



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»
(РИИ АлтГТУ)

В.И. БАХМАТ
В.В. БОРИСОВСКИЙ

МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по физике для студентов очной и заочной форм обучения
всех технических направлений

Рубцовск 2015

УДК 537.87

Бахмат В.И., Борисовский В.В. Механика и молекулярная физика: Методическое пособие к выполнению лабораторных работ по физике для студентов очной и заочной форм обучения всех технических направлений/ Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2015. – 63 с.

Методические указания содержат лабораторные работы по механике и молекулярной физике, которые соответствуют программе курса общей физики для технических вузов. Дан теоретический материал, описание установки, определен порядок выполнения лабораторных работ и последовательность обработки результатов наблюдений и вычислений.

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры высшей математики, физики и химии Рубцовского индустриального института.
Протокол № 4 от 10.12.2015 г.

Рецензент: к.т.н., доцент

С.А. Гончаров

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Классификация и расчет ошибок измерений	4
Требования техники безопасности при проведении учебных лабораторных занятий	8
Лабораторная работа №1	10
Лабораторная работа №2	16
Лабораторная работа №3	21
Лабораторная работа №4	27
Лабораторная работа №5	33
Лабораторная работа №6	39
Лабораторная работа №7	45
Лабораторная работа №8	51
Лабораторная работа №9	59

ВВЕДЕНИЕ

Теоретический материал, сообщенный на лекциях, закрепляется в памяти и связывается с практикой двумя путями: решением задач и работой в лаборатории. Лабораторные занятия дают наглядное представление о протекании физических явлений и процессов. В лаборатории, как правило, приходится иметь дело с совокупностью явлений, что позволяет лучше разобраться в сложных физических явлениях.

Экспериментальные навыки, приобретенные в учебных лабораториях, важны как для будущего исследователя – научного работника, так и для инженера – производственника. Лабораторные занятия должны углублять и закреплять теоретические знания, полученные на лекциях и при самостоятельном изучении физики по учебнику.

Лабораторные занятия развивают наблюдательность, внимание, память, учат мыслить. Если смотреть на лабораторные работы с практической точки зрения, с точки зрения подготовки высококвалифицированного инженера, то на лабораторных занятиях студент должен познакомиться с простейшими методами научных исследований, получить полезные навыки в проведении измерений физических величин, научиться пользоваться измерительными приборами и инструментом, лабораторным оборудованием, материалами, а также освоить на практике методы математической обработки результатов физического эксперимента.

КЛАССИФИКАЦИЯ И РАСЧЁТ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты любого измерения всегда содержат некоторую погрешность или ошибку. Ошибки измерений можно разделить на три вида: грубые (промахи), систематические и случайные.

Промах заключается в том, что экспериментатор допускает ошибки по невнимательности при записи показателей прибора (например, пишет 213 вместо 231). Эта ошибка устраняется при тщательной работе и внимательной записи результатов измерений.

Систематические ошибки обусловлены недостатком метода измерений либо самого прибора, а также влиянием внешних условий или дефектов объекта измерения. Для исключения систематических ошибок необходимо найти пути их учета, зная вид систематической ошибки.

Ошибки, природа которых нам известна и величину которых достаточно точно можно определить, устраняют введением соответствующих поправок (например, при измерении длины поправки на температурное удлинение измеряемого тела и измерительной линейки). Источники таких ошибок нужно тщательно анализировать, величины поправок определить и учитывать в окончательном результате.

Ошибки известного происхождения, но неизвестной величины. К их числу относится погрешность измерительных приборов, которая определяется классом точности прибора. Систематические ошибки этого типа не могут быть исключены, но их максимальное значение, как правило, известно.

Третья группа систематических ошибок самая опасная. Это ошибки, о существовании которых мы не подозреваем, хотя величина их может быть очень значительной (например, при определении плотности тела в измеряемом образце внутри есть пустоты).

Ошибки, обусловленные свойствами измеряемого объекта. Например, при измерении электропроводности материала отрезок проволоки имеет утолщение, трещину, неоднородность.

Случайные ошибки обусловлены случайными факторами, которые, в свою очередь, могут быть вызваны различными причинами. С одной стороны, это могут быть причины, не зависящие от измеряемой величины, например, состояние организма человека, наблюдающего за прибором, погодные и природные условия, состояние рабочего места и др. С другой – сама измеряемая величина может носить случайный характер.

Расчёт погрешностей измерений при определении измеряемой величины X производится следующим образом.

1. **Абсолютной погрешностью измерения** ΔX называют модуль разности между измеряемым значением X и её истинным значением $X_{\text{ист}}$:

$$\Delta X = |X - X_{\text{ист}}|. \quad (1)$$

$X_{\text{ист}}$, вообще говоря, остается неизменным, но с определенной вероятностью можно сказать, что оно находится в интервале:

$$X - \Delta X \leq X_{\text{ист}} \leq X + \Delta X. \quad (2)$$

2. Определение абсолютной систематической ошибки по классу точности прибора используется для электроизмерительных приборов. Класс точности E_x прибора для измерения физической величины X определяется:

$$E_x = \frac{\Delta X_{\text{сист}}}{X_{\text{пред}}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $X_{\text{пред}}$ – наибольшее предельное значение величины X , которое можно измерять данным прибором. Тогда абсолютная систематическая погрешность измерения:

$$\Delta X_{\text{сист}} = \frac{E_x \cdot X_{\text{пред}}}{100 \%}. \quad (4)$$

Например, класс точности вольтметра равен 0,2, а шкала рассчитана на 50 В. Тогда систематическая погрешность окажется равной:

$$\Delta U_{\text{сист}} = \frac{50 \cdot 0,2}{100} = 0,1 \text{ В}.$$

Причём это значение не зависит от результатов измерений.

3. За абсолютную систематическую ошибку отдельного прямого измерения принимается наименьшее значение шкалы измерительного инструмента или прибора. В некоторых случаях, когда деление шкалы достаточно большое, за абсолютную систематическую ошибку можно принимать половину деления шкалы. Например, 0,01 мм для микрометра (цена деления), 0,05 мм для линейки (половина деления шкалы).

4. Если в расчётах используются табличные значения или даются значения величин, измеренных заранее, о точности измерения которых нам неизвестно, то за абсолютную систематическую ошибку принимается величина, равная половине единицы наименьшего разряда, представленного в числе. Например, масса грузика дается равной 100 г. Следовательно, $\Delta m = 0,5$ г.

5. Случайная погрешность, обусловленная случайными факторами, определяется для нескольких измерений. В любом случае за истинное значение величины X принимается её среднее значение $X_{\text{ср}}$. Для этого проводят несколько измерений X_1, X_2, \dots, X_n и рассчитывается $X_{\text{ср}}$:

$$X_{\text{ср}} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}, \quad (5)$$

где n – число измерений. Очевидно, что чем больше значения измерений отличаются друг от друга, тем больший разброс имеет величина X . Величину случайной ошибки измерения оценивают с помощью средней квадратичной ошибки:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{ср}} - X_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (6)$$

Для определения величины случайной ошибки $\Delta X_{\text{сл}}$ необходимо определить доверительную вероятность (надёжность) α . Это вероятность того, что значение измеренной величины окажется в интервале от $X - \Delta X$ до $X + \Delta X$. При увеличении числа измерений величина случайной погрешности уменьшится. Однако при большом числе измерений это уменьшение оказывается крайне незначительным. Для того, чтобы учесть зависимость $\Delta X_{\text{сл}}$ от α и n , вводится специальный коэффициент $t_{n,\alpha}$, называемый коэффициентом Стьюдента. Случайная погрешность определяется выражением:

$$\Delta X_{\text{сл}} = t_{n,\alpha} \cdot S_n. \quad (7)$$

Коэффициент Стьюдента можно определить по таблице 1 для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Таблица 1

Значения коэффициента Стьюдента

Число измерений n	1	2	3	4	5	6	7	8
Надёжность $\alpha = 0,95$	12,7	4,3	3,2	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3

6. Полная абсолютная погрешность ΔX находится путём сложения:

$$\Delta X = \Delta X_{\text{сист}} + \Delta X_{\text{сл.}} \quad (8)$$

Мы рассмотрели случай так называемого прямого метода измерения, когда показания измеряемой величины определяются непосредственно по шкале прибора.

7. Если физическую величину невозможно измерить с помощью приборов, то её конечный результат находится по формуле через величины, определенные в результате прямых измерений. Такой метод измерения называется **косвенным**.

Нахождение погрешности косвенных измерений производится по правилам дифференцирования с последующей заменой дифференциалов погрешностями.

Например, абсолютная погрешность в определении ускорения может быть найдена в результате логарифмирования и последующего дифференцирования соотношения $a = \frac{2h}{t^2}$. Логарифмируем расчётную формулу:

$$\ln a = \ln 2 + \ln h - \ln t^2.$$

Дифференцируем полученное выражение:

$$\frac{da}{a} = \frac{dh}{h} - 2 \cdot \frac{dt}{t}.$$

Заменяя дифференциалом на соответствующие или абсолютные погрешности величины прямых измерений и учитывая, что независимо от знака дифференциалов слагаемые берут только со знаком «+», так как погрешность при измерении нескольких переменных может только увеличиваться, получим:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{2\Delta t}{t}, \quad \Delta a = a \cdot \left(\frac{\Delta h}{h} + 2 \frac{\Delta t}{t} \right).$$

8. После определения абсолютной погрешности определяем относительную погрешность:

$$E_X = \frac{\Delta X}{X}, \quad (9)$$

которую можно выразить в процентах, если умножить на 100%.

Окончательный результат измерения представляется в виде:

$$X = (X \pm \Delta X) \text{ (единицы измерения); } E = \dots \% ; \alpha = 0,95. \quad (10)$$

Например, $a = (2,9 \pm 0,3) \text{ м/с}^2$; $\varepsilon = 10,3 \%$; $\alpha = 0,95$.

ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

1. Общие положения

1.1. К работе в учебной лаборатории допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности. Инструктаж проводит преподаватель на вводном занятии, после чего студенты расписываются в специальном журнале, который хранится в лаборатории.

1.2. Студенты, допущенные к занятиям, должны знать правила работы на установках, изложенные в руководстве к лабораторным работам по курсу общей физики, инструкцию по мерам оказания первой медицинской помощи.

1.3. Выполнять работы разрешается только на исправных и полностью укомплектованных установках. На рабочем месте не должны находиться предметы, не требующиеся при выполнении задания.

1.4. Находясь в учебной лаборатории, студенты должны быть внимательными, дисциплинированными, точно выполнять указания преподавателя.

1.5. Студенты, виновные в нарушении инструкции, несут ответственность, степень которой зависит от характера нарушения и последствий.

2. Характеристика выполняемой работы и рабочего места

2.1. Лабораторные установки по курсу общей физики включают в себя мерительные инструменты, электроизмерительные и осветительные приборы, а также вычислительную технику (микрокалькулятор).

2.2. Перед началом работы в учебной лаборатории студент обязан: привести в порядок рабочее место, убрать все, что может помешать при работе; внимательно провести внешний осмотр установок, убедиться в исправном состоянии измерительных приборов, клемм, соединительных проводов и кнопок управления, выключателя сети. Осмотр производить при отключенных установках.

2.3. Работа на установках запрещается при обнаружении повреждения изоляции электропроводки, неисправностей отдельных узлов и блоков при отсутствии заземления и предохранительных приспособлений.

3. Обязанности студентов при выполнении лабораторных работ

3.1. Работать разрешается только на установках, за которыми студенты закреплены и которые им хорошо изучены.

3.2. Необходимо следить, чтобы рабочее место имело достаточное освещение.

3.3. Электрическую схему следует собирать так, чтобы провода не перекрещивались, не натягивались и не скручивались петлями. Приборы управления и измерительные приборы расставлять так, чтобы было удобно производить переключения, передвигать ползунки и рукоятки, наблюдать за приборами, не перегибаясь через приборы и провода.

3.4. После сборки схемы установки начинать работу можно только после разрешения преподавателя.

3.5. Перед включением установки в сеть ЛАТР должен быть выведен в нулевое положение, а положение ползунка реостата соответствовать максимальному сопротивлению цепи; ключи, подающие напряжение в измерительную цепь, разомкнуты.

3.6. Во время проведения измерений изменять напряжение в цепях необходимо плавно. При проведении переключений отключить всю установку от сети.

3.7. При всех случаях обнаружения повреждений электрического оборудования, измерительных приборов и проводов необходимо немедленно отключить лабораторную установку и сообщить об этом преподавателю.

3.8. После окончания работы отключить установку от электросети, убрать рабочее место. О всех неполадках на установке сообщить преподавателю.

4. Поведение при возникновении несчастных случаев и пожара

4.1. При возникновении пожара необходимо пользоваться огнетушителем и песком, имеющимися в лаборатории.

4.2. При возникновении несчастного случая следует действовать согласно инструкции по мерам оказания первой медицинской помощи в лабораториях.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ТЕЛА

Цель работы: Изучение динамики поступательного движения связанной системы тел с учётом силы трения: оценка силы трения как источника систематической погрешности при определении ускорения свободного падения на лабораторной установке.

Приборы и принадлежности: установка «Машина Атвуда», набор грузов, электронный секундомер.

Теоретическое введение

Ускорение свободного падения g можно найти с помощью простого опыта: бросить тело с известной высоты h и измерить время падения t , а затем из формулы $h = \frac{gt^2}{2}$ вычислить g .

Сопротивление воздуха при больших скоростях играет заметную роль. Формула $h = \frac{gt^2}{2}$ описывает равноускоренное движение и не учитывает сопротивление воздуха. Таким образом, увеличивая высоту h , мы увеличиваем время падения и уменьшаем относительную погрешность измерения времени, но при этом вносим другую ошибку: сама формула $h = \frac{gt^2}{2}$ становится неточной.

Это говорит о том, что точность измерения какой-то физической величины связана не только с точностью измерительных приборов, но и с тем, насколько точно принятая модель описывает данный опыт.

Основная задача, которая стоит перед экспериментатором при определении ускорения свободного падения g , состоит в выборе оптимального соотношения между высотой падения и временем падения.

Существует способ, который позволяет при небольшой высоте падения, чтобы можно было пренебречь сопротивлением воздуха, сделать время падения большим по сравнению с тем, которое при непосредственном падении тела с этой высоты получилось бы.

Такой способ реализован в приборе, который называется «Машина Атвуда» (рис. 1). Суть работы машины Атвуда состоит в следующем.

Через блок перекинута нить, на которой закреплены грузы массой M каждый. На один из грузов кладется перегрузок массой m . Ускорение груза легко найти, если ввести два предположения (выбрать модель):

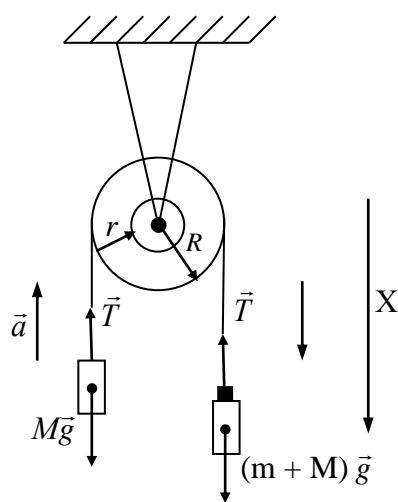


Рис. 1

- 1) блок и нить невесомы, то есть их массы равны нулю;
- 2) трением тела о воздух и трением между блоком и его осью можно пренебречь.

С учётом этих предположений уравнения движения грузов имеют вид.

$$\begin{aligned} Mg - T &= -Ma, \\ (M + m)g - T &= (M + m)a, \end{aligned} \quad (1)$$

где T – сила натяжения нитей, a – ускорение грузов. Из уравнений (1) получаем

$$a = g \frac{m}{2M + m} = g \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon},$$

где

$$\varepsilon = \frac{m}{2M}. \quad (2)$$

Время, за которое груз опускается на высоту $h = \frac{at^2}{2}$, равно:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \cdot \sqrt{\frac{1 + \varepsilon}{\varepsilon}}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что время падения груза может быть сколь угодно большим, если уменьшить ε . Мы предположили, что трение в оси блока отсутствует. В действительности оно есть. Весь вопрос в том, можно ли им пренебречь или нет. Если подвести к блоку на нитях тяжелые грузы, то в оси блока будет большая сила трения. Значит, необходимо брать достаточно тяжелый перегрузок, чтобы преодолеть эту силу трения и привести всю систему в движение. Получим соотношение, связывающее массы грузов, перегрузок и коэффициент трения между блоком и осью блока.

