

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Казанский государственный
энергетический университет**

**МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ
ФИЗИКА**

**Методические указания по выполнению лабораторных
работ по дисциплине «Физика»**

Казань 2014

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Казанский государственный
энергетический университет

МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Методические указания по выполнению
лабораторных работ по дисциплине
«Физика»

Казань 2014

УДК 531
ББК 22.2
М55

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, зав.лабораторией ФГБУН КИББ КазНЦ РАН *А.В. Анисимов*; доктор технических наук, профессор Казанского государственного энергетического университета, зав.каф. ЭПА *Н.К. Андреев*

М55 Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика» /Сост. В.Л. Матухин, О.С. Зуева, В.В. Куржунов, С.Ф. Малацион, Т.А. Серебренникова. Под редакцией В.Л. Матухина – Казань: Казан.гос.энерг.ун-т, 2014.– 48 с.

Настоящий сборник содержит 8 лабораторных работ по разделам «Механика» и «Молекулярная физика» курса физики. В каждой лабораторной работе приведена краткая теория рассматриваемого вопроса, описана методика проведения эксперимента и обработка экспериментальных данных.

Пособие соответствует программе рассматриваемых разделов курса физики для студентов энергетических специальностей. Предназначено для преподавателей и студентов Казанского государственного энергетического университета.

УДК 531
ББК 22.2

© В.Л. Матухин, О.С. Зуева, В.В. Куржунов, С.Ф. Малацион, Т.А. Серебренникова. Под редакцией В.Л. Матухина
© Казанский государственный энергетический университет, 2014

1. ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Целью лабораторной работы является привитие студентам навыков и умений пользования штангенциркулем и микрометром – измерительными приборами, у которых для повышения точности измерения линейных размеров предметов существуют дополнительные шкалы: нониус (в штангенциркуле) и микрометрический винт (в микрометре).

Описание методики измерения с помощью линейного нониуса и микрометрического винта

а) Измерения с помощью линейного нониуса

Нониус представляет собой дополнительную шкалу (линейку), разбитую на n равных делений, которая перемещается при измерении вдоль основной шкалы (масштаба).

Простейшим нониусом является десятичный ($n = 10$), который позволяет измерять длину предмета с точностью до 0,1 наименьшего деления (цены деления) масштаба (рис.1.1.а).

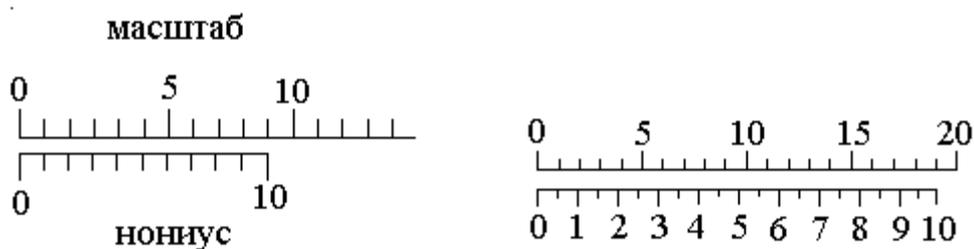


Рис.1.1

Длина такого нониуса равна девяти наименьшим делениям масштаба. При длине одного наименьшего деления масштаба $b = 1$ мм длина наименьшего деления нониуса $a = 0,9$ мм. Разность $(b - a) = 0,1$ мм есть наименьшая длина, которая может быть измерена с помощью десятичного нониуса.

Часто используется нониусы, шкала которых имеет 20 наименьших делений (рис. 1.1.б). Длина такого нониуса равна 19 целым наименьшим делениям масштаба. При длине одного наименьшего деления масштаба $b = 1$ мм длина наименьшего деления нониуса $a = 19/20$ мм. Разность $(b - a) = 1/20$ мм $= 0,05$ мм есть наименьшая длина, которая может быть измерена с помощью десятичного нониуса.

В обоих случаях длина n наименьших делений нониуса равна длине $(n - 1)$ наименьших делений масштаба, т.е.

$$an = b(n - 1) \quad (1.1)$$

Получаемая из (1.1) разность

$$b - a = b/n \quad (1.2)$$

определяет точность нониуса. Ею называют величину b/n , равную отношению цены наименьшего деления основной шкалы b к числу наименьших делений нониуса n .

Таким образом, чем больше наименьших делений имеет нониус, тем выше его точность и тем меньше длина, которая может быть измерена с помощью такого нониуса.

На рис.1.2 изображено положение нониуса (точность которого $b/n = 0,05$ мм) при измерении отрезка длиной L . В общем виде величина L может быть представлена выражением

$$L = kb + \Delta L, \quad (1.3)$$

где k – целое число наименьших делений масштаба, укладываемое в измеряемом отрезке до нуля нониуса; ΔL – доля длины наименьшего деления масштаба.

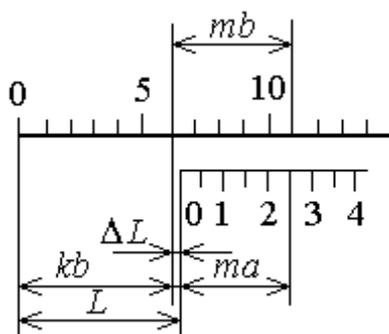


Рис.1.2

Для определения ΔL находят такое наименьшее деление m на нониусе, номер которого точно совпадает с каким – либо делением масштаба. Тогда ΔL с учетом (1.2) можно представить в виде

$$\Delta L = mb - ma = m(b - a) = m \frac{b}{n} \quad (1.4)$$

Подставив (1.4) в (1.3), получим

$$L = kb + m \frac{b}{n} \quad (1.5)$$

В нашем примере $b = 1$ мм, $n = 20$, $k = 6$, $m = 5$. Длина измеряемого отрезка равна

$$L = (6 \cdot 1 + 5 \cdot 1/20) \text{ мм} = 6,25 \text{ мм}.$$

б) Измерения с помощью микрометрического винта

Для более точного измерения линейных размеров предмета используется микрометр – измерительный прибор, основной частью которого является микрометрический винт. Микрометрические винты могут быть с шагом (длиной наименьшего деления основной шкалы прибора), равным 0,5

мм или 1 мм, и позволяют производить измерения с точностью до 0,01 мм (рис. 1.3).

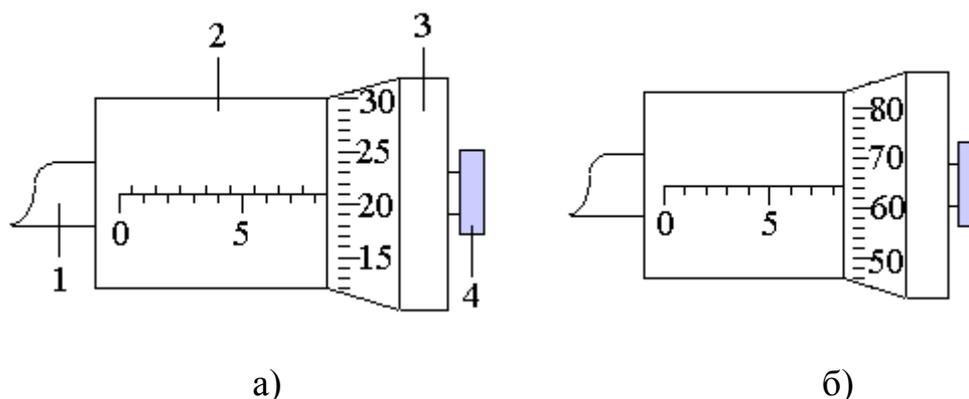


Рис.1.3

Микрометрический винт 1 микрометра ввинчивается в трубку 2 с основной шкалой (масштабом). На нем закреплен барабан 3 с делениями, выполняющий роль нониуса в штангенциркуле. Измеряемый предмет зажимают между пяткой скобы микрометра, не показанной на рисунке, и началом трубки 2 путем вращения винта с помощью фрикционной головки 4. Вращение винта осуществляют только до тех пор, пока при необходимой для измерения степени винта на предмет не услышат характерный треск предохранительного устройства.

Для расчета показаний микрометра также используется формула (1.5).

Значения величин, входящих в формулу (1.5) (рис. 1.3а), равны: $b = 0,5$ мм, $n = 50$, $k = 17$, $m = 21$. Измеряемая длина равна

$$L = (17 \cdot 0,5 + 21 \cdot 0,5 / 50) \text{ мм} = 8,71 \text{ мм.}$$

Значения величин, входящих в формулу (1.5) (рис. 1.3б), равны: $b = 1$ мм, $n = 100$, $k = 8$, $m = 65$. Измеряемая длина равна

$$L = (8 \cdot 1 + 65 \cdot 1 / 100) \text{ мм} = 8,65 \text{ мм.}$$

Предварительное задание

Каждый студент должен ознакомиться с устройством штангенциркуля и микрометра, их регулировкой и уяснить особенности отсчета показаний штангенциркулей (с различной точностью нониуса) и микрометров (с различной ценой деления).

Рабочее задание

Определите объем сплошного цилиндра, для чего предварительно произведите измерения его диаметра d и высоты h с помощью штангенциркуля.

Указания по выполнению эксперимента

1. Определите цену деления b масштаба штангенциркуля и число наименьших делений n на нониусе штангенциркуля.
2. Определите точность нониуса b/n штангенциркуля.
3. Произведите замеры диаметра d и высоты h цилиндра штангенциркулем пять раз в разных местах.
4. Результаты измерений занесите в табл. 1.1 и 1.2, оформленные отдельно для измерений, высоты и диаметра цилиндра.

Таблица 1.1

Номер измерения	k	m	d_i	$ d_i - \bar{d} $, мм	$(d_i - \bar{d})^2$, мм ²

Таблица 1.2

Номер измерения	k	m	h_i	$ h_i - \bar{h} $, мм	$(h_i - \bar{h})^2$, мм ²

Указания по обработке результатов измерений

1. Проведите обработку результатов измерений диаметра d и высоты h , полученных каждым прибором, пользуясь алгоритмом обработки результатов прямых измерений, изложенным в [3]. Для этого:
 - а) рассчитайте средние арифметические значения величин \bar{d} и \bar{h} по формулам

$$\bar{d} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 d_i, \quad \bar{h} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 h_i;$$

- б) используя таблицы 1.1 и 1.2 найдите среднеквадратичную погрешность серии измерений диаметра и высоты цилиндра

$$\Delta d = \sqrt{\frac{1}{5 \cdot 4} \sum_{i=1}^5 (d_i - \bar{d})^2}, \quad \Delta h = \sqrt{\frac{1}{5 \cdot 4} \sum_{i=1}^5 (h_i - \bar{h})^2};$$

- в) определите приборную систематическую погрешность штангенциркуля, равную половине его наименьшего деления (половине точности нониуса).

