

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра математики и естествознания

С.М. Ожегова

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

для студентов направлений подготовки
09.03.03 Прикладная информатика
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
15.03.02 Технологические машины и оборудование
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
22.03.02 Metallургия
18.03.01 Химическая технология
38.03.01 Экономика
очной и заочной форм обучения

Новотроицк, 2020 г.

УДК 53
ББК 22.3
О – 45

Рецензенты:

Гюнтер Д.А., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и естествознания Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Саблин А.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории улавливания химических продуктов коксования АО «Восточный научно-исследовательский углехимический институт»

Ожегова С.М. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика: лабораторный практикум по физике. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2020. - 52 с.

Данный лабораторный практикум предназначен для студентов направлений подготовки 09.03.03 Прикладная информатика, 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.02 Технологические машины и оборудование, 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, 22.03.02 Metallургия, 18.03.01 Химическая технология, 38.03.01 Экономика, очной и заочной форм обучения.

Пособие составлено в соответствии с программой курса «Физика» для студентов указанных направлений подготовки и предназначено для проведения в первом семестре лабораторного практикума.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",
Новотроицкий филиал, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Правила работы студентов в учебной физической лаборатории	5
<i>Лабораторная работа №1. Определение ускорения свободного падения с помощью универсального маятника</i>	<i>7</i>
<i>Лабораторная работа №2. Изучение основного закона динамика вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси</i>	<i>17</i>
<i>Лабораторная работа №3. Изучение законов динамики на приборе Атвуда.....</i>	<i>25</i>
<i>Лабораторная работа №4. Изучение упругого и неупругого ударов шаров.....</i>	<i>32</i>
<i>Лабораторная работа №5. Определение отношений удельных теплоемкостей газа методом адиабатического расширения</i>	<i>42</i>
<i>Библиографический список.....</i>	<i>51</i>

ВВЕДЕНИЕ

В процессе проведения физического практикума необходимо научить студента творчески подходить к исследовательской работе, правильно выбирать методику эксперимента и измерительные приборы.

Студент должен научиться понимать и применять теорию изучаемого явления.

Сознательное выполнение эксперимента, внимательность и сосредоточенность на процессе измерений, бережное отношение к приборам – необходимые условия успешного проведения опыта.

Предлагаемое методическое пособие предназначено для подготовки и выполнения лабораторных работ студентами технических и экономических специальностей очной и заочной форм обучения по курсу общей физики «Механика. Молекулярная физика. Термодинамика».

Лабораторный практикум содержит 5 лабораторных работ, выполняемых студентами первого курса. Темы лабораторных работ, включенных в настоящий практикум, посвящены физическим основам механики, молекулярно-кинетической теории газов, физики жидкого состояния, термодинамике. Студенты очной формы обучения выполняют все работы, студенты заочной формы обучения – две, по выбору преподавателя (название выбранных работ фиксируется в программе данного учебного года). Каждая работа содержит теоретическое введение, описание установки, методические рекомендации по выполнению и обработке результатов измерений, а также указания по технике безопасности и охране труда.

Теория изучается по учебникам, лекциям и «Методическому пособию». В тексте встречаются ссылки на «Курс физики» Трофимовой Т.И., «Курс общей физики» Савельева И.В. с указанием соответствующего тома и параграфа.

Формулы, на которые есть ссылки в тексте, имеют порядковые номера в пределах каждой главы. Все формулы выведены в Международной системе единиц (СИ). Студентам рекомендуется все расчеты производить в этой системе.

ПРАВИЛА РАБОТЫ СТУДЕНТОВ В УЧЕБНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

1. Лабораторные занятия требуют подготовленности к работе, строгой дисциплины, тщательного соблюдения правил техники безопасности и правил работы в учебной физической лаборатории.

2. Студент обязан знать цель и содержание работы, схему и принцип действия экспериментальной установки, иметь оформленный соответствующим образом лабораторный журнал.

3. Без лабораторного журнала и конспекта студент к выполнению лабораторной работы не допускается.

4. В течении семестра студент выполняет лабораторные работы в порядке, указанном в маршрутном листе.

5. На занятии студент должен получить допуск к выполнению лабораторной работы, выполнить все измерения, оформить отчет и защитить работу. В виде исключения защита может быть перенесена на следующее лабораторное занятие. Студент, не защитивший две лабораторные работы, к выполнению третьей не допускается.

6. Преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов. Студент отвечает на заданные вопросы (письменно в черновике конспекта или устно).

7. Преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в табличке на обложке).

8. После получения допуска к работе студент приступает к ее выполнению. При выполнении работы следует строго соблюдать правила техники безопасности.

9. После окончания работы следует отключить установку от сети и убрать свое рабочее место. После выполнения работы преподаватель подписывает выполнение работы (графа ВЫПОЛНЕНИЕ в табличке на обложке).

10. Далее выполняются расчеты, заполняются таблицы экспериментальных данных, оформляется графический материал.

При оформлении отчета следует придерживаться следующих требований:

- отчет оформляется на отдельном двойном листе;
- должны быть указаны номер, название, цель работы;
- дан краткий перечень оборудования, необходимого для выполнения лабораторной работы;
- необходимо сделать и заполнить таблицы для экспериментальных данных и вычисляемых величин, выписать все расчетные формулы и математические расчеты к ним, написать вывод по результатам работы, подклеить графики;
- все записи должны вестись аккуратно, без сокращений слов, с оставлением полей для замечаний преподавателя.

11. Вывод о проделанной работе должен содержать информацию о том, что измерено, что вычислено, какой результат получен.

ВЫВОД по ОТВЕТУ (шаблон):

По результатам измерений и расчетов получено значение _____,
название физической характеристики

равное _____ = (_____ ± _____) 10[—] _____
символ среднее ошибка степень един. измерения

ВЫВОД по ГРАФИКУ (шаблон):

Полученный экспериментально график зависимости _____
название функции словами

от _____ имеет вид прямой, проходящей через начало координат,
название аргумента

(параболы, гиперболы, плавной кривой) и качественно совпадает с теоретической зависи-
мостью данных характеристик, имеющей вид _____.
формула

12. После оформления отчета студент сдает его преподавателю. Если отчет оформлен верно, все расчеты выполнены правильно преподаватель засчитывает лабораторную работу (графа ЗАЧЕТ в табличке на обложке)

13. Студент, пропустивший занятие или не получивший ДОПУСК, на следующем занятии выполняет очередную работу согласно своему маршрутному листу, а пропущенную работу выполняет на дополнительном занятии.

14. Дополнительные занятия проводятся в соответствии с установленным расписанием. Для выполнения работы в дополнительное время студент должен получить ДОПУСК на консультации у преподавателя, ведущего занятие, и записаться на выполнение работы у лаборанта.

Лабораторная работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОГО МАЯТНИКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Измерить местное ускорение свободного падения с помощью обратного и физического маятников.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Колебание – это движение, отличающееся той или иной степенью периодичности.

Свободные колебания – это колебания, которые возникают под действием внутренних сил, после того как систему выведут из положения равновесия и система предоставлена самой себе. Данные колебания – затухающие. Они не затухают, если отсутствует сила трения.

Вынужденные колебания – это колебания, которые происходят под действием внешней периодически изменяющейся силы.

Гармонические колебания – это периодические колебания, происходящие по закону \sin или \cos .

В физике под маятником понимают твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной точки или оси. Принято различать математический и физический маятники.

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

Физическим маятником называют любое тело, имеющее ось вращения, расположенную выше центра масс.

Пружинным маятником называют тело, подвешенное на пружине, которое испытывает упругую деформацию.

Уравнение движения тела, описывающего гармонические колебания, имеет вид:

$$x'' + \omega_0^2 x = 0 \quad (1.1)$$

Решение данного уравнения (1.1) имеет сложный вид:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

A - амплитуда колебаний – модуль наибольшего смещения точки от положения равновесия.

$(\omega_0 t + \alpha_0)$ - фаза.

α_0 - начальная фаза колебаний, фаза в начальный момент времени.

Физический смысл фазы: фаза показывает какое время в долях периода прошло от начала колебаний.

T – *период* – время полного колебания.

n – *частота*, число колебаний за 1 с.