Пусть m_0 – масса перегрузка, который только страгивает блок с грузами. Это значит, что любой перегрузок меньшей массы не приводит систему в движение. В этом случае момент силы натяжения нитей равен моменту силы трения $M_{тр}$ в оси блока:

$$(T_2 - T_1)R = m_0 gR = M_{mp}, \quad (4)$$

где $T_2 = (M + m_0)g$ и $T_1 = Mg$ – силы натяжения нитей, R – радиус блока. Момент силы трения в оси блока $M_{тр} = F_{тр} \cdot r$, где $F_{тр}$ – сила трения между блоком и осью, r – радиус оси (подшипника).

Сила трения $F_{тр}$ между блоком и осью пропорциональна силе давления на ось блока. Тогда

$$N = T_1 + T_2 = (2M + m_0)g,$$

$$F_{mp} = \mu \cdot N = \mu(2M + m_0)g,$$

где μ – коэффициент трения между блоком и осью, зависящий от свойств соприкасающихся поверхностей втулки блока и оси, смазки и т.д. Таким образом, момент силы трения в оси блока:

$$M_{mp} = (2M + m_0)g \cdot \mu \cdot r. \quad (5)$$

Обозначим $\varepsilon_0 = \frac{m_0}{2M}$. Подставим (5) в (4):

$$\frac{\varepsilon_0}{1 + \varepsilon_0} = \frac{\mu \cdot r}{R}. \quad (6)$$

Как видно из (6), ε_0 не может быть сколь угодно малым. Оно определяется конструкцией блока (например, его радиусами R и r) и коэффициентом трения между блоком и осью.

Так как в машине Атвуда $m_0 \ll M$, то $\varepsilon_0 \ll 1$ и

$$\varepsilon_0 \approx \frac{\mu \cdot r}{R}; \quad \mu = \frac{\varepsilon_0 R}{r} = \frac{m_0 R}{2Mr}.$$

Значение ε_0 можно оценить экспериментально. Для этого необходимо при имеющихся в установке грузах массы M подобрать такую массу перегрузка m_0 , который начнет страгивать блок с грузами.

Чтобы в дальнейшем трением между осью и блоком можно было пренебречь, необходимо выбрать массу m перегрузка $m \approx 10 m_0$.

В первую очередь, необходимо определить минимальную массу перегрузка m_0 , страгивающего блок, с тем чтобы в дальнейшем проводить измерения с грузами, в 5 ÷ 10 раз превышающими по массе m_0 . Так как блок не может быть отцентрирован идеально, то может оказаться, что в различных начальных положениях блока массы страгивающего перегрузка различны. Поэтому необходимо повторить измерения m_0 в разных положениях блока, а затем в качестве m_0 взять наибольшее из них.

Следует убедиться, что движение системы при достаточно большой фиксированной массе перегрузка $m \gg m_0$ является равноускоренным. Для этого нужно экспериментально проверить выполнение зависимости $h = \frac{at^2}{2}$. Удобно переписать это соотношение в виде:

$$t = \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \sqrt{h}, \quad (7)$$

из которого ясно, что в осях координат $x = \sqrt{h}$, $y = t$. Прямая $t = f(\sqrt{h})$, проходящая через начало координат, соответствует равноускоренному движению, она может быть построена по экспериментальным точкам: для одного перегрузка m и ряда различных значений высоты h измеряется время падения груза. Измерение времени для каждой высоты h производится несколько раз, результаты усредняются и записываются в виде:

$$t = \bar{t} \pm \Delta t,$$

где \bar{t} – среднее арифметическое значение измеренного времени падения для данной высоты. В условиях эксперимента погрешность Δt оказывается заметно превышающей погрешность в показаниях электронного секундомера (Δt_0), а именно:

$$\Delta t \gg (\Delta t_0) = 10^{-3} \text{ с.}$$

Поэтому было бы грубой ошибкой считать, что погрешность определяется временем падения, равна 10^{-3} с.

$$\begin{aligned} \Delta t &= \Delta t_{\text{сум}} + \Delta t_{\text{сл}}; \\ \Delta t_{\text{сл}} &= t_{a,n} \cdot S_{\langle t \rangle} = t_{a,n} \sqrt{\frac{\sum (\bar{t} - t_i)^2}{n(n-1)}}; \\ \Delta t_{\text{сум}} &= \Delta t_0; \quad t_{a,n} = 2,8. \end{aligned}$$

Для построения графика на оси ординат откладываются измеренные значения \bar{t} ($y = \bar{t}$) с указанием погрешности Δt . На оси абсцисс откладывается $x = \sqrt{h}$. Если полученные экспериментальные точки ложатся на прямую, то движение можно считать равноускоренным.

Наконец, важно выяснить, подтверждается ли на опыте зависимость времени падения от массы m перегрузка (см. (3)):

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \sqrt{\frac{2M+m}{m}} \approx 2 \sqrt{\frac{h}{g}} \sqrt{\frac{M}{m}} \approx \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \sqrt{h}. \quad (8)$$

В осях координат $x = \sqrt{\frac{M}{m}}$, $y = t$, функция $t = f\left(\sqrt{\frac{M}{m}}\right)$ является уравнением

прямой или $y = 2 \sqrt{\frac{h}{g}} \cdot x$. Зависимость $t = f\left(\sqrt{\frac{M}{m}}\right)$ при фиксированной высоте

падения h может быть построена по экспериментальным точкам: для нескольких значений массы перегрузка определяется временем падения $t = \bar{t} \pm \Delta t$. Измерение времени падения при каждом m повторяется несколько раз, результаты усредняют и находят среднее значение \bar{t} и разброс Δt . Полученные экспериментальные данные откладываются на осях координат: на оси ординат – значение \bar{t} с указанием погрешности Δt , на оси абсцисс – соответствующие значения $\sqrt{\frac{M}{m}}$. Затем через полученные точки проводится прямая и по её наклону определяется значение g :

$$\frac{y}{x} = \text{tg } \alpha = 2 \sqrt{\frac{h}{g}}; \quad \frac{1}{4} \text{tg}^2 \alpha = \frac{h}{g}; \quad g = \frac{4h}{\text{tg}^2 \alpha}. \quad (9)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Определите массу m_0 сдвигающего перегрузка. Для этого, постепенно увеличивая массу m перегрузка, определите с точностью до 0,5 г значение m_0 , начиная с которого блок приходит в движение. Измерения повторите при

четырёх положениях блока, каждый раз поворачивая блок примерно на 90° по отношению к предыдущему положению. В качестве m_0 следует принять наибольшее из найденных значений.

2. Определите экспериментально по формуле (7) зависимость времени падения груза от высоты h . Измерения проведите при определенном выбранном значении массы перегрузка $m = (5 \div 10)m_0$. При этом необходимо также, чтобы выполнялось $m \ll 2M$. Определите время падения t для четырех – пяти высот h , повторяя измерения для каждого значения h по четыре раза. Результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 1

N	h	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	\bar{t}	Δt	m	m ₀
1									
2									
3									
4									

Здесь $t_1 \dots t_4$ - результаты измерения времени падения с установленной высоты h . По результатам измерений в осях координат $x = \sqrt{h}$;

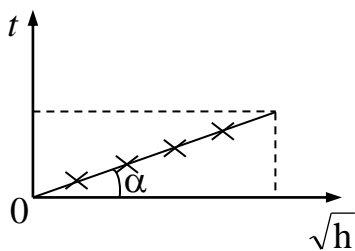


Рис. 2

$y = t$ постройте прямую $t = f(\sqrt{h})$. По наклону прямой определите $\frac{y}{x} = \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{2}{a}}$, $a = \frac{2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}$. (10)

3. Определите опытным путем зависимость времени падения t от массы m перегрузка. Измерения проводите при наибольшей возможной высоте падения $h = h_{\max}$ для четырёх значений массы m . Для каждого значения m повторите измерения четыре раза, результаты занесите в таблицу 2.

$$M = 77,8 \text{ г.}$$

Таблица 2

N	m	M/m	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	\bar{t}	Δt
1								
2								
3								
4								

$$\Delta m = 0,5 \text{ г}$$

$$h_{\max} =$$

4. По результатам измерений в осях координат $x = \sqrt{\frac{M}{m}}$; $y = t$ постройте прямую

$$t = f\left(\sqrt{\frac{M}{m}}\right).$$

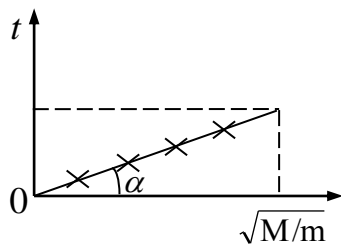


Рис. 3

По наклону прямой с помощью соотношения (8) и (9) определите ускорение свободного падения

$$g = \frac{4hM}{mt^2} = \frac{4h}{\operatorname{tg} 2\alpha} \text{ и погрешность } \Delta g.$$

$$\Delta g = g \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}.$$

5. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Почему измеренное значение ускорения свободного падения меньше, а не больше, чем $9,8 \text{ м/с}^2$?
2. Какова относительная погрешность измерения g ?
3. Что такое напряженность поля тяготения? Какое поле тяготения называется однородным, центральным?
4. Как меняется сила притяжения тела к Земле при подъеме с поверхности Земли, при погружении в глубокую шахту, доходящую до центра Земли?
5. При проведении соревнований по подъему тяжестей или по прыжкам в высоту нужно ли учитывать, в каком месте земного шара происходят состязания?

Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 1: [текст]; Учеб.пособие для студентов всех форм обучения техн. направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 67 с.
2. Борисовский, В.В. Механика жидкостей и газов (теория и практика) [текст]: Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2014. - 43 с.
3. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34
4. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб.: Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38
5. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА

Цель работы: изучение свойств физического маятника, их применение для определения ускорения свободного падения.

Приборы и принадлежности: оборотный маятник, электронный секундомер.

Теоретическое введение

1. Гармонические колебания физического маятника

Физическим маятником (ФМ) является любое твёрдое тело, совершающее периодическое движение вблизи положения равновесия. В частном случае ФМ может быть твёрдое тело, способное свободно вращаться вокруг оси подвеса $O'O'$, не проходящей через центр масс тела (точка C на рис. 5). Если колебания такого тела происходят в пределах малых углов отклонения от вертикали θ , то величина силы, возвращающей маятник в положение равновесия, линейно зависит от величины смещения от положения устойчивого равновесия. Тогда частота и период колебания ФМ и колебательный процесс называют гармоническим. Так как движение ФМ происходит в гравитационном поле Земли, то величина возвращающей силы определяется характеристиками поля тяготения в месте расположения ФМ. Из курса физики известна формула периода колебания математического маятника T_m :

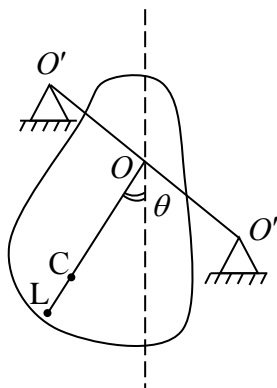


Рис. 5

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (1)$$

Здесь ℓ – длина невесомой нити (или стержня) подвеса, равная расстоянию от оси вращения до центра тяжести тела массой m , принимаемого за материальную точку.

Величина g определяет величину ускорения свободного падения. Как видно из (1), период математического маятника не зависит от массы m тела. Можно преобразовать (1) так, чтобы формула выражала период колебания физического маятника.

По определению, момент инерции материальной точки равен:

$$I = m\ell^2. \quad (2)$$

Тогда зависимость периода колебаний от момента инерции определяется в виде:

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{m\ell \cdot \ell}{m\ell \cdot g}} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{m\ell g}}. \quad (1,a)$$

В таком виде формула (1,а) применена также и для любого твёрдого тела – физического маятника, если понимать под I момент инерции физического маятника относительно оси подвеса $O'O'$, а $\ell = \ell_c$ обозначить расстояние от оси подвеса до центра масс тела:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mg\ell_c}}. \quad (3)$$

Формула (3) выражает зависимость периода колебаний ФМ от его параметров (m, ℓ_c, I) и ускорения свободного падения.

Физическому маятнику можно поставить в соответствие эквивалентный (по периоду колебаний) математический маятник. Если длина нити подвеса ℓ_m математического маятника равна величине:

$$\ell_m = \frac{I}{m \cdot \ell_c}, \quad \text{то} \quad T_m = T; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell_{np}}{g}}. \quad (4)$$

Поэтому для характеристики свойств ФМ пользуются понятием его приведенной длины. Приведенная длина (ℓ_{np}) ФМ численно равна длине эквивалентного математического маятника, определяемой по (4).

Величина ℓ_{np} показывает, на каком расстоянии от оси подвеса находится характерная точка ФМ, называемая центром качания. Следует отметить, что центр качания ФМ не совпадает с центром масс. Центр качания (L) и точка подвеса (O) всегда расположены по разные стороны от центра масс ФМ (см. рис. 5). Центр качания и точка подвеса находятся во взаимном обратном соответствии: если точку подвеса перенести в центр качания, то центр качания в новом положении совпадает с прежней точкой подвеса (это следует из постоянства ℓ_{np} для данного ФМ).

Можно определить положение центра качания ФМ расчётным путем по формуле (3), если известны масса, момент инерции и положение центра масс. Когда эти параметры заранее не известны, положение центра качания находится экспериментально. Для этого следует иметь одну точку подвеса закрепленную, а другую точку (или ось) подвеса – перемещать вдоль линии OC , проходящей через центр масс, и фиксированную точку подвеса. Если подобрать у ФМ такое расположение двух параллельных осей подвеса, при котором период колебаний окажется одинаковым, то расстояние между осями будет равно ℓ_{np} . Определив величину приведенной длины физического маятника, можно рассчитать величину ускорения свободного падения:

$$g = \frac{4\pi^2}{T^2} \ell_{np}. \quad (5)$$

Период ($T_0 = T$) соответствует положению двух осей подвеса, при котором он одинаков, то есть не зависит от того, относительно какой из осей совершается колебание.

2. Определение ускорения свободного падения тел с помощью оборотного маятника

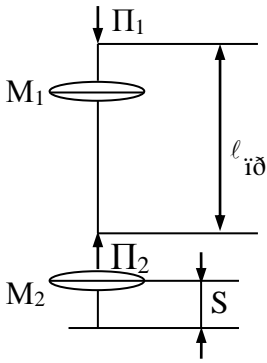


Рис. 6

Для опытного определения g можно использовать оборотный маятник в виде стержня (рис. 6), на котором могут перемещаться и закрепляться в различных положениях две оси подвеса (призмы P_1 и P_2) и массивные грузы (чечевицы M_1 и M_2). Закрепив чечевицу и одну из призм, можно менять положение другой оси подвеса и сопоставлять периоды колебания T_1 (около P_1) и T_2 (около P_2). Когда l станет равной $l_{пр}$, периоды T_1 и T_2 совпадут по величине: ($T_1 = T_2 = T_0$). Однако для повышения точности измерений лучше иметь две жестко закрепленные (изготовленные как одно целое со стержнем) призмы подвеса, а положение центра тяжести и величину момента инерции маятника

направленно изменять путем перемещения одного из грузов (M_2). В соответствии с формулами (2, 4), при этом будет изменяться величина $l_{пр}$ маятника. Когда положение центра качания совпадает с положением одной из призм (P_2), периоды T_1 и T_2 станут равными по величине. Это будет означать, что расстояние соответствует $l_{пр}$ и его следует измерить.

Таким образом, расстояние между неподвижными призмами P_1 и P_2 равно приведенной длине оборотного маятника только при таком положении подвижного груза $S = S_0$, при котором $T_1 = T_2 = T_0$.