Обычно $\Delta d_{\text{пр}} = \Delta h_{\text{пр}} = \frac{0,05}{2} = 0,025$ мм

- г) найдите полные абсолютные погрешности измерений по формулам

$$\Delta d_{\text{полн}} = \sqrt{\Delta d^2 + \Delta d_{\text{пр}}^2}, \quad \Delta h_{\text{полн}} = \sqrt{\Delta h^2 + \Delta h_{\text{пр}}^2};$$

д) окончательный результат прямых измерений высоты и диаметра цилиндра, с учетом правила округления результатов, запишите в виде

$$d = \bar{d} \pm \Delta d_{\text{полн}}, \quad h = \bar{h} \pm \Delta h;$$

е) вычислите относительные погрешности измеренных высоты и диаметра цилиндра

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d_{\text{полн}}}{d} * 100\%, \quad \varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h} * 100\%.$$

2. Вычислите объем цилиндра \bar{V} , используя средние арифметические значения величин d и h , по формуле

$$\bar{V} = \pi \bar{d}^2 \bar{h} / 4, \quad (1.6)$$

где \bar{d} и \bar{h} - средние арифметические значения величин d и h соответственно.

3. Вычислите среднюю абсолютную ошибку ΔV косвенного измерения объема цилиндра по формуле.

$$\Delta V = \bar{V} \sqrt{\left(\frac{\Delta h_{\text{полн}}}{\bar{h}}\right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta d_{\text{полн}}}{\bar{d}}\right)^2} = \bar{V} \sqrt{\varepsilon_h^2 + 4\varepsilon_d^2} \quad (1.7)$$

где $\Delta d_{\text{полн}}$ и $\Delta h_{\text{полн}}$ - полные абсолютные, а ε_d и ε_h - относительные погрешности прямых измерений диаметра и высоты соответственно.

4. Относительную погрешность измерения объема цилиндра найдите по формуле

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{\bar{V}} \cdot 100\% \quad (1.8)$$

5. Запишите окончательный результат в виде

$$V = \bar{V} \pm \Delta V \text{ (мм}^3\text{)} \quad (1.9)$$

с учетом правил округления результатов измерений и требований к точности записи результатов измерений.

6. Сравните результаты, полученные при измерениях штангенциркулем и микрометром, и сделайте выводы о причинах их расхождения.

Указания по оформлению отчета

Отчет оформляется каждым студентом индивидуально и должен содержать:

- а) номер и название работы;
- б) цель работы;
- в) краткую теорию изучаемого вопроса;
- г) основные характеристики измерительных приборов;
- д) записи результатов прямых измерений и расчетов косвенных измерений, оформленные в виде таблицы;
- г) графики полученных зависимостей (если требуются);
- д) запись вычислений, приводящих к окончательному результату;

- е) расчет ошибок измерений;
- ж) окончательный результат с указанием ошибки измерения;
- з) выводы.

Все графики должны быть выполнены на миллиметровой бумаге. При расчетах необходимо использовать единицы системы СИ.

Контрольные вопросы

1. Как устроены штангенциркуль и микрометр? Для чего они используются?
2. Что представляет собой линейный нониус? С какой целью он используется?
3. Что такое точность нониуса и как она определяется?
4. Как повысить точность нониуса?
5. По какой формуле рассчитывается линейный размер предмета? Какие величины входят в эту формулу?
6. В чем причина расхождения результатов, получаемых при измерениях штангенциркулем и микрометром?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. – Спб.: Изд-во Лань, 2006.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008
3. Зуева О.С., Зуев Ю.Ф., Серебrenникова Т.А. Учет погрешностей при проведении физических экспериментов. – Казань.: КГЭУ, 2007

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ТЕЛА

Цель работы

Целью работы является ознакомление студентов с одним из возможных методов определения ускорения свободного падения.

Описание установки

Установка (рис. 2.1) выполнена в виде вертикальной штанги 1 со шкалой и пульта управления 4. Вдоль штанги может перемещаться пускатель металлического шарика 2, роль которого выполняет электромагнит (ЭМ). В нижней части штанги неподвижно закреплена ловушка 3, состоящая из кольца с мешочком и контактной заслонки. Отсчет расстояния между пускателем и ловушкой, т.е. высоты падения шарика h , производится по шкале штанги. Время полета шарика t отчитывается по электросекундомеру 5, пуск которого производится путем включения тумблера 6 на пульте

управления. Одновременно с пуском электросекундомера обесточивается электромагнит и начинается свободное падение шарика. Остановка электросекундомера происходит при падении шарика на контактную заслонку вследствие разрыва электрической цепи. Время полета шарика отсчитывается с точностью до 0,01 с.

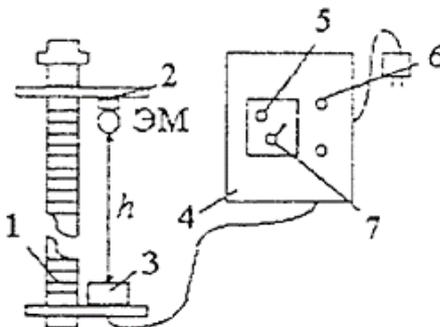


Рис.2.1

Предварительное задание

Каждый студент должен изучить кинематику поступательного движения и закон всемирного тяготения по [1], вывести формулу, связывающую высоту падения h , время полета t и ускорение свободного падения g , а именно:

$$h = gt^2/2. \quad (2.1)$$

Рабочее задание

В работе требуется определить ускорение свободного падения тела при падении тела с заданной высоты.

Указания по выполнению эксперимента

1. Установите электромагнит на высоте h_1 .
2. Поставьте на пульте управления все тумблеры в положение «выключено».
3. Включите электроцепь установки в сеть с переменным напряжением 220В.
4. Переведите контактную заслонку ловушки с помощью специальной ручки в горизонтальное положение.
5. Верните стрелки электросекундомера с помощью рычага 7 в нулевое положение.
6. Включите тумблер «магнит» на пульте управления и плотно прижмите снизу к электромагниту шарик.
7. Включите тумблер «электросекундомер» на пульте управления.

8. Произведите отсчет времени падения шарика t_1 после остановки электросекундомера.
9. Измерения повторите не менее пяти раз.
10. Прodelайте те же измерения времени падения шарика с двух других высот h_2 и h_3 .
11. Результаты измерений занесите в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ серии	Измеряемая величина	Номер опыта					Среднее значение	$\Delta_{\text{сл.}}$	$\Delta_{\text{пр.}}$	$\Delta_{\text{полн.}}$
		1	2	3	4	5				
I	h_1									
	t_1									
II	h_2									
	t_2									
III	h_3									
	t_3									

Указания по обработке результатов измерений

Произведите обработку результатов прямых и косвенных измерений по методике, изложенной в работе [3]. Для этого:

1. Найдите средние значения измеренных величин.
2. Вычислите случайные абсолютные ошибки измерений каждой величины.
3. Определите полные абсолютные ошибки каждой серии измерений h и t с учетом приборных ошибок. Подобные расчеты более подробно изложены в лабораторной работе №1.
4. Результаты всех расчетов занесите в табл.2.1.
5. По формуле (2.1) рассчитайте для всех трех серий ускорение свободного падения g , пользуясь средними значениями h и t .
6. Получите формулу для вычисления абсолютной ошибки Δg (определение g является косвенным измерением).
7. Вычислите абсолютные ошибки Δg для каждой серии измерений.
8. Запишите окончательные результаты с учетом правил округления и точности записи результатов в виде:

$$\text{I серия} - g_1 = \bar{g}_1 \pm \Delta g_1$$

$$\text{II серия} - g_2 = \bar{g}_2 \pm \Delta g_2$$

$$\text{III серия} - g_3 = \bar{g}_3 \pm \Delta g_3$$

Результаты эксперимента представьте на графике в координатах (h, t^2) и убедитесь в том, что точки ложатся на одну прямую.

Указания по оформлению отчета

Требования к оформлению отчета соответствует требованиям работы 1.

Контрольные вопросы

1. Зависит ли ускорение свободного падения от скоростей тел?
2. Как и почему зависит величина ускорения свободного падения от географической широты?
3. Сформулируйте закон всемирного тяготения.
4. Выразите массу Земли через ее радиус, гравитационную постоянную и ускорение свободного падения.
5. Как убедиться на опыте, что ускорение свободного падения не зависит от формы и массы тел?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спириин Г.Г. Курс общей физики. Книга 1. Механика. М.: Академия, 2013 г. 368 с.
3. Зуева О.С., Зуев Ю.Ф., Серебренникова Т.А. Учет погрешностей при проведении физических экспериментов. – Казань.: КГЭУ, 2015. 25 с.

3. ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ УДАРЕ ШАРОВ.

Цель работы

Целью работы является изучение законов сохранения импульса и энергии на примере удара шаров.

Описание установки и метода изучения процесса

Установка для выполнения работы (рис. 3.1) представляет собой основание 1, на котором смонтирована стойка 4, несущая подвески 5 шаров 3 и штангу 6 с электромагнитом 7.

Бифилярный подвес, несущий левый шар, можно перемещать в горизонтальном положении при вращении ручки 9, изменяя тем самым межцентровое расстояние. Для отсчета положения шаров имеются две шкалы. Правая шкала 8 стационарна, и указатель положения правого шара, находящегося в положении равновесия, располагается над ее нулевой отметкой. Левая шкала 2 может перемещаться.

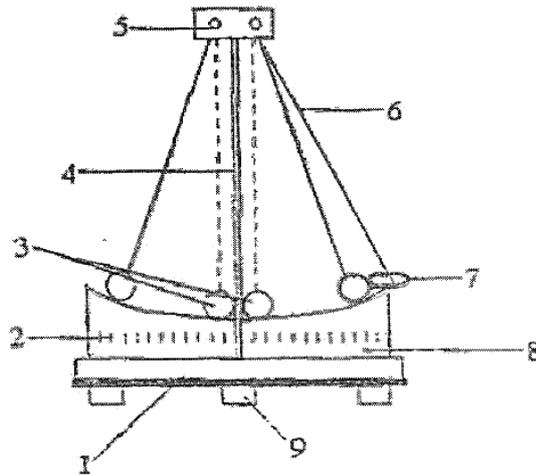


Рис. 3.1

При изменении межцентрального расстояния шаров необходимо так расположить эту шкалу, чтобы ее нулевая отметка находилась против указателя левого шара, который в исходном положении покоится ($v_2=0$). Электромагнит 7, который питается источником постоянного тока напряжением 6В, удерживает правый шар в исходном положении перед ударом.

В работе рассматривается удар двух шаров, подвешенных на длинных нитях в виде маятников, которые можно считать математическими. Удар шаров происходит в положении их равновесия, является центральным и прямым. В этих условиях в момент удара проекция внешней силы – сила тяжести, действующей на систему из двух шаров, - линию удара равна нулю, и систему можно считать замкнутой. Поэтому для нее справедлив закон сохранения импульса, а для абсолютно упругого удара и закон сохранения механической энергии.