$\omega_0 = 2\pi n$ – *циклическая частота*, число колебаний за 2π секунд.

$$T = \frac{1}{n}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad [n] = 1 \text{Гц}, [w] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Докажем, что $x = A \sin(\omega_0 t + \alpha_0)$ является решением (1.1), используя закон сохранения энергии.

В точке А система имеет и потенциальную и кинетическую энергию.

$$E_A = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} \quad (1.2)$$

В точке В система имеет максимальную потенциальную энергию.

$$E_B = \frac{kA^2}{2} + 0 \quad (1.3)$$

По закону сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2}{2} \quad (1.4)$$

$$mv^2 = k(A^2 - x^2) \quad (1.5)$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \frac{k}{m}(A^2 - x^2) \quad (1.6)$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) = \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{A^2 - x^2} \quad (1.7)$$

Произведем разделение переменных:

$$\frac{dx}{\sqrt{A^2 - x^2}} = \omega_0 dt \quad (1.8)$$

Проинтегрируем:

$$\int_A^x \frac{dx}{\sqrt{A^2 - x^2}} = \int_0^t \omega_0 dt \quad (1.9)$$

$$\arcsin \frac{x}{A} = w_0 t + const \quad (1.10)$$

$$x = A \sin(w_0 t + \alpha_0)$$

$$v = x' = Aw_0 \cos(w_0 t + \alpha_0) = v_{\max} \sin(w_0 t + \alpha_0 + \frac{\pi}{2}) \quad (1.11)$$

$$a = x'' = -Aw^2 \sin(w_0 t + \alpha_0) \quad (1.12)$$

Подставим (1.3) в (1.1):

$$-Aw^2 \sin(w_0 t + \alpha_0) + w_0^2 A \sin(w_0 t + \alpha_0) = 0$$

Уравнение $x = A \sin(w_0 t + \alpha_0)$ - является решением (1.1).

Графически изобразим зависимость x, v, a от t .

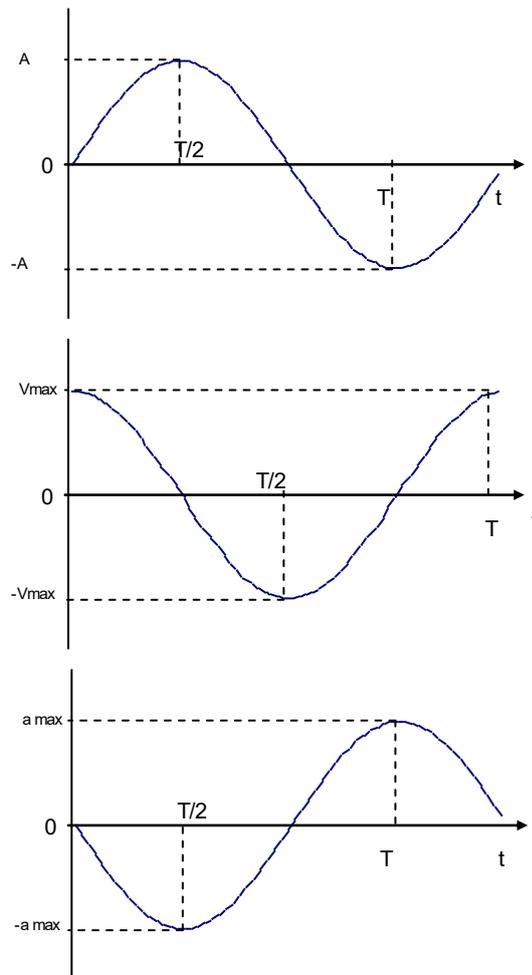


Рисунок 1 – Графики зависимости координаты, скорости и ускорения свободных незатухающих колебаний

Рассмотрим математический маятник и выведем формулу для его периода. Отклонение маятника от положения равновесия будем характеризовать углом φ ,

образованным нитью с вертикалью. При отклонении маятника от положения равновесия возникает вращательный момент M , равный по величине $mgl \sin \varphi$ (m – масса, а l – длина маятника). Он имеет такое направление, что стремится вернуть маятник в положение равновесия, и аналогичен в этом отношении квазиупругой силе; моменту M и угловому смещению φ нужно приписывать противоположные знаки. Следовательно, выражение для вращательного момента имеет вид:

$$M = -mgl \sin \varphi \quad (1.13)$$

Напишем для маятника уравнение динамики вращательного движения, обозначив угловое ускорение через φ'' , и учитывая, что момент инерции маятника равен ml^2 , получаем:

$$ml^2 \varphi'' = -mgl \sin \varphi$$

Последнее уравнение можно привести к виду:

$$\varphi'' + \frac{g}{l} \sin \varphi = 0 \quad (1.14)$$

Ограничимся рассмотрением малых колебаний. В этом случае можно положить $\sin \varphi \approx \varphi$. Введя, кроме того, обозначение:

$$\frac{g}{l} = \omega_0^2, \quad (1.15)$$

придем к уравнению: $\varphi'' + \omega_0^2 \varphi = 0$ (1.16)

Его решение имеет вид:

$$\varphi = a \cos(\omega_0 t + \alpha)$$

Следовательно, при малых колебаниях угловое отклонение математического маятника изменяется со временем по гармоническому закону.

Как следует из (1.3), частота колебаний математического маятника зависит только от длины маятника и от ускорения свободного падения и не зависит от массы маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1.17)$$

Из формулы (1.17) следует $g = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2}$

Если колеблющееся тело нельзя представить как материальную точку, маятник называется физическим. При малых отклонениях от положения равновесия физический маятник совершает гармонические колебания, период которых зависит от массы маятника m , его момента инерции относительно оси вращения J и расстояния между осью вращения и центром масс маятника a :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mga}} \quad (1.18)$$

Входящая в эту формулу величина $l_{пр} = \frac{J}{ma}$ называется приведенной длиной физического маятника - это длина такого математического маятника, период колебания которого равен периоду колебания данного физического маятника.

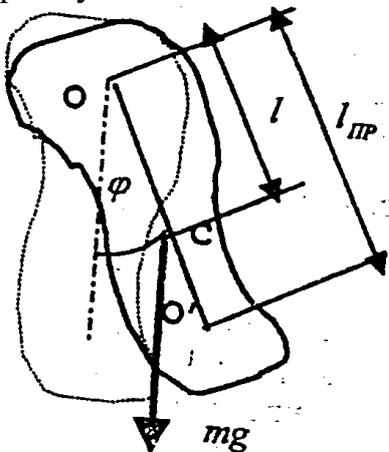


Рисунок 2 – Физический маятник

Точка на прямой, соединяющей точку подвеса с центром масс, лежащая на расстоянии приведенной длины от оси вращения, называется центром качания физического маятника O' . При подвешивании маятника в центре качания O' , приведенная длина, а значит и период колебания будут теми же, что и в начале. Следовательно, точка подвеса O и центр качания O' обладают свойством взаимности: при переносе точки подвеса в центр качания прежняя точка подвеса становится новым центром качания (рис.2).

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОРУДОВАНИЯ:

1. Установка «Маятник универсальный».
2. Линейка инструментальная (стальная).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ:

«Маятник универсальный» представляет собой настольный прибор (рис. 3). На вертикальной стойке основания 1 крепится кронштейн 2, который имеет возможность поворота вокруг стойки на 360 градусов и фиксации в выбранном положении.

С одной стороны кронштейна 2 подвешен математический маятник 3, а с другой – физический обратный маятник 4. Математический маятник 3 пред-

ставляет собой металлический шарик 5 на бифилярном подвесе; длину подвеса можно изменять, вращая ручку 6. Физический оборотный маятник 4 представляет собой стальной стержень 7 с двумя грузами 8, подвешенный на опорной призме 9. Грузы 8 и опорные призмы 9 могут перемещаться по всей длине стержня 7 и фиксироваться в любом положении. Стержень 7 имеет кольцевые проточки через каждые 10 мм, которые служат для надежной фиксации грузов и опорных призм, а также для отсчета расстояний между ними. Грузы и опорные призмы имеют размеры по длине стержня кратные 10 (20 мм) и элементы фиксации, находящиеся строго посередине этих размеров, что облегчает определение расстояний между ними.