Следовательно, необходимо последовательно перемещать груз M_2 по стержню на известные расстояния S и сравнивать периоды колебания маятника в его двух положениях (поворачивая маятник с одной призмы подвеса на другую). Чтобы уменьшить число проб и не пытаться случайным образом «попасть» в положение S_0 , рекомендуется определить это особое положение из графического сопоставления зависимостей периодов T_1 и T_2 от величины S . Для этого необходимо установить зависимости $T_1 = f_1(S)$ и $T_2 = f_2(S)$, построить графики этих функций и найти их общую точку (то есть точку пересечения). Зависимости $T_1(S)$ и $T_2(S)$ – нелинейные. Однако при сравнительно небольших пределах изменение S их можно приближенно аппроксимировать прямыми линиями, проведенными по экспериментальным данным. Период T_0 ,

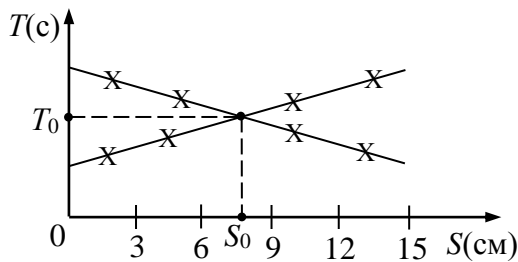


Рис. 7

соответствующий координате S_0 , можно определить по оси ординат, или же (если позволяет время) можно определить экспериментально, установив подвижную чечевицу в положение $S = S_0$ и выполнив измерения T_{01} и T_{02} . Совпадение периодов (в пределах погрешности измерений) подтвердит правильность определения S_0 по графикам (рис. 7).

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Установить маятник на опору Π_1 так, чтобы подвижный груз находился внизу. Зафиксировать груз в самом нижнем положении, условно принимаемом за нулевое ($S_1 = 0$).

2. Лёгкими толчками привести маятник в колебание («раскачать качели») в пределах угла отклонения $\pm 10^\circ$. С помощью электросекундомера измерить время за 10 полных колебаний и записать величину периода (за время одного полного колебания) в таблицу 1. Не останавливая маятника, повторить еще два раза измерения периода колебаний, как описано выше.

3. Остановить маятник, передвинуть груз на 3 см и провести серию трех измерений периода колебаний при новом $S_i \neq 0$, $\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$.

4. Выполнив измерения в положениях $S = 0, 3, 6, 9, 12$ и 15 см, повернуть маятник на противоположную призму и выполнить измерения по пунктам 2 – 4, занося данные в таблицу 2.

5. Построить график зависимостей $T_1(S)$ и $T_2(S)$ (рис. 7), проводя по экспериментальным точкам усредненные прямые, и найти значение S_0 . Затем установить груз M_2 в положение, соответствующее S_0 , и измерить периоды в 2 положениях обратного маятника.

6. По среднему арифметическому значению, полученному в п.5, по формуле (5) рассчитать величину ускорения свободного падения тел на широте г. Рубцовска.

Рекомендуем следующую форму таблицы 1.

Таблица 1

Маятник подвешен на опору Π_1

№ опыта	N = 10 Периоды колебаний при S_i , равном						$T = \frac{t}{N}$
	S = 0	S = 3 см	S = 6 см	S = 9 см	S = 12 см	S = 15 см	S = S_0
1							
2							
3							
среднее значение \bar{T}							

Аналогичным образом заполняется таблица 2 для случая, когда маятник подвешен на опору Π_2 , а груз M_2 вернуть в положение $S = 0$.

Таблица 2

Маятник подвешен на опору Π_2

№ опыта	N = 10 Периоды колебаний при S_i , равном						$T = \frac{t}{N}$ $S = S_0$
	S = 0	S = 3 см	S = 6 см	S = 9 см	S = 12 см	S = 15 см	
1							
2							
3							
среднее значение \bar{T}							

7. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать дифференциальное уравнение незатухающих гармонических колебаний.

2. Математический, физический маятники, их периоды колебаний. Сделать вывод.

3. Записать и объяснить основное уравнение динамики вращательного движения.

4. Момент инерции твердых тел. Получить формулу момента инерции диска.

Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 1: [текст]; Учеб.пособие для студентов всех форм обучения техн. направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 67 с.

2. Борисовский, В.В. Механика жидкостей и газов (теория и практика) [текст]: Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2014. - 43 с.

3. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34

4. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб.: Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38

5. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ПРОВЕРКА СПРАВЕДЛИВОСТИ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ПРИ ВРАЩЕНИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ВОКРУГ НЕПОДВИЖНОЙ ОСИ

Цель работы: 1. Установление прямой пропорциональности между угловым ускорением и результирующим моментом всех внешних сил, действующих на систему. 2. Проверка зависимости углового ускорения от момента инерции системы.

Приборы и принадлежности: маятник Обербека, набор грузов, секундомер, масштабная линейка, штангенциркуль.

Теоретическое введение

1. Описание маятника Обербека

Схема прибора приведена на рис. 8. Четыре спицы 1 укреплены на втулке 2

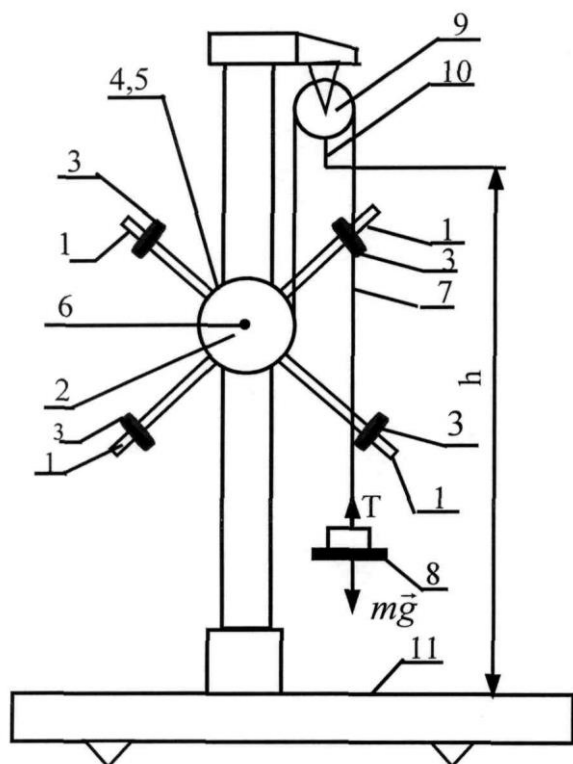


Рис. 8

под прямым углом. На каждой спице находится груз 3 массой $m_{гр}$. Втулка 2 и два шкива 4 и 5 радиусами r_1 и r_2 , соответственно, насажены на общую ось 6. Ось закреплена в подшипниках так, что вся система – спицы с грузами, втулка и шкивы – может вращаться вокруг неподвижной оси z . Передвигая грузы $m_{гр}$ по спицам, можно легко изменять момент инерции J системы, так как J (см. [2, 3, 4]) зависит от расстояния R грузов от оси вращения z . На один из шкивов 4 и 5 намотана нить 7, к которой привязана платформа 8 известной массы m_0 . На платформу 8 могут помещаться грузы различной массы с тем, чтобы можно было изменять суммарный момент сил, действующий на систему. Нить с платформой перекинута через блок 9, имеющий указатель 10. Расстояние между указателем 10 и основанием прибора равно

h . Указатель 10 служит началом отсчета при движении платформы с грузами.

2. Теория метода измерения

Первый способ.

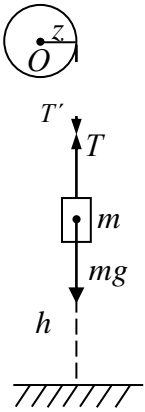


Рис. 9

Установление прямой пропорциональности между угловым ускорением ε системы и результирующим моментом M всех внешних сил, действующих на систему, требует умения в измерении этих величин.

Чтобы понять, момент каких сил действует на систему, представим (рис. 9), что на платформу 8 положен груз. Нить 7 натягивается. Сила натяжения нити T создает вращающий момент, действующий на систему. Величина момента силы натяжения равна: $M_T = T \cdot r$, где r – радиус шкива 4 или 5. Силу натяжения нити можно найти из уравнения движения платформы с грузом:

$$mg - T = ma \rightarrow T = m(g - a), \quad (1)$$

где m – масса платформы с грузом. В дальнейшем будем говорить: m – масса груза, a – его линейное ускорение. Тогда момент силы натяжения равен:

$$M_T = m(g - a) \cdot r. \quad (2)$$

Кроме того, на систему действует момент сил трения $M_{тр}$ оси z и блока 9 в подшипниках, направление которого противоположно направлению момента силы натяжения. Таким образом, результирующий момент сил M , действующий на систему, определяется как:

$$M = M_T - M_{тр} = m(g - a) \cdot r - M_{тр}. \quad (3)$$

Момент сил трения является неизвестной величиной. Хотя интуитивно понятно, что момент сил трения мал, неизвестно, мал ли он настолько, чтобы им можно пренебречь. Можно по порядку величины экспериментально определить $M_{тр}$. Для этого, помещая на платформу 8 грузы, найти минимальное значение массы груза, при которой маятник начнет вращаться. В этом случае величина момента сил трения может быть определена как:

$$M_{mp} \approx m_{min} \cdot g \cdot r.$$

Дальнейшие измерения необходимо проводить с грузом массы $m \geq 10m_{min}$. На первый взгляд, относительную роль момента сил трения можно уменьшить, если взять груз массой $m \gg m_{min}$, допустим, груз $m = 10^3 m_{min}$. Однако это не так по двум причинам. Первая – увеличение массы груза приводит к увеличению силы давления N на ось, а значит, и к росту момента сил трения, так как $M_{тр} = K \cdot N \cdot r$, где K – коэффициент трения, r – плечо силы трения. Вторая причина состоит в том, что увеличение m уменьшает время падения груза t , а значит, ухудшает точность измерения ускорения a , так как линейное ускорение платформы 8 равно:

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad (4)$$

где h – путь, который проходит платформа при равноускоренном движении за время t от указателя 10 до основания прибора 11.

Для того, чтобы определить угловое ускорение ε системы, необходимо учесть, что угловое ускорение шкива 4 или 5 связано с тангенциальным ускорением a_τ точек на ободе шкива соотношением:

$$\varepsilon = \frac{a_\tau}{r}.$$

Тангенциальное ускорение точек на ободе шкива при условии, что нить 7 нерастяжима, равно линейному ускорению платформы 8 с грузами. Таким образом, угловое ускорение ε системы равно:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} \quad \text{при} \quad a_\tau = a. \quad (5)$$

Из уравнений (1), (3) и (5) получаем:

$$\frac{a}{r} = \frac{mgr - M_{\text{дд}}}{J + mr^2}. \quad (6)$$

Момент инерции системы, входящей в формулу (6), равен согласно теореме Гюйгенса-Штейнера:

$$J = J_0 + 4m_{\text{тр}}R^2, \quad (7)$$

где R – расстояние центров грузов $m_{\text{тр}}$ от оси вращения, J_0 – момент инерции системы при $R = 0$ (грузы $m_{\text{тр}}$ сняты со спиц). В условии опыта величина mr^2 много меньше, чем J , поэтому в формуле (6) ею можно пренебречь и записать (6) в форме:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{1}{J}(mgr - M_{\text{тр}}), \quad (8)$$

где $a = \frac{2h}{t^2}$, которая удобна для экспериментальной проверки.

Проверяется прямая пропорциональность между угловым ускорением системы, равным $\varepsilon = \frac{a}{r}$, где a определяется по формуле (4), и моментом внешней силы $M = mgr$ при условии, что $J = \text{const}$. Если на оси ординат откладывать ε , а на оси абсцисс – mgr , то, согласно (8), экспериментальные точки должны ложиться на прямую. Из (8) видно, что наклон этой прямой равен $1/J$, а точка пересечения с осью абсцисс дает $M_{\text{тр}}$.

Второй способ.

Для проверки основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела по второму способу преобразуем уравнение (8), пренебрегая в нем малой величиной момента сил трения по сравнению с моментом mgr . Дело в том, что момент силы трения определен уже из графика зависимости

$\varepsilon = f(mgr)$. Поэтому масса платформы с грузом выбирается такой, чтобы неравенство $mgr \gg M_{\text{тр}}$ заведомо выполнялось. Уравнение (8) запишется тогда:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{1}{J} \cdot (mgr - M_{\text{тр}}) \approx \frac{mgr}{J_0 + 4m_{\text{тр}}R^2}.$$

Следовательно,

$$\frac{g}{a} = \frac{J_0 + 4m_{\text{тр}}R^2}{mr^2} = \frac{J_0}{mr^2} + 4\frac{m_{\text{тр}}}{m} \left(\frac{R}{r}\right)^2. \quad (9)$$

Из (9) понятно, как экспериментально проверить зависимость $\varepsilon = f\left(\frac{1}{J}\right)$ и теорему Гюйгенса-Штейнера. Нужно, выбрав постоянную массу груза m , измерить ускорение a при различных положениях R грузов $m_{\text{тр}}$ на спицах. Результаты измерений удобно изобразить в виде точек на координатной плоскости XOY , где $x = (R/r)^2$, $y = g/a$. Если экспериментальные точки в пределах точности измерений ложатся на прямую, то это подтверждает зависимость $\varepsilon = f\left(\frac{1}{J}\right)$ и теорему Гюйгенса-Штейнера. Причем наклон этой прямой равен $4m_{\text{тр}}/m$, точка пересечения с осью ординат дает J_0/mr^2 .

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Сбалансируйте маятник Обербека. Для этого оставьте на крестовине два груза на двух противоположных спицах и равных расстояниях от оси вращения. Перемещая немного один из грузов вдоль спицы, добейтесь равновесия. Затем точно сбалансируйте грузы на второй паре спиц на таком же расстоянии от оси вращения. Полезно несколько раз привести маятник во вращение, каждый раз давая ему возможность останавливаться. Подумайте, как на основании этих опытов определить, хорошо ли сбалансирован маятник.

2. Определите приблизительно минимальную массу $m_{\text{мин}}$, при которой маятник начинает вращаться, и оцените момент сил трения из отношения:

$$M_{\text{тр}} \approx m_{\text{мин}} \cdot g \cdot r.$$

3. Определите экспериментально зависимость углового ускорения маятника от момента приложенной силы mgr . В этой серии измерений момент инерции маятника должен оставаться постоянным: $J = \text{const}$. Для определения зависимости $\varepsilon = f(mgr)$ измерьте время t , за которое груз m опускается на расстояние h . Измерение времени для каждого груза при постоянном значении h повторите 3 раза. Затем найдите среднее значение времени падения груза по формуле:

$$\bar{t} = \frac{1}{3}(t_1 + t_2 + t_3)$$

и определите среднее ускорение груза из соотношения (4):

$$\bar{a} = \frac{2h}{\bar{t}^2}.$$

Эти измерения и вычисления повторите для пяти значений массы m груза, причем для всех m должно выполняться неравенство $m \gg m_{min}$. Результаты измерений запишите в таблицу 1.

4. Отложите полученные экспериментальные точки в координатной плоскости $x = mgr$, $y = \varepsilon$ и по ним постройте график зависимости $\varepsilon = f(mgr)$ (рис. 10,а).

Таблица 1

	t_1	t_2	t_3	\bar{t}	\bar{h}	$\bar{\varepsilon}$	mgr	$M_{гр}$
m_1								
m_2								
m_3								
m_4								
m_5								

$$r_1 = 4 \text{ см}$$

$$r_2 = 2 \text{ см}$$

5. Проверьте экспериментально зависимость (9). Для этого, взяв постоянную массу груза $m \gg m_{min}$, определите ускорение a груза m при пяти различных положениях R на спицах грузов $m_{сп}$. В каждом положении R измерения времени падения груза t с высоты h повторите 3 раза. Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Полученные экспериментальные точки нанесите с учетом погрешностей в координатной плоскости $x = \left(\frac{R}{r}\right)^2$, $y = \frac{g}{a}$.

Таблица 2

R	r	(R/r)	$4m_{гр}$	t_1	t_2	t_3	\bar{t}	\bar{h}	\bar{a}	g/\bar{a}

И постройте график зависимости $\frac{g}{a} = f\left(\frac{R}{r}\right)^2$ (рис. 10,б).

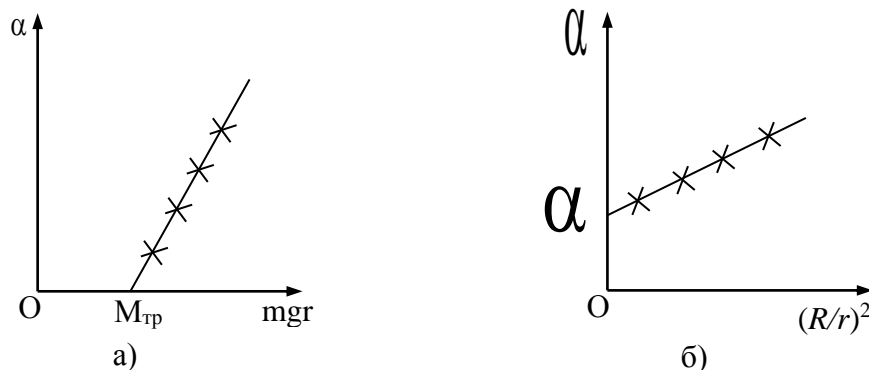


Рис. 10

6. Определите из графика значение:

$$4 \frac{m_{\text{тр}}}{m} \text{ и } \frac{J_0}{mr^2}.$$

7. Проведите анализ полученных результатов и сделайте на основе этого анализа выводы.