Рассмотрим случай абсолютно упругого удара двух шаров. Пусть шары с массами m_1 и m_2 движутся до соударения со скоростями v_1 и v_2 , а после соударения со скоростями u_1 , u_2 . На основании закона сохранения импульса можно записать

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2 \quad (3.1)$$

На основании закона сохранения энергии имеем

$$m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2 \quad (3.2)$$

Перепишав эти равенства в виде

$$m_1 v_1 - m_1 u_1 = m_2 u_2 - m_2 v_2$$

$$m_1 v_1^2 - m_1 u_1^2 = m_2 u_2^2 - m_2 v_2^2$$

и поделив второе на первое, получим

$$v_1 + u_1 = u_2 + v_2 \text{ или } v_1 - v_2 = -(u_1 - u_2) \quad (3.3)$$

Таким образом, при центральном абсолютно упругом ударе относительная скорость шаров меняет свое направление на противоположное, оставаясь неизменной по величине.

В случае когда удар шаров не является абсолютно упругим, часть кинетической энергии шаров переходит в энергию их остаточной деформации. Тогда

$$\begin{aligned} m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 &> m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2 \\ v_1 - v_2 &> -(u_1 - u_2) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Таким образом, при неупругом ударе шаров относительная скорость их меняет свое направление на противоположное, уменьшаясь по абсолютной величине.

Для количественной оценки уменьшения относительной скорости шаров вводится коэффициент восстановления:

$$K = |u_1 - u_2| / |v_1 - v_2| \quad (3.5)$$

Посредством коэффициента восстановления K можно характеризовать упругие свойства того или иного материала. Для реальных тел всегда $K < 1$.

В работе рассматривается **упругое** соударение шаров одинаковой массы, когда один из шаров до удара покоится ($v_2=0$). При абсолютно упругом ударе ударяющий шар должен остановиться и $u_1=0$, а второй шар (ударяемый) должен приобрести непосредственно после удара скорость $u_2=v_1$. В реальных условиях этого не наблюдается, и удар можно считать лишь близким к абсолютно упругому, так как незначительная часть механической энергии ударяющихся шаров переходит в энергию другого вида – энергию неупругой деформации шаров. Поэтому вместо закона сохранения механической энергии в этом случае выполняется закон сохранения и превращения энергии:

$$W_1 = W_{11} + \Delta W \quad (3.6)$$

где $W_1 = m_1 v_1^2 / 2$ - энергия шаров перед ударом (с учетом того, что $v_2=0$);

$W_{11} = (m_1 u_1^2 / 2) + (m_1 u_2^2 / 2)$ - энергия шаров после удара; ΔW - энергия неупругой деформации. Из (3.6) следует, что

$$\Delta W = W_1 - W_{11} = \frac{1}{2} [m_1 (v_1^2 - u_1^2) - m_2 u_2^2] \quad (3.7)$$

Потенциальная энергия шаров в положении равновесия (в момент удара) принята равной нулю.

При абсолютно **неупругом** ударе, после которого шары движутся совместно с одинаковыми скоростями $u=u_1=u_2$, энергия неупругой деформации

$$\Delta W = \frac{1}{2} [m_1 v_1^2 - (m_1 + m_2) u^2] \quad (3.8)$$

Для экспериментальной проверки справедливости закона сохранения импульса необходимо определить скорости шаров до и после соударения. Это можно сделать, зная высоту, с которой они начинают движение до удара, и высоту их подъема после удара. Без учета потерь энергии на преодоление сил сопротивления на основании закона сохранения механической энергии получим:

а) для опускающегося (ударяющего) шара

$$v_1 = \sqrt{2gh_1}, \quad (3.9)$$

б) для поднимающихся после удара шаров

$$u_1 = \sqrt{2gh'_1}, \quad u_2 = \sqrt{2gh'_2}, \quad (3.10)$$

где h_1 – высота опускания первого (ударяющего) шара; h'_1 и h'_2 – высота подъема шаров после удара.

Поскольку на установке непосредственно измеряются угол начального отклонения α и углы α_1 и α_2 , на которые отклоняются шары после удара, высоту подъема и опускания шаров выразим через длину подвеса l и измеренные углы (см. рис. 3.2.):

$$h_1 = l(1 - \cos\alpha) = 2l\sin^2(\alpha/2), \quad (3.11a)$$

$$h'_1 = l(1 - \cos\alpha_1) = 2l\sin^2(\alpha_1/2), \quad (3.11 б)$$

$$h'_2 = l(1 - \cos\alpha_2) = 2l\sin^2(\alpha_2/2). \quad (3.11 в)$$

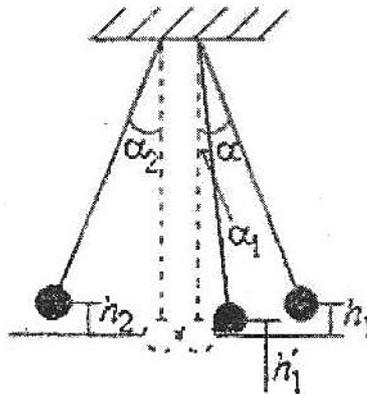


Рис.3.2

Если угол отклонения мал, то $\sin\alpha/2 \approx (\alpha/2)^2$, тогда

$$h_1 = 2l(\alpha/2)^2, \quad (3.12a)$$

$$h'_1 = 2l(\alpha_1/2)^2, \quad (3.12б)$$

$$h'_2 = 2l(\alpha_2/2)^2. \quad (3.12в)$$

Подставляя (3.12) в соответствующие выражения (3.10), получим соотношения для скоростей шаров:

$$v_1 = \alpha\sqrt{lg}, \quad (3.13a)$$

$$u_1 = \alpha_1\sqrt{lg}, \quad (3.13б)$$

$$u_2 = \alpha_2\sqrt{lg}, \quad (3.13в)$$

где l – расстояние от точки подвеса до центра тяжести шаров; α – угол отклонения первого шара; α_1 и α_2 – углы отклонения первого и второго шара после удара.

Предварительное задание

Изучив материал по [1], [2], на основании законов сохранения импульса и энергии каждый студент должен:

а) получить выражение для скоростей шаров u_1 и u_2 после абсолютно упругого и скорости u после абсолютно неупругого ударов;

б) показать, что при $v_2 = 0$ и $m_1 = m_2$ скорости $u_1 = 0$, $u_2 = v_1$ для абсолютно упругого удара и $u = v_1/2$ для абсолютно неупругого удара;

в) проанализировать, как влияет соотношение масс шаров на их скорость u после неупругого удара;

г) получить выражение для энергии неупругой деформации шаров через энергию ударяющего шара $W_1 = m_1 v_1^2/2$ используя соотношение (3.8) и выражение для скорости после абсолютно неупругого удара (с учетом того, что $v_2 = 0$).

Рабочее задание

1. Проверьте справедливость закона сохранения импульса, т.е. убедитесь в том, что разность импульсов системы из двух шаров до и после соударения не превосходит абсолютной ошибки при определении этой величины. Для этого измерьте углы α , α_1 и α_2 , определите скорости шаров v_1 , u_1 и u_2 и их абсолютные ошибки.

2. Вычислите энергию неупругой деформации шаров по формуле (3.8) и по выражению для нее, полученному в пункте г) предварительного задания.

3. Сравните полученные значения и сделайте выводы о причинах их возможных расхождений.

4. Определит коэффициент восстановления K при упругом ударе шаров по формуле (3.5).

Указания по выполнению эксперимента

1. Подвесьте на нитях два одинаковых пластмассовых шара массой $m_1 = m_2 = (115 \pm 1)$ г и произведите их центровку с помощью ручки 10 и шкалы 2.

2. Подключите электромагнит к розетке (6 В), отклоните правый шар на угол α до контакта его с сердечником электромагнита.

3. Тумблером разомкните цепь электромагнита и, наблюдая удар, близкий к абсолютно упругому, произведите отсчет углов α_1 и α_2 первого отклонения ударяющего и ударяемого шаров.

4. Повторите опыт не менее пяти раз того же угла α .

5. Для наблюдения неупругого удара подвесьте на нитях пластмассовый шар массой $m_1 = (50 \pm 1)$ г и пластилиновый шар массой $m_2 = (90 \pm 1)$ г.

6. Повторите операции, указанные в пп. 1,2,3,4, учитывая, что $\alpha_1 = \alpha_2$, так как при неупругом ударе шары движутся общей массой с общей скоростью.

7. Результаты измерений оформите таблично: табл. 3.1 – для упругого, табл. 3.2. – для неупругого удара шаров.

Таблица 3.1

Номер опыта	α	α_1	α_2	$\bar{\alpha}_1$	$\bar{\alpha}_2$

Таблица 3.2.

Номер опыта	α	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_2$

Указания по обработке результатов измерений

Проведите обработку результатов прямых и косвенных измерений по методике, изложенной в работе [3]. Для этого:

1. Вычислите средние арифметические значения углов α , α_1 и α_2 для упругого удара и α , $\alpha_1 = \alpha_2$ для неупругого удара, выразив углы в радианах, по формуле $\alpha = \frac{\alpha^\circ \pi}{180^\circ}$, где α° - угол в градусах; α - угол в радианах.

2. Вычислите средние абсолютные ошибки этих углов по формуле

$$\Delta\alpha = \sqrt{(\Delta\alpha)^2 + (\Delta\alpha_{\text{пр}})^2},$$

где $\Delta\alpha = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}$ - среднеквадратичная погрешность среднеарифметического значения угла; $\Delta\alpha_{\text{пр}}$ - приборная погрешность, $(\Delta\alpha_{\text{пр}})^2 = (\Delta/2)^2$, где Δ - половина цены наименьшего деления шкалы.

Результат представьте в виде $\alpha = \alpha \pm \Delta\alpha$.

3. По средним значениям углов определите средние значения скоростей шаров по формулам (3.13 а, б, в) для упругого и неупругого ударов.

4. Рассчитайте абсолютные ошибки в определении этих скоростей по формуле $\Delta v = v \sqrt{\frac{\Delta \alpha^2}{\alpha^2} + \frac{\Delta l^2}{4l^2}}$. Примите $l = 110 \text{ см} = 1,1 \text{ м}$; $\Delta l = 0,1 \text{ см} = 10^{-3} \text{ м}$; $\Delta \alpha$ - выразите в радианах.

5. Проверьте справедливость закона сохранения импульса для упругого удара с помощью соотношения

$$\Delta \sum_i p_i \leq \sum_i \Delta p_i,$$

где

$$\Delta \sum_i p_i = (m v_1 - m u_1 - m u_2),$$

$$\sum_i \Delta p_i = \sqrt{v_1^2 \Delta m^2 + m^2 \Delta v_1^2} + \sqrt{u_1^2 \Delta m^2 + m^2 \Delta u_1^2} + \sqrt{u_2^2 \Delta m^2 + m^2 \Delta u_2^2}.$$

6. Вычислите энергию неупругой деформации шаров по формуле (3.8) и по выражению для нее, полученному в пункте г). предварительного задания (при неупругом ударе шаров).

7. Определите коэффициент восстановления K при упругом ударе шаров по формуле (3.5).

Указания по оформлению отчета

Требования к оформлению отчета соответствуют требованиям работы №1.

Контрольные вопросы

1. На каком этапе опыта можно использовать закон сохранения импульса? Почему? Сохраняется ли механическая энергия на этом этапе?

2. Как изменяется кинетическая энергия шаров и их относительная скорость при различных видах удара: абсолютно упругом и абсолютно неупругом?

3. Какой удар называется упругим (неупругим)? Как движутся шары после соударения?

4. Получите выражение для вычисления абсолютной ошибки измерения скоростей шаров.

5. При каких соотношениях масс двух неупруго взаимодействующих тел энергия ударяющего тела $W_1 = m_1 v_1^2 / 2$:

а) почти целиком переходит в энергию необратимой деформации ΔW ;

б) значительно превосходит ΔW ;

6. Как получить соотношение для проверки закона сохранения импульса при абсолютно неупругом ударе шаров?

7. Формулы (3.13 а, б, в) для скоростей шаров получены при допущении $\sin^2\alpha/2 \approx (\alpha/2)^2$. Какую погрешность в процентах вносит это допущение?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики. Книга 1. Механика. М.: Академия, 2013 г. 368 с.
3. Зуева О.С., Зуев Ю.Ф., Серебренникова Т.А. Учет погрешностей при проведении физических экспериментов. – Казань.: КГЭУ, 2015. 25 с.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА ПРИ ЗАБИВАНИИ СВАИ

Цель работы

Целью работы является привитие студентам навыков и умений применения основных физических законов – законов сохранения энергии и импульса – на практике (на примере модели копра).

Описание установки и метода изучения процесса забивания сваи

Работа проводится на установке (рис.4.1), которая состоит из груза 1, направляющих 2, подъемного механизма 3, сбрасывающего рычага 4, линейки 5, сваи 6 и ящика с песком 7. Весь процесс забивания сваи можно разделить на три этапа:

- свободное падение груза с заданной высоты h_1 до удара о сваю на высоте h_2 ;
- взаимодействие груза со свайей на высоте h_2 – процесс неупругого соударения;
- совместное движение груза и сваи с высоты h_2 до остановки на высоте h_3 .

В этом процессе очень важен третий этап, и поэтому необходимо разобраться в тех превращениях энергии, которые происходят на этом этапе.

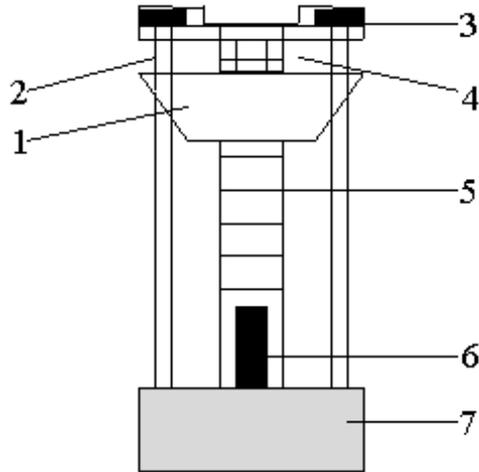


Рис.4.1

На третьем этапе работу совершают силы сопротивления грунта за счет уменьшения кинетической и потенциальной энергии системы «груз – свая – земля». Закон сохранения и превращения энергии применительно к этому случаю имеет вид

$$\vec{f}\vec{s} = fs \cos\alpha = W_2 - W_1 \quad (4.1)$$

W_1 и W_2 – соответственно, полные механические энергии системы в начале движения и в момент остановки, \vec{f} – средняя сила сопротивления грунта; \vec{s} – смещение сваи с грузом от момента начала движения до полной остановки.

Так как сила сопротивления \vec{f} и смещение \vec{s} направлены по одной прямой, но в противоположные стороны, то $\cos\alpha = \cos\pi = -1$ и соотношение (4.1) принимает вид

$$fs = W_1 - W_2. \quad (4.2)$$

Если m_1, m_2 – массы груза и сваи, h_2 и h_3 – положения системы «груз – свая» относительно земли в начале и в конце движения, а v – общая скорость груза со свайей в начале движения (общая скорость их в конце движения, т.е. в момент остановки, равна нулю), то

$$W_1 - W_2 = (m_1 + m_2)v^2/2 + (m_1 + m_2)(h_2 - h_3), \quad (4.3)$$

где $(h_2 - h_3) = s$.

Равенств (4.2) и (4.3) недостаточно для определения f , поскольку неизвестна общая скорость v груза со свайей. Для ее нахождения необходимо уяснить, что происходит на втором этапе, т.е. на этапе соударения. На этом этапе на систему «груз – свая», помимо действующих внешних сил (силы тяжести и силы сопротивления грунта), начинают действовать развивающиеся при соударении внутренние силы, которые значительно превосходят внешние силы. В этом случае рассматриваемую систему можно считать приближенно замкнутой и применить к ней закон сохранения импульса.

До удара груз двигался со скоростью v_1 , приобретенной в результате падения с заданной высоты $h = h_1 - h_2$. Свая же была неподвижной. После

удара система «груз – свая» начинает двигаться с общей скоростью v . Отсюда, согласно закону сохранения импульса,

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2)v \quad (4.4)$$

Как следует из (4.4), для нахождения v необходимо, в свою очередь, определить v_1 – скорость груза непосредственно перед соударением, т.е. в конце первого этапа. Потенциальная энергия груза, обусловленная взаимодействием с землей, переходит в кинетическую энергию груза, так что к системе «груз – земля» можно применить закон сохранения механической энергии: $m_1gh = m_1v_1^2/2$, откуда

$$v_1 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}. \quad (4.5)$$

С учетом (4.5) из (4.4) получим для скорости v следующее выражение:

$$v = \frac{m_1}{m_1+m_2} \sqrt{2g(h_1 - h_2)}. \quad (4.6)$$

Для вычисления силы сопротивления следует подставить (4.2) и (4.6) в (4.3), откуда получим

$$f = \left[\left(\frac{m_1^2}{m_1+m_2} \right) \frac{h}{s} + (m_1 + m_2) \right] g. \quad (4.7)$$

Предварительное задание

Каждый студент должен:

изучить законы сохранения энергии и импульса по [1], уяснить условия их применения на каждом этапе процесса, изучаемого в работе, и вывести формулу для расчета силы сопротивления f ;

Получить выражения для вычисления энергии неупругой деформации груза и сваи при соударении, т.е. на втором этапе, и ту долю, которую составляет эта энергия от энергии системы перед соударением.

Рабочее задание

Определите среднюю силу сопротивления грунта при забивании сваи. Сравните значение этой энергии с ее значением, рассчитанным в предварительном задании.

Указания по выполнению эксперимента

1. Поднимите и закрепите груз на высоте h_1 (по нижнему срезу груза), сваю поднимите до отметки h_2 .

2. Сбросьте груз с помощью механизма сброса и измерьте по шкале высоту h_3 (положение сваи после остановки).
3. Значение смещения системы «груз-свая» $s = h_2 - h_3$ занесите в таблицу 4.1
4. Повторите опыт не менее пяти раз при тех же значения h_1 и h_2 .

Таблица 4.1

Номер опыта	h_1	$s = h_2 - h_3$	\bar{s}	f	Δf
1					
2					
3					
4					
5					

Указания по обработке результатов измерений

Обработка результатов прямых и косвенных измерений изложена в [3].

1. Определите значения смещений системы «груз – свая» $s = (h_2 - h_3)$ для каждого из пяти опытов.
2. Вычислите среднее арифметическое значение \bar{s} величины s .
3. Вычислите абсолютную ошибку величины s .
4. Абсолютные ошибки заданных величин примите равными:
 $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \Delta h = 10^{-3}$ м; $\Delta m_1 = \Delta m_2 = \Delta m = 10^{-2}$ кг; $\Delta g = 0$.
5. Вычислите по среднему значению \bar{s} среднее значение силы сопротивления \bar{f} .
6. Найдите абсолютную ошибку измерения силы f по формуле

$$\Delta f = \bar{f} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta m_1}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_2}{m_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta s}{s}\right)^2} \quad (4.8)$$

7. Запишите окончательный результат в виде

$$f = \bar{f} \pm \Delta f$$

Указания по оформлению отчета

Требования к оформлению отчета соответствует требованиям работы № 1.

Контрольные вопросы

1. Что вы определяете в данной работе?
2. Какие этапы можно выделить в процессе забивания сваи в грунт и какие законы сохранения применить на каждом из них? При каких условиях?
3. Как получается выражение для расчета энергии неупругой деформации груза и сваи при соударении?

4. Каким должно быть соотношение масс груза и сваи, чтобы энергией неупругой деформации можно было пренебречь?

5. Как будет изменяться сила сопротивления грунта, если увеличить высоту h ?

Указания по технике безопасности

При установке сваи следует обязательно придерживать груз рукой.

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спиринов Г.Г. Курс общей физики. Книга 1. Механика. М.: Академия, 2013 г. 368 с.
3. Зуева О.С., Зуев Ю.Ф., Серебренникова Т.А. Учет погрешностей при проведении физических экспериментов. – Казань.: КГЭУ, 2015. 25 с.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ РОТОРА И СИЛЫ ТРЕНИЯ В ОПОРЕ

Цель работы

Целью лабораторной работы является привитие студентам экспериментальных навыков определения моментов инерции тел (на примере ротора).

Описание установки и метода изучения процесса

Система, момент инерции которой требуется определить, состоит из вала 1 с закрепленным на нем ротором (маховиком) 2 (рис.5.1). К валу крепится нить 3 с грузом 4 массой m . Наматывая нить на вал, мы поднимаем груз на некоторую высоту h_1 и сообщаем ему потенциальную энергию mgh_1 . Если теперь груз отпустить, начинается его ускоренное поступательное движение, приводящее к ускоренному вращению вала и маховика. При этом потенциальная энергия груза переходит в кинетическую энергию его поступательного движения, в кинетическую энергию вращательного движения маховика и вала и частично в тепловую энергию за счет работы сил трения в опорных подшипниках вала.

В соответствии с законом сохранения и превращения энергии

$$mgh_1 = m v^2 / 2 + J \omega^2 / 2 + f h_1, \quad (5.1)$$

где J – момент инерции маховика и вала; f – сила трения в опорах.

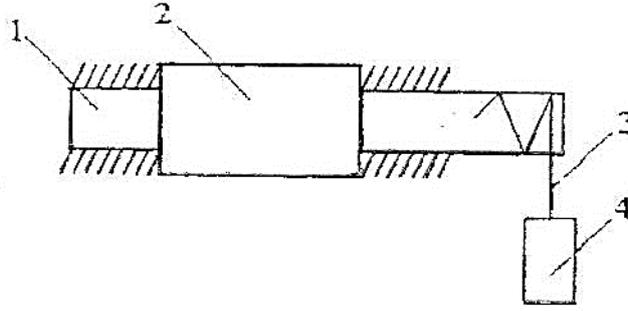


Рис.5.1

Как следует из (5.1), для определения момента инерции J системы необходимо знать скорость груза v , угловую скорость вала ω и силу трения f . Опишем, как находятся эти величины.

Принимая силу трения f постоянной и используя известные соотношения для равноускоренного движения без начальной скорости $v = at$ и $h_1 = at^2/2$, получим для скорости груза v в нижней точке выражение

$$v = 2h_1/t. \quad (5.2)$$

Угловая скорость вала ω определяется из связи с линейной скоростью v , с которой движутся и точки поверхности вала, и равна, с учетом (5.2):

$$\omega = v/r = 2v/d = 4h_1/td, \quad (5.3)$$

где d – диаметр вала; t – время падения груза.