Шкала 10, нанесенная на вертикальной стойке, предназначена для определения длины математического маятника. Датчик фотоэлектрический 11 с помощью нижнего кронштейна 12 закреплен в нижней части вертикальной стойки и имеет возможность перемещаться, как вдоль, так и вокруг стойки и фиксироваться в любом положении. Датчик предназначен для выдачи электрических сигналов на миллисекундомер 13.

Миллисекундомер физический комбинированный 13 выполнен самостоятельным прибором с цифровой индикацией времени и количества полных периодов колебания маятников. Миллисекундомер располагается рядом с установкой и соединяется с ней специальным проводом.

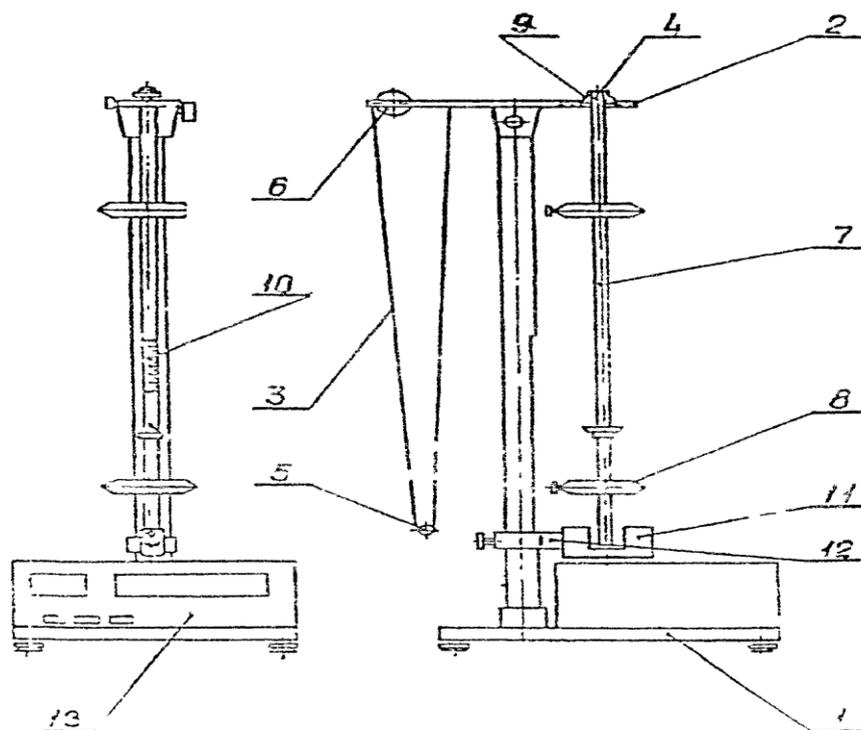


Рисунок 3 – Схема установки

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

Задание 1.

Определение ускорения свободного падения с помощью математического маятника.

1. Установить необходимую длину математического маятника, для чего верхний кронштейн следует повернуть на 180 градусов таким образом, чтобы шарик 5 математического маятника оказался в рабочей зоне фотодатчика.

2. Вращая ручку 6, добиться такого положения шарика 5, при котором его центральная риска совпадет по высоте с риской на фотодатчике.

3. По шкале 10 или с помощью линейки инструментальной измерить длину l математического маятника.

4. Подключить к разъему ВХОД на миллисекундомере датчик фотоэлектрический.

5. Включить в сеть шнур питания миллисекундомера.

6. Нажать кнопку СЕТЬ, расположенную на лицевой стороне миллисекундомера, при этом должны загореться лампочка фотодатчика и цифровые индикаторы.

7. Привести математический маятник в колебательное движение, отклонив металлический шарик на 5-6 градусов от вертикального положения, после чего нажать кнопку СБРОС на миллисекундомере.

8. С помощью миллисекундомера измерить время t , за которое маятник совершил N полных колебаний. Число полных колебаний N маятника задается лаборантом.

Измеренные величины l , N и t занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

Измерено				Вычислено				
Номер опыта	L , м	N	t , с	T , с	T_{cp} , с	$g_{экс}$, м/с ²	$g_{табл}$, м/с ²	ε , %
1.							9,81	
2.								
3.								
4.								
5.								
6.								
7.								
8.								

1. Провести измерения N и t по пунктам 6-7 еще семь раз и результаты также занести в таблицу 1. По окончании работы выключить миллисекундомер, нажав на кнопку СЕТЬ.

2. По результатам опытов вычислить периоды колебаний математического маятника по формуле $T = \frac{t}{N}$ и результаты с точностью до третьего знака занести в таблицу 1.

3. Вычислить среднее значение периода колебаний T_{cp} по формуле $T_{cp} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_8}{8}$, и ответ с точностью до третьего знака занести в таблицу 1.

4. По формуле $g_{on} = \left(\frac{2\pi}{T_{cp}}\right)^2 \cdot \ell$ вычислить ускорение свободного падения и результаты с точностью до второго знака занести в таблицу 1.

5. Принимая $g_{табл} = 9,81 \text{ м/с}^2$, по формуле $\varepsilon = \frac{|g_{таб} - g_{on}|}{g_{таб}} \cdot 100\%$ вычислить относительную погрешность результата и записать ее в таблицу 1.

6. Зная, что $\varepsilon = \frac{\Delta g_{on}}{g_{таб}} \cdot 100\%$, вычислить $\Delta g_{экс}$ и записать окончательный результат в виде: $g = g_{on} \pm \Delta g_{on}$, м/с².

7. По заданию преподавателя величины ε и $g_{экс}$ рассчитать методами теории погрешностей.

8. Вращая ручку 6, поднять шарик в верхнее положение и повернуть верхний кронштейн на 180 градусов.

Задание 2.

Определение ускорения свободного падения с помощью физического маятника.

1. Укрепить одну опорную призму 9 физического оборотного маятника на расстоянии 40 мм от конца стержня (крайняя призма), а другую опорную призму укрепить на расстоянии 120-150 мм от другого конца и два груза 8 закрепить винтами в положениях, показанных на рисунке 3, (приближенно).

2. Подвесить оборотный маятник на опорной призме, расположенной на расстоянии 40 мм от конца стержня (крайняя призма).

3. Установить нижний кронштейн с фотодатчиком на высоте так, чтобы стержень 7 физического оборотного маятника пересекал оптическую ось фотодатчика.

4. Отклонить маятник на угол 4-5 градусов, нажать кнопку СБРОС на миллисекундомере и без толчка отпустить маятник.

5. Для заданного числа N полных колебаний измерить время t по показаниям миллисекундомера, т. е. нажать кнопку СТОП при заданном на индикаторе N и t записать в таблицу 2.

6. Полученные значения N и t записать в таблицу 2.

7. Рассчитать период T_k колебаний оборотного маятника по формуле:

$T_k = \frac{t}{N}$ с точностью до третьего знака и записать в таблицу 2.

8. Повернуть маятник и повесить его на другой опорной призме (средней).

9. Установить нижний кронштейн с фотодатчиком по высоте так, чтобы стержень 7 физического оборотного маятника пересекал оптическую ось фотодатчика.

10. Рассчитать период T_c колебаний обратного маятника по формуле:

$$T_c = \frac{t}{N} \text{ с точностью до третьего знака и записать в таблицу 2.}$$

11. Рассчитать относительную погрешность отличия периодов T_k и T_c по формуле:

$$\varepsilon_T = \frac{|T_k - T_c|}{T_k} \cdot 100\%$$

12. Если $\varepsilon_T > 0,5 \%$, то передвинуть либо грузы 8 (вместе или отдельно), либо опорные призмы 9 (отдельно или вместе) и при новом положении грузов и призм произвести измерения и вычисления по пунктам 2–12.

13. Перемещением грузов или опорных призм на стержне добиться совпадения колебаний T_k и T_c маятника при его качаниях на обеих призмах с точностью $\varepsilon_T \leq 0,5 \%$.