Примечание: значение r (приведено внизу таблицы 1) измерить штангенциркулем.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основной закон динамики вращательного движения и запишите основное уравнение динамики при вращении твёрдого тела вокруг неподвижной оси.
2. Что такое момент инерции тела, что он характеризует?
3. Какие способы можно предложить для проверки справедливости основного уравнения динамики вращательного движения?
4. Объясните методику проверки основного уравнения динамики этими способами.
5. Почему стремятся уменьшить момент силы трения?
6. Как определить приближённую величину $M_{\text{тр}}$?
7. Какую из величин в данном эксперименте необходимо измерять с наибольшей точностью и почему?

Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 1: [текст]; Учеб.пособие для студентов всех форм обучения техн. направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 67 с.
2. Борисовский, В.В. Механика жидкостей и газов (теория и практика) [текст]: Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2014. - 43 с.
3. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=34

4. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб.: Лань, 2010. — 574 с. [ЭР]
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38
5. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА ПО МЕТОДУ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: определение момента инерции тела методом крутильных колебаний, проверка справедливости теоремы Гюйгенса-Штейнера.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка, грузы сферической формы, секундомер, штангенциркуль, весы и разновески.

Теоретическое введение

Поступательное и вращательное движения являются частными проявлениями общего процесса механического движения материи. Основным законом динамики поступательного движения описывается выражением:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}, \quad \text{или} \quad \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}. \quad (1)$$

Величина m – масса тела – выражает численно меру инертности тела, то есть его способность изменять состояние поступательного движения под действием \vec{F} . Основным законом динамики вращательного движения твердого тела, вращающегося вокруг оси симметрии тела, записывается в виде:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}, \quad \text{или} \quad \vec{M} = J\vec{\varepsilon} = J \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}, \quad (1,a)$$

где \vec{L} – момент импульса тела;
 $\vec{\varphi}$ – вектор углового перемещения;
 $\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение;
 \vec{M} – момент силы.

Коэффициент пропорциональности J носит название момента инерции. Момент инерции является мерой инертности тела во вращательном движении и определяет способность тела изменять состояние вращательного движения под действием момента силы \vec{M} . Размерность момента инерции в системе СИ – $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$. Исходя из размерности можно дать определение момента инерции материальной точки относительно оси вращения в виде:

$$J_i = m_i \cdot r_i^2, \quad (2)$$

где r_i – радиус вращения материальной точки, а m_i – её масса. Масса реального тела представляется в виде суммы материальных точек его составляющих.

Аналогично этому момент инерции тела есть совокупность моментов инерции его частей, рассматриваемых как материальные точки:

$$J = \sum_i J_i. \quad (3)$$

Для тел правильной геометрической формы суммирование (а в пределе – интегрирование) по (3) даёт следующие результаты для моментов инерции, вычисленных относительно оси, проходящей через центр этих тел:

обруч	$J = mr^2;$
диск	$J = \frac{1}{2}mr^2;$
шар	$J = \frac{2}{5}mr^2,$

здесь r – радиусы соответствующих тел, а m – их масса.

Если необходимо рассчитать момент инерции тела относительно оси AA' , не проходящей через центр симметрии, но параллельно ей (рис. 11), можно воспользоваться теоремой Гюйгенса-Штейнера: «Момент инерции тела $J_{AA'}$ относительно любой оси AA' , параллельной оси OO' , проходящей через центр симметрии тела, равен моменту инерции $J_{OO'}$ этого тела относительно оси OO' , сложенному с величиной $m\ell^2$ », где ℓ – расстояние между осями AA' и OO' , m – масса тела

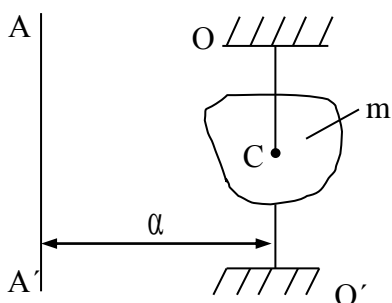


Рис. 11

$$J_{AA'} = J_{OO'} + m\ell^2. \quad (4)$$

Используя формулы (3) и (4), можно аналитически рассчитать момент инерции любого тела, условно разделяя его на составные части правильной геометрической формы и определяя расстояния, на которых они находятся от общей оси вращения тела. В случаях, когда аналитическое определение момента инерции затруднено сложностью формы тела или неоднородностью распределения массы, его определяют опытным путем, что является одной из целей настоящей работы.

Теория метода определения момента инерции твердого тела и проверки теоремы Гюйгенса-Штейнера

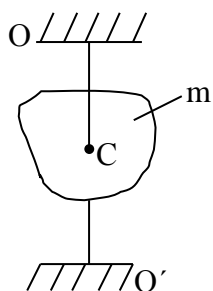


Рис. 12

Тело, момент инерции которого необходимо определить относительно некоторой оси вращения OO' , проходящей через центр симметрии C тела, жестко скрепляют с этой осью. Если концы оси фиксировать, тело с осью можно рассматривать как крутильный (торсионный) маятник (рис. 12). Выведенный из состояния равновесия маятник будет совершать колебания с периодом:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{\chi}}. \quad (5)$$

Здесь χ (каппа) называется коэффициентом угловой жёсткости или модулем кручения подвеса (оси). Численно χ выражает величину момента силы, возникающего в материале при его закручивании на единичный угол. Для тела, момент инерции $J_{OO'}$ которого необходимо определить в опыте, период колебаний будет иметь величину T_0 :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{J_{OO'}}{\chi}}. \quad (5,a)$$

Если коэффициент угловой жесткости известен, то $J_{OO'}$ легко определить из формулы (5a). Однако часто коэффициент угловой жесткости неизвестен. Тогда

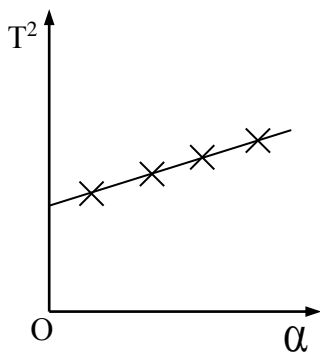


Рис. 13

для определения момента инерции тела $J_{OO'}$, чтобы исключить χ из формулы (5,a), поступают следующим образом: добавляют к телу, момент инерции которого определяют, дополнительное тело правильной геометрической формы, момент инерции J которого относительно оси OO' маятника легко вычислить по теореме Гюйгенса-Штейнера. Период колебаний такого усложненного маятника станет равным:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J + J_{OO'}}{\chi}}. \quad (6)$$

И уравнений (5,a) и (6) выражаем искомый момент инерции $J_{OO'}$:

$$J_{OO'} = \frac{T_0^2}{T^2 - T_0^2} \cdot J. \quad (7)$$

Если в качестве дополнительного груза использовать два одинаковых шара, массы m_0 и радиуса r каждый, расположенных симметрично относительно оси маятника OO' , то момент инерции J можно записать, применяя теорему Гюйгенса-Штейнера, в виде:

$$J = \frac{2}{5}mr^2 + m\ell^2. \quad (8)$$

Здесь $m = 2m_0$ – общая масса двух шаров, ℓ – расстояние между осью OO' и центром каждого шара.

С учётом (8) получаем формулу для искомого момента инерции:

$$J_{OO'} = \frac{T_0^2}{T^2 - T_0^2} \left(\frac{2}{5}mr^2 + m\ell^2 \right). \quad (9)$$

Подчеркнём, что формула (9) позволяет определить момент инерции $J_{OO'}$ крутильного маятника при условии, что теорема Гюйгенса-Штейнера справедлива. Чтобы убедиться в справедливости теоремы, проведем следующие рассуждения. Допустим, что с помощью устройства, изображенного на рис. 14,

измерена зависимость периода колебаний маятника T с дополнительными грузами шарообразной формы от расстояния ℓ между центром шара и осью OO . Построим график зависимости T^2 от ℓ^2 . Покажем, что, если теорема Гюйгенса-Штейнера справедлива, этот график должен изображаться прямой (рис. 13), пересекающей ось ординат в точке $\frac{4\pi^2}{\chi} \cdot \frac{2}{5}mr^2 + \frac{4\pi^2}{\chi}J_{OO}$. Наклон этой

прямой равен величине $tg \alpha = \frac{T^2}{\ell^2} = \frac{4\pi^2 m}{\chi}$, отсюда

$$\chi = \frac{4\pi^2 m}{tg \alpha}. \quad (10)$$

Если $J = \frac{2}{5}mr^2 + m\ell^2$, то формула (6) легко приводится к виду:

$$T^2 = \frac{4\pi^2 m \ell^2}{\chi} + \frac{4\pi^2}{\chi} \left(J_{OO} + \frac{2}{5}mr^2 \right),$$

то есть:

$$T^2 = a\ell^2 + c,$$

$$c = \frac{4\pi^2}{\chi} \left(J_{OO} + \frac{2}{5}mr^2 \right).$$

Полученное уравнение есть уравнение прямой, что доказывает справедливость теоремы Гюйгенса-Штейнера. Наклон этой прямой равен $\frac{4\pi^2}{\chi}m$, что даёт возможность экспериментально определить значение модуля кручения подвеса (оси OO) χ .

Прямая пересекает ось ординат в точке $\left(\frac{2}{5}mr^2 + J_{OO} \right) \frac{4\pi^2}{\chi}$, что позволяет рассчитать момент инерции J_{OO} крутильного маятника с точностью большей, чем это позволяет сделать формула (9), так как для определения J_{OO} в данном случае используется прямая, построенная с учетом погрешностей измерения всех экспериментальных точек.

Схема экспериментальной установки для проверки теоремы Гюйгенса-Штейнера и определения момента инерции твёрдого тела изображена на рис. 14. Тело 1, момент инерции которого J_{OO} необходимо определить, имеет форму шара с кольцом и двумя симметрично расположенными стержнями. Дополнительные грузы 2 – малые шары, надеваются на стержни и могут быть установлены на различных расстояниях ℓ от оси симметрии установки. Ось OO прикреплена к телу 1 с двух сторон и закреплена в кронштейнах 3. Для приведения системы в колебательно-вращательное движение необходимо приложить момент силы – повернуть двумя руками стержни на угол $8^\circ - 10^\circ$ (при малых углах период колебаний не зависит от амплитуды колебаний).

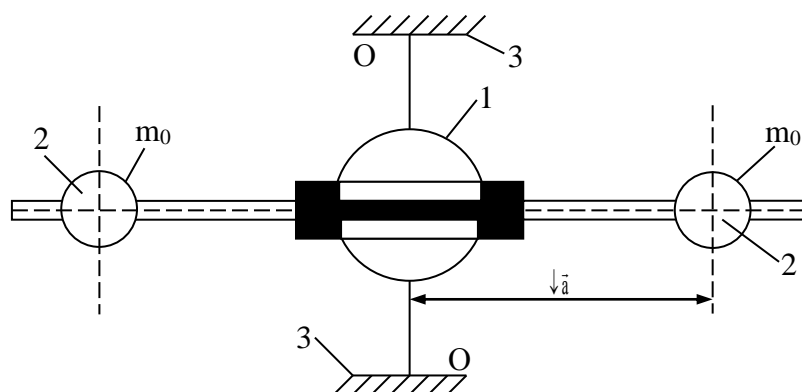


Рис. 14

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Проведите измерения периода колебаний T_0 крутильного маятника без дополнительных грузов не менее трёх раз. Для более точного измерения периода необходимо измерить время t не менее как десяти полных колебаний, а затем определить период как

$$T = \frac{t}{N},$$

где N – число полных колебаний.

Определите среднеарифметическое его значение:

$$T_{0_{cp}} = \frac{1}{3}(T_{0_1} + T_{0_2} + T_{0_3}).$$

2. Проведите измерение зависимости периода T крутильного маятника с дополнительными грузами от расстояния ℓ между осью OO и центром шаров. Установите дополнительные грузы на концах стержней, чтобы их край совпадал с краем стержня. В таком положении центры шаров будут находиться на расстоянии 0,2 м от оси вращения OO . Измерьте период T_1 . Измерьте периоды T_2, T_3, \dots, T_6 , последовательно передвигая на 2 см шары к центру. Заполните таблицу 1. Измерение периода для каждого значения ℓ проведите не менее трёх раз. Определите среднеарифметическое его значение для каждого ℓ .

3. Измерьте диаметр шаров-грузов, найдите величину их радиуса. Определите общую массу двух шаров.

4. Постройте график зависимости $T^2 = f(\ell^2)$; убедившись в справедливости теоремы Гюйгенса-Штейнера, определите из графика χ -модуль кручения подвесы (оси OO) и момент инерции J_{OO} маятника относительно оси OO .

5. Вычислите момент инерции J_{OO} по формуле (9). Сравните полученные значения J_{OO} .

6. Сделайте вывод о справедливости теоремы Гюйгенса-Штейнера и о совпадении момента инерции J_{OO} маятника, рассчитанного по формуле и определенного из графика. В каком случае точность определения J_{OO} больше и почему?

Таблица 1

№ опыта	$l_0, \text{ м}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$	$l_4, \text{ м}$	$l_5, \text{ м}$	$l_6, \text{ м}$	Примечание
	$T_0, \text{ с}$	$T_1, \text{ с}$	$T_2, \text{ с}$	$T_3, \text{ с}$	$T_4, \text{ с}$	$T_5, \text{ с}$	$T_6, \text{ с}$	
1								$r, \text{ м} = 0,023 \text{ м}$ $m_0, \text{ кг} = 0,18 \text{ кг}$
2								
3								
Среднее значение периода								

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл момента инерции?
2. Что определяет теорема Гюйгенса-Штейнера?
3. Почему, если график зависимости T^2 от l^2 представляется отрезком прямой линии, это означает, что теорема Гюйгенса-Штейнера справедлива?
4. При длительном пребывании в невесомости космонавты обычно худеют. Как можно измерить массы тела космонавтов в невесомости?

Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 1: [текст]; Учеб.пособие для студентов всех форм обучения техн. направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 67 с.
2. Борисовский, В.В. Механика жидкостей и газов (теория и практика) [текст]: Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2014. - 43 с.
3. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=34
4. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб.: Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=38
5. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА ЗАБИВКЕ СВАИ

Цель работы: определение средней силы сопротивления грунта забивке сваи, оценка потери механической энергии при забивке сваи.

Приборы и принадлежности: модель силы сопротивления грунта забивке сваи.

Теоретическое введение

Используемая для этой цели модель копра состоит из груза, помещенного на некоторой высоте H , и сваи. Свая удерживается в определенном положении с помощью механического устройства, играющего роль грунта.

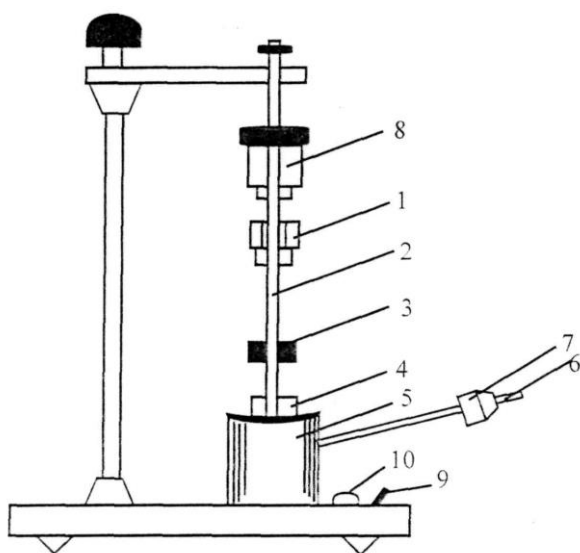


Рис. 15

Модель копра (рис. 15) состоит из груза 1, который может перемещаться по вертикальным направляющим 2, и сваи 3, которая с большим трением может скользить внутри разрезанной пополам втулки 4, находящейся внутри металлической обоймы 5. Сила трения между сваем и втулкой, играющей роль грунта, создается за счет силы нормального давления на одну половину втулки со стороны малого плеча рычага 6. На большое плечо этого рычага надета гиря 7, передвигая которую вдоль рычага можно изменять величину силы нормального давления на втулку и,

следовательно, на сваю.