Сила трения в опорах определяется на основе следующих рассуждений. После опускания груза на всю длину нити маховик по инерции продолжает вращаться и поднимает груз вверх на высоту $h_2 < h_1$, что свидетельствует об уменьшении его потенциальной энергии. Это происходит вследствие тормозящего действия сил трения в опорах, их работы на всем пути движения груза ($h_1 + h_2$). Таким образом,

$$f(h_1 + h_2) = mgh_1 - mgh_2,$$

Отсюда

$$f = mg(h_1 - h_2)/(h_1 + h_2). \quad (5.4)$$

Подставив (5.2), (5.3) и (5.4) в (5.1), получим выражение для момента инерции вращающейся системы:

$$J = \frac{md^2}{4} \left[gt^2 \frac{h_2}{h_1(h_1+h_2)} - 1 \right]. \quad (5.5)$$

Предварительное задание

Для выполнения работы каждый студент должен уяснить применение закона сохранения и превращения энергии для вращающихся систем, в которых действуют силы трения, иметь четкое представление о моменте инерции тела и основном законе динамики вращательного движения [1].

Рабочее задание

Определите момент инерции вращающейся системы и силу трения в ее опорах.

Указания по выполнению эксперимента

Перед началом измерений необходимо проследить за движением груза после опускания его с некоторой высоты, фиксируя нить на вале в момент подъема груза на максимальную высоту.

После этого приступите к измерениям.

1. Сначала измерьте штангенциркулем диаметр вала d и, опустив груз на всю длину нити, линейкой измерьте высоту h_1 – расстояние от нулевой отметки линейки до нижнего среза груза.

2. Затем намотайте нить на вал, поднимая нижний срез груза до нулевой отметки линейки.

3. Отпустите груз одновременно с пуском секундомера, останавливая его ход в момент достижения грузом нижней точки, и фиксируйте нить на вале в момент достижения подъема грузом на максимальную высоту h_2 .

4. Снимите показания времени t и высоты h_2 , учитывая, что t – это время падения груза до нижней точки, а h_2 – высота подъема груза от нижней точки до точки остановки.

5. Опыт повторите пять раз.

6. Результаты измерений оформите в виде табл. 5.1.

Таблица 5.1

n	1	2	3	4	5
h_2					
t					

Указания по обработке результатов измерений

Произведите обработку результатов прямых и косвенных измерений по [3].

1. Определите средние значения \bar{t} и \bar{h}_2 измеренных величин t и h_2 .

2. Вычислите абсолютные ошибки этих величин Δt и Δh_2 .

3. Абсолютные ошибки величин m и d считайте близкими к нулю ввиду точных значений этих величин.

4. Абсолютную ошибку величины h_1 примите равной цене деления линейки, т.е. $\Delta h_1 = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$.

5. Используя значения измеренных величин, вычислите средние значения \bar{J} и \bar{f} величин J и f по формулам (5.5) и (5.4).

6. Вычислите абсолютные ошибки этих величин:

$$\Delta J = \bar{J} \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{\bar{t}}\right)^2 + \left(\frac{2\bar{h}_1 + \bar{h}_2}{\bar{h}_1 + \bar{h}_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta h_1}{\bar{h}_1}\right)^2 + \left(\frac{h_1}{\bar{h}_1 + \bar{h}_2}\right)^1 \cdot \left(\frac{\Delta h_2}{\bar{h}_2}\right)^2},$$

$$\Delta f = \frac{2mg}{(\bar{h}_1 + \bar{h}_2)^2} \cdot \sqrt{\bar{h}_2^2 \cdot \Delta h_1^2 + \bar{h}_1^2 \cdot \Delta h_2^2}.$$

7. Окончательный результат запишите в виде

$$J = \bar{J} \pm \Delta J; \quad f = \bar{f} \pm \Delta f.$$

Указания по оформлению отчета

Требования к оформлению отчета соответствует требованиям работы № 1.

Контрольные вопросы

1. Что называется моментом инерции тела? Каков его физический смысл?
2. От чего зависит момент инерции тела?
3. Может ли тело характеризоваться различными значениями момента инерции?
4. Обладает ли тело моментом инерции в состоянии покоя?
5. Какие силы создают вращающийся момент в рассматриваемой системе?
6. Каким будет характер движения системы, если сила трения постоянна?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008. 560 с.
 2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики. Книга 1. Механика. М.: Академия, 2013 г. 368 с.
 3. Зуева О.С., Зуев Ю.Ф., Серебренникова Т.А. Учет погрешностей при проведении физических экспериментов. – Казань.: КГЭУ, 2015. 25 с.
-

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА И ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ ШТЕЙНЕРА

Цель работы

Целью лабораторной работы является овладение на практике методом определения момента инерции физического маятника.

Описание установки и метода изучения процесса

Установка (рис. 6.1) состоит из основания 1 на трех регулируемых винтах 2, стойки 3, несущей опорную призму 4, на которую подвешены два маятника: физический 5 и математический 6.

Частным случаем вращательного движения являются колебания тела произвольной формы около закрепленной оси.

Колебаниями называются процессы, отличающиеся той или иной степенью повторяемости. Таким свойством повторяемости обладают, например, качания маятников часов.

Простейшими являются гармонические колебания, т.е. такие колебания, при которых колеблющаяся величина (например, отклонение маятника) изменяется со временем по закону синуса или косинуса. Периодические процессы иной формы могут быть представлены в виде суперпозиции гармонических колебаний.

В механике под маятником понимают твердое тело, совершающее под действием некоторой силы (часто это сила тяжести) колебания вокруг неподвижной точки или оси. Принято различать математический и физический маятники.

Математическим маятником называют идеализированную систему, состоящую из невесомой и нерастяжимой нити, на которой подвешена масса, сосредоточенная в одной точке. Достаточно хорошим приближением к математическому маятнику служит небольшой тяжелой шарик, подвешенный на длинной тонкой нити.

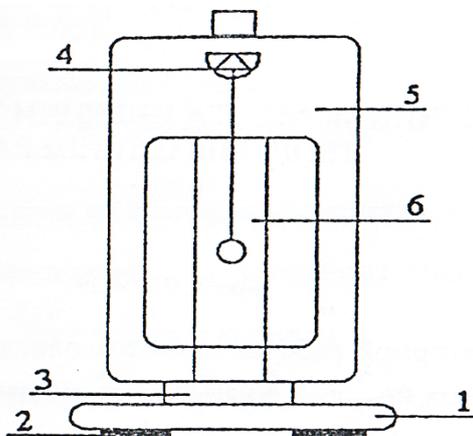


Рис. 6.1

Отклонение маятника от положения равновесия характеризуется углом φ , образованным нитью с вертикалью (рис. 6.2а). При отклонении маятника от положения равновесия возникает вращающий момент:

$$M = -mgl \sin \varphi, \quad (6.1)$$

где m – масса, а l – длина маятника. Знак « $-$ » в данном выражении возникает из-за того, что направление M и углового смещения противоположны. Запишем для нашего математического маятника уравнение вращательного движения:

$$J\varepsilon = M, \quad (6.2)$$

где M – вращающий момент силы тяжести, ε – угловое ускорение, причем $\varepsilon = \varphi''$ (т.е. вторая производная от углового смещения по времени) J – момент инерции маятника. Пользуясь теоремой Штейнера $J = J_0 + ml^2$ и учитывая, что у математического маятника из-за отсутствия размеров $J_0 = 0$, получим $J = ml^2$. Тогда уравнение (6.2) примет вид

$$ml^2 \varphi'' = -mgl \sin \varphi \text{ или } \varphi'' = -(g/l) \sin \varphi. \quad (6.3)$$

В случае, когда в процессе колебаний происходят малые отклонения от положения равновесия (малые смещения φ), можно положить $\sin(\varphi) \sim \varphi$. Введя, кроме того, обозначение $g/l = \omega_0^2$, получим

$$\varphi'' + \omega_0^2 \varphi = 0. \quad (6.4)$$

Как хорошо известно, решение уравнения (6.4) имеет вид

$$\varphi = A \cos(\omega_0 t + \alpha). \quad (6.5)$$

Таким образом, маятник совершает периодические колебания с частотой ω_0 и амплитудой A , а α – начальная фаза совершаемых колебаний. При этом частота определяется только длиной маятника и ускорением свободного падения и не зависит от массы маятника. По определению, период колебаний $T = 2\pi/\omega_0$. Соответственно, период колебания математического маятника определяется выражением

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}. \quad (6.6)$$

Если колеблющееся тело нельзя представить как материальную точку, маятник называют физическим. При отклонении маятника от положения равновесия на угол φ возникает вращающий момент:

$$M = -mgd \sin \varphi, \quad (6.7)$$

где m – масса маятника; d – расстояние между точкой подвеса O и центром инерции центром тяжести ЦТ маятника (рис.6.2.б). Тогда уравнение вращательного движения маятника будет иметь вид

$$J\varphi'' = -mgd \sin \varphi, \quad (6.8)$$

где J – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через точку подвеса O . В случае малых колебаний $\sin \varphi \sim \varphi$ имеем

$$\varphi'' + \omega_0^2 \varphi = 0, \quad (6.9)$$

где через ω_0 обозначена величина

$$\omega_0^2 = mgd/J. \quad (6.10)$$

Соответственно, период колебания физического маятника определяется выражением

$$T = 2\pi\sqrt{J/mgd}. \quad (6.11)$$

Из сопоставлений формул (6.6) и (6.11) получается, что математический маятник длиной

$$l_{\text{пр}} = J/md \quad (6.12)$$

будет иметь такой же период, что и данный физический маятник. Величину $l_{\text{пр}}$ называют приведенной длиной физического маятника. Таким образом, приведенная длина физического маятника – это длина такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника.

Точка на прямой, которая соединяет точку подвеса с центром инерции (центром тяжести ЦТ) и лежит на расстоянии приведенной длины $l_{\text{пр}}$ от оси вращения, называется центром качения физического маятника (точка O' на рис.6,2б).

В настоящей работе иллюстрируется один из вариантов определения моментов инерции тел по сопоставлению качания математического и физического маятников.

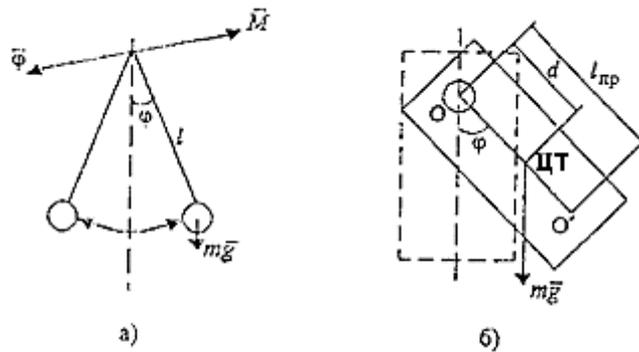


Рис.6.2

Определение момента инерции тела (физического маятника) основано на определении приведенной длины физического маятника, которая может быть найдена путем изменения длины математического маятника до тех пор, пока колебания физического и математического маятников не совпадут по частоте. Из условия равенства периодов колебаний маятников получим выражение для момента инерции тела относительно оси вращения:

$$J = mdl_{\text{пр}}, \quad (6.13)$$

где m – масса физического маятника; $l_{\text{пр}}$ – его приведенная длина; d – расстояние от оси вращения до центра инерции (ЦТ).

Величина момента инерции тела J относительно некоторой оси $O - O'$, не проходящей через ЦТ, определяется, как известно, теоремой Штейнера:

$$J = J_0 + md^2 \quad (6.14)$$

где J_0 – момент инерции тела относительно оси, проходящей через ЦТ и параллельной оси $O - O'$.

Для двух различных осей, не проходящих через центр инерции тела, из (6.14) получим

$$J_1 - J_2 = m(d_1^2 - d_2^2), \quad (6.15)$$

или

$$l_{1пр}d_1 - l_{2пр}d_2 = d_1^2 - d_2^2. \quad (9.16)$$

Это соотношение может быть проверено, если использовать результаты, полученные для моментов инерции тела относительно двух его различных точек подвеса, что и является целью данной работы.

Предварительное задание

Каждый студент должен после ознакомления с [1] знать уравнение колебательного движения маятника, выражения для периодов колебаний математического и физического маятников, уяснить теорему Штейнера и суть ее проверки.

Рабочее задание

Определите момент инерции физического маятника относительно двух различных точек подвеса и проверьте на основе полученных данных теорему Штейнера, а также, пользуясь данной теоремой, определите собственный момент инерции физического маятника J_0 .

Указания по выполнению эксперимента

1. Ознакомившись с прибором, сначала произведите его установку по отвесу с помощью винтов 2.
2. Подвесьте деталь (физический маятник) за одну из точек подвеса на опорной призме, отклоните оба маятника (физический и математический) на небольшой угол и опустите.
3. Изменяя длину математического маятника путем нажатия на кнопку крепления нити, добейтесь совпадения частоты качания маятников, т.е. равенства периодов их колебаний.
4. Измерьте длину $l_{1пр}$ математического маятника, которая определяет приведенную длину физического маятника.
5. Измерьте расстояние d_1 от точки подвеса до ЦТ физического маятника.
6. Переверните маятник и подвесьте его за другую точку подвеса. Проведя аналогичные описанным выше операции, измерьте приведенную длину $l_{2пр}$ физического маятника и расстояние d_2 от точки его подвеса до ЦТ.
7. Определите величину собственного момента инерции физического маятника.

Указания по обработке измерений

1. Используя значения измеренных величин $l_{1пр}$, $l_{2пр}$, d_1 и d_2 , убедитесь по формуле (6.16) в справедливости теоремы Штейнера.
2. Используя теорему Штейнера (6.14), получите выражение для собственного момента J_0 инерции физического маятника. Используя полученное выражение и принимая массу физического маятника $m = 3,5$ кг, рассчитайте собственный момент инерции J_0 физического маятника для обоих случаев подвеса.
3. Сделайте выводы о причинах возможных расхождений.

Указания по оформлению отчета

Требования к оформлению отчета соответствует требованиям работы 1.

Контрольные вопросы

1. Какие силы приводят к колебаниям физического маятника?
2. Как изменяется вращающий момент этих сил?
3. Как выглядит уравнение движения маятника?
4. Какими выражениями определяются периоды колебаний математического и физического маятников? От каких величин зависят частоты их колебаний?
5. Сформулируйте теорему Штейнера. В чем заключается ее проверка?
6. Как в данной работе определяются моменты инерции маятника?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008. 560 с.
2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики. Книга 1. Механика. М.: Академия, 2013 г. 368 с.
3. Зуева О.С., Зуев Ю.Ф., Серебренникова Т.А. Учет погрешностей при проведении физических экспериментов. – Казань.: КГЭУ, 2015. 25 с.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ МЕТОДОМ ОТКАЧКИ

Цель работы

Определение молярной (универсальной) газовой постоянной R – константы состояния идеального газа, одинаковой для всех газов.

Описание установки и метода изучения процесса

Молярную газовую постоянную можно определить из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad (7.1)$$

где p – давление; V – объем; m – масса газа; M – молярная масса этого газа; T – абсолютная температура газа.

Все параметры газа, входящие в уравнение (7.1), можно измерить непосредственно, за исключением массы газа, так как взвешивание газа возможно только вместе с сосудом, в который он заключен. Поэтому для определения R из (9.1) необходимо исключить массу сосуда. Это можно сделать, рассмотрев уравнение состояния двух масс m_1 и m_2 одного и того же газа при неизменных температуре T и объеме V .

Рассмотрение уравнения состояния (9.1) для двух значений массы газа дает следующее выражение для молярной газовой постоянной:

$$R = \frac{M(p_1 - p_2)V}{(m_1 - m_2)T}. \quad (7.2)$$

Следовательно, если определить давление p_1 и температуру T для некоторой массы m_1 , заключенной в сосуде объемом V , а затем изменить массу m_1 газа в том же сосуде до величины m_2 (например, путем откачки) и вновь определить давление p_2 при той же температуре T , то по формуле (9.2) можно рассчитать молярную газовую постоянную.



Рис. 7.1

Установка ФПТ-1-12 представляет собой конструкцию настольного типа (рис. 9.1), состоящую из:

- блока управления (1);
- блока приборного (2);
- колбы (3), установленной на весах (4).

На лицевой панели блока приборного установлен вакуумметр (5), термометр для измерения температуры окружающей среды (6), внутри блока установлен компрессор. Колба установлена на весах и соединена с вакуумметром вакуумной трубкой.

Соединение компрессора со штуцером измерительного блока осуществляется с помощью вакуумной трубки.

Предварительное задание

Каждый студент должен

- ознакомиться с устройством установки для определения универсальной газовой постоянной R ;
- получить формулу для определения универсальной газовой постоянной R .

Рабочее задание

В работе требуется самостоятельно осуществить экспериментальное определение универсальной газовой постоянной R .

Указания по технике безопасности

К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с ее устройством и принципом действия.

Указания по выполнению эксперимента

1. Подать напряжение питания на электронные весы и включить установку тумблером «СЕТЬ». При этом загорается сигнальная лампа.
2. С помощью электронных весов определить массу колбы с воздухом ($m_0 + m_1$) при нормальном атмосферном давлении p_1 .
3. Включить компрессор кнопкой «ПУСК» и, удерживая кнопку нажатой, откачать воздух из колбы до разности давлений $p_1 - p_2$. После чего, закрыв кран и выключив компрессор (отпустив кнопку «ПУСК»),

определить массу колбы с воздухом ($m_0 + m_2$) при уменьшенном давлении p_2 .

4. Повторить измерения не менее трех раз (для разности давлений $0,4 \cdot 10^5$ Па, $0,6 \cdot 10^5$ Па, $0,8 \cdot 10^5$ Па).

5. Измерить температуру воздуха в лаборатории.

6. Выключить установку тумблером «СЕТЬ».

Указания по обработке результатов эксперимента

1. Для каждого проведенного измерения определить массу откаченного воздуха ($m_1 - m_2$) при соответствующей разности давлений ($p_1 - p_2$) и вычислить универсальную газовую постоянную R с использованием следующих значений: $M = 0,029$ кг/моль; $V = 10^{-3}$ м³.

2. Данные вычислений занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

№	m_1	m_2	$m_1 - m_2$	$p_1 - p_2$	R
1					
2					
3					

3. Рассчитать среднее значение R и сравнить его с теоретическим значением. Оценить точность определения R .

Указания по оформлению отчета

Каждый студент оформляет отчет индивидуально в соответствии с требованиями, изложенными в работе № 1.

Контрольные вопросы

1. Что такое универсальная газовая постоянная?

2. В чем заключается закон Авогадро?

3. Напишите уравнение Менделеева-Клапейрона для одного моля газа и для произвольной массы газа.

4. Выведите формулу для определения универсальной газовой постоянной методом откачки.

5. Как связаны постоянные R , число Авогадро N_A и постоянная Больцмана k ?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008. 560 с.
 2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики. Книга 3. Термодинамика. Статистическая физика. Строение вещества. М.: Академия, 2013 г. 384 с.
 3. Зуева О.С., Зуев Ю.Ф., Серебренникова Т.А. Учет погрешностей при проведении физических экспериментов. – Казань.: КГЭУ, 2015. 25 с.
-

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА

$\gamma = C_p/C_v$ МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы

Изучение тепловых процессов в идеальном газе, ознакомление с методом Клемана-Дезорма и экспериментальное определение отношения молярных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме.

Описание установки и метода изучения процесса

Внешний вид рабочей панели и принципиальная схема экспериментальной установки ФПТ1-6н представлена на рис. 4.1: 1 – выключатель «СЕТЬ» для питания установки; 2 – выключатель «Компрессор» для нагнетания воздуха в рабочий сосуд (емкость объемом $V = 3500 \text{ см}^3$), расположенный в полости корпуса; 3 – кран К1, необходимый для предотвращения сброса давления из рабочего сосуда после остановки компрессора; 4 – пневмотумблер «Атмосфера», позволяющий на короткое время соединять рабочий сосуд с атмосферой; 5 – измеритель давления с помощью датчика давления в рабочем сосуде; 6 – двухканальный измеритель температуры, позволяющий измерить температуру внутри окружающей среды и температуру внутри рабочего сосуда.

Состояние некоторой массы газа определяется тремя термодинамическими параметрами: давлением p , объемом V и температурой T . Уравнение, устанавливающее связь между этими параметрами, называется уравнением состояния. Для идеальных газов таким уравнением является *уравнение Клапейрона-Менделеева*:

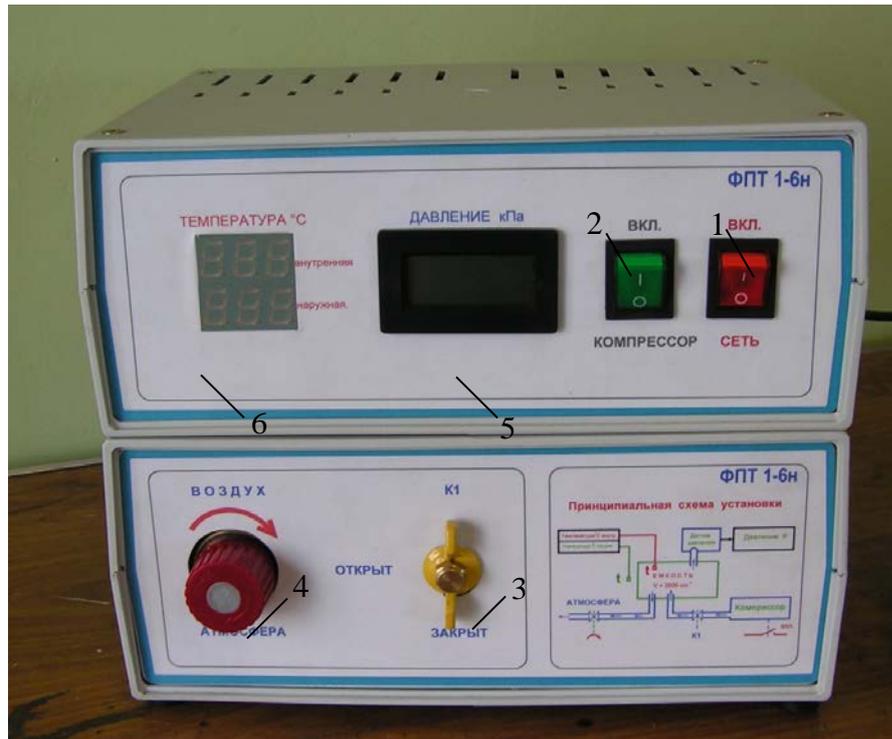


Рис. 8.1. Схема экспериментальной установки

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (8.1)$$

где m - масса газа, M - молярная масса, $R = 8.31$ Дж/моль R - универсальная газовая постоянная.

Любое изменение состояния термодинамической системы, связанное с уменьшением или увеличением хотя бы одного из параметров p , V , T , называется термодинамическим процессом.

Изопроцессы - это процессы, протекающие с неизменной массой газа при одном постоянном параметре:

изобарический - при $p = const$,

изохорический - при $V = const$,

изотермический - при $T = const$.

Адиабатический процесс совершается без теплообмена с окружающей средой, поэтому для его осуществления систему теплоизолируют или ведут процесс так быстро, чтобы теплообмен не успел произойти. При адиабатическом процессе изменяется все три параметра p , V , T .

При адиабатическом сжатии идеального газа температура его повышается, а при расширении понижается. На рис. 8.1 в системе координат p и V изображены изотерма ($pV = const$) и адиабата ($p \cdot V^\gamma = const$). Из рисунка видно, что адиабата проходит круче изотермы. Объясняется это тем, что при адиабатическом сжатии увеличение давления газа происходит не только из-

за уменьшения его объема, как при изотермическом сжатии, но и за счет повышения температуры.

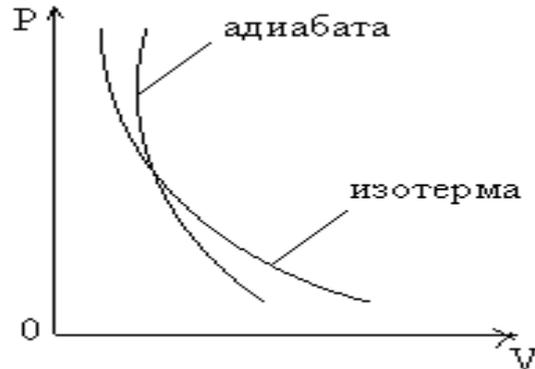


Рис.8.2

Теплоемкостью тела называется величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания этого тела на один Кельвин. Она зависит от массы тела, его химического состава и вида процесса сообщения теплоты. Теплоемкость одного моля вещества называется молярной теплоемкостью C_M . Согласно *первому началу термодинамики* тепло dQ , сообщенное системе, расходуется на увеличение внутренней энергии системы dU и совершение системой работы dA против внешних сил

$$dQ = dU + dA. \quad (8.2)$$

Используя первое начало термодинамики и уравнение Клапейрона-Менделеева, можно вывести уравнение Пуассона для адиабатического процесса $p \cdot V^\gamma = \text{const}$

В этих уравнениях γ - является показателем адиабаты

$$\gamma = C_p / C_v,$$

где C_p и C_v - молярные теплоемкости при постоянном объеме и давлении, соответственно.

Для идеального газа расчет теплоемкостей C_p и C_v можно провести теоретически. При нагревании газа при постоянном объеме ($dV=0$) работа газа $dA = pdV$ равна нулю, поэтому молярная теплоемкость

$$C_v = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} = \frac{d}{dT} \left(\frac{i}{2} R dT \right) = \frac{i}{2} R, \quad (8.3)$$

где i – число степеней свободы – количество независимых координат, с помощью которых однозначно можно задать положение молекулы.

При изобарном нагревании ($p = \text{const}$) тепло, подведенное к газу, расходуется на увеличение внутренней энергии и на совершение работы расширения газа $dA = pdV = (m/M)RdT$. Теплоемкость моля газа при этом равна

$$C_p = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{dA}{dT} = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} = C_V + R = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R \quad (8.4)$$

Сравнивая (8.4) и (8.3), получим

$$C_p = C_V + R \quad (8.5)$$

Уравнение (8.4) представляет собой уравнение Майера для молярных теплоемкостей. Следовательно, *разность молярных теплоемкостей* $C_p - C_V = R$ *численно равна работе расширения одного моля идеального газа при нагревании его на один градус Кельвина при постоянном давлении.* В этом утверждении заключается физический смысл молярной газовой постоянной R .

Для идеальных газов отношение $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}$ зависит только от числа степеней свободы молекул газа, которое в свою очередь определяется структурой молекулы, т.е. количеством атомов, из которых состоит молекула. Одноатомная молекула имеет три степени свободы (инертные газы). Если молекула состоит из двух атомов, то число степеней свободы складывается из числа степеней свободы поступательного движения центра масс и вращательного движения системы вокруг двух осей, перпендикулярных к оси молекулы, т.е. равно пяти. Для трех и многоатомных молекул имеются три поступательные и три вращательные степени свободы, т.е. $i = 6$.

В данной работе *коэффициент Пуассона* γ для воздуха определяется опытным путем.

Если при помощи насоса накачать в сосуд некоторое количество воздуха, то давление и температура воздуха внутри сосуда повысятся. Вследствие теплообмена воздуха с окружающей средой через некоторое время температура воздуха, находящегося в сосуде, сравняется с температурой внешней среды T_0 .

Давление, установившееся в сосуде, равно $p_1 = p_0 + p'$, где p_0 – атмосферное давление, $p' = h_1 k$ – добавочное давление, пропорциональное разности уровней жидкости в манометре h_1 (рис. 8.2), k – коэффициент пропорциональности. Таким образом, воздух внутри сосуда характеризуется параметрами $p_0 + p'$, V_0 , T_0 . Уравнение состояния примет вид:

$$(p_0 + p')V_0 = \frac{m}{M}RT_0, \quad (8.6)$$

где m – масса воздуха в сосуде, M – молярная масса воздуха.

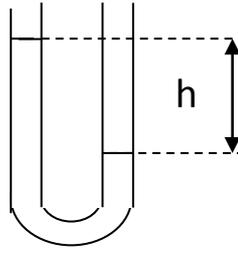


Рис. 8.3

Если на короткое время ($\sim 3c$) открыть тумблер «АТМОСФЕРА», то воздух в сосуде будет расширяться. Этот процесс расширения можно рассматривать как подключение к сосуду дополнительного объема V' . Давление в сосуде установится равным атмосферному p_0 , температура понизится до T_1 , а объем будет равен $V_0 + V'$. Следовательно, в конце процесса уравнение состояния примет вид

$$(V_0 + V')p_0 = \frac{m}{M}RT_1. \quad (8.7)$$

Разделив выражение (8.6) на выражение (8.7), получим

$$\frac{(V_0 + V')p_0}{(p_0 + p')V_0} = \frac{T_1}{T_0}. \quad (8.8)$$

Расширение происходит без теплообмена с внешней средой, т.е. процесс является адиабатическим, поэтому для начального и конечного состояний системы можно записать:

$$(p_0 + p')V_0^\gamma = p_0(V_0 + V')^\gamma, \\ \frac{V_0^\gamma}{(V_0 + V')^\gamma} = \frac{p_0}{(p_0 + p')}, \quad (8.9)$$

где γ – показатель адиабаты.

Охладившийся при расширении воздух через некоторое время, вследствие теплообмена с внешней средой, нагреется до комнатной температуры T_0 (изохорический процесс). Давление возрастет до некоторой величины $p_2 = p_0 + p''$, где $p'' = h_2 k$ – новое добавочное давление, пропорциональное разности уровней жидкости в манометре h_2 . Для воздуха массой m' оставшегося в сосуде уравнение состояния начала нагрева

$$V_0 p_0 = \frac{m'}{M}RT_1, \quad (8.10)$$

а в конце нагрева до комнатной температуры T_0

$$V_0(p_0 + p'') = \frac{m'}{M}RT_0. \quad (8.11)$$

Разделив (8.10) на (8.11), получим

$$\frac{p_0}{(p_0+p'')} = \frac{T_1}{T_0}. \quad (8.12)$$

Правые части выражений (8.8) и (8.12) одинаковы, следовательно, левые части также равны

$$\frac{(V_0+V')p_0}{(p_0+p')V_0} = \frac{p_0}{(p_0+p'')},$$

или

$$\frac{(p_0+p'')}{(p_0+p')} = \frac{V_0}{(V_0+V')}. \quad (8.13)$$

Возведя левую и правую часть (8.13) в степень γ , запишем

$$\frac{(p_0+p'')^\gamma}{(p_0+p')^\gamma} = \frac{V_0^\gamma}{(V_0+V')^\gamma}. \quad (8.14)$$

Заменив правую часть (8.14) с учетом (8.9), имеем

$$\left(\frac{p_0+p''}{p_0+p'}\right)^\gamma = \frac{p_0}{p_0+p'}$$

Разделив почленно на p_0 , преобразуем это выражение к виду

$$\left(\frac{1+\frac{p''}{p_0}}{1+\frac{p'}{p_0}}\right)^\gamma = \frac{1}{1+\frac{p'}{p_0}} \quad (8.15)$$

Т.к. $p' \ll p_0$; $p'' \ll p_0$ то, ограничиваясь первым членом разложения в ряд бинома $(1+x)^\gamma = 1+\gamma x$ и пренебрегая членами второго порядка малости, получим для показателя адиабаты γ :

$$\frac{1+\gamma*p''/p_0}{1+\gamma*p'/p_0} = 1 - p'/p_0. \quad (8.16)$$

После несложных алгебраических преобразований найдем выражение для коэффициента Пуассона

$$\gamma = \frac{p'}{p' - p''} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$$

Предварительное задание

Изучив материал по [1], [2] каждый студент должен:

- 1) ознакомиться с методом Клемана-Дезорма;
- 2) получить уравнение Майера для молярных теплоемкостей и вывести уравнение для показателя адиабаты (8.16);

Рабочее задание

Определить отношения молярных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме.

Порядок выполнения работы

Подать на установку питание, включив тумблер 6 «СЕТЬ».

1. Включить подачу воздуха в колбу тумблером «ВКЛ» в модуле «ВОЗДУХ». При этом пневмотумблер «АТМОСФЕРА» должен находиться в нижнем положении.
2. По манометру контролировать рост давления в колбе. После достижения заданного уровня рабочего давления (150÷250) отключить подачу воздуха тумблером «ВКЛ».
3. После стабилизации давления (в течение 2-3 минут) снять показание h_1 манометра. Результат занести в таблицу 1.
4. Переключить пневмотумблер «АТМОСФЕРА» в верхнее положение и держать его так до тех пор, пока давление в колбе не упадет до нуля, после чего резко опустить пневмотумблер вниз.
5. После стабилизации процесса (2-3 минуты), снять показания h_2 манометра, определяющие давление, возросшее за счет теплообмена до комнатной температуры. Результат занести в таблицу 1.
6. Опыт провести 5 раз.

Таблица 8.1

№ опыта	$h_1, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$	γ	$ \Delta\gamma $
1				
2				
3				
4				
5				
Средние значения				

Указания по обработке результатов измерений

1. Подставить в формулу (16) полученные значения h_1 и h_2 , взятые из каждого отдельного опыта, вычислить γ_1 , γ_2 и т.д. Результаты занести в таблицу.
2. Определить среднее значение $\gamma_{\text{ср}}$, среднюю абсолютную ошибку $\Delta\gamma_{\text{ср}}$ по [3].
3. Результат записать в виде $\gamma = \gamma_{\text{ср}} \pm \Delta\gamma$

Указания по оформлению отчета

Требования к оформлению отчета соответствуют требованиям работы №1.

Контрольные вопросы

1. Какие теплоемкости Вам известны?
2. От чего зависит теплоемкость газов? Почему $C_p > C_v$?
3. Каков физический смысл молярной газовой постоянной R ?
4. Объясните изменения температуры газа в процессе опыта.
5. Объясните, почему адиабата при расширении газа спадает круче, чем изотерма?
6. Что такое число степеней свободы? Как зависит от числа степеней свободы C_v и γ ? Зная γ (из опыта), рассчитайте число степеней свободы молекулы воздуха.

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008. 560 с.
 2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики. Книга 3. Термодинамика. Статистическая физика. Строение вещества. М.: Академия, 2013 г. 384 с.
 3. Зуева О.С., Зуев Ю.Ф., Серебренникова Т.А. Учет погрешностей при проведении физических экспериментов. – Казань.: КГЭУ, 2015. 25 с.
-

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ (ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ) ЖИДКОСТЕЙ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы

Изучение процессов переноса в жидкостях и газах, в частности, внутреннего трения (динамической вязкости) жидкостей, ознакомление с методом Стокса и экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения (динамической вязкости) жидкостей по методу Стокса

Описание установки и метода изучения процесса

Метод Стокса основан на измерении скорости падения шарика определенных размеров в исследуемой жидкости. В работе рассматривается движение шарика в вязкой жидкости. При свободном падении внутри жидкости, шарик встречает сопротивление, которое обусловлено ее вязкостью. Это следует из того, что слой жидкости, непосредственно прилегающий к поверхности шарика, движется вместе с ним, как бы прилипая к нему, а силы сопротивления возникают вследствие внутреннего трения между слоями жидкости. Сила сопротивления тормозит движение шариков и направлена вверх. Помимо силы сопротивления, на шарик действует сила тяжести и выталкивающая сила Архимеда. Сила тяжести направлена вниз. Выталкивающая сила Архимеда, так же как и сила сопротивления направлена вверх (см. рис. 9.1).

Выражение для силы тяжести, действующей на шарик массой m , объемом V , изготовленный из материала плотностью ρ , имеет вид

$$F_{\text{тяж}} = mg = \rho Vg. \quad (9.1)$$

Сила Архимеда равна силе тяжести жидкости, вытесненной шариком, и поэтому будет определяться не плотностью материала шариков, а плотностью жидкости $\rho_{\text{ж}}$:

$$F_{\text{А}} = m_{\text{ж}}g = \rho_{\text{ж}}Vg. \quad (9.2)$$

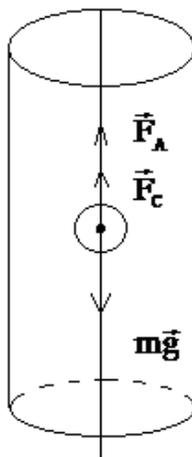


Рис. 9.1

Что же касается силы сопротивления, то величина этой силы зависит от многих факторов: от внутреннего трения жидкости, от формы тела, от характера обтекания и т.д. Стоксом было получено строгое решение задачи о ламинарном обтекании шарика безграничной жидкостью, когда движение жидкости носит слоистый характер: по мере удаления от поверхности тела скорость слоев жидкости уменьшается, но они продолжают двигаться параллельно. В этом случае сила сопротивления определяется формулой

$$F_c = 6\pi\eta r v, \quad (9.2)$$

где η – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость) жидкости; v – скорость движения шарика; r – его радиус.

Зная силы, действующие на шарик в жидкости, с помощью второго закона Ньютона можно найти уравнение его движения

$$(\rho - \rho_{ж})Vg - 6\pi\eta r v = m \frac{dv}{dt} \quad (9.3)$$

Скорость падения шарика в жидкости на начальном этапе постепенно возрастает. Соответственно, согласно формуле (9.2) возрастает и сила сопротивления F_c . Когда сила сопротивления F_c по абсолютной величине окажется равной силе $mg - F_A$, ускорение шарика станет равным нулю. Это означает, что становится равной нулю равнодействующая сил, действующих на шарик, и его движение можно считать установившимся, т.е. происходящим с некоторой постоянной скоростью v_0 . Для такого движения уравнение (9.3) перейдет в уравнение вида:

$$(\rho - \rho_{\text{ж}})Vg - 6\pi\eta rv = 0 \quad (9.4)$$

Учитывая, что объем шарика может быть найден по формуле $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, соотношение (9.4) позволит определить коэффициент внутреннего трения:

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{v_0}. \quad (9.5)$$

Фактически коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость) жидкости может быть вычислен, если опытным путем измерить установившуюся скорость v_0 падения шарика и определить его радиус r .

Для измерений используется стеклянный цилиндр, наполненный исследуемой вязкой жидкостью. В нашем случае используется глицерин. Для чистого глицерина при 20 °С динамическая вязкость составляет $\eta = 1,48$ Па·с. Глицерин, используемый в лабораторных условиях, впитывает атмосферную влагу из воздуха и поэтому обладает гораздо меньшей динамической вязкостью, которую необходимо определить в данной лабораторной работе. На стенках сосуда нанесены две метки на некотором расстоянии l друг от друга. Верхняя метка должна располагаться ниже уровня жидкости с таким расчетом, чтобы скорость шарика к моменту прохождения этой метки успевала выйти на установившийся режим, т.е. стать постоянной. Измеряя расстояние между метками с помощью линейки, а время падения с помощью секундомера, по формуле равномерного движения

$$v_0 = l/t \quad (9.6)$$

рассчитывают скорость шарика v_0 . Далее, используя соотношение (9.5), и табличные значения величин ρ , $\rho_{\text{ж}}$ и g можно определить динамическую вязкость жидкости.

Описанная выше методика определения коэффициента внутреннего трения основана на формуле Стокса (9.2) и правильна лишь при ламинарном обтекании шарика безграничной жидкостью. Однако, если изучается движение шариков радиусом 1-2 мм, происходящее со скоростью 5-10 см/с в вязкой жидкости, например в глицерине, движение жидкости будет ламинарным.

В нашем опыте жидкость ограничена стенками сосуда, учет наличия которых приводит к более точной формуле

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{(1 + 2,4 \frac{r}{R})v_0}, \quad (9.7)$$

где R – радиус сосуда.

Для небольших шариков отличие (9.7) от (9.5) лежит в пределах точности эксперимента и может не приниматься во внимание.

Вязкость изменяется по экспоненциальному закону, причем с уменьшением температуры вязкость жидкости возрастает. Например, значения динамической вязкости глицерина при разных температурах приведены в таблице 9.1. В ряде случаев вязкость становится настолько большой, что жидкость затвердевает без образования кристаллической решетки. В этом заключается механизм образования аморфных тел.

Таблица 9.1

$t, ^\circ\text{C}$	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	1,74	1,62	1,48	1,35	1,23	1,124	1,024	0,934	0,85	0,78

Предварительное задание

Каждый студент должен ознакомиться с методом Стокса и устройством для определения коэффициента внутреннего трения (динамической вязкости) жидкости и получить формулу (9.5) для расчета искомой величины.

Рабочее задание

В работе требуется самостоятельно осуществить экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения (динамической вязкости) жидкости.

Указания по выполнению эксперимента

1. Отобрать пять небольших стальных шариков примерно одинакового диаметра, измерить их диаметр штангенциркулем, определить среднее значение радиуса используемых шариков. Все данные занести в таблицу 9.2.
2. Измерить расстояние l между метками на цилиндре.
3. Для каждого из пяти шариков определить время падения шарика в жидкости между метками. Найти его среднее значение. Данные занести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2

n	1	2	3	4	5	Среднее
d						
t						

Указания по обработке результатов измерений

1. Вычислить скорость установившегося движения шарика по формуле (9.6), используя значение среднего времени падения шариков.
2. Используя соотношение (9.5) рассчитать коэффициент внутреннего трения (динамическую вязкость) глицерина, приняв значение плотности материала шариков (железа) $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотности глицерина $\rho_{\text{ж}} = 1,27 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.
3. Сравнить полученный результат с табличным значением коэффициента внутреннего трения при температуре проведения эксперимента.

Указания по оформлению отчета

Требования к оформлению отчета соответствуют требованиям работы №1.

Контрольные вопросы

1. Какой метод используется для определения коэффициента внутреннего трения жидкостей? На чем он основан?
2. Какие силы действуют на шарик в жидкости? Напишите его уравнение движения.
3. Когда движение шарика в жидкости можно считать установившимся?
4. Как получается рабочая формула для определения коэффициента внутреннего трения жидкостей?
5. Как изменяется вязкость жидкостей, газов с увеличением температуры? В чем причина такого изменения?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Академия, 2008. 560 с.
 2. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики. Книга 3. Термодинамика. Статистическая физика. Строение вещества. М.: Академия, 2013 г. 384 с.
 3. Зуева О.С., Зуев Ю.Ф., Серебренникова Т.А. Учет погрешностей при проведении физических экспериментов. – Казань.: КГЭУ, 2015. 25 с.
-

СОДЕРЖАНИЕ

1. Измерение линейных величин	3
2. Определение ускорения свободного падения тела	8
3. Проверка закона сохранения импульса и определение энергии неупругой деформации при ударе шаров	11
4. Определение средней силы сопротивления грунта при забивании сваи	18
5. Определение момента инерции ротора и силы трения в опоре	22
6. Определение момента инерции тела и проверка теоремы Штейнера	26
7. Определение молярной газовой постоянной методом откачки	30
8. Определение отношения молярных теплоемкостей газа $\gamma = C_p/C_v$ методом адиабатического расширения	34
9. Определение коэффициента внутреннего трения (динамической вязкости) жидкостей по методу Стокса	42

Редактор издательского отдела *К.В. Аршинова*
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Изд. лиц. ИД № 03480 от 08.12.00. Подписано в печать
Формат 60 × 84/16. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.

Физ. печ. л. . Усл.-печ. л. . Уч.-изд. л. .

Тираж 450 экз. Заказ № 2965.

Издательский отдел КГЭУ 420066, Казань, Красносельская, 51
Типография КГЭУ 420066, Казань, Красносельская, 51