Таблица 2 – Результаты измерений и вычислений

Номер опыта	Маятник на крайней призме			Маятник на средней призме			$\varepsilon_T, \%$	Итоговые значения величин				
	N	t, с	$T_k, \text{ с}$	N	t, с	$T_c, \text{ с}$		$T_{cp}, \text{ с}$	$l_{np}, \text{ м}$	$g_{экс}, \text{ м/с}^2$	$g_{таб}, \text{ м/с}^2$	$\varepsilon, \%$
											9,81	

14. При $\varepsilon_T \leq 0,5 \%$ вычислить T_{cp} по формуле $T_{cp} = \frac{T_c + T_k}{2}$, с точностью до третьего знака и записать его в таблицу 2. Отключить миллисекундомер, нажав кнопку СЕТЬ.

15. Измерить расстояние между опорными призмами (l_{np}) по сантиметровым рискам на стержне и вычислить ускорение свободного падения по формуле

$$g_{on} = \left(\frac{2\pi}{T_{cp}} \right)^2 \cdot l_{np}. \text{ Результаты занести в таблицу 2.}$$

16. Рассчитать относительную погрешность результата по формуле:

$$\varepsilon_T = \frac{|g_{таб} - g_{on}|}{g_{таб}} \cdot 100\%$$

17. Вычислить $\Delta g_{экс}$ (смотреть пункт 14 задания 1) и записать окончательный результат в виде: $g = g_{экс} \pm \Delta g_{экс}, \text{ м/с}^2$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какие колебания называют гармоническими? Дайте определения их основных характеристик (амплитуды, смещения, фазы, периода, частоты, циклической частоты).
2. Что называется маятником? Дайте определение математического, пружинного и физического маятников.
3. Выведите дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее гармонические колебания. Что является решением этого уравнения?
4. Запишите зависимость координаты, скорости, ускорения от времени для гармонических колебаний и постройте графики этих зависимостей.
5. Что такое приведенная длина физического маятника? От чего она зависит?
6. Каким свойством обладают точка подвеса и центр качания физического маятника?
7. Выведите формулы для расчета периода колебаний математического и физического маятников.
8. От чего зависит ускорение свободного падения?
9. Как определить абсолютную и относительную погрешности прямых и косвенных измерений в данной работе?

ЛИТЕРАТУРА:

1. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 1. Механика. Молекулярная физика. М., Наука, 1982, §§ 53-54.
2. Трофимова Т.И., Курс физики. М., Высшая школа, 2007, §§ 140-142.

Лабораторная работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА, СКАТЫВАЮЩЕГОСЯ С НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Определить момент инерции тела относительно мгновенной оси вращения расчетным и экспериментальным методом

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При изучении вращения твердых тел пользуются понятием момента инерции. Момент инерции тела – мера инертности твердых тел при вращательном движении. Его роль такая же, что и массы при поступательном движении. Моментом инерции системы (тела) относительно данной оси называется физическая величина, равная сумме произведений масс m материальных точек системы на квадраты их расстояния до рассматриваемой оси:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (2.1)$$

Суммирование производится по всем элементарным массам m_i , на которые разбивается тело. В случае непрерывного распределения масс эта сумма сводится к интегралу:

$$J = \int r^2 dm \quad (2.2)$$

где интегрирование производится по всему объему тела. Величина r в этом случае есть функция положения точки с координатами x, y, z . Момент инерции – величина аддитивная: момент инерции тела относительно некоторой оси равен сумме моментов инерции частей тела относительно той же оси.

Определим момент инерции диска относительно оси, проходящей через центр инерции и перпендикулярной плоскости вращения. Масса диска – m , радиус – R .

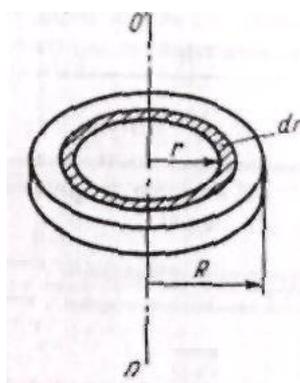


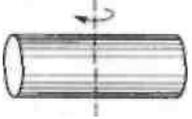
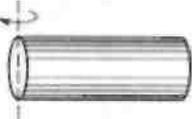
Рисунок 4 – Определение момента инерции диска

Площадь кольца (рис. 4), заключенного между r и $r + dr$, равна $dS = 2\pi r dr$. Площадь диска $S = \pi R^2$. Следовательно, $\frac{dm}{m} = \frac{dS}{S}$.

Тогда

$$dm = m \frac{dS}{S} \text{ или } dm = m \frac{2\pi r dr}{\pi R^2}.$$

Таблица 3 – Моменты инерции различных твердых тел

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции
Полый тонкостенный цилиндр радиусом R	Ось симметрии 	$J = mR^2$
Сплошной цилиндр или диск радиусом R	Ось симметрии 	$J = \frac{mR^2}{2}$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину 	$J = \frac{ml^2}{12}$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его конец 	$J = \frac{ml^2}{3}$
Шар радиусом R	Ось проходит через центр шара 	$J = \frac{2}{5} mR^2$

Если известен момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр масс, то момент инерции относительно другой оси параллельной этой определяется по **теореме Штейнера**:

Момент инерции тела I относительно произвольной оси равен моменту инерции I_c относительно параллельной оси, проходящей через центр масс C тела, плюс произведение массы тела на квадрат расстояния между осями:

$$I = I_c + ma^2 \quad (2.3)$$

Моментом силы \vec{M} относительно неподвижной точки O называется физическая величина равная векторному произведению радиус-вектора силы \vec{r} на силу \vec{F} .

$$\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}] = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2.4)$$

\vec{M} – псевдовектор, его направление совпадает с направлением поступательного движения правого винта при его вращении от \vec{r} к \vec{F} .

$$M = rF \sin \alpha = F \cdot \ell \quad (2.5)$$

$$\alpha = \left(\vec{r} \overset{\wedge}{\vec{F}} \right), \quad \ell - \text{плечо}$$

Радиус-вектор силы – это направленный отрезок, соединяющий точку приложения силы с осью вращения.

$$[M] = H \cdot m$$

Если на тело, закрепленное на оси действуют несколько сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2 \dots \vec{F}_n$, то суммарное их действие будет эквивалентно действию одного момента M , равного алгебраической сумме моментов всех действующих сил:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i \quad (2.6)$$

При этом, если сила вращает тело по часовой стрелке, то будем считать её момент «+», если она вращает тело против часовой стрелки - «-».

Работа при вращении тела идет на увеличение его кинетической энергии:

$$dA = dT \quad (2.7)$$

но $dT = d\left(\frac{J_z \omega^2}{2}\right) = J_z \omega \cdot d\omega$, поэтому $M_z d\varphi = J_z \omega \cdot d\omega$, или $M_z \frac{d\varphi}{dt} = J_z \omega \frac{d\omega}{dt}$

Учитывая, что $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, получим $M_z = J_z \frac{d\omega}{dt} = J_z \varepsilon$.

Уравнение представляет собой уравнение динамики вращательного движения твердого тела относительно неподвижной оси. Можно показать, что если ось z совпадает с главной осью инерции, проходящей через центр масс, то имеет место векторное равенство:

$$\vec{M} = J \vec{\varepsilon} \quad (2.8)$$

где J – главный момент инерции тела (момент инерции относительно главной оси).

Определим кинетическую энергию твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси. Разобьем это тело на n материальных точек. Каждая точка движется с линейной скоростью $v_i = \omega r_i$ тогда кинетическая энергия точки:

$$E_{ki} = \frac{m_i v_i^2}{2} \quad \text{или} \quad E_{ki} = \frac{m_i r_i^2 \omega^2}{2} \quad (2.9)$$

Полная кинетическая энергия вращающегося твердого тела равна сумме кинетических энергий всех его материальных точек:

$$E_k = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = \frac{J\omega^2}{2} \quad (2.10)$$

[J – момент инерции тела относительно оси вращения].

Если тело совершает поступательное и вращательное движения одновременно, то его полная кинетическая энергия равна:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} \quad (2.11)$$

Из сопоставления формул кинетической энергии для поступательного и вращательного движений видно, что мерой инертности при вращательном движении служит момент инерции тела.

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОРУДОВАНИЯ:

1. Установка «Наклонная плоскость».
2. Линейка инструментальная (стальная).
3. Набор тел.
4. Секундомер

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ:

В работе используются тела, осью которых является цилиндрический стержень радиусом r . Одно из тел (рис.5) помещают на параллельные направляющие 2, образующие с горизонтом углы α_1 и α_2 .