Для удержания груза на некоторой высоте над сваем до удара служит электромагнит 8, работающий на постоянном токе от выпрямителя. Электромагнит приводится в действие включением тумблера 9. Электромагнит можно передвигать совместно с грузом по направляющим 2 и закреплять в нужном положении стопорным винтом. Для закрепления груза на электромагните его поднимают до соприкосновения с ним и тумблером включают электромагнит. Высота положения груза отсчитывается от верхней поверхности металлической обоймы 5, которую в процессе выполнения работы берут за начальный уровень, по рискам, нанесенным на правую направляющую 2 через 1 сантиметр. Расстояние верхнего конца сваи от начального уровня отсчитывается с помощью штангенциркуля – глубиномера или с помощью миллиметровой линейки.

Процесс забивки сваи в грунт происходит следующим образом. При падении груза его потенциальная энергия, обусловленная взаимодействием с Землей, переходит в кинетическую энергию движения груза (приращением

кинетической энергии Земли при этом можно пренебречь). Тогда, обозначив через v_1 скорость груза непосредственно перед соударением со сваей, m_1 – массу груза и H – первоначальную высоту груза над сваей, получим уравнение:

$$m_1 g H = \frac{m_1 v_1^2}{2}, \quad (1)$$

откуда

$$v_1 = \sqrt{2gH}. \quad (2)$$

При дальнейшем движении груза происходит неупругое соударение со сваей. Физические явления во время столкновения довольно сложны. Сталкивающиеся тела деформируются, возникают упругие силы и силы трения, в телах возбуждаются колебания и волны и т.д. Однако если удар неупругий, то в конечном итоге все эти процессы прекращаются, и в дальнейшем груз и свая, соединившись вместе, движутся как единое тело с массой $m_1 + m_2$ с некоторой общей скоростью v , сохраняя возникшую при ударе взаимную деформацию. Общую скорость груза и сваи сразу после удара можно найти, применив закон сохранения импульса к системе «груз-свая». Систему «груз-свая» на рассматриваемом этапе взаимодействия считаем приближенно замкнутой, так как внешние силы по отношению к этой системе (силы тяжести груза и сваи и сопротивления грунта) малы по сравнению с внутренними силами, развивающимися при соударении между грузом и сваей. До удара груз двигался со скоростью v_1 , приобретенной в результате падения с высоты H , свая же была неподвижна. После удара груз и свая движутся с общей скоростью v . Тогда, согласно закону сохранения импульса, считая удар груза и сваи абсолютно неупругим, запишем:

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v,$$

так как
имеем:

$$v_1 = \sqrt{2gH},$$

$$v = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot \sqrt{2gH}, \quad (3)$$

где m_2 – масса сваи.

В дальнейшем система «груз-свая», перемещаясь внутри грунта с начальной скоростью v , испытывает силы сопротивления со стороны грунта. Так как в общем случае грунт может иметь различную плотность на различных глубинах, сила сопротивления грунта будет различаться в разных слоях грунта, поэтому в дальнейшем будем говорить о средней силе сопротивления грунта забивке сваи: $F_{\text{ср}}$.

По окончании удара груз и свая движутся вместе замедленно до полной остановки, при этом сила сопротивления грунта совершает работу, равную:

$$A = \bar{F}_{\text{ср}} \cdot \bar{S} = F_{\text{ср}} \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

где \bar{S} – смещение сваи с грузом в грунте.

Так как сила сопротивления грунта F_{cp} и смещение направлены по одной прямой, но в противоположные стороны, то $\cos \alpha = -1$.

Тогда:

$$A = -F_{cp} \cdot S. \quad (5)$$

Эта работа равна изменению энергии системы «груз-свая – Земля», то есть:

$$-F_{cp} \cdot S = W_2 - W_1, \text{ или } F_{cp} \cdot S = W_1 - W_2, \quad (6)$$

где W_1 и W_2 – соответственно механическая энергия системы в начале движения и в момент остановки.

Обозначим h_1 и h_2 высоту забиваемой сваи относительно заранее выбранного начального уровня перед началом забивки сваи и после окончания забивки соответственно, рис. 16. Тогда:

$$W_1 = \frac{m_1 + m_2}{2} v^2 + m_1 g h_1 + m_2 g h_1, \quad (7)$$

$$W_2 = m_1 g h_2 + m_2 g h_2. \quad (8)$$

А разность:

$$W_1 - W_2 = \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2} + (m_1 + m_2) g (h_1 - h_2). \quad (9)$$

Обозначим:

$$h_1 - h_2 = S. \quad (10)$$

Подставив в (6) ($W_1 - W_2$) из (9), v из (3), S из (10), имеем:

$$F_{cp} = \left[\left(\frac{m_1^2}{m_1 + m_2} \right) \frac{H}{S} + (m_1 + m_2) \right] g. \quad (11)$$

Примечание: при неупругом ударе происходят различного рода процессы в соударяющихся телах (их пластические деформации, трение и др.). В результате происходит частичное преобразование механической энергии во внутреннюю энергию соударяющихся тел.

Проведем оценку потери кинетической энергии и системы «груз-свая» в результате неупругого удара.

Кинетическая энергия системы до удара:

$$W_0 = \frac{m_1 v_1^2}{2}.$$

После удара кинетическая энергия системы «груз-свая»:

$$W = \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2}.$$

Абсолютное уменьшение кинетической энергии системы:

$$\Delta W = W_0 - W = \frac{m_1 v_1^2}{2} \cdot \frac{m_2}{m_1 + m_2}.$$

Относительное уменьшение кинетической энергии системы:

$$\delta = \frac{\Delta W}{W_0} = \frac{m_2}{m_1 + m_2}. \quad (12)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Под максимально возможной высотой H поднятия груза 1 понимается такая высота, при падении с которой груз при $\ell = 200$ мм забивает сваю 3 во внутрь разрезанной втулки 4 немного не до конца. Для определения такой высоты необходимо выдвинуть сваю 3 из разрезанной втулки 4 на максимально возможную высоту, приподняв рычаг 6. Свая при этом должна оставаться внутри втулки не менее чем на 1,5 см. Тумблером включить электромагнит 8, привести в соприкосновение с ним груз 1 и, передвигая электромагнит с «прилипшим» к нему грузом, подобрать такую высоту поднятия груза, при которой, падая, груз забьет сваю в разрезанную втулку немного не до конца.

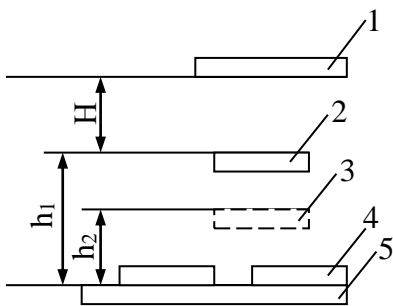


Рис. 16

2. Проведите первую серию измерений. Для этого:

- а) высота H подъёма груза 1 максимально возможная, высота положения сваи 3 максимально возможная, расстояние гири 7 от центра сваи $\ell = 200$ мм;
 - запишите в таблицу 1 значения H, h_1 ;
 - проведите однократную забивку сваи 3 грузом 1, измерьте величину h_2 и запишите в таблицу 2;
 - повторите предыдущую операцию не менее 5 раз;
 - рассчитайте среднеарифметическое значение $h_{2cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{2i}$ и запишите в таблицу 1;

- вычислите величину S и запишите в таблицу 1;

- вычислите среднюю силу сопротивления грунта забивке сваи по формуле (11) и запишите ее значение в таблицу 1.

Проведите аналогично следующие 4 серии измерений и рассчитайте в каждой серии величину средней силы сопротивления грунта забивке сваи:

- б) высота H подъёма груза меньше, чем в предыдущем случае, на 2,5 см, высота h_1 прежняя, расстояние ℓ прежнее;
- в) высота H подъёма груза 1 меньше, чем в предыдущем случае, на 2,5 см, высота h_1 прежняя, расстояние ℓ прежнее;
- г) высота H подъёма груза 1 максимально возможная, как и в случае а), высота h_1 прежняя, расстояние $\ell = 250$ мм;

д) высота H подъёма груза 1 максимально возможная, высота h_1 прежняя, расстояние $\ell = 300$ мм.

3. Вычислите погрешность в определении F_{cp} по методике расчета погрешности косвенных измерений:

$$\Delta F_{cp} = \frac{m_1^2 H g}{(m_1 + m_2) S} \sqrt{\left(\frac{\Delta H}{H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2}. \quad (13)$$

Принять $\Delta H = 0,5$ мм; $\Delta S = 0,5$ мм.

4. Проведите расчет $\delta = \frac{\Delta W}{W_0}$ (относительное уменьшение кинетической энергии системы).

5. Постройте графики зависимостей $F_{cp} = f(H)$ при $\ell = const$ и $F_{cp} = f(\ell)$ при $H = const$.

6. Проведите анализ этих графиков на предмет зависимости средней силы сопротивления грунта забивке свай от высоты подъёма груза H и расстояния ℓ .

7. Сделайте выводы.

$$m_1 = 458 \text{ г.}$$

$$m_2 = 76 \text{ г.}$$

Таблица 1

№ серии измерений	ℓ (м)	h_1 (м)	H (м)	h_{2cp} (м)	$S = h_1 - h_{2cp}$ (м)	F_{cp} (Н)
1	0,2					
2	0,2					
3	0,2					
4	0,25					
5	0,30					

Таблица 2

Измерения	1-я серия	2-я серия	3-я серия	4-я серия	5-я серия
1					
2					
3					
4					
5					
Среднее значение h_{2cp}					

Контрольные вопросы

1. Какой удар называется неупругим?
2. Можно ли и каким образом вычислить энергию деформации груза и свай?

3. Можно ли считать систему «груз-свая» замкнутой? Почему?
4. От чего зависит коэффициент полезного действия копра? Как сделать его максимальным?
5. Зависит ли сила сопротивления $F_{\text{ср}}$ от высоты подъема груза H_1 ?
6. Поясните методику получения расчетной формулы для средней силы сопротивления грунта.

Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 1: [текст]; Учеб.пособие для студентов всех форм обучения техн. направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 67 с.
2. Борисовский, В.В. Механика жидкостей и газов (теория и практика) [текст]: Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2014. - 43 с.
3. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=34
4. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб.: Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=38
5. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПРОВОЛОКИ НА ПРИБОРЕ ЛЕРМАНТОВА

Цель работы: изучение упругой деформации тела и определение модуля Юнга для стальной проволоки.

Приборы и принадлежности: прибор Лермантова, набор грузов, микрометр, линейка.

Теоретическое введение

Возьмём однородный стержень и приложим к его основаниям A и B растягивающие или сжимающие силы F (рис. 17, а, б). Стержень будет деформирован, то есть растянут или сжат. Мысленно проведем произвольное сечение C , перпендикулярное к оси стержня. Для равновесия стержня AC необходимо, чтобы на его нижнее основание C действовала сила $F_1 = F$. Это есть сила, с которой нижняя часть стержня BC тянет верхнюю или давит на нее. Такая сила возникает потому, что нижняя часть стержня деформирована и действует на нижнюю с силой, равной F_1 и противоположно направленной.

Такие силы действуют в любом поперечном сечении растянутого или сжатого стержня. Таким образом, деформация стержня связана с возникновением упругих сил, с которыми каждая часть стержня действует на другую, с которой она граничит. Силу, отнесенную к единице площади поперечного сечения стержня, называют **напряжением**. В рассматриваемом случае напряжение перпендикулярно поперечному сечению стержня. Если стержень растянут, то это напряжение называется **натяжением** и определяется выражением:

$$T = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения стержня.

Если же стержень сжат, то напряжение называется **давлением** и численно определяется по формуле:

$$P = \frac{F}{S}. \quad (2)$$

Давление можно рассматривать как отрицательное натяжение и наоборот, то есть:

$$P = -T.$$

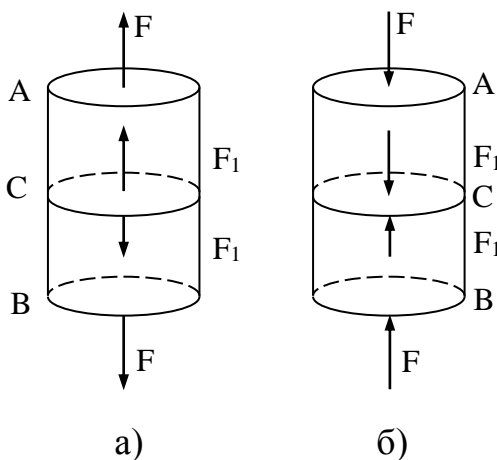


Рис. 17

Пусть l_0 – длина недеформированного стержня. После приложения силы F его длина получает приращение Δl и делается равной $l = l_0 + \Delta l$. Отношение:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

называется **относительным удлинением стержня**. Относительное удлинение, взятое с противоположным знаком, называется **относительным сжатием**. Опыт показывает, что для не слишком больших упругих деформаций натяжение T или давление P пропорционально относительному удлинению (или относительному сжатию). Это утверждение выражает закон Гука для деформаций растяжения или сжатия стержней и записывается как:

$$T = E \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{и} \quad P = -E \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (2,а)$$

Здесь E – постоянная, зависящая только от материала стержня и его физического состояния. Она называется модулем Юнга и выражается формулой:

$$E = T \frac{l_0}{\Delta l} = \frac{F}{S} \cdot \frac{l_0}{\Delta l}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что модуль Юнга равен такому натяжению, при котором длина стержня удваивается, то есть:

$$E = \frac{F}{S} \quad \text{при} \quad \Delta l = l_0.$$

Описание прибора

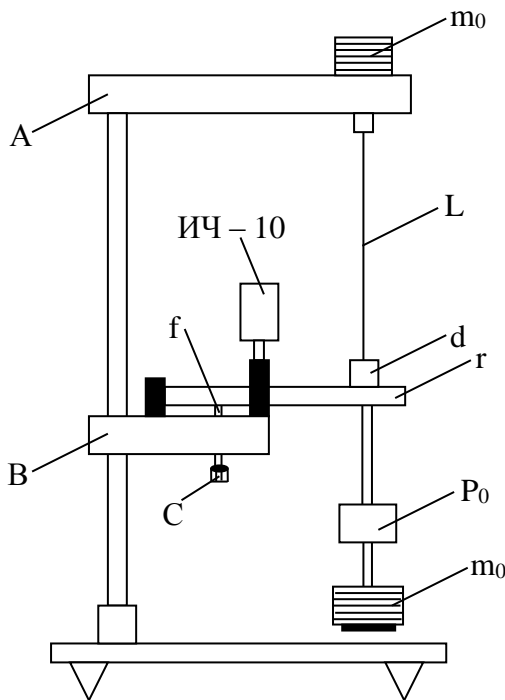


Рис. 18

проволоки рычаг r опускается и стрелка часового индикатора показывает

величину, пропорциональную этому удлинению. Щуп индикатора расположен от центра вращения рычага r на расстоянии a , а от проволоки на расстоянии b . Для предохранения проволоки от ненужных толчков и разрыва в приборе используется арретир f , который укреплен на кронштейне B . Ввертывая винт C арретира f , можно освободить проволоку от нагрузки. При настольном исполнении прибора использование арретира обязательно!

Грузы, необходимые для растяжки проволоки, хранятся на специальном подвесе кронштейна A . Для растяжения проволоки L грузы поочередно подвешиваются на ось груза P_0 . Этим достигается постоянство нагрузки на верхний кронштейн A и, тем самым, постоянство прогиба последнего.

Нагружение проволоки и снятие нагрузки необходимо всегда проводить очень осторожно или же для предосторожности использовать арретир.

Для определения модуля Юнга стальной проволоки необходимо знать результирующую массу установленных для растяжения проволоки грузов и измерить удлинение Δl проволоки при её растяжении. Удлинение Δl в приборе находят с помощью индикатора часового типа. В начальном состоянии, когда проволока только выпрямлена грузом P_0 , необходимо вращением оправы индикатора установить нулевое положение стрелки прибора N_0 . После подвешивания к проволоке груза массой m проволока растянется на величину Δl , рычаг r опустился и стрелка часового индикатора покажет величину перемещения рычага ΔN в месте нахождения щупа индикатора. На рис. 19 – взаимное расположение рычага r , часового индикатора ИЧ-10 и цилиндра d с проволокой L . При растяжении проволоки и опускании рычага r величину удлинения проволоки Δl можно найти, рассматривая два подобных треугольника (рис. 20).

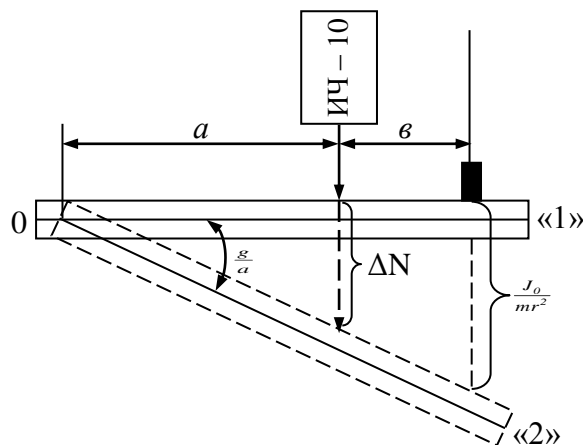


Рис. 19

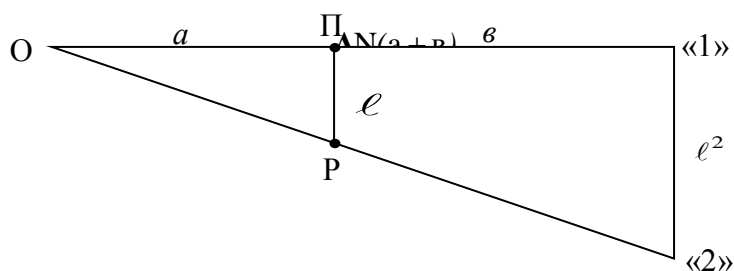


Рис. 20

Здесь a – расстояние от оси вращения рычага r до щупа микрометра, b – расстояние от щупа микрометра до исследуемой проволоки. $a = 104$ мм; $b = 25$ мм.

Подставив значения $\Delta\ell$ из (4) в (3) и заменив площадь поперечного сечения проволоки выражением:

$$S = \frac{\pi D^2}{4},$$

где D – диаметр проволоки, получаем окончательную формулу для определения модуля Юнга:

$$E = F \frac{4\ell_0 a}{\pi D^2 (a + b) \Delta N}, \quad (5)$$

где a – расстояние от оси вращения 0 рычага r до щупа индикатора, $a = 104$ мм; b – расстояние от щупа индикатора до проволоки ($b = 25$ мм), D – диаметр проволоки, ℓ_0 – длина исследуемой проволоки $\ell_0 = 0,75$ м, $\Delta N = N - N_0$ – величина перемещения рычага в месте нахождения щупа индикатора, $F = mg$ – величина силы растягивающего груза, m – масса груза, g – ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с².

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Установите прибор вертикально с помощью регулировочных ножек на основании прибора.

2. Поместите все пять грузов сверху прибора на специальном держателе.

3. Опустите винтом C арретир f , установите нулевое положение стрелки микрометра часового типа вращением циферблата прибора.

4. Поднимите арретир винтом C и нагрузите проволоку грузом массы $m_1 = 100$ г. Опустите арретир и отметьте деление шкалы микрометра N_1 .

5. Снимите груз m_1 и вновь определите нулевую точку по шкале N_0 . Если нулевая точка не совпадает с прежней, возьмите среднее значение из двух показаний:

$$N_{cp} = \frac{N_0 + N'_0}{2}.$$

Так же поступите при следующих нагрузках.

6. Нагружайте последовательно проволоку грузами массы $m_2, m_3 \dots m_5$, увеличивая каждый раз на 100 г, и доведите общую массу до 0,5 кг.

7. Измерьте при опущенном арретире диаметр проволоки в трех различных местах: сверху, посередине, внизу по три раза (в направлениях под 120° друг к другу). Искомое значение диаметра определяется как среднее арифметическое из 9 значений ($D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i$).

8. Измерьте при опущенном арретире f длину проволоки от верхнего закрепления до цилиндра d .

9. Все данные запишите в таблицу 1.

10. Рассчитайте E по формуле (5) для каждой нагрузки. Искомое значение E получите как среднеарифметическое. Выразите E в единицах давления H/m^2 .

11. Рассчитайте абсолютную погрешность ΔE в определении модуля Юнга методом расчета погрешностей прямых измерений. Окончательный результат запишите в виде:

$$\Delta E = \bar{E} \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \ell}{\ell_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2};$$

$$\Delta F = 0,005 \text{ Н}; \quad \Delta \ell = 0,005 \text{ м};$$

$$E = E \pm \Delta E.$$

Вычислите относительную погрешность γ в измерении E .

$$\gamma = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%.$$

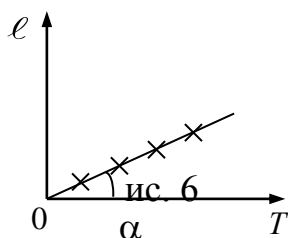


Рис. 21

12. Постройте график зависимости удлинения проволоки $\Delta \ell$ от натяжения $T = \frac{F}{S}$, то есть $\Delta \ell = f(T)$ (рис. 21).

13. Определите модуль Юнга проволоки из построенного графика $\Delta \ell = f(T)$ как отношение начальной длины проволоки ℓ_0 к угловому коэффициенту

$\Delta \ell / T$:

$$\frac{\Delta \ell}{T} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\ell_0}{E}; \quad E = \frac{\ell_0}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

14. Определите модуль Юнга из построенного графика зависимости и сравните его значение со средним значением модуля Юнга, полученным с использованием формулы (5).

Таблица 1

№ п/п	$F = mg$ [Н]	N_0 [мм]	N_1 [мм]	$N_1 - N_0$ [мм]	ℓ_0 [мм]	D [мм]	$\Delta \ell$ [мм]	E Н/м ²	E из графика Н/м ²
1									
2									
3									
4									
5									

15. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие деформации называются упругими и в чем сущность закона Гука?
2. Можно ли для растяжения проволоки брать грузы любого веса? Как выбрать наибольший вес?
3. Почему длину проволоки измеряют грубо по сравнению с диаметром проволоки?
4. Каков физический смысл модуля Юнга?
5. Что такое пределы пропорциональности, упругости и прочности?

Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 1: [текст]; Учеб.пособие для студентов всех форм обучения техн. направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 67 с.
2. Борисовский, В.В. Механика жидкостей и газов (теория и практика) [текст]: Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2014. - 43 с.
3. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34
4. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб.: Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38
5. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИЗУЧЕНИЕ УПРУГОГО И НЕУПРУГОГО УДАРА ШАРОВ

Цель работы: с помощью установки для изучения упругого и неупругого удара шаров ФПМ – 08 изучить законы сохранения импульса и механической энергии, определить время соударения и энергию деформации.

Приборы и принадлежности: установка для изучения упругого и неупругого удара шаров ФПМ – 08 ПС, сменные части: шар диаметром 30 – 2 шт., шар диаметром 25 – 1 шт., шар диаметром 30 – 1 шт., шар диаметром 35 – 4 шт., шар пластилиновый – 2 шт., пресс-форма, микросекундомер, весы разновесные.

Теоретическое введение

Общий вид установки изображен на рис. 22.

Установка представляет собой настольный прибор, выполненный на едином основании 1 с регулируемыми опорами 3.

На вертикальной стойке 2 закреплены верхний 5 и нижний 6 кронштейны.

На верхнем кронштейне находится винтовой механизм 7 изменения межцентрового расстояния шаров, приводимый в движение ручкой 8 и фиксируемый гайкой 9.

Маятник левый 10 и маятник правый 11 состоят из металлического (пластилинового) шара 12 с нониусом 13, закрепленного при помощи крючка 14,

траверсов 15 и токоведущих бифилярных проводов на штанге 16. Для уменьшения трения бифилярный подвес крепится на штанге при помощи призматических опор 17.

Винтовой механизм 7 осуществляет изменение межцентрового расстояния за счет перемещения штанг левого маятника, что используется при установке шаров разного диаметра.

На нижнем кронштейне закреплены левая 18 и правая 19 шкалы, каждая из которых может перемещаться в определенных пределах по плите кронштейна при установке нониуса шара на «0» и фиксироваться в выбранном положении при помощи винтов. Правая шкала служит для определения угла бросания шара, левая – для определения угла отскока после удара.

На правой шкале крепится электромагнит 20 с регулируемым усилием. Регулировка усилия осуществляется винтом 21. Электромагнит может перемещаться вдоль шкалы и фиксироваться гайкой 22 в выбранном

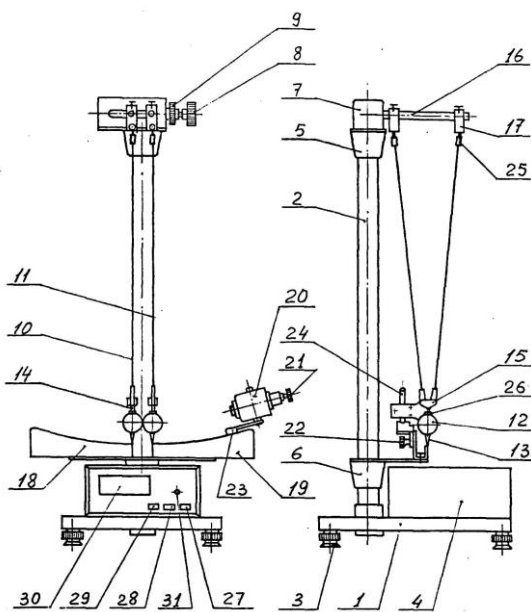


Рис. 22

положении. Конструкция кронштейна 23 крепления электромагнита предусматривает также возможность его перемещения по вертикали вдоль стержня 24 и вокруг него. Электромагнит служит для удерживания правого шара в выбранном положении.

Бифилярный подвес снабжен зажимным устройством 25, при помощи которого осуществляется регулировка и фиксация выбранной длины нити подвеса.

Каждый шар снабжен устройством винт-гайка 26, при помощи которого можно в небольших пределах (5 – 8 мм) менять положение шара по вертикали за счет изменения положения крючка 14.

На общем основании 1 крепится микросекундомер физический 4, предназначенный для замера времени соударения металлических шаров и для питания электромагнита 20. На передней панели микросекундомера находятся кнопки СЕТЬ 27, СБРОС 28, ПУСК 29, индикаторная панель времени 30 и сигнальная лампочка ПЕРЕПОЛНЕНИЕ 31. Включение электромагнита происходит одновременно с нажатием кнопки включения сети 27. Нажатием кнопки пуска 29 осуществляется обесточивание электромагнита. Микросекундомер фиксирует время только одного (первого) соударения.

Принцип работы установки основан на изучении удара, как совокупности явлений, возникающих при кратковременном приложении к телу внешних сил, на примере соударения шаров, подвешенных на бифилярных подвесах.

Применяя к ударяющимся шарам закон сохранения импульса, можем написать:

для упругого удара:

$$m_1 V_1 = m_1 V'_1 + m_2 V'_2; \quad (1)$$

для абсолютно неупругого удара:

$$m_1 V_1 = (m_1 + m_2) U, \quad (2)$$

где m_1 – масса правого шара;

m_2 – масса левого шара;

V'_1 ; V'_2 – скорости шаров после упругого удара;

V_1 – скорость правого шара до удара;

U – общая скорость шаров после абсолютно неупругого удара.

1 метод:

Скорости шаров до и после удара можно определить из следующих выражений:

$$V_1 = 2\sqrt{gl} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{\text{оп}}}{2}\right), \quad (3)$$

$$V'_1 = 2\sqrt{gl} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right), \quad (4)$$

$$V'_2 = 2\sqrt{gl} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_2}{2}\right), \quad (5)$$

$$U = 2\sqrt{g\ell} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right), \quad (5, a)$$

где U – скорость движения шаров после неупругого соударения;
 ℓ – расстояние от точки подвеса до центра тяжести шаров;
 $\alpha_{\text{бр}}$ – угол бросания;

α_1 ; α_2 – углы отскока правого и левого шаров.

Из выражений (1) и (2) для упругого удара имеем:

$$V_2' = \frac{m_1 V_1 - m_1 V_1'}{m_2}, \quad (6)$$

а для неупругого:

$$U = \frac{m_1 V_1}{m_1 + m_2}, \quad (7)$$

$$U = 2\sqrt{g\ell} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right),$$

где α_3 – угол отскока шаров после неупругого соударения.

Используя результаты эксперимента, по формулам 3, 4, 5 определить скорости V_1 , V_1' , V_2' и проверить, удовлетворяют ли они закону сохранения импульса (формула 1).

2 метод:

Скорости шаров до удара можно определить, учитывая время движения шара до соударения t и углы бросания $\alpha_{\text{бр}}$. С другим шаром (левым) см. рисунок 23:

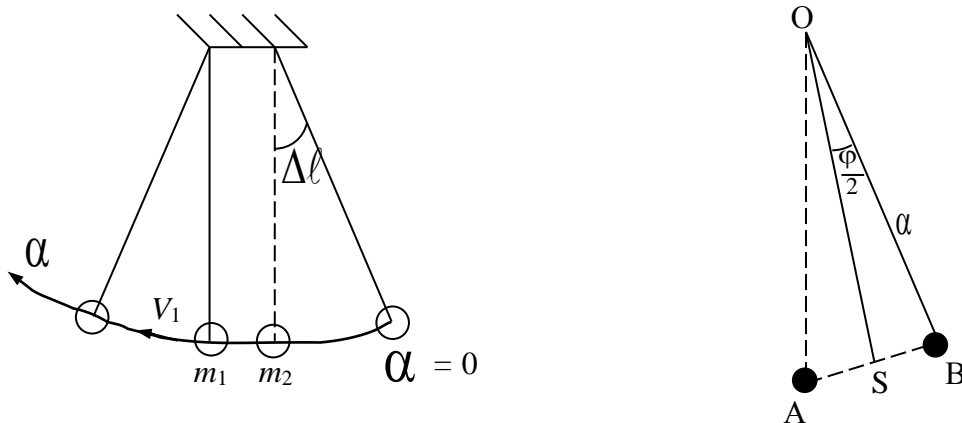


Рис. 23

$$\text{Из } \triangle AOB \Rightarrow \frac{S/2}{\ell} = \sin \frac{\alpha_{\text{бр}}}{2}.$$

$$S = 2\ell \sin \frac{\alpha_{\text{бр}}}{2}, \quad (1, a)$$

где S – длина дуги окружности.

Шар 1 движется до соударения равноускоренно $S = \frac{at^2}{2}$; $V_1 = V_{0_1} + at \Rightarrow$

$$S = \frac{V_1 \cdot t}{2}. \quad (2,a)$$

Решая совместно (1,a, 2,a), получим:

$$\frac{V_1 \cdot t}{2} = 2\ell \sin \frac{\alpha_{\text{бп}}}{2};$$
$$V_1 = \frac{4\ell}{t} \cdot \sin \frac{\alpha_{\text{бп}}}{2}. \quad (3,a)$$

Сравнить скорость V , используя формулу (3) и (3,a).

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Расположить установку на столе и добиться устойчивого положения ее основания при помощи регулировочных опор, используя в качестве отвеса бифилярные подвесы маятников.

2. На траверсы 15 подвесить два металлических шара и установить необходимое межцентровое расстояние (шары касаются друг друга) ручкой 8.

3. При помощи зажимного устройства 25 установить необходимую длину бифилярных подвесов 10, 11 и положение шаров таким образом, чтобы нониусы 13 шаров находились в одной вертикальной плоскости со шкалами 18 и 19, при этом риски на шарах, находящихся в состоянии покоя, должны быть на одном уровне.

4. Установить шкалы 18 и 19 таким образом, чтобы положение нулей соответствовало положению нониусов 13 шаров, находящихся в покое.

5. Установить положение электромагнита 20 по высоте таким образом, чтобы его ось совпадала с риской подведенного к нему шара.

6. Включить в сеть шнур питания микросекундомера 4.

7. Нажать на кнопку СЕТЬ, расположенную на лицевой панели микросекундомера, при этом должны загореться лампочки цифровой индикации.

8. Отклонить правый шар до соприкосновения с электромагнитом, при этом должно произойти «залипание» шара.

9. Нажать на кнопку СБРОС, при этом на лампочках цифровой индикации должны загореться цифры «0».

10. Нажать на кнопку ПУСК, при этом должен обесточиться электромагнит, произойдет удар шаров и на цифровом индикаторе микросекундомера должно зафиксироваться время соударения (лампочка ПЕРЕПОЛНЕНИЕ гореть не должна). Удар должен быть прямым и центральным, то есть траектории отскока шаров должны находиться в одной вертикальной плоскости.

11. Отклонить правый шар до соприкосновения с электромагнитом (угол $\alpha_{бр}$).

12. Нажать на кнопку СБРОС.

13. Убедившись, что левый шар находится в состоянии покоя, нажать на кнопку ПУСК.

14. Записать показания микросекундомера.

15. Повторить пункты 1 – 3 и определить угол отскока левого шара по шкале.

16. Повторить пункты 1 – 3 и определить угол отскока правого шара по шкале.

17. Снять металлические шары и на их место повесить пластилиновые таким образом, чтобы их металлические вставки были со сторон, противоположных точке касания.

18. Снять левый маятник вместе с двумя призмными опорами с левой штанги и закрепить на правый таким образом, чтобы опора левого маятника находилась между опорами правого маятника.

19. Отрегулировать положение шаров по высоте таким образом, чтобы при соударении получить прямой центральный удар.

20. Левую шкалу передвинуть до соприкосновения с правой.

21. Повторить пункты 1 – 3 и определить угол отскока обоих шаров (при соударении должно произойти «залипание» шаров друг к другу).

22. Измерения проделать пять раз и определить среднее значение времени и углов отскока.

23. Повторить опыты два раза при изучении упругого и неупругого ударов, сменив при этом шары другой массы.

24. Определить массы шаров путем взвешивания на весах с точностью 0,1 г.

25. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1, 2.

26. Проверить, используя результаты эксперимента, удовлетворяют ли они закону сохранения импульса.

Таблица 1

Упругий удар

№	ℓ	$\alpha_{бр}$	α_1	α_2	m_1	m_2	t	V_1	V'_1	V'_2
1										
2										
3										
4										
5										
1										
2										
3										
4										
5										

Неупругий удар

№	l	$\alpha_{\text{оп}}$	α_3	m_1	m_2	t	V_1	U
1								
2								
3								
4								
5								
1								
2								
3								
4								
5								

Контрольные вопросы

1. Что такое упругий, неупругий удары?
2. Потери энергии на деформацию при неупругом ударе. Рассчитать её, используя результаты измерений.
3. Получить выражения скорости шаров до удара (формула 3).
4. Как определить скорости тел после центрального абсолютно упругого удара?
5. Что такое коэффициент восстановления?

Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 1: [текст]; Учеб.пособие для студентов всех форм обучения техн. направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 67 с.
2. Борисовский, В.В. Механика жидкостей и газов (теория и практика) [текст]: Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2014. - 43 с.
3. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34
4. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб.: Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38
5. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ ГАЗОВ (C_p/C_v) СПОСОБАМИ ДЕЗОРМА И КЛЕМАНА

Цель работы: определить отношение теплоемкостей (C_p/C_v).

Приборы и принадлежности: стеклянный баллон, U – образный манометр, ручной насос, электронный секундомер.

Теоретическое введение

Теплоёмкостью называется количество теплоты, которое необходимо сообщать телу для изменения его температуры на 1 К.

Теплоёмкость, отнесенная к единице массы вещества, называется **удельной теплоёмкостью**, а отношение теплоёмкости к молю – **молярной** или **мольной теплоёмкостью**.

По определению теплоёмкость:

$$C = \frac{dQ}{dT}. \quad (1)$$

Газ, получая (или отдавая) тепло, изменяет свой объем и совершает работу, а также изменяет свою внутреннюю энергию.

По первому началу термодинамики:

$$dQ = dU + dA, \quad (2)$$

где dQ – теплота, переданная газу,
 dU – изменение внутренней энергии газа,
 dA – работа, совершенная газом.

Элементарная работа, совершенная газом при изменении его объема, определяется:

$$dA = pdV, \quad (3)$$

где p – давление газа,
 dV – изменение объёма.

Теплоёмкость одного моля газа найдём, используя уравнения (1) и (2).

$$C = \frac{dU}{dT} + \frac{dA}{dT}, \quad (4)$$

или

$$C = \frac{dU}{dT} + \frac{pdV}{dT}. \quad (4,a)$$

Так как давление p зависит от объёма V по-разному в зависимости от процесса, то теплоёмкость для различных процессов будет неодинакова.

При **изохорном процессе** $V = const$, $dV = 0$ ($dA = 0$), а поэтому молярная теплоёмкость газа, сохраняющего неизменным объём:

$$C_V = \frac{dU}{dT}. \quad (5)$$

При *изобарном процессе* остается неизменным давление газа, то есть $p = const$. Величину pdV найдём, используя уравнение Менделеева-Клайперона:

$$pV = RT. \quad (6)$$

Продифференцируем уравнение (6) для случая $p = const$.

$$pdV = RdT. \quad (7)$$

Таким образом, теплоёмкость одного моля газа при постоянном давлении определяется из уравнения (4,а):

$$C_p = \frac{dU}{dT} + \frac{RdT}{dT} = C_V + R. \quad (8)$$

Из уравнения (8) видно, что всегда $C_p > C_V$. Непосредственное определение теплоемкостей довольно затруднительно, особенно C_V . При рассмотрении многих вопросов используется отношение теплоемкости при постоянном давлении (C_p) к теплоёмкости при постоянном объеме (C_V):

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}. \quad (9)$$

Величина этого отношения одинакова как для молярных, так и для удельных теплоёмкостей, так как $C_{p_{\text{мол.}}} = C_{p_{\text{уд.}}} \cdot \mu$ и $C_{V_{\text{мол.}}} = C_{V_{\text{уд.}}} \cdot \mu$, где $C_{p_{\text{мол.}}}$ и $C_{V_{\text{мол.}}}$ – молярные теплоемкости, а $C_{p_{\text{уд.}}}$ и $C_{V_{\text{уд.}}}$ – удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и объеме, соответственно, μ – молярная масса газа.

Отношение удельных теплоёмкостей газов играет очень большую роль при адиабатных процессах и при процессах, близких к ним.

Величиной γ определяется, например, скорость распространения звука в газах, от нее зависит течение газов по трубам со звуковыми скоростями и достижения сверхзвуковых скоростей в расширяющихся трубах.

Адиабатный процесс – процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой. Можно с достаточным приближением рассматривать всякое быстрое изменение объема как процесс адиабатный, и чем быстрее он происходит, тем ближе к адиабатному.

Применим первое начало термодинамики к адиабатному процессу:

$$dQ = 0, \quad dA + dU = 0 \quad \text{или} \quad dA = -dU,$$

то есть при адиабатном процессе работа совершается газом только за счет изменения внутренней энергии.

Выразим dU из уравнения (5), тогда работа газа при адиабатном расширении будет иметь вид:

$$dA = -C_V dT. \quad (10)$$

Используя уравнения (5), (7), (8) и (9), можно получить связь между давлением и объемом при адиабатном процессе:

$$pV^\gamma = \text{const} \text{ (уравнение Пуассона),} \quad (11)$$

где $\gamma = C_p / C_v$ – показатель адиабаты.

$$\gamma = \frac{i + 2}{i},$$

где i – число степеней свободы молекулы.

Показатель адиабаты для одноатомного ($i = 3$), двухатомного ($i = 5$) и многоатомного ($i = 6$) газа будет разным.

Методика определения показателя адиабаты

На рис. 24 представлена схема экспериментальной установки, с помощью которой можно определить показатель адиабаты. Установка состоит из баллона B объемом $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$, водяного манометра M , насоса H , крана A и зажима $Д$.

Стеклянный баллон B соединен с открытым манометром M и насосом H . Если исключить пары воды, то воздух можно рассматривать как двухатомный газ.

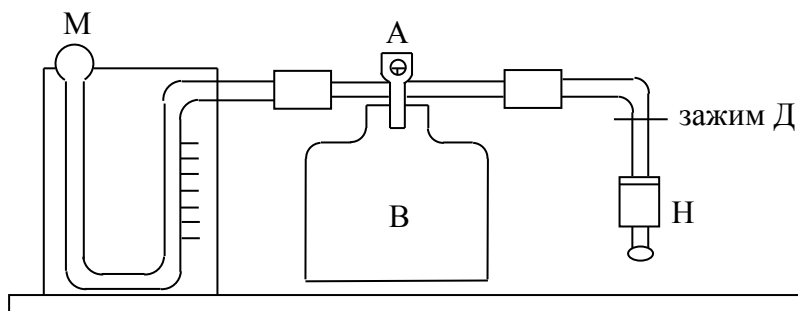


Рис. 24

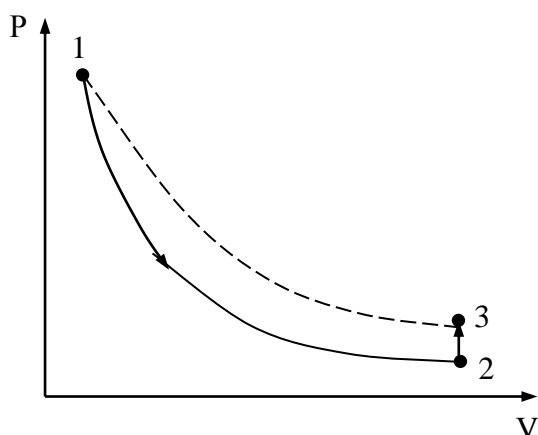


Рис. 25

Насосом H накачивают воздух до тех пор, пока разность уровней жидкости в коленах манометра не станет равной $h = (20 \div 30)$ см. Для предотвращения утечки газа через насос H необходимо зажать резиновую трубку между насосом и краном A специальным зажимом.

При накачивании воздуха температура его в баллоне B увеличивается за счет работы внешних сил, приложенных к поршню. По истечении $1 \div 2$ минут температура воздуха в баллоне за счет теплообмена с

окружающей средой станет равной температуре окружающей среды. Уровень жидкости в коленах манометра перестанет перемещаться, и установится разность уровней h_1 .

Полученное состояние газа в баллоне B характеризуется следующими основными параметрами: V_1 – объём, p_1 – давление, T_1 – температура окружающего воздуха (состояние 1 на рис. 25).

Затем нужно быстро открыть кран A на некоторое время, соединив баллон B с окружающим воздухом, и после того, как давление в баллоне B станет равным атмосферному давлению, кран A закрыть. При достаточном сечении выпускного отверстия процесс расширения газа происходит быстро и его можно считать адиабатным.

Полученное при этом состояние газа в баллоне B характеризуется параметрами: V_2 – объём, p_2 – давление (атмосферное), T_2 – температура. Жидкость в коленах манометра находится на одном уровне (состояние 2 на рис. 25).

Из-за совершения работы газом против внешнего давления температура его уменьшится $T_2 < T_1$. Через $1 \div 2$ минуты после закрытия крана воздух в баллоне нагреется изохорически до комнатной температуры T_1 , давление повысится до величины p_3 (состояние 3), появится разность уровней жидкости в коленах манометра h_2 . Состояние 1 и 2 связаны между собой следующим соотношением:

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (11,а)$$

Состояния же 1 и 3 принадлежат к одной и той же изотерме, поэтому они связаны законом Бойля-Мариотта:

$$p_1 V_1 = p_3 V_2. \quad (12)$$

Из уравнений (11,а) и (12) определим:

$$\left(\frac{p_3}{p_1} \right)^\gamma = \frac{p_2}{p_1}. \quad (13)$$

Чтобы найти γ , необходимо прологарифмировать выражение (13):

$$\gamma = \frac{\ln p_2 - \ln p_1}{\ln p_3 - \ln p_1}. \quad (14)$$

Так как давления p_1 и p_2 отличаются на очень малую величину, то разность логарифмов можно заменить разностью давлений:

$$\gamma = \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3}. \quad (15)$$

Таким образом, для определения γ необходимо определить давление в трех состояниях p_1, p_2, p_3 . В условиях данного опыта p_2 равно атмосферному давлению, когда разность уровней жидкости в коленах манометра равна нулю.

Давление воздуха в баллоне в начальном состоянии (1) равно:

$$p_1 = p_2 + \rho g h_1,$$

где p_2 – атмосферное давление;

ρ – плотность жидкости в манометре;

g – ускорение свободного падения;

h_1 – разность урвненией жидкости в манометре при измерении давления p_1 после того, как температура в баллоне станет равной температуре окружающей среды.

Давление в баллоне в конечном состоянии:

$$p_3 = p_2 + \rho gh_2,$$

где h_2 – разность урвненией жидкости в манометре при измерении давления p_3 . Подставив p_1 и p_3 в уравнение (15), получим:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (16)$$

По формуле (16) можно производить вычисления γ .

Величина h_2 получена в предположении, что кран A закрывается в момент окончания адиабатного процесса 1 – 2, то есть в тот момент, когда давление в баллоне снизится до некоторой величины p'_2 , но ещё не достигнет атмосферного давления p_2 . Как видно из рис. 26, соответствующая разность давлений после осуществления процесса адиабатного расширения и последующего изохорного нагревания определяется разностью ординат 2' – 3' вместо разности ординат 2 – 3, что приведёт к повышению величины γ по сравнению с её действительным значением.

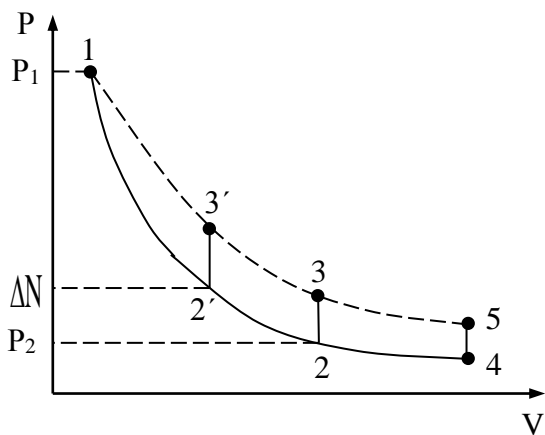


Рис. 26

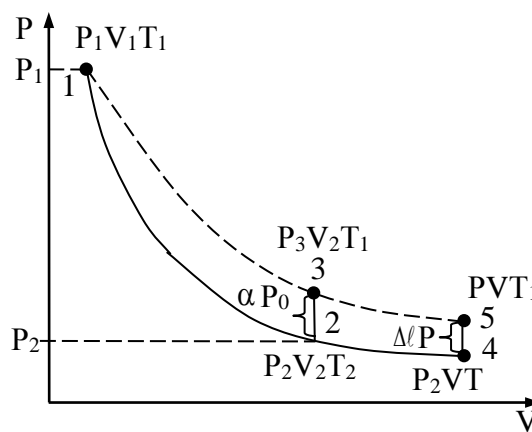


Рис. 27

Если кран закрыть спустя некоторое время после завершения процесса 1 – 2, то за это время температура в баллоне несколько повысится за счет теплообмена с внешней средой (изобарный процесс 2 – 4, происходящий при давлении, равном атмосферному). В этом случае разность давлений, определяемая разностью ординат 4 – 5, окажется заниженной, что приведет к уменьшению γ . Для получения точного результата измерения кран необходимо закрыть в тот момент, когда газ находится в состоянии 2, что практически невозможно. Ввиду этого отрезок ординаты 2 – 3 приходится определять косвенным путем.

Рассмотрим с этой целью процесс, происходящий в баллоне при открытом кране. Предположим, что газ находится в состоянии 1. Открыв кран A , произведем адиабатное расширение. При этом температура газа понизится до температуры T_2 , давление станет равным p_2 (атмосферному) – процесс 1 – 2. Если кран оставить открытым в течение времени τ после окончания процесса 1 – 2, то температура газа в баллоне за это время несколько повысится за счет теплообмена до величины T (изобарный процесс 2 – 4). Закроем кран и оставим баллон на некоторое время, пока температура внутри баллона не станет равной температуре окружающей среды T_1 (изохорный процесс 4 – 5). При этом давление газа в сосуде повысится на величину Δp , которую определим по соответствующей разности уровней $h_{2\tau}$, так как $h_{2\tau}$ измеряем, когда кран был открыт в течение времени τ . С уменьшением τ величина $h_{2\tau}$ стремится к h_2 , то есть к искомому значению. Следовательно, величину h_2 можно определить, имея зависимость $h_{2\tau} = f(\tau)$. Как видно из рис. 27, Δp и $h_{2\tau}$ зависит от τ нелинейно. Любой нелинейный процесс с достаточной степенью точности можно аппроксимировать экспонентой. Следовательно, можно записать:

$$h_{2\tau} = h_2 e^{-a\tau} \Rightarrow \frac{h_{2\tau}}{h_2} = e^{-a\tau}; \quad \ln\left(\frac{h_{2\tau}}{h_2}\right) = -a\tau. \quad (17)$$

При $\tau \rightarrow 0$, $h_{2\tau} \rightarrow h_2$.

Прологарифмируем выражение (17):

$$\ln h_{2\tau} = \ln h_2 - a\tau.$$

Получив на опыте ряд значений $\ln h_{2\tau}$ при различных длительностях процесса расширения, можно построить график $\ln h_{2\tau} = f(\tau)$ (рис. 28). Соединив полученные точки прямой, продолжаем ее до пересечения с осью ординат. Ордината точки пересечения соответствует логарифму искомой величины – $\ln h_2$.

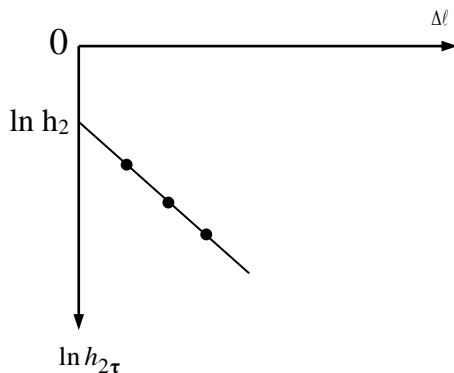


Рис. 28

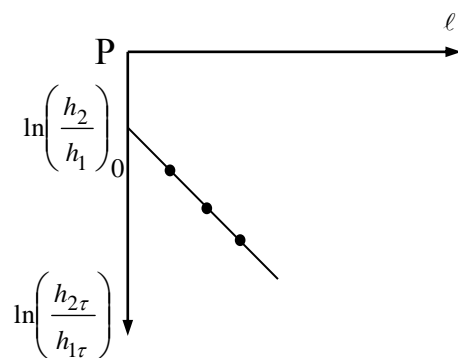


Рис. 29

Потенцируя, найдем искомое значение h_2 . Тогда γ определяется как:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}, \quad (18)$$

так как величина h_2 зависит от h_1 , то при построении графика (см. рис. 28) необходимо иметь всегда или $h_1 = \text{const}$ или выразить h_2 в долях h_1 , то есть взять отношение $\frac{h_2}{h_1}$, тогда:

$$\gamma = \frac{1}{1 - \frac{h_2}{h_1}} \quad (19)$$

и график нужно строить не для $\ln h_{2\tau} = f(\tau)$, а для $\ln \frac{h_{2\tau}}{h_1} = f(\tau)$ (рис. 29).

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Накачайте в баллон воздух до тех пор, пока разность уровней жидкости в манометре не будет равна $20 \div 30$ см. Закройте кран A и подождите 1 – 2 минуты, пока температура внутри баллона не станет равной температуре окружающей среды, а давление в баллоне перестанет изменяться. После этого отсчитайте показания манометра L_1 и L_2 , найдите разность $L_1 - L_2 = h_1$. Запишите в таблицу 1.

2. Откройте кран A , соединяя баллон с атмосферой, и одновременно включите секундомер. Спустя 2 секунды кран закройте. При этом давление в баллоне станет равным атмосферному, а температура понизится. Подождите 1 – 2 минуты, пока температура в баллоне не станет равной комнатной, а давление увеличится, отсчитайте показания манометра l_1 и l_2 , а также $l_1 - l_2 = h_2$.

3. Опыт повторите не менее 5 раз, увеличивая время запаздывания (τ) на 2 секунды (4, 6, 8, 10 с). При этом следите за тем, чтобы начальное давление в баллоне перед открытием крана A было одинаковым, то есть $h_1 = \text{const}$. Для каждого времени (τ) опыт повторить 3 раза. Определить среднее значение по формулам:

$$h_{1cp} = \frac{1}{3} \sum h_{1i}; \quad h_{2cp} = \frac{1}{3} \sum h_{2i}.$$

4. Данные опыта запишите в таблицу 1.

5. По полученным данным постройте на миллиметровой бумаге график (рис. 29), откладывая по оси абсцисс время τ , а по оси ординат соответствующие значение $\ln\left(\frac{h_{2\tau}}{h_1}\right)_{cp}$. Через полученные точки проведите

прямую до пересечения с осью ординат. Точка пересечения $\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right) = f(\tau)$ соответствует процессу, происходящему бесконечно быстро, то есть адиабатному процессу. Потенцируя $\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)$, определите $\frac{h_2}{h_1} = e^{\left(\ln\frac{h_2}{h_1}\right)}$ и $\gamma = \frac{1}{1 - \frac{h_2}{h_1}}$.

Таблица 1

№ опыта	τ , с	L_1 , мм	L_2 , мм	$h_{1\tau}$, мм	l_1 , мм	l_2 , мм	$h_{2\tau}$, мм	$\frac{h_{2\tau}}{h_{1\tau}}$	$\left(\frac{h_{2\tau}}{h_{1\tau}}\right)_{\text{ср}}$	$\ln\left(\frac{h_{2\tau}}{h_{1\tau}}\right)_{\text{ср}}$	γ
1 2 3	2										
1 2 3	4										
1 2 3	6										
1 2 3	8										
1 2 3	10										

6. Определить по формуле (19) отношение теплоёмкостей газов $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.

Сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется адиабатным?
2. Почему теплоемкость газа зависит от способа нагревания?
3. Почему C_p больше C_v ?
4. Почему необходимо определять h_2 при $\tau = 0$?
5. Считая воздух смесью двухатомных газов, рассчитать для него γ .

Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 1: [текст]; Учеб.пособие для студентов всех форм обучения техн. направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 67 с.
2. Борисовский, В.В. Механика жидкостей и газов (теория и практика) [текст]: Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2014. - 43 с.
3. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=34
4. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб.: Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=38
5. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Цель работы: проверка применимости модели идеального газа для воздуха при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Приборы и принадлежности: сосуд с пробкой, в которую вставлен капилляр (рис. 30), мерный сосуд для сбора вытекающей жидкости; измерительная линейка для определения высоты жидкости, электронный секундомер.

Теоретическое введение

Идеальным газом называют систему материальных точек, потенциальная энергия взаимодействия которых пренебрежимо мала по сравнению с их кинетической энергией. Обмен энергией между частицами в таких случаях происходит только в момент удара. В большинстве случаев полагают удар двух частиц абсолютно упругим, без перехода части кинетической энергии в потенциальную энергию возбужденной молекулы или атома.

Подобная модель является приближенной и хорошо отвечает наблюдаемым свойствам газов при выполнении условия $D \ll \langle \lambda \rangle$, где D – эффективный диаметр частиц газа, а $\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега частиц между соударениями.

В молекулярно-кинетической теории газов под эффективным диаметром понимают наименьшее расстояние между частицами, на которое они могут сблизиться при соударении. На первой стадии столкновения микрочастиц (молекул или атомов) их кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию деформированных электронных оболочек. Затем, на последующей стадии, энергия упруго деформированных оболочек переходит в кинетическую энергию разлетающихся частиц. Очевидно, что чем больше кинетическая энергия частиц, тем на меньшее расстояние они могут сблизиться при ударе. Поэтому величина эффективного диаметра молекул газа не является «константой», а зависит от параметров состояния газа (в первую очередь – от температуры).

Молекулярно-кинетическая теория позволила получить формулы, в которых макроскопические параметры газа (давление, объём, температуры) связаны с его микропараметрами (размеры, масса молекулы, её скорость). Пользуясь этими формулами, можно при помощи легко измеряемых макропараметров (давления, температуры, коэффициента внутреннего трения) получить интересующие нас микропараметры.

В данной работе вычисляется средняя длина свободного пробега по коэффициенту внутреннего трения (вязкости).

Из молекулярно-кинетической теории вытекает формула, связывающая вязкость со средней длиной свободного пробега молекулы. Эта формула имеет вид:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle, \quad (1)$$

где η – коэффициент внутреннего трения (вязкости);

ρ – плотность газа;

$\langle \lambda \rangle$ – средняя длина свободного пробега;

$\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул.

С учётом максвелловского распределения молекул по скоростям:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}. \quad (2)$$

Плотность газа ρ при давлении p , температуре T и молярной массе μ :

$$\rho = \frac{\mu p}{RT}. \quad (3)$$

Величину внутреннего трения газа (η) можно определить, используя закон Пуазейля, согласно которому объём газа, протекающего по трубке радиусом r и длиной ℓ за время t , выражается следующим образом:

$$V = \frac{\pi r^4 t \Delta p}{8 \ell \eta}. \quad (4)$$

Комбинируя (1) и (4) с учётом (2) и (3), получаем рабочую формулу для расчета средней длины пробега молекул:

$$\langle \lambda \rangle = 3 \sqrt{\frac{\pi^3 R}{8^3 \mu}} \cdot \frac{r^4 t \Delta p \sqrt{T}}{V \ell p}, \quad (5)$$

где $A = 3 \sqrt{\frac{\pi^3 R}{8^3 \mu}}$.

Учитывая, что $R = 8,31$ Дж/К·моль, $\mu = 0,029$ кг/моль, рассчитываем коэффициент пропорциональности в формуле (5):

$$A = \left[3 \sqrt{\frac{3,14^3 \cdot 8,31}{8^3 \cdot 0,029}} \right] = 12,5 \text{ (Дж/кг·К)}^{1/2}.$$

Таким образом, формула (5) примет следующий вид:

$$\langle \lambda \rangle = A \frac{r^4 t \Delta p \sqrt{T}}{V \ell p}, \quad (6)$$

где r – радиус капилляра;

ℓ – длина капилляра;

p, T – давление и температура воздуха в помещении;

V – объём воздуха, вошедшего в сосуд за время t ;

Δp – разность давлений на концах капилляра (см. формулу 12).

Средняя длина свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ и эффективный диаметр молекулы D связаны между собой соотношением:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi n D^2}, \quad (7)$$

где n – концентрация молекул газа при давлении (p) и температуре (T):

$$\frac{nT}{p} = \frac{n_0 T_0}{p_0}, \quad (8)$$

где $T_0 = 0^\circ \text{C} = 273 \text{ K}$;

$p_0 = 760 \text{ мм рт.ст} \approx 10^5 \text{ Па}$;

$n_0 = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ – число Лошмидта, то есть концентрация молекул при нормальных условиях (p_0, T_0).

Эффективный диаметр молекулы воздуха (D) можно вычислить из формулы (7), выражающей его связь с длиной свободного пробега ($\langle \lambda \rangle$). С учётом соотношения (8), получим:

$$D = \sqrt{\frac{p_0 T}{\sqrt{2} \pi \langle \lambda \rangle T_0 n_0 p}}. \quad (9)$$

Методика измерения и описания экспериментальной установки

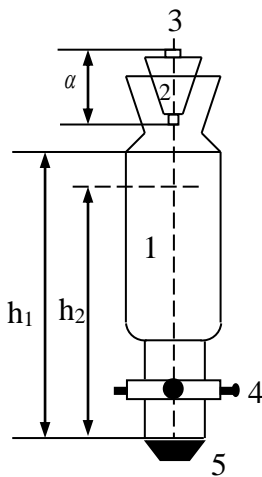


Рис. 30

Фактическая задача определения $\tilde{\lambda}$ сводится к определению коэффициента внутреннего трения η воздуха. Схема используемого устройства приведена на рис. 30. Сосуд 1 заполнен водой и закрыт пробкой 2, через которую проходит капиллярная трубка 3. При закрытом кране 4 давление воздуха над жидкостью равно атмосферному, так как сосуд сообщается с атмосферой через капилляр. Как только кран открывается, начинается истечение жидкости непрерывной струей до тех пор, пока сумма давлений воздуха над жидкостью (p_1) и гидростатического давления жидкости внутри сосуда на уровне отверстия (ρgh) не станет равной атмосферному ($p_{\text{атм}}$), то есть

$$p_1 + \rho gh = p_{\text{атм}}. \quad (10)$$

С этого момента жидкость будет выливаться отдельными каплями. В капилляр будет засасываться воздух, так как концы капилляра будут находиться под разным давлением (верхний – под атмосферным, а нижний – под давлением газа внутри сосуда p_1). Разность давлений на концах капилляра с учётом (10):

$$\Delta p_{\text{атм}} = p_{\text{атм}} - p_1 = \rho gh. \quad (11)$$

Так как площадь сечения сосуда 1 велика, а объём вытекающей жидкости будет незначительным, поэтому в качестве Δp можно взять среднюю разность давления на концах капилляра в начале и в конце истечения жидкости:

$$\Delta p = \rho g \frac{h_1 + h_2}{2}, \quad (12)$$

где $\rho - 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды;

h_1, h_2 – высота уровня жидкости (см. рис. 30).

Радиус капилляра измеряют с помощью микрометра. Температуру и атмосферное давление воздуха измеряют термометром и барометром, установленными в помещении лаборатории.

Объём воздуха, вошедшего в сосуд, равен объёму вытекшей жидкости и определяется мерным сосудом.

Порядок выполнения работы

1. Закройте кран 4 и заполните сосуд водой так, чтобы поверхность воды не касалась капиллярной трубки. Плотно закройте сосуд пробкой 2.

2. С помощью линейки измерьте высоту h_1 столба жидкости – от уровня конца сосуда до уровня поверхности воды.

3. Установите сосуд (5), откройте кран 4 и дождитесь момента, когда струя вытекающей воды начинает разбиваться на капли. Быстро замените сосуд с водой и одновременно включите секундомер. Отметьте время наполнения 50 мм воды.

Примечание: при отсутствии мерного стакана объём рассчитайте по формуле

$V = \frac{m}{\rho}$, где $\rho - 1000 \text{ кг/м}^3$, m – масса вытекшей жидкости.

4. Измерьте высоту h_2 . По формуле (12) рассчитайте Δp .

5. Запишите показания термометра и барометра (в единицах СИ). Повторите опыт ещё 2 раза по п. 1-4.

6. По формуле (6) рассчитайте $\langle \lambda \rangle$, используя средние арифметические значения Δp , r и V . Затем по формуле (9) оцените величину эффективного диаметра молекул воздуха.

7. Определите погрешность измерения. Запишите результат с погрешностью.

8. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

9. Сделайте вывод по работе.

Таблица 1

№ п/п	h_1	h_2	ΔP	t	r	V	T	P	ℓ	$\langle \lambda \rangle$	D
	м	м	Па	С	м	м ³	К	Па	м	м	м
1											
2											
3											
Среднее значение											

$r = 0,16$ мм – радиус капилляра

Контрольные вопросы

1. Что называется эффективным диаметром молекул?
2. Почему величина эффективного диаметра молекул зависит от температуры и давления?
3. От каких физических величин зависит коэффициент внутреннего трения газа?
4. Почему погрешность измерения радиуса капилляра должна быть наименьшей из погрешностей всех величин, входящих в формулу (8)?
5. Выведите формулу (1), связывающую длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул.

Список литературы

1. Борисовский, В.В. Краткий курс физики. Часть 1: [текст]; Учеб.пособие для студентов всех форм обучения техн. направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2013. - 67 с.
2. Борисовский, В.В. Механика жидкостей и газов (теория и практика) [текст]: Учебное пособие для студентов всех форм обучения технических направлений/ В.В. Борисовский. - Рубцовск: РИИ, 2014. - 43 с.
3. Бухман, Н.С. Упражнения по физике. — СПб. : Лань, 2008. — 96 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=34
4. Валишев, М.Г. Курс общей физики / М.Г. Валишев, А.А. Повзнер. — СПб.: Лань, 2010. — 574 с. [ЭР] http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38
5. Ремизов, А.Н. Курс физики: [текст]: Учебник/ А.Н. Ремизов, А.Я. Потапенко. - М.: Дрофа, 2006. - 720 с.

Бахмат Владимир Ильич
Борисовский Василий Васильевич

МЕХАНИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Методические указания к выполнению лабораторных работ
по физике для студентов очной и заочной форм обучения
всех технических направлений

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 15.12.15. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 3,94. Тираж 120 экз. Заказ 151511. Рег. № 141

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.