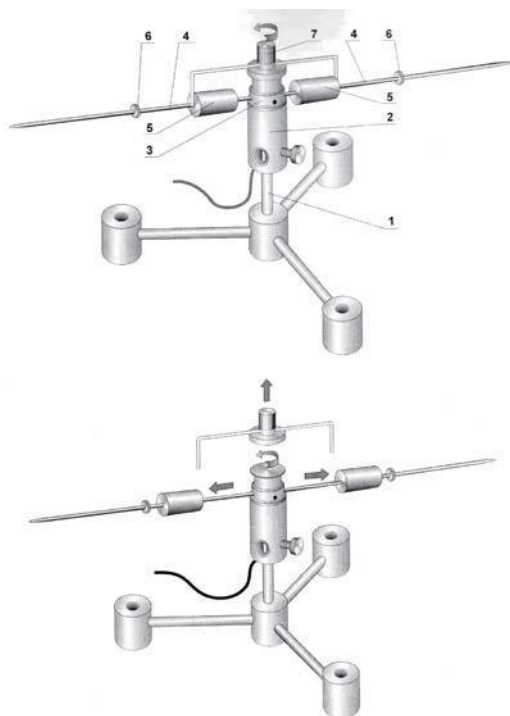


Рис. 4.2 Конструкция экспериментальной установки

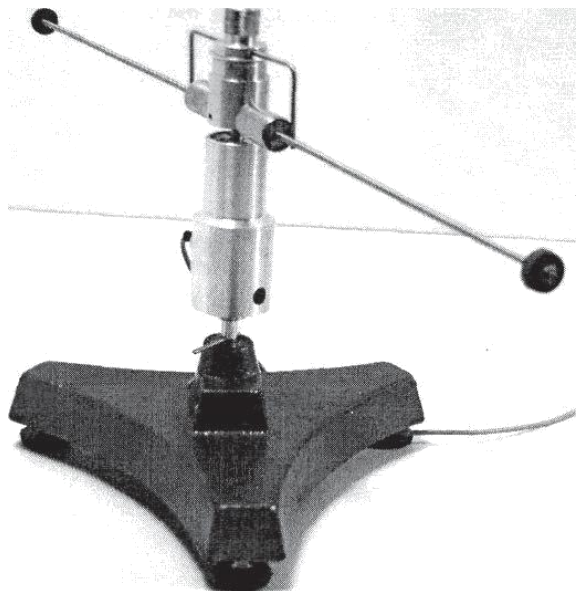


Рис. 4.3 Вид экспериментальной установки

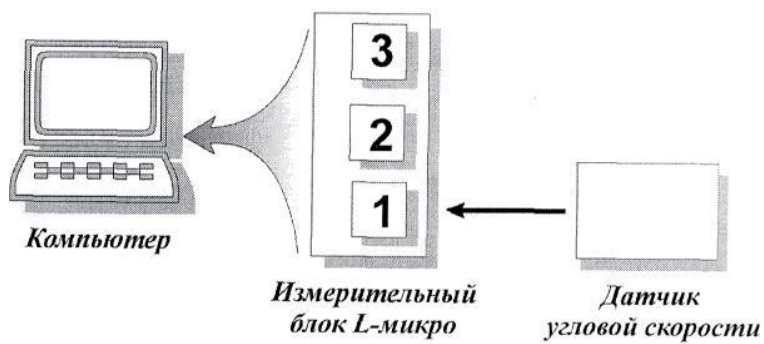


Рис. 4.4 Схема подключения установки

Лабораторная работа № 5

Маятник Максвелла

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: измерение момента инерции осесимметричного твердого тела в виде диска и сравнение с расчетными значениями.

ОБОРУДОВАНИЕ:

- штатив
- перекладина для маятника Максвелла
- маятник Максвелла
- электромагнит
- оптоэлектрический датчик
- измерительный блок L -микро
- блок питания
- линейка
- пластина для установки датчика

Маятник Максвелла представляет собой диск, неподвижно установленный на оси. На концах оси симметрично относительно диска закрепляются нити, с помощью которых маятник подвешивается к штативу. При вращении оси нити могут наматываться на ось или разматываться, обеспечивая тем самым перемещение маятника вверх и вниз. Если, намотав нити на ось, поднять маятник на некоторую высоту и отпустить, то он начнет совершать колебательное движение в поле силы тяжести. В нижней точке маятник приобретает наибольшую скорость вращения, и, продолжая вращаться по инерции, снова поднимается на некоторую высоту за счет наматывания нитей на ось. После достижения верхней точки, где скорость вращения маятника становится равной нулю, он начинает падать, вращаясь при этом в другую сторону. На рис. 5.1 показана схема сил, действующих на вал. Движение маятника осуществляется под действием силы тяжести mg и силы натяжения нитей N . Движение маятника является равноускоренным до тех пор, пока нити хотя бы частично намотаны на вал. При этом угловая скорость ω вращения диска вокруг оси, и линейная скорость v геометрической оси диска связаны между собой соотношением:

$$v = (d/2)\omega \quad (5.1)$$

где d - диаметр вала. Иными словами, скорость движения центра масс маятника равна скорости сматывания нитей с вала. Кинетическая энергия диска равна

$$T = \frac{J\omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2} = \frac{Jv^2}{2 \cdot \left(\frac{d}{2}\right)} + \frac{mv^2}{2} = \left(\frac{2J}{d^2} + \frac{m}{2}\right)v^2, \quad (5.2)$$

где J - момент инерции маятника.

В соответствии с законом сохранения энергии при движении в поле силы тяжести кинетическая энергия маятника, который опустился с высоты h , равна его потенциальной энергии на этой высоте, поэтому можно записать:

$$mgh = \left(\frac{2J}{d^2} + \frac{m}{2}\right)v^2 \quad (5.3)$$

При равноускоренном движении скорость v выражается через высоту падения h и время движения t на основании кинематических соотношений:

$$v = a \cdot t \text{ и } h = \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (5.4)$$

где a - ускорение, с которым движется центр масс диска. Из формул (5.4) следует

$$v = \frac{2h}{t} \quad (5.5)$$

Подставив (5.5) в уравнение (5.3) и решив его относительно J , получим расчетную формулу для определения момента инерции маятника Максвелла относительно его оси симметрии

$$J = \frac{md^2}{4} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right) \quad (5.6)$$

Отметим, что расчетная формула может быть получена также на основе законов динамики.

Выполняя данную лабораторную работу, вы измерите время t падения маятника Максвелла с высоты h и на основе полученных данных рассчитаете его момент инерции. После этого вам необходимо будет сравнить полученное значение момента инерции с теоретическим. Геометрические размеры и масса элементов маятника Максвелла приведены в Таблице 5.1.

СБОРКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

1. Соберите лабораторную установку в соответствии с рис. 5.2. Сначала смонтируйте стойку штатива (1) и закрепите на ней перекладину (2). На перекладину штатива заранее устанавливает-

ся электромагнит (3). Для его установки необходимо вывернуть один из имеющихся в перекладине винтов. Нить, на которой подвешивается маятник, надевается на винты, имеющиеся на перекладине штатива. После установки оси маятника (4) в горизонтальное положение можно для фиксации один раз обернуть нить вокруг каждого из винтов. Перекладина с маятником Максвелла устанавливается таким образом, чтобы маятник двигался возможно ближе к стойке штатива. В этом случае штатив более устойчив и не испытывает заметных колебаний при достижении маятником нижней точки.

2. Под свободно висящим неподвижным маятником установите оптоэлектрический датчик (5). Отрегулируйте высоту установки перекладины таким образом, чтобы нижняя кромка диска свободно висящего маятника была на 1 см ниже уровня, на котором находятся излучатель и приемник датчика.

3. Соберите электрическую схему эксперимента (рис. 5.3). Подключите измерительный блок L -микро к разъему последовательного порта компьютера. После этого подсоедините его к сети (220В, 50 Гц) и включите. Подключите 9-ти штырьковый разъем кабеля электромагнита к третьему разъему измерительного блока. Выводы, предназначенные для подачи напряжения питания, соедините с источником питания 12 В. Подключите датчик к первому разъему измерительного блока.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБРАБОТКА

1. Запустите программу L -физика-практикум, и в появившемся на экране списке выберите лабораторную работу «Маятник Максвелла».

2. Приступите к проведению опыта. Для этого необходимо сделать следующее:

а. Включите блок питания.

б. Выберите пункт меню «ИЗМЕРЕНИЕ». При этом на электромагнит будет подано напряжение питания, а на экране появится сообщение.

с. Намотайте нити на вал и подвесьте маятник к магниту (рис. 5.4). Когда электромагнит удерживает маятник, нити подвеса не должны быть натянуты и не должны провисать. Выполнение этих условий позволит Вам уменьшить разброс во времени падения маятника. Поэтому после того, как Вы подвесили маятник к электромагниту, слегка поверните его в направлении разматывания нитей.

d. Нажмите клавишу «пуск» на экране. При этом одновременно с отключением питания электромагнита начнется отсчет времени падения маятника. Как только маятник перекроет свет в датчике, на экране компьютера появится время его движения. Остановите руками движение маятника и запишите время в Таблицу 5.2.

3. Повторите измерения по пунктам “2 с” - “2 d” еще 4 раза. Измеренное время падения заносите в Таблицу 5.2. Питание на электромагнит подается автоматически после регистрации време-ни движения маятника.

4. При помощи линейки определите высоту падения маятника h (измерьте расстояние от нижней точки диска маятника, когда он подвешен к электромагниту, до оптической оси датчика) и запишите ее в Таблицу 5.3. Обратите внимание на погрешность определения h .

5. На основании экспериментальных данных рассчитайте среднее время падения маятника

$$\left(t_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \right)$$

и среднеквадратичное отклонение

$$\left(\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{cp} - t_i)^2} \right)$$

Полученное значение t_{cp} вносится в Таблицу 5.3.

6. Определите момент инерции маятника. Расчет проводится по формуле (5.6) с использованием характеристик маятника (мас-са и диаметр оси), приведенных в Таблице 5.1, и времени падения. Диаметр нитей подвеса 0.6мм. Полученный результат впишите в Таблицу 5.3 - ($J_{эксп}$).

7. Рассчитайте момент инерции маятника на основе данных, приведенных в Таблице 5.1

8. Внесите результаты в Таблицу 5.3.

9. Сопоставьте результаты расчетов и экспериментов. Оцените погрешность определения момента инерции маятника.

Таблица 5.1

Физические параметры установки

d_0 , мм	D , мм	m_0 , кг	$m_{\text{д}}$, кг	$m=m_0+m_{\text{д}}$, кг
10 ± 0.1	100 ± 0.1	0.062	0.410	0.472

Таблица 5.2

Результаты измерений

№ опыта	1	2	3	4	5
Время падения, с					

Таблица 5.3

Расчет моментов инерции

$t_{ср}$, с	h , м	$J_{эксп}$, кг·м ²	J_0 , кг·м ²	J_d , кг·м ²	$J_{теор}$, кг·м ²

Обозначения, принятые в таблицах: d_0 - диаметр оси маятника; D - диаметр диска; m_0 - масса оси маятника; m_d - масса диска; m - полная масса маятника;

$$J_d = \frac{1}{8} m_d D^2 \text{ - момент инерции диска}$$

$$J_0 = \frac{1}{8} m_0 d^2 \text{ - момент инерции вала}$$

$J_{теор} = J_d + J_0$ - момент инерции маятника, рассчитанный на основе геометрических параметров маятника.

Включать в сеть измерительный блок L-микро можно только после его подключения к разъему последовательного порта компьютера.

Проверить целостность нитей подвеса маятника перед проведением опыта.

Не допускать ударов маятника по корпусу датчика. Для этого необходимо руками останавливать его движение после первого или второго подъема вверх.

Контрольные вопросы

1. Какое движение называется поступательным? Какое движение называется вращательным?

2. Что называется угловой скоростью? угловым ускорением? Как определяются их направления? Какова связь между линейными и угловыми величинами?

3. В чем заключается закон сохранения импульса?

4. Что называется центром масс системы материальных точек?

5. Что такое момент инерции тела?

6. Что такое момент импульса материальной точки? твердого тела? Как определяется направление момента импульса?

7. В чем заключается физическая сущность закона сохранения момента импульса.

8. Выведите формулу для момента инерции диска, используя определение момента инерции материальной точки относительно фиксированной оси.

9. Найдите опечатку в выводе формулы (5.2).

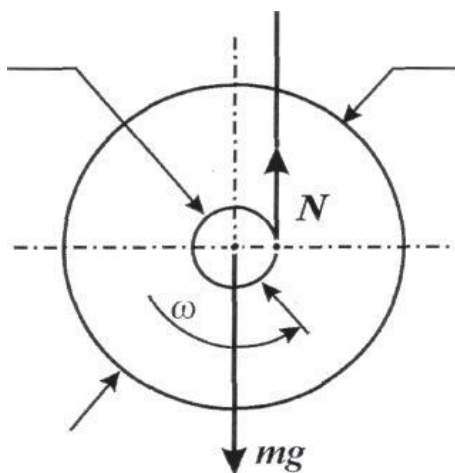


Рис. 5.1 Схема экспериментальной установки

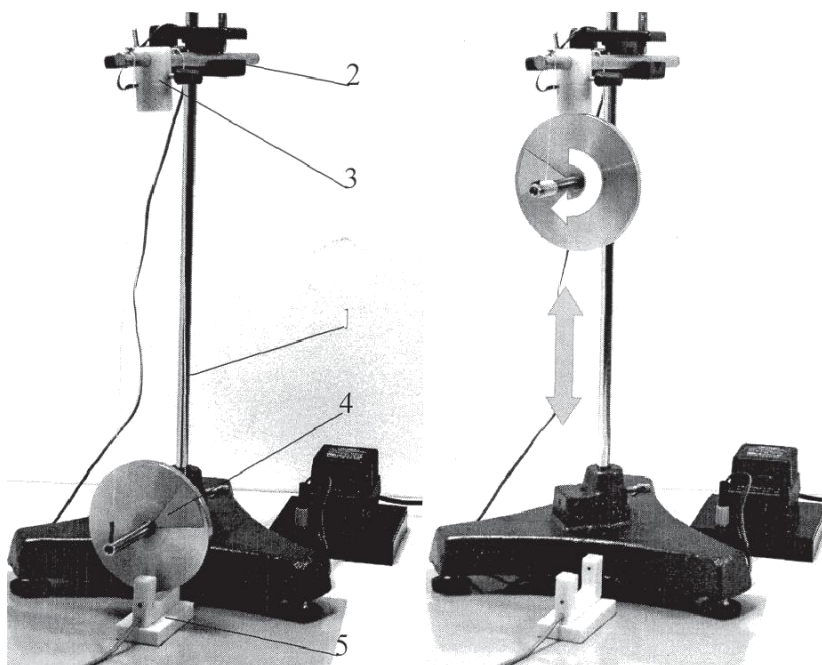


Рис. 5.2 Вид экспериментальной установки

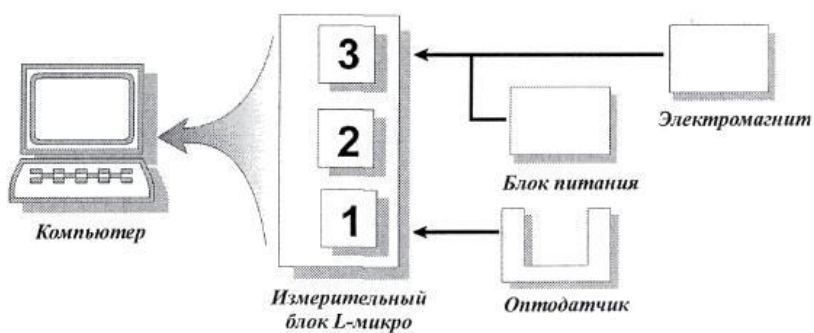


Рис. 5.3 Схема подключения установки

Лабораторная работа № 6

Определение моментов инерции тел

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: измерение момента инерции твердых тел, исследование зависимости момента инерции от конфигурации тела.

ОБОРУДОВАНИЕ:

- | | |
|-------------------------------------|--|
| • штатив
(основание, стойка) | • нить для подвешивания груза |
| • датчик угловой скорости | • компьютерный измерительный блок L -микро |
| • стержни (спицы) с грузами - 4 шт. | • штангенциркуль |
| • груз наборный (0.12 кг). | • линейка |

Момент инерции твердого тела можно определить с помощью вычислений. В тех случаях, когда тело неоднородно по своему составу или имеет сложную геометрическую конфигурацию, определение момента инерции производится экспериментально.

Экспериментальная установка, используемая в данной работе, исторически получила название «Маятник Обербека». Ее внешний вид представлен рис. 6.1.

Маятник Обербека представляет собой четыре стержня (1), закрепленные в муфте (2). Ось вращения муфты расположена горизонтально. На каждом из стержней имеется груз (3), который с помощью специальных фиксаторов (4) может размещаться на любом расстоянии от оси муфты. Таким образом, момент инерции конструкции может изменяться в широких пределах. Раскрутка маятника Обербека осуществляется с помощью нити (5), предварительно намотанной на цилиндрическую поверхность муфты. К нижнему концу нити прикрепляются грузы (6) различной массы. Для проведения измерений муфта маятника Обербека надета на ось датчика угловой скорости (7), что позволяет записывать значения скорости вращения во время движения.

При выполнении лабораторной работы Вам необходимо измерить момент инерции маятника Обербека в двух случаях: при минимальном удалении грузов от оси вращения и при расположении их на середине спиц. В каждом случае раскрутка маятника проводится двумя различными грузами. В соответствии с теорией, изложенной ниже, это позволит при обработке данных исключить влияние сил трения.

Рассмотрим движение маятника Обербека на основе законов динамики. Груз на нити движется поступательно под действием

силы тяжести и силы натяжения нити. При этом можно записать уравнение второго закона Ньютона для груза массой m :

$$ma = mg - T \quad (6.1)$$

Отсюда находим силу натяжения нити T :

$$T = m(g - a) \quad (6.2)$$

Эта сила, приложенная по касательной к окружности муфты, создает вращающий момент $M = TR$ (R - радиус цилиндрической поверхности муфты, на которую намотана нить).

Теперь, используя основной закон динамики вращательного движения, проанализируем вращение маятника Обербека. При этом следует учитывать момент M_{Tp} , создаваемый силами трения и тормозящий вращение. Определение этого момента затруднительно, так как его создают неизвестные по величине силы с неизвестными относительно оси плечами. Ими могут быть силы со-противления движению грузов со стороны воздуха или трения в оси датчика угловой скорости.

$$J\varepsilon = M - M_{Tp} = T \cdot R - M_{Tp} \quad (6.3)$$

или

$$J \cdot \varepsilon = m(g - a)R - M_{Tp} \quad (6.4)$$

Угловое ускорение маятника ε и линейное ускорение a груза на нити связаны формулой:

$$\varepsilon = \frac{a}{R}, \quad (6.5)$$

Поскольку в экспериментах измеряется угловая скорость вращения и на ее основе определяется угловое ускорение маятника Обербека, то из (6.4) с помощью (6.5) следует исключить a :

$$J \cdot \varepsilon = m(g - \varepsilon \cdot R) \cdot R - M_{Tp} \quad (6.6)$$

Для того чтобы исключить из уравнения неизвестный момент трения M_{Tp} , можно провести эксперимент дважды с различными грузами m_1 и m_2 . При этом угловые ускорения ε_1 и ε_2 и вращающие моменты M_1 и M_2 сил T_1 и T_2 окажутся различными. Запишем уравнения основного закона вращательного движения в первом и втором экспериментах:

$$J \cdot \varepsilon_1 = M_1 - M_{Tp} \quad (6.7)$$

$$J \cdot \varepsilon_2 = M_2 - M_{Tp}$$

Или, на основе (6.6):

$$J \cdot \varepsilon_1 = m_1 (g - \varepsilon_1 \cdot R) \cdot R - M_{Tp} \quad (6.8)$$

$$J \cdot \varepsilon_2 = m_2 (g - \varepsilon_2 \cdot R) \cdot R - M_{Tp}$$

Таким образом, (6.8) представляет систему двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными - искомым моментом инерции J и моментом трения M_{Tp} - Исключив момент трения, найдем момент инерции J установки. Для этого в системе (6.8) вычитаем второе уравнение из первого и получаем одно уравнение с искомым J :

$$J \cdot \varepsilon_1 - J \cdot \varepsilon_2 = m_1 (g - \varepsilon_1 R) \cdot R - m_2 (g - \varepsilon_2 R) \cdot R \quad (6.9)$$

Отсюда находим расчетную формулу для J :

$$J = \frac{g(m_1 - m_2) - R(m_1 \varepsilon_1 - m_2 \varepsilon_2)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \cdot R \quad (6.10)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для определения момента инерции маятника Обербека на основе формулы (6.10) необходимо с помощью компьютера записать данные по движению системы при определенных положениях грузов маятника и массах груза на нити. Для равноускоренного движения зависимость угловой скорости от времени является линейной и имеет вид $Y=AX+B$ (переменная X здесь имеет смысл времени). Коэффициент A равен угловому ускорению системы ε (величина B в таком уравнении движения имеет смысл угловой скорости в начальный момент времени, и в рамках данной работы не рассматривается).

В действительности движение маятника всегда в той или иной степени отличается от равномерно ускоренного. При построении прямой линии, наилучшим образом аппроксимирующей экспериментальные результаты, программа рассчитывает не только коэффициенты уравнения этой прямой, но и величины, характеризующие отклонение реальных точек от «идеальной» зависимости.

Эти величины называются среднеквадратичными отклонениями коэффициентов A и B , и обозначаются A и B соответственно.

В первую очередь, отклонение движения от равномерно ускоренного связано с неточностью балансировки грузов на стержнях. Так, в случае плохой балансировки при вращении маятника возникнут биения, которые проявятся на графике в виде периодических изменений скорости раскрутки (ускорения) системы. Это приведет к большему разбросу точек и соответствующему увеличению значений A и B .

Поскольку задачей эксперимента является определение углового ускорения ϵ , во внимание следует принимать только значение A , показывающее, сколь велико было отклонение от «равноускоренности» в каждом конкретном запуске установки.

1. Соберите установку как показано на рис. 6.1. Штатив собирается с длинной вертикальной стойкой (8), на которой закрепляется датчик угловой скорости (7) с муфтой (2). Ось вращения датчика должна быть горизонтальной. В отверстия муфты необходимо ввернуть четыре одинаковых спицы (1), на которых располагаются подвижные грузы (3).

Установите грузы примерно на середине стержней и отрегулируйте положение грузов так, чтобы крестовина маятника (вал и стержни с грузами) находились в положении безразличного равновесия, т. е. оставались неподвижными в отсутствие внешнего воздействия в любом положении. Для этого нужно маятник отпустить и после остановки его движения передвинуть нижний груз ближе к оси маятника. Затем повернуть маятник и опять отпустить. Эти действия необходимо повторять до тех пор, пока после отпускания маятник не останется неподвижным.

Измерьте удаление грузов от оси и внесите полученное значение в Таблицу 6.2 (столбец « $l, м$ »).

Закрепите один конец нити длиной 40 - 60 см на катушке муфты датчика угловой скорости и прикрепите к другому ее концу груз. Перед запуском маятника Вам будет необходимо намотать нить на катушку муфты и таким образом поднять груз над поверхностью стола. Намотка нити производится виток к витку в один слой.

Измерьте с помощью штангенциркуля диаметр катушки муфты, определите значение ее радиуса R и внесите его в Таблицу 6.2.

Масса груза рассчитывается с помощью Таблицы 6.1, в которой приведены массы элементов наборного груза.

2. Подключите измерительный блок L -микро к разъему последовательного порта компьютера и к сети (220 В, 50 Гц). Ка-

бель датчика угловой скорости включите в разъем 1 компьютерного измерительного блока (рис. 6.2). Включите вилку измерительного блока в сеть.

3. Запустите программу «L-Физика-практикум», нажмите «ВЫБОР РАБОТЫ» и в появившемся на экране списке выберите лабораторную работу «Определение моментов инерции тел».

4. Убедитесь в работоспособности датчика. Для этого нажмите кнопку «НАСТРОЙКА ОБОРУДОВАНИЯ» и поверните маятник Обербека на небольшой угол. Справа на экране Вы должны увидеть чередование изображений перекрытого и открытого датчика.

5. Проведите измерения. Для этого сделайте следующее.

а) Нажмите кнопку «ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ»

б) Установите на наборный груз все элементы (массу его при этом обозначим m_1), закрепите его на конце нити и намотайте нить на катушку в один слой так, чтобы груз поднялся почти до уровня катушки. После этого удерживайте маятник рукой, не давая ему начать вращение.

в) Включите режим регистрации данных компьютером, нажав кнопку «ПУСК». Отпустите маятник. Запись данных будет продолжаться около 5 секунд. Вам следует остановить вращение маятника после того, как вся нить будет размотана. После прекращения записи данные будут представлены на экране.

г) Проведите первичную обработку данных, появившихся на экране в виде графика зависимости угловой скорости вращения маятника Обербека от времени. Для передачи в программу обработки на графике следует оставить участок, относящийся к равноускоренному движению системы (исключить участок, отражающий движение системы после того, как нить полностью размоталась или груз, опускаясь, достиг поверхности стола). Для этого выделите нужный участок графика рамкой справа на-лево, держа нажатой левую кнопку мыши. Затем нажмите кнопку «ОБРАБОТКА».

Если вы захотите выбрать другой набор точек (до нажатия клавиши « ОБРАБОТКА»), то вам необходимо вернуться к отображению всего графика. Для этого поместите указатель мыши в область графика, нажмите левую кнопку мыши и проведите указателем справа налево или нажмите кнопки «Ось X» и «Ось Y».

е) После нажатия кнопки «ОБРАБОТКА» Вы перейдете в следующее окно, на котором будет представлен выбранный вами участок графика. Постройте прямую линию, наилучшим обра-

зом аппроксимирующую экспериментальные данные. Для этого нажмите кнопку «ПРЯМАЯ». На экране появится уравнение вида $Y=AX+B$ и среднеквадратические отклонения коэффициентов A и B , A и B соответственно. Полученные значения A (коэффициент при X , являющийся угловым ускорением ε) и A (совпадающее с $\Delta\varepsilon$) необходимо внести в Таблицу 6.2. Данные вносятся в столбец таблицы « ε , рад·с⁻²» в клетки, расположенные горизонтально. Погрешность определения углового ускорения $\Delta\varepsilon$ вписывается в ту же клетку таблицы в скобках под значением углового ускорения.

ф) действия, описанные в п.п. б) - е) необходимо повторить 5 раз для получения в дальнейшем усредненного значения углового ускорения и среднеквадратичного отклонения при данных условиях эксперимента.

г) измените массу груза примерно в 2 раза, сняв часть элементов наборного груза (m_2). Выполните действия, описанные в п.п. б) - ф) и получите значения углового ускорения маятника Обербека.

h) уменьшите момент инерции маятника Обербека (сдвиньте грузы почти вплотную к муфте датчика) и снова сбалансируйте маятник (добейтесь безразличного равновесия на оси вращения). Запишите в таблицу расстояние от центра грузов до оси (l) и выполните измерения по пунктам б) - г)

6. При итоговой обработке данных следует:

а) . По результатам каждой серии запусков рассчитать и внести в Таблицу 6.2 среднее значение углового ускорения ε_{cp} и среднеквадратичное отклонение σ . Формулы для подсчета этих величин приведены ниже.

$$\varepsilon_{cp} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \varepsilon_i, \quad (6.11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (\varepsilon_{cp} - \varepsilon_i)^2} \quad (6.12)$$

Если эксперимент и обработка результатов проведены правильно, то значение σ должно быть примерно равно величине $\Delta\varepsilon$, получавшейся в каждом конкретном запуске.

б). На основании расчетной формулы, выведенной в теоретической части работы, определить значения моментов инерции J маятника Обербека при различных удалениях грузов от оси вращения.

с). Оценить погрешность определения моментов инерции маятника Обербека. Формула для расчета погрешности определения момента инерции, записанная по правилам вычисления погрешности косвенных измерений на основе расчетной формулы (6.10), выглядит очень громоздко. Однако для оценки погрешности определения J эту формулу можно существенно упростить. В числителе дроби (6.10) произведение $g \cdot (m_1 - m_2)$ существенно больше значения выражения $R \cdot (m_1 \varepsilon_1 - m_2 \varepsilon_2)$ при всех значениях массы груза и угловых ускорениях, имевших место в проведенном эксперименте, и произведением $R \cdot (m_1 \varepsilon_1 - m_2 \varepsilon_2)$ можно пренебречь. Выражение (6.10) после этого примет вид:

$$J = \frac{g(m_1 - m_2)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} R = \frac{gm'R}{\varepsilon'} \quad (6.13)$$

где буквой m' обозначена разность масс грузов, а ε' обозначает разность угловых ускорений. Относительная погрешность определения момента инерции записывается в виде:

$$\left(\frac{\Delta J}{J}\right)^2 = \left(\frac{\Delta m'}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon'}{\varepsilon}\right)^2 \quad (6.14)$$

Входящие в (6.14) величины m' и R составляют примерно 0.001 кг (если не взвешивать грузы с большей точностью) и 10.4м, а $\Delta \varepsilon'$ рассчитывается по формуле:

$$(\Delta \varepsilon')^2 = \sigma_{\varepsilon_1}^2 + \sigma_{\varepsilon_2}^2$$

Таблица 6.1

Массы грузов

m , кг		Кол.
0,01	легкий	2
0,043	тяжелый	2
0,013	крюк с площадкой	1

Таблица 6.2

Расчет углового ускорения и момента инерции

$R, \text{ м}$	$l, \text{ м}$	$m, \text{ кг}$	$\varepsilon, \text{ рад}\cdot\text{с}^{-2}$ ($\Delta\varepsilon, \text{ рад}\cdot\text{с}^{-2}$)					$\varepsilon_{\text{ф}}, \text{ рад}\cdot\text{с}^{-2}$	$\sigma, \text{ рад}\cdot\text{с}^{-2}$	$J, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
		m_1								
		m_2								
		m_1								
		m_2								

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Включать в сеть измерительный блок L-микро можно только после его подключения к разъему последовательного порта компьютера.

Следите за тем, чтобы грузы на стержнях маятника были надежно закреплены.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое движение называется поступательным? Какое движение называется вращательным?
2. Что называется угловой скоростью? Что называется угловым ускорением? Как определяются их направления? Какова связь между линейными и угловыми величинами?
3. В чем заключается закон сохранения импульса?
4. Что называется центром масс системы материальных точек?
5. Что такое момент инерции тела?
6. Что такое момент импульса материальной точки? Что такое момент импульса твердого тела? Как определяется направление момента импульса?
7. В чем заключается физическая сущность закона сохранения момента импульса?
8. Каким образом в эксперименте исключается влияние неизвестного момента сил трения?
9. Как вы понимаете слова: «прямая линия, наилучшим образом аппроксимирующая экспериментальные данные».
10. Выведите самостоятельно формулу (6.14).

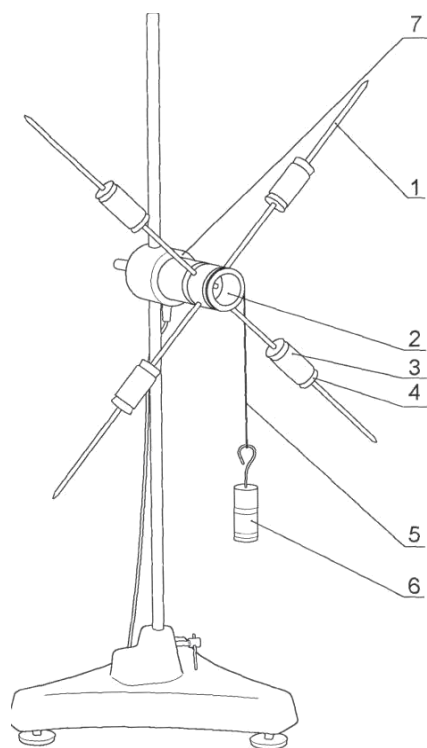


Рис. 6.1 Схема установки

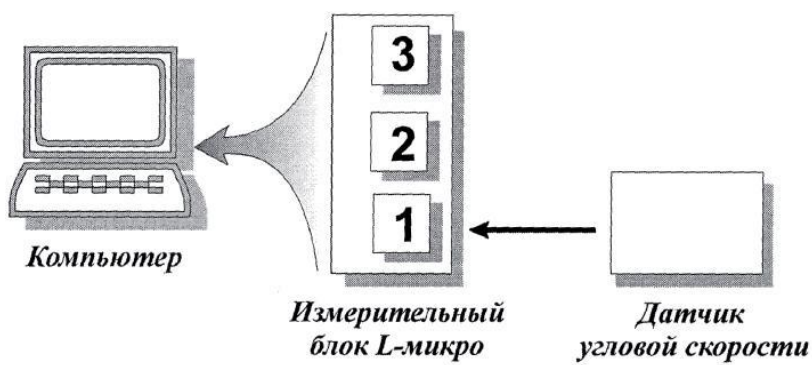


Рис. 6.2 Схема подключения установки

Лабораторная работа № 7

Измерение вязкости жидкости методом Стокса

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: измерение коэффициента внутреннего трения методом Стокса.

ОБОРУДОВАНИЕ

- трубка с жидкостью
- основание с датчиками
- стальной шарик
- электромагнит
- измерительный блок L-микро
- блок питания

Сила сопротивления F_C , действующая со стороны жидкости на медленно движущееся в ней тело шарообразной формы, выражается формулой Стокса:

$$F_C = 6\pi\eta Rv \quad (7.1)$$

где R - радиус тела, v - его скорость, а η - динамическая вязкость жидкости. На применении этой формулы основывается метод измерения динамической вязкости, называемый методом Стокса. При определении вязкости по методу Стокса измеряется скорость установившегося (равномерного) падения небольшого шарика в жидкости.

На шарик, падающий в вязкой жидкости, действуют три силы (см. рис. 7.1) - сила тяжести P , направленная вниз, выталкивающая сила - сила Архимеда F_A , направленная вверх и сила сопротивления F_C , направленная против движения, т.е. тоже вверх.

Если опустить шарик в жидкость, то он вначале он будет двигаться ускоренно, т.к. $P > F_A + F_C$. Сила сопротивления F_C будет расти согласно формуле Стокса до тех пор пока не наступит равно-весие сил:

$$P = F_A + F_C \quad (7.2)$$

С этого момента движение шарика будет равномерным. Из уравнения (7.2) и определяется коэффициент вязкости.

Силу тяжести находим по объему V и плотности ρ_m металлического шарика:

$$P = mg = \rho_m Vg = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_m g \quad (7.3)$$

Силу Архимеда определяем по объему шарика и плотности жидкости ρ :

$$F_A = \rho V g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g \quad (7.4)$$

Подставляя в (7.2) выражения (7.1), (7.3), (7.4) получим:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho g + 6 \pi \eta R v = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_m g \quad (7.5)$$

Решение уравнения (7.5) относительно η дает расчетную формулу:

$$\eta = \frac{2 R^2 g (\rho_m - \rho)}{9 v} \quad (7.6)$$

В лабораторной работе измеряется время движения шарика между датчиками. Движение шарика на этом участке равномерное. На основе полученных данных рассчитывается скорость шарика v в жидкости. Величины R , ρ_m и ρ даны в таблице 7.2.

Для проведения измерений используется установка, в которой шарик движется внутри вертикально установленной заполненной жидкостью трубки. Запуск шарика осуществляется электромагнитом, собранным на пробке, которой закрыта трубка, а для измерения скорости используются оптические датчики, выполненные на основе светодиодов. Свет излучателя датчика проходит через трубку в поперечном направлении и в момент прохождения шарика перекрывается им, т.е. перестает попадать на приемник излучения. На экране компьютера это отражается в виде изменения (уменьшения) уровня сигнала, поступающего от датчика.

В установке используется два оптических датчика (1 и 2, рис. 7.2), установленных на верхней и нижней печатных платах, находящихся внутри основания (печатные платы, излучатели и приемники излучения хорошо видны через прозрачную цилиндрическую стенку основания). Один из светодиодов работает в качестве излучателя света, а второй - в качестве приемника излучения. Обратите внимание (после подключения датчиков к измерительному блоку), что излучатели верхнего и нижнего датчиков направлены навстречу друг другу. Это позволяет избежать засветки приемников излучения светом от «чужого» излучателя. Проходя мимо датчика, шарик перекрывает луч, попадающий на приемник излучения, и это позволяет измерить на экране промежутки времени, в течение которого шарик двигался от одного датчика до другого.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите установку для измерения вязкости как показано на рис. 7.2. Вставьте трубку с жидкостью (6) в отверстие корпуса (3). Катушку электромагнита (4) установите на металлическом стержне (5), выходящем из пробки, которой закрыта трубка (6).

2. Подключите измерительный блок *L-микро* к разъему последовательного порта компьютера и включите его в сеть (220В, 50Гц).

3. В соответствии со схемой, приведенной на рис. 7.3, девятиштырьковый разъем кабеля электромагнита (9) подсоедините к третьему каналу измерительного блока, а на два штекера этого кабеля подайте постоянное напряжение 6 - 9В от блока питания.

4. В первый разъем измерительного блока включите кабель оптических датчиков (8, рис. 7.2). Включите измерительный блок *L-микро*.

5. Запустите программу *L-физика* - практикум, выберите пункт меню «выбор работы» и в появившемся на экране списке выберите лабораторную работу «Измерение вязкости жидкости методом Стокса».

6. Нажмите на экранную кнопку «проведение измерений». При этом будет подано напряжение питания на электромагнит.

7. Поднимите трубку с жидкостью и, придерживая электромагнит пускового устройства, переверните ее для того, чтобы шарик опустился вниз и «прилип» к электромагниту. Вставьте трубку обратно в основание.

8. Произведите запуск, нажав кнопку «пуск» на экране компьютера (при этом питание удерживающего шар электромагнита будет отключено, и шарик начнет движение в жидкости).

9. Пользуясь курсором, определите время движения шарика между датчиками. Для этого подведите указатель мышки к точке, примерно соответствующей середине переднего фронта изменения сигнала от первого датчика и щелкните левой клавишей. На экране возникнет вертикальная желтая линия, проходящая через выбранную Вами точку, а в правом нижнем углу экрана будет показано время, соответствующее этой точке (рис 7.4). Запишите это значение времени в строку t_1 Таблицы 7.1. После этого аналогичным образом определите и внесите в таблицу (строка t_2) время, соответствующее середине переднего фронта изменения сигнала на втором датчике.

10. Проведите опыт 5 раз, повторяя пункты 2-4. Питание электромагнита включается автоматически после завершения очередной записи данных.

11. Вычислите усредненное значение времени движения шарика между оптическими датчиками t_{cp} и внесите его в таблицу 7.1. В таблице 7.2 рассчитайте скорость шарика и определите вязкость жидкости на основании расчетной формулы и приведенных там параметров установки.

12. Рассчитайте среднеквадратичное отклонение времени движения шарика между датчиками по формуле:

$$\Delta t_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}{n}} \quad (7.7)$$

t_i - время пролета шарика между датчиками в i -том эксперименте, n - общее число экспериментов.

13. Вычислите погрешность определения вязкости и внесите полученное значение в таблицу 7.2.

$$\Delta \eta = \frac{2R^2 g (\rho_m - \rho)}{9l} \Delta t = \eta (t/t) \quad (7.8)$$

Таблица 7.1

Расчет времени движения шарика между датчиками

Время движения шарика, с						t_{cp}, c	t_{cp}, c
t_1, c							
t_2, c							
$t = t_2 - t_1$							

Таблица 7.2

Расчет коэффициента вязкости жидкости

R, m	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\rho_m, \text{кг/м}^3$	l, m	$V_{cp}, \text{м}^3$	$\eta, \text{кг/(м·с)}$	$\Delta \eta, \text{кг/(м·с)}$
0.005	$1.26 \cdot 10^3$	$7.8 \cdot 10^3$	0.045			

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Включать в сеть измерительный блок L-микро можно только после его подключения к разъему последовательного порта компьютера.

Осторожно обращаться со стеклянной трубкой. Переворачивать ее необходимо на минимальной высоте над столом.

Контрольные вопросы

1. Что такое вязкость? В каких единицах она измеряется?
2. Каков физический смысл коэффициента динамической вязкости?
3. От чего зависит вязкость?
4. В чём заключается метод Стокса определения вязкости.
5. Запишите формулу для определения силы сопротивления движению шара в жидкости.
6. Получите самостоятельно формулу (7.8).

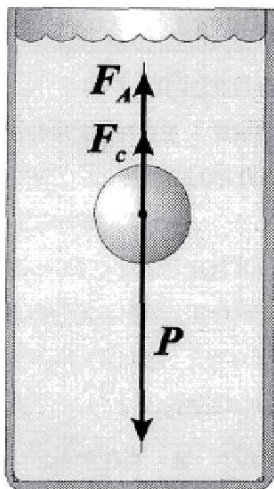


Рис. 7.1 Шарик в вязкой жидкости

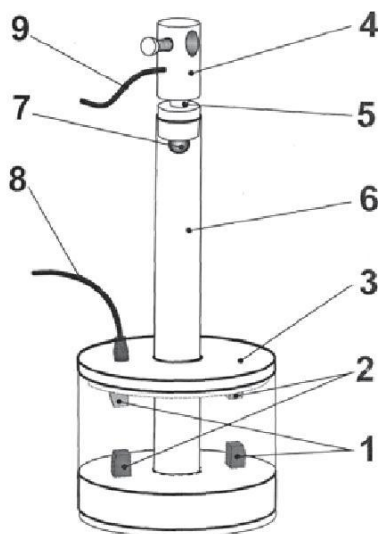


Рис. 7.2 Схема установки

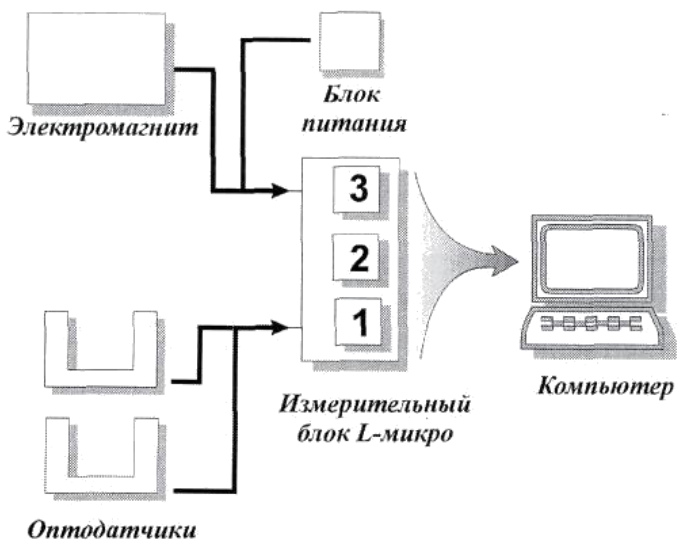


Рис. 7.3 Схема подключения установки

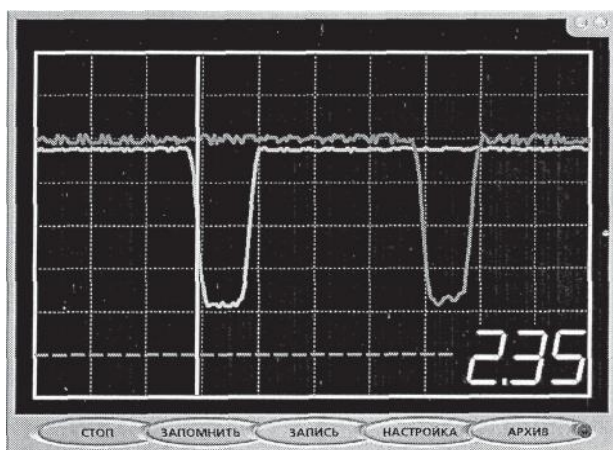


Рис 7.4 Показания датчиков на экране компьютера

Лабораторная работа № 8

Измерение теплопроводности воздуха

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: измерение коэффициента теплопроводности воздуха.

ОБОРУДОВАНИЕ:

- штатив
- прибор для измерения теплопроводности воздуха
- измерительный блок *L*-микро
- блок питания
- стальная пластина
- резистор 22 Ом

Явление теплопроводности состоит в возникновении направленного переноса внутренней энергии в газообразных, жидких и твердых телах при наличии в них пространственных неоднородностей температуры. В стационарном одномерном случае явление теплопроводности описывается уравнением Фурье, которое имеет вид:

$$q_e = -k \frac{dT}{dx} \quad (8.1)$$

Здесь q_e - удельный тепловой поток - физическая величина, равная количеству теплоты, переносимой через единичную площадку S , перпендикулярную направлению движения тепла за единицу времени t :

$$q_e = \frac{\Delta Q}{\Delta S \cdot \Delta t}; \quad (8.2)$$

k - коэффициент теплопроводности, dT/dx - градиент температуры — изменение температуры вдоль направления потока тепла.

В данной лабораторной работе определение коэффициента теплопроводности воздуха производится методом нагреваемой нити. Измерения проводятся при помощи специального прибора, схема которого показана на рис. 8.1. Прибор представляет собой два коаксиальных стеклянных цилиндра (1) и (2), которые закрыты с торцов теплоизолирующими и электроизолирующими пробками (3) и (4). Через эти пробки во внутренний цилиндр проведена проволочная нить (5), которая нагревается электрическим током. В результате передачи тепла во внешнее пространство температу-

ры цилиндров T_1 и T_2 - разные. При этом имеется в виду внешняя поверхность внутреннего и внутренняя поверхность внешнего цилиндра. Чтобы исключить передачу тепла за счет конвекции цилиндры располагают вертикально, для этой же цели предназначены пробки (3) и (4). Измерение разности температур производится дифференциальной термопарой хромель-капель (7).

Для вывода расчетной формулы используем уравнение Фурье (8.1) и учтем, что передача теплоты происходит не от плоскости к плоскости вдоль одной пространственной координаты декартовой системы координат, а от одной цилиндрической поверхности к другой, т.е. вдоль радиуса цилиндров.

$$q_e = -k \frac{dT}{dr} \quad (8.3)$$

В приборе, который используется в данной лабораторной работе, перенос теплоты за счет теплопроводности осуществляется между двумя коаксиальными цилиндрами с радиусами r_1 и r_2 и высотой h . Температуры цилиндров в установившемся режиме T_1 и T_2 . Передача теплоты от внутреннего цилиндра к внешнему может происходить за счет трех процессов — теплопроводности, конвекции и лучеиспускания. Уравнение Фурье относится только к процессу теплопроводности, конвекция исключена принятыми мерами — вертикальное расположение цилиндров и теплоизолирующие пробки на их торцах. Теплоотдачу за счет лучеиспускания учитывать не нужно, т.к. Температура внутреннего цилиндра не превышает 100° С.

Количество теплоты Q , стекшее с цилиндра r_1 в единицу времени и попавшее на цилиндр r_2 , целиком пройдет через любую цилиндрическую поверхность радиуса r . Иными словами, полный тепловой поток не зависит от радиуса цилиндрической поверхности. Его можно определить как произведение удельного теплового потока при данном значении радиуса r на площадь поверхности соответствующего радиуса $S = 2\pi rh$:

$$Q_T = q_e 2\pi rh \quad (8.4)$$

Умножим левую и правую части уравнения (8.3) на $2\pi rh$:

$$2\pi rhq_e = -2\pi rh \cdot k \frac{dT}{dr}$$

или

$$Q_T = -2\pi r h \cdot k \frac{dT}{dr} \quad (8.5)$$

Это дифференциальное уравнение можно решить методом разделения переменных. Для этого умножим левую и правую части (8.5) на dr/r :

$$\frac{dr}{r} = -2\pi h k \cdot dT \quad (8.6)$$

В левой части (8.6) — только переменная r , а в правой — только переменная T , поэтому можно проинтегрировать левую и правую части независимо друг от друга. Пределы интегрирования в левой части — r_1 и r_2 , а в правой — T_1 и T_2 :

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \int_{T_1}^{T_2} -2\pi h k \cdot dT \quad (8.7)$$

Взяв интегралы, получаем:

$$Q_T (\ln r_2 - \ln r_1) = -2\pi h k (T_2 - T_1) \quad (8.8)$$

Отсюда для Q_T получаем:

$$Q_T = 2\pi h k (T_1 - T_2) \frac{1}{\ln(r_2/r_1)} \quad (8.9)$$

Это и есть тепловой поток от первого цилиндра ко второму за счет теплопроводности.

Он должен равняться тепловой мощности, которая выделяется во внутреннем цилиндре за счет нагревания проволоочной нити электрическим током $Q = Q_T$ или, подставляя значения входящих сюда величин:

$$I \cdot U = -2\pi h \cdot k \cdot (T_2 - T_1) \frac{1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (8.10)$$

Это уравнение полного баланса энергии. Из него найдем коэффициент теплопроводности воздуха:

$$k = \frac{I \cdot U \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi h (T_2 - T_1)} \quad (8.11)$$

В данной работе используется дифференциальная термопара, которая измеряет разность температур $T=T_1-T_2$. Расчетная формула при этом записывается в виде:

$$k = \frac{I \cdot U \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi h \Delta T} \quad (8.12)$$

Значения I и U так же как и T измеряются компьютерной измерительной системой, а величины r_1 и r_2 приведены в таблице 8.1.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Разместите прибор для измерения коэффициента теплопроводности воздуха на стальной пластине, закрепленной в штативе, так, чтобы стеклянные цилиндры располагались вертикально (рис. 2).

2. Подключите измерительный блок L-микро к разъему последовательного порта компьютера и к сети (220 В, 50 Гц) (рис. 3).

3. В первый разъем измерительного блока подключите кабель с усилителем (на разъеме этого кабеля имеется метка - буква «У»). Другой конец этого кабеля подключите к выводам термопарных датчиков (крайние клеммы). При этом термопарные датчики включаются навстречу друг другу, и измеряемое значение температуры соответствует разности температур стенок цилиндров. Если во время измерений получится отрицательное значение разности температур, то следует поменять местами одноштырьковые разъемы, подключенные к установке.

4. Соберите цепь нагревателя (рис. 3), подключив его к блоку питания через резистор сопротивлением 22 Ом. Блок питания следует переключить на напряжение 12 В. для присоединения проводов к выводам нагревателя воспользуйтесь зажимами «крокодил».

5. Подключите ко второму разъему измерительного блока кабель для измерения напряжений на элементах схемы. Одноштырьковые разъемы кабеля подключаются на клеммы резистора R .

6. Запустите программу L-физика практикум, выберите пункт меню «выбор работы» и в появившемся на экране списке выберите лабораторную работу «Измерение теплопроводности воздуха».

7. Нажмите кнопку «проведение измерений» для перехода к измерениям.

8. Нажмите кнопку «пуск» для начала регистрации данных.

9. Включите блок питания в сеть и наблюдайте рост разности температур поверхностей цилиндров на экране компьютера. Значение разности температур можно увидеть в верхнем правом углу экрана. Как только значение T перестанет изменяться (достижение стационарного режима теплопередачи), Вы можете вне-сти разность температур в таблицу.

10. Внесите в таблицу значение напряжения, измеряемое на резисторе R .

11. Отключите одноштырьковые разъемы измерительного ка-беля от выводов резистора R и подключите их к нагревательному элементу. Измерьте напряжение на нагревателе. Впишите в табли-цу полученное значение.

12. Рассчитайте силу тока в цепи нагревателя на основе зако-на Ома для участка цепи

$$I = U_R/R.$$

13. Рассчитайте значение коэффициента теплопроводности воздуха, используя параметры установки и полученные данные.

Таблица 8.1

Расчет коэффициента теплопроводности воздуха

r_1 , м	r_2 , м	h , м	R , Ом	T , град	U_R , В	U , В	I , А	k , Вт/(м·град)
0.002	0.006							

Обозначения, принятые в таблице:

r_1 - радиус внутреннего

цилиндра; r_2 - радиус внешнего

цилиндра; h - длина цилиндров;

R - сопротивление резистора, включенного в цепь нагревателя для измерения тока;

T - стационарное значение разности температур;

U_R - падение напряжения на резисторе R ;

U - напряжение на нагревателе; I -

сила тока в цепи нагревателя; k -

коэффициент теплопроводности.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Включать в сеть измерительный блок L-микро можно только после его подключения к разъему последовательного порта компьютера.

Осторожно обращаться с прибором, изготовленным на основе стеклянных трубок.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что такое температура? В каких единицах она измеряется?
2. Что такое теплота? В каких единицах она измеряется?
3. Что такое теплоёмкость? В каких единицах она измеряется?
4. Что такое теплопроводность? В каких единицах она измеряется?
5. Объясните физическую сущность законов Фурье.

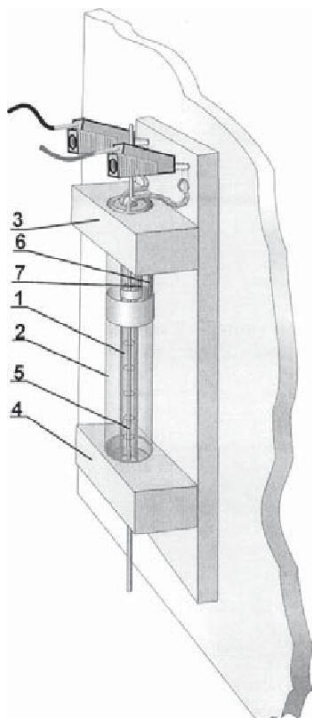


Рис 8.1 Схема установки

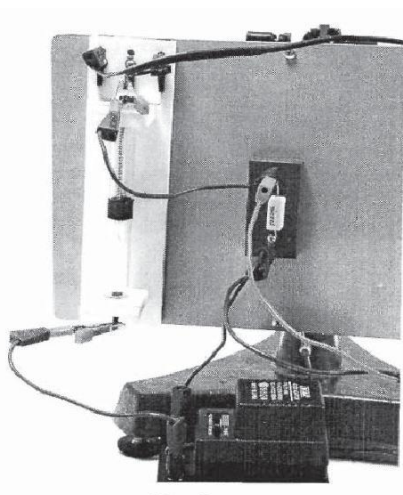


Рис. 8.2 Вид установки

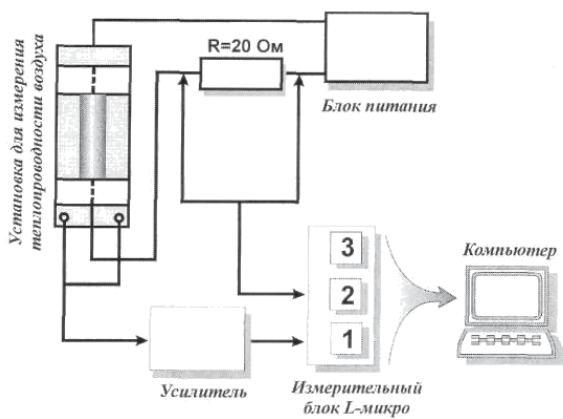


Рис. 8.3 Схема подключения установки

Библиографический список

1. Иверонова, В. И. Физический практикум. Механика и молекулярная физика / В. И. Иверонова под ред. В. И. Ивероновой. — Изд. “Наука”, гл. ред. ф.-м. лит., 1967г. — 352 с.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики: т. 1. Учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова — М.: Высш. шк., 1990.— 478 с.: ил.
3. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 4-х томах. Т.1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика.: учебное пособие / И. В. Савельев; под общ. ред. В. И. Савельева. — М. : КНОРУС, 2009. — 528 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. Программное обеспечение <i>L-micro</i> и работа с ним . . .	3
Лабораторная работа №1. Соударение шаров	6
Лабораторная работа № 2. Измерение скорости тела баллистическим маятником	14
Лабораторная работа № 3. Измерение ускорения свободного падения с помощью математического и физического маятников	
22 Лабораторная работа № 4. Изучение закона сохранения момента импульса	30
Лабораторная работа № 5. Маятник Максвелла	37
Лабораторная работа № 6. Определение моментов инерции тел	44
Лабораторная работа № 7. Измерение вязкости жидкости методом Стокса	53
Лабораторная работа № 8. Измерение теплопроводности воздуха	59
Библиографический список	66

Электронное учебное издание

Ёч Франц Адольфович
Масликов Александр Альбертович

Лабораторные работы по общей физике
Механика

ЭЛЕКТРОННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Филиал «Протвино»
государственного университета «Дубна»
142281 г. Протвино Московской обл.,
Северный проезд, д. 9