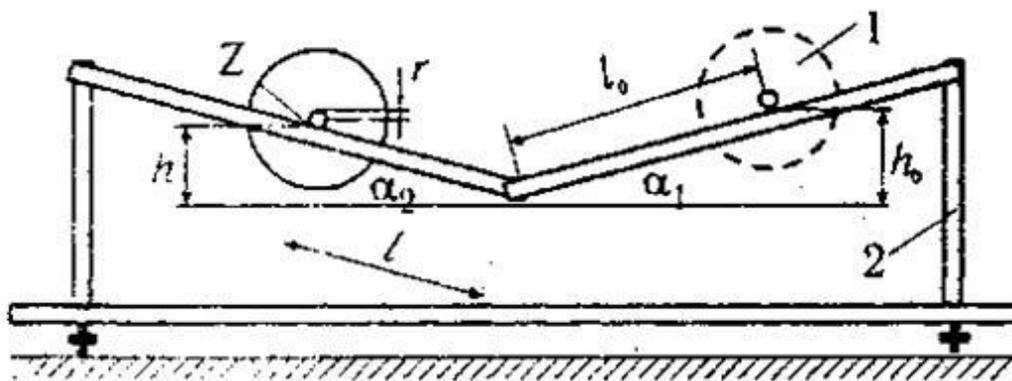


Рисунок 5 – Схема установки

Если тело отпустить, то оно, скатываясь, достигнет нижней точки и, двигаясь далее по инерции, поднимется вверх по направляющим. Движение тела, при котором траектории всех точек лежат в параллельных плоскостях, называется плоским. Плоское движение можно представить двумя способами: либо как совокупность поступательного движения тела со скоростью центра масс и вращательного вокруг оси, проходящей через центр масс, либо как только вращательное движение вокруг мгновенной оси вращения (МОВ), положение которой непрерывно изменяется. В нашем случае эта мгновенная ось Z проходит через точки касания направляющих с движущимся стержнем.

При скатывании тело, опускаясь с высоты $h_0 = l_0 \sin \alpha_1 = l_0 \alpha_1$, проходит путь l_0 , а поднимаясь по инерции на высоту $h = l \alpha_2$, проходит путь l . В нижней точке

скорость поступательного движения центра масс $v = \frac{2l_0}{t}$, а угловая скорость тела:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2l_0}{rt} \quad (2.12)$$

где t – время движения от верхней точки до нижней, r – радиус стержня (оси).

На скатывающееся тело действует момент сил сопротивления M_{mp} . Работа его на пути l_0 равна $A = M_{mp}\varphi$, где угловой путь $\varphi_0 = \frac{l_0}{r_0}$.

Решая совместно выше записанные выражения, получаем формулу для определения момента инерции динамическим методом:

1. Исследуйте форму тела. Приняв во внимание, что момент инерции любого тела равен сумме моментов инерции отдельных его элементов, мысленно разделите исследуемое тело на простые элементы, для которых формулы расчета величины I_I даны в таблице 3
2. Сделайте эскиз исследуемого тела, а если необходимо, то и его элементов, обозначая символами все размеры, подлежащие измерению. Например, коромысло (рис. 1а) состоит из насаженных на вал 1 шкива 2 и маховика 3 с двумя отверстиями 4. Это тело можно представить (рис. 1б) как совокупность трех сплошных цилиндров 1, 2 и 3 за вычетом двух малых дисков 4, расположенных на месте отверстий маховика.

$$I = \frac{mglr^2(\alpha_1 + \alpha_2)t^2}{2l_0(l_0 + l)} \quad (2.12)$$

Здесь величина $(\alpha_1 + \alpha_2)$ является константой для данной установки.

Момент инерции тела относительно МОВ определяется теоремой Штейнера.

Расчет момента инерции сложной формы:

1. Исследуйте форму тела. Приняв во внимание, что момент инерции любого тела равен сумме моментов инерции отдельных его элементов, мысленно разделите исследуемое тело на простые элементы, для которых формулы расчета величины I_I даны в таблице.
2. Сделайте эскиз исследуемого тела, а если необходимо, то и его элементов, обозначая символами все размеры, подлежащие измерению. Для расчета момента инерции тела используют формулу:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.13)$$

Необходимо знать массы указанных элементов, их радиусы, а также расстояния a от центра отверстий до оси вращения. В случае, если массы m неизвестны для их определения через плотность и объем деталей нужно измерить еще длины l_1 , l_2 и l_3 .

Таблица 4 – Моменты инерции некоторых тел

№ п/п	Тело	Формула момента инерции
1	Диск	$I = \frac{1}{2}mr^2$
2	Ось	$I = \frac{1}{2}mr^2$
3	Пластина	$I = \frac{1}{12}m(b^2 + a^2)$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

Задание 1.

Аналитический расчет момента инерции тела

Для расчета момента инерции тела необходимо измерить массу тел (написана на телах) или объем (массу рассчитать, используя плотность) и радиусы цилиндрических тел. Расчет величины I дан в пункте 2 «расчет момента инерции тел сложной формы» (таблица 4). В соответствии с ней результаты всех измерений и вычислений вносите в таблицу 5. Определите момент инерции тела, сложив моменты инерции диска, оси и пластины.

Таблица 5 – Результаты измерений и вычислений

Индекс	Элементы тела вращения	Диаметр d , мм, и a , мм	Масса m , кг	Момент инерции I , кг·м ²	
				формула	значение
1	Диск				
2	Ось				
3	Пластина				

Задание 2.

Определение момента инерции тела динамическим методом

1. Определить массу тела, запишите ее значение, а также постоянную установки ($\alpha_1 + \alpha_2$) в таблицу 6.

2. Проверить правильность положения установки. При скатывании тело не должно смещаться к одной из направляющих. Для регулировки используйте винты основания. Измерить штангенциркулем диаметр d стержня в различных местах, определить его среднее значение и средний радиус r .

3. Установить тело на направляющие на расстоянии l_0 от нижней точки, за его положение фиксируется магнитом по нажатию кнопки «Сброс» секундомера.

4. Нажать кнопку Пуск. При этом электромагнит отключится и тело начинает двигаться. Когда тело достигнет нижней точки, секундомер автоматически выключится. Записать время движения тела до нижней точки в таблицу 3.

5. Наблюдая далее за движением тела по инерции, отметить расстояние l , на которое оно поднимется до остановки.

6. Опыт повторить еще семь раз при том - же расстоянии записывая результаты в таблицу 6.

Таблица 6 – Результаты измерений и вычислений

№ п.п.	d , мм	t , с	l , м	$\alpha_1 + \alpha_2$	рад
1				$m =$	кг
2				$l_0 =$	м
3				$r =$	м
4					
5					
6					
7					
8					
Среднее значение					

7. Найти среднее значение величин r , t , l и по формуле (1) рассчитать момент инерции тела I относительно МОВ.

8. Определить абсолютную и относительную погрешности измерений момента инерции маховика аналитическим и динамическим методами. Сделать выводы.

Задание 3.

Изучение зависимости момента инерции от распределения массы относительно оси вращения

В этом задании используется тело в виде крестовины, по которой могут перемещаться грузы (цилиндры). Все результаты измерений заносятся в таблицу 7.

1. Определить массу m тела и радиус r оси тела, и записать постоянную установки ($\alpha_1 + \alpha_2$).
2. Установить подвижные цилиндры на равном расстоянии b от оси вращения и измерить это расстояние.

Таблица 7 – Результаты измерений и вычислений

№ п.п.	b	t , с	I , кг*м ²	$\alpha_1 + \alpha_2$	рад
1				$m =$	кг
2				$l_0 =$	м
3				$r =$	м
4					
5					

3. Установить тело на направляющие на расстоянии l_0 от нижней точки, его положение фиксируется магнитом нажатием кнопки «Сброс» секундомера.

4. Нажать кнопку секундомера «Пуск». При этом электромагнит отключится и тело начнет двигаться. Когда тело достигнет нижней точки, секундомер автоматически выключится. Записать время движения тела до нижней точки в таблице.

5. Отметить расстояние l , на которое продвинется тело.

6. Повторить измерения по пунктам 3-5 при других расстояниях b цилиндров, относительно оси вращения.

7. Вычислить момент инерции для каждого опыта.

8. Построить график зависимости I от m^2 .

9. Используя график, определить момент инерции крестовины без грузов.

10. Сделать выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Что называется моментом силы?
2. Что характеризует момент инерции материальной точки, твердого тела?
3. Чему равен момент инерции материальной точки, твердого тела относительно оси? В каких единицах измеряется момент инерции? От каких величин зависит момент инерции тела?
4. Чему равна работа постоянного момента сил?
5. От каких величин зависят кинетическая энергия тела при поступательном и вращательном движениях?
6. Сформулируйте теорему Штейнера и приведите пример ее использования.
7. Выведите основной закон динамики вращательного движения твердого тела и поясните его.
8. Как рассчитывают момент инерции твердого тела сложной формы?
9. Выведите момент инерции цилиндра.
10. Как определить абсолютную и относительную погрешность в работе?

ЛИТЕРАТУРА:

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов/Таисия Ивановна Трофимова 13-е изд., стер.- М.; Издательский центр «Академия», 2007 г.
2. Дмитриева В.Ф., Прокофьев В.Л. Основы физики. Учебное пособие для студентов вузов М.; Высшая школа, 2005 г.
3. Савельев И.В. «Курс общей физики», т.1,2,3, - М.; Наука, 2005 г.

Лабораторная работа №3

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ДИНАМИКИ НА ПРИБОРЕ АТВУДА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Изучить законы динамики на приборе Атвуда.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В основе динамики лежат три закона, сформулированные Ньютоном на основании обобщения многочисленных опытных данных.

I закон Ньютона: Существуют такие системы отсчета относительно которых материальная точка (тело) сохраняют состояние покоя или равномерно прямолинейно движется, если на неё (него) не действуют другие тела или действие этих сил компенсировано.

Стремление тела сохранять свою скорость постоянной называется инерцией.

I закон – закон инерции, он выполняется не для всех систем отсчета.

Системы отсчета, относительно которых выполняется I закон называются инерциальными системами отсчета.

Опытным путем установлено, что инерциальной можно считать гелиоцентрическую (звездную) систему отсчета, можно считать систему отсчета, связанную с Землей.

Все с.о. покоящиеся или движущиеся с постоянной скоростью тоже считаются инерциальными.

Неинерциальные – движущиеся с ускорением относительно Земли.

II закон Ньютона – основной закон динамики поступательного движения.

Из опыта известно, что при одинаковых воздействиях различные тела приобретают различные ускорения. Это свойство самого тела называется инертностью.

Масса тела – мера инертности тела.

Сила – это физическая величина, являющаяся мерой воздействия на тело других тел или полей.

Ускорение, приобретаемое материальной точкой (телом), пропорционально вызывающей его силе, с нею по направлению и обратно пропорционально массе материальной точки (тела).

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \text{ или } \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}).$$

Векторная величина равная произведению $m\vec{v}$ и имеющая направление скорости называется **импульсом**.

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} \text{ - более общая формула II закона Ньютона.}$$

Скорость изменения импульса материальной точки равна действующей на неё силе.

$$[\vec{F}] = H \quad [m] = кг$$

III закон Ньютона: Всякое действие материальных точек (тел) друг на друга, носит характер взаимодействия; силы с которыми действуют материальные точки, всегда равны по модулю, противоположно направлены и действуют вдоль прямой, соединяющей эти точки:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

Эти силы приложены к разным материальным точкам (телам), всегда действуют парами и являются силами одной природы.

Угловое ускорение точки при ее вращении вокруг неподвижной оси пропорционально вращающему моменту и обратно пропорционально моменту инерции (**основное уравнение динамики вращательного движения материальной точки**):

$$M = \varepsilon J \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{M}{J} \quad (3.1)$$

Если систему двух одинаковых грузов соединить легкой нитью, перекинуть ее через блок и на один из грузов поместить перегрузок массой m_1 то система придет в равноускоренное движение. Считая нить нерастяжимой и невесомой, составим уравнение движения всех тел системы (тело с перегрузком будем считать одним целым):

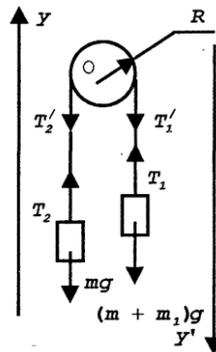


Рисунок 6 – Схема системы движущихся грузов

$$\begin{cases} \vec{T}_2 + m\vec{g} = m\vec{a} \\ (m_1 + m)\vec{g} + \vec{T}_1 = (m_1 + m)\vec{a} \\ \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_{mp} = J \cdot \vec{\varepsilon} \end{cases} \quad (3.2)$$

где a – ускорение грузов;
 T_1 и T_2 – силы натяжения левой и правой частей нити;
 J – момент инерции блока относительно его оси O;
 ε – угловое ускорение блока;

R – радиус блока;

M_{mp} – момент силы трения относительно оси блока.

Перейдем к проекциям сил, моментов сил и ускорений на выбранную ось.

$$\begin{cases} T_2 - mg = ma \\ (m_1 + m)g - T_1 = (m_1 + m)a \\ T_1 R - T_2 R - M_{mp} = J \cdot \varepsilon \\ \varepsilon = \frac{a}{R} \end{cases} \quad (3.3)$$

Решая систему уравнений (3.3) находим:

$$a = \frac{m_1 g - \frac{M_{mp}}{R}}{2m + m_1 + \frac{J}{R^2}} \quad (3.4)$$

Если, $m_1 \ll 2m + \frac{J}{R^2}$ то уравнение примет вид:

$$a \left(2m + \frac{J}{R^2} \right) = m_1 g - \frac{M_{mp}}{R} \quad (3.5)$$

Так как $M_{TP} = const$, то ускорение системы a , линейно зависит от $m_1 g$. При $a = 0$:

$$(m_1 g)_{a=0} = \frac{M_{mp}}{R} \quad (3.6)$$

Чтобы убедиться в справедливости уравнений движения следует определить a для различных S при разных перегрузках и сравнить полученные значения ускорений с их экспериментальным значением, полученным из формулы:

$$a_s = \frac{2s}{t^2} \quad (3.7)$$

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОРУДОВАНИЯ:

1. Машина Атвуда (далее установка).
2. Нить с грузами одинаковой массы.
3. Разновесы (грузы массами 1, 2, 3, 5 г).
4. Миллисекундомер физический.

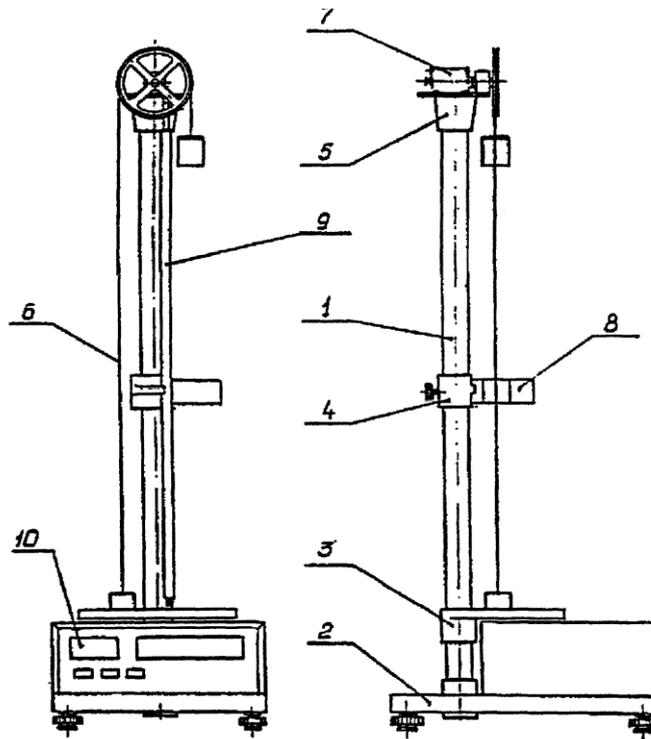


Рисунок 7 – Машина Атвуда

Машина Атвуда (рис.7) представляет собой настольный прибор, у которого на вертикальной стойке 1 основания 2 расположены три кронштейна: нижний 3, средний 4, верхний 5.

На верхнем кронштейне 5 крепится блок с узлом подшипников качения, через который перекинута эластичная нить с грузами 6, одинаковой массы m ($m = 80$ г).

На верхнем кронштейне 5 находится электромагнит 7, который с помощью фрикциона при подаче на него напряжения, удерживает систему с грузами в неподвижном состоянии.

На среднем кронштейне 4 крепится фотодатчик 8, который выдает электрический сигнал окончания счета времени равноускоренного движения грузов.

Средний кронштейн имеет индекс (риска на его корпусе), положение которой совпадает с оптической осью фотодатчика.

Нижний кронштейн 3 представляет собой площадку с резиновым амортизатором, о который ударяется груз при его остановке.

Средний и нижний кронштейны имеют возможность свободного перемещения и фиксации на вертикальной стойке, по всей ее свободной длине.

На вертикальной стойке 1 укреплена миллиметровая линейка 9, по которой определяют начальное и конечное положения грузов, а следовательно, и пройденный путь. Начальное положение определяется визуально по нижнему срезу груза, конечное положение – по индексу среднего кронштейна.

Секундомер физический 10 выполнен самостоятельным прибором с цифровой индикацией времени. Секундомер соединен кабелем с фотодатчиком.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

Задание 1.

Проверка закона пути: $s = \frac{at^2}{2}$

1. Получить от лаборанта перегрузок известной массы и значения путей s_1 и s_2 , которые будет проходить ускоренно движущаяся система грузов. Эти значения внести в таблицу 1.

2. Установить кронштейн с фотодатчиком в нижней части шкалы вертикальной стойки так, чтобы плоскость кронштейна, окрашенная в красный цвет, совпала с одной из рисок шкалы, а наборный груз при движении вниз проходил по центру рабочего окна фотодатчика.

3. За нижнее положение h_2 груза берется отметка шкалы, соответствующая риске на корпусе фотодатчика и являющаяся как бы продолжением оптической оси фотодатчика, которую пересекает движущийся груз.

4. Положить на правый груз указанный перегрузок и опустить левый груз до касания с платформой.

5. Установить правый груз в крайнем верхнем положении так, чтобы нижняя плоскость груза (визир вертикальной стойки соприкасается с нижней плоскостью груза) совпала с одной из рисок шкалы вертикальной стойки. Это будет верхнее положение h_1 груза.

6. Определить путь s_1 , пройденный грузом, как разность его верхнего h_1 и нижнего h_2 положений: $h = h_1 - h_2$, м.

7. Записать полученное значение s_1 в таблицу 8, в которую также записывают значения массы m_1 перегрузка.

8. Зафиксировать груз в этом положении. Для этого нажать кнопку «Сеть» блока в положение 1, при этом должен сработать фрикцион электромагнитного тормоза.

9. Нажать на кнопку «Пуск» блока. Происходит растормаживание электромагнитного тормоза., груз начнет опускаться и таймер блока начинает отсчет времени. При пересечении оптической оси фотодатчика отсчет времени прекратится. Записать показания таймера, т.е. времени t движения груза в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты измерений и вычислений

$m_1 = \dots$ кг				
$s_1, м$	$t_1, с$	$a_1, м/с^2$	$a_{m1}, м/с^2$	$\varepsilon, \%$
$s_2, м$	$t_2, с$	$a_2, м/с^2$	$a_{m2}, м/с^2$	$\varepsilon, \%$

9. Отвернуть винт крепления среднего кронштейна и установить по индексу расстояние s_2 .

10. Провести измерения по пунктам 2-8 для нового пути s_2 . Результаты занести в таблицу 1.

11. По формулам $a_m = \frac{m_1 g}{2m + m_1}$ и $a_s = \frac{2s}{t^2}$ определить соответственно теоретическое и экспериментальное значения ускорений и вычислить относительную погрешность измерений по формуле $\varepsilon = \frac{|a_s - a_m|}{a_m} \cdot 100\%$ для опытов с s_1 и s_2 .

12. Сделать вывод о зависимости (или независимости) ускорения a_s от пути s при неизменной массе перегрузка.

Задание 2.

Определение момента силы трения и силы трения.

Таблица 9 – Результаты измерений и вычислений

№ опыта	m_1 , кг	s_5 , м	t , с	$m_1 g$, мН	a , м/с ²	$\frac{M_{mp}}{R}$, мН	R , м	M_{mp} , мН
1	10							
2	20							
3	30							
4	40							
5	50							
6	60							
7	70							
8	80							

1. Получить у лаборанта значение пути s_5 для проведения опытов ускоренного движения грузов с перегрузками от **10** до **80 г** включительно.

2. Прodelать с каждым перегрузком опыты по измерению времени ускоренного движения системы грузов по пунктам 2–8 и результаты записать в таблицу 9.

3. По результатам таблицы 3 построить график зависимости $a = a(m_1 g)$.

4. Отрезок на оси абсцисс $m_1 g$ от начала координат, отсекаемый графиком $a(m_1 g)$, дает величину $\frac{M_{mp}}{R}$. По этой величине определяют M_{mp} и силу трения, считая ее приложенной к поверхности оси (радиус оси дается в таблице 9).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Что такое масса тела? Назовите единицы измерения массы и способы измерения массы тела.
2. Что такое сила? Какие силы изучают в механике? Назовите единицы измерения силы и способы измерения силы.
3. Что называют ускорением? Назовите единицы измерения ускорения и способы измерения ускорения.
4. Что называют равнодействующей силой, приложенной к телу? Покажите на рисунках способы определения равнодействующей нескольких сил, приложенных к телу.
5. Запишите и поясните второй закон Ньютона.

6. Как с помощью второго закона Ньютона можно сформулировать первый закон Ньютона?
7. Запишите и поясните третий закон Ньютона и укажите следствия этого закона.
8. Запишите все известные вам соотношения кинематики, в которые входит ускорение тела.
9. Выведите соотношение для системы a_m тел, движущихся на машине Атвуда.
10. Выведите соотношение для определения M_{mp} для оси блока.
11. Как изменится ускорение системы, если увеличить массу постоянных грузов m (не меняя массы перегрузка или силы трения)?
12. Укажите основные причины погрешности измерения ускорения с помощью машины Атвуда.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 1, Механика. Молекулярная физика, М., Наука, 1982, §§1–8.
2. Трофимова Т.И., Курс физики, М., Высшая школа, 2007, §§5–7.

Лабораторная работа №4

ИЗУЧЕНИЕ УПРУГОГО И НЕУПРУГОГО УДАРОВ ШАРОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Изучение упругого и неупругого ударов шаров.

При изучении следует определить:

- скорость шаров до взаимодействия v_1, v_2 скорости шаров после взаимодействия u_1, u_2 ;
- коэффициент восстановления K ;
- среднюю силу соударения F ;
- необратимую потерю кинетической энергии

$$\Delta W = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} - \frac{m_1 u_1^2}{2} - \frac{m_2 u_2^2}{2};$$

- проверить, используя экспериментальные данные, справедливость закона сохранения импульса для упругого и неупругого ударов.
 - определить абсолютную и относительную погрешности эксперимента.
- Расчеты значительно сокращаются, если $v_2 = 0$.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

При взаимодействии тел наблюдается различная степень упругой и пластической деформации.

Кинетическая энергия, которой обладают тела до взаимодействия, превращается в потенциальную энергию упругой деформации и во внутреннюю энергию взаимодействующих тел.

Существует два вида предельных взаимодействий между телами. Если при взаимодействии тел их кинетическая энергия полностью или частично превращается во внутреннюю энергию и не превращается в потенциальную энергию упругой деформации, то такой вид взаимодействия называют **абсолютно неупругим ударом**. Если же кинетическая энергия тел в результате первой степени взаимодействия полностью или частично превращается в потенциальную энергию, то такой вид взаимодействия называется **абсолютно упругим ударом**.

В микромире наблюдается явление упругого взаимодействия. Примером такого взаимодействия является рассеяние электронов и других элементарных частиц.

В макромире в мире тел большой массы, по сравнению с массой элементарных частиц, не наблюдается явление абсолютно упругого взаимодействия. Следствием взаимодействия макротел являются остаточные деформации, звуковые колебания, изменение механических свойств материалов, нагревание тел.

Величина и скорость рассеяния механической энергии (диссоциации) зависит от упругих свойств материала взаимодействующих тел. Так, например, у тел, состоящих из мягкой глины, теста, пластилина наблюдается быстрое рас-

сеяние механической энергии при взаимодействии. При таком взаимодействии, когда наблюдается пластическая деформация, механическая энергия, в основном, переходит во внутреннюю энергию.

Взаимодействие тел, состоящих из материалов в пластическом состоянии, с большой степенью точности можно считать **абсолютно неупругим**.

Для абсолютно неупругого удара справедлив закон сохранения импульса, а закон сохранения механической энергии не выполняется.

Кинетическая энергия до взаимодействия всегда больше кинетической энергии после взаимодействия. Если 2 шара массами m_1 и m_2 имели до удара соответственно скорости, v_1 и v_2 то после абсолютно неупругого удара они будут иметь одинаковые скорости. При абсолютно неупругом ударе шары деформируются и возникающие между ними силы взаимодействия будут тормозить шар, двигающийся с большей скоростью и ускорять шар, двигающийся с меньшей скоростью, до тех пор, пока их скорости не сравняются. На основании **закона сохранения импульса**, который утверждает, что суммарный импульс изолированной системы тел остается величиной постоянной, можно записать:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u} + m_2\vec{u} = \vec{u}(m_1 + m_2) \quad (4.1)$$

Из равенства (4.1) следует, что скорость тел после абсолютно неупругого удара будет равна:

$$\vec{u} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2} \quad (4.2)$$

Определив по данным опыта скорости v_1 , v_2 , u и массы шаров m_1 и m_2 , можно проверить справедливость равенства (4.1). Если материалы, из которых состоят тела, обладают упругими свойствами (сталь, стекло, слоновая кость и так далее), то на первой стадии удара часть кинетической энергии превращается в потенциальную энергию упругой деформации взаимодействующих тел. После окончания процесса деформации потенциальная энергия полностью превращается в кинетическую энергию. Тела после взаимодействия двигаются со скоростями, которые определяются законом сохранения энергии и законом сохранения импульса. Для упрощения расчетов обычно рассматривается центральный удар шаров.

Удар называется **центральным**, если направление скоростей шаров в момент удара совпадает с линией, соединяющих их центры. После абсолютно упругого удара шары приобретают скорости u_1 и u_2

Для определения скоростей u_1 и u_2 следует решить систему уравнений, которые выражают законы сохранения импульса и энергии:

$$\begin{cases} m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2 \\ \frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} = \frac{m_1u_1^2}{2} + \frac{m_2u_2^2}{2} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} m_1(\vec{v}_1^2 - \vec{u}_1^2) = m_2(\vec{u}_2^2 - \vec{v}_2^2) \\ m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{u}_1 + m_2\vec{u}_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_1(\vec{v}_1 - \vec{u}_1)(\vec{v}_1 + \vec{u}_1) = m_2(\vec{u}_2 - \vec{v}_2)(\vec{u}_2 + \vec{v}_2) \\ m_1(\vec{v}_1 - \vec{u}_1) = m_2(\vec{u}_2 - \vec{v}_2) \end{cases}$$

$$\vec{v}_1 + \vec{u}_1 = \vec{v}_2 + \vec{u}_2$$

$$\vec{u}_1 = \vec{v}_2 + \vec{u}_2 - \vec{v}_1 \quad \vec{u}_2 = \vec{v}_1 + \vec{u}_1 - \vec{v}_2$$

$$m_1(\vec{v}_1 - \vec{u}_2 - \vec{v}_2 + \vec{v}_1) = m_2(\vec{u}_2 - \vec{v}_2)$$

$$2m_1\vec{v}_1 - m_1\vec{u}_2 - m_1\vec{v}_2 = m_2\vec{u}_2 - m_2\vec{v}_2$$

$$\vec{u}_2(m_2 + m_1) = 2m_1\vec{v}_1 - m_1\vec{v}_2 + m_2\vec{v}_2$$

$$\begin{cases} \vec{u}_2 = \frac{\vec{v}_2(m_2 - m_1) + 2m_1\vec{v}_1}{m_2 + m_1} \\ \vec{u}_1 = \frac{\vec{v}_1(m_1 - m_2) + 2m_2\vec{v}_2}{m_2 + m_1} \end{cases} \quad (4.4)$$

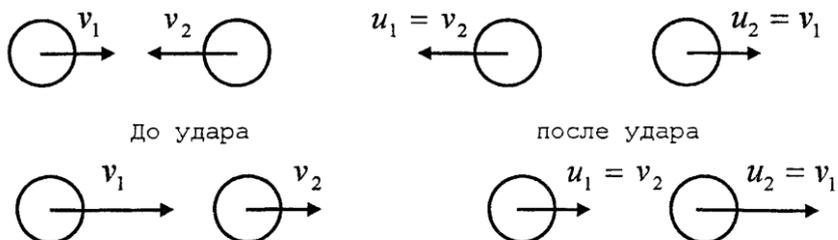
В формулах (4.4) значения v_1 и v_2 могут иметь одинаковые знаки и противоположные, в зависимости от направления движения шаров. Если начальная скорость второго шара равна нулю ($v_2 = \mathbf{0}$), то формулы (4.4) примет вид:

$$u_1 = \frac{v_1(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}, \quad u_2 = \frac{2m_1v_1}{m_1 + m_2} \quad (4.5)$$

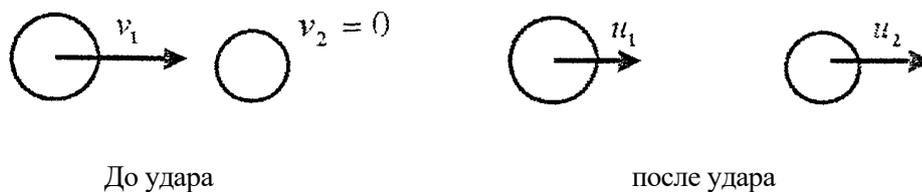
Направление скоростей u_1 и u_2 после удара будет зависеть от соотношения масс m_1 и m_2 .

Рассмотрим несколько частных случаев упругого удара шаров.

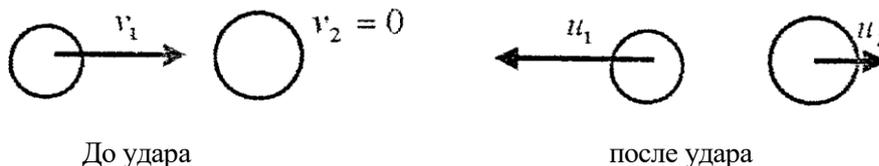
1. Если массы шаров равны $m_1 = m_2 = m$, то происходит обмен скоростями $u_1 = v_2, u_2 = v_1$.



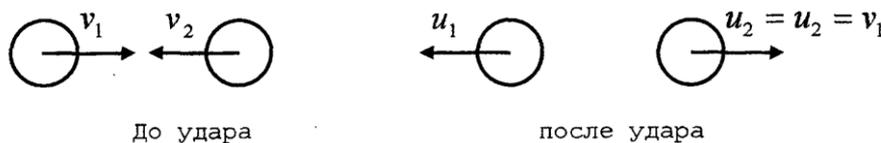
2. Если $m_1 > m_2$ и $v_2 = 0$, то после удара оба шара будут двигаться в одном и том же направлении и $u_2 > u_1$.



3. Если $m_1 < m_2$ и $v_2 = 0$, то после удара оба шара будут двигаться в противоположных направлениях.

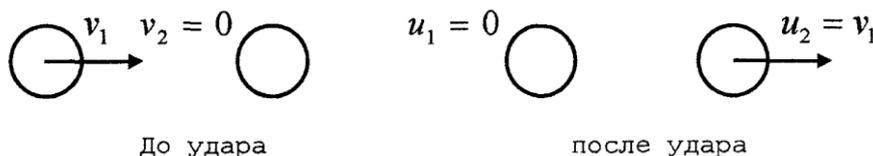


4. Если массы шаров равны ($m_2 = m_1$), а скорости противоположно направлены и равны по абсолютной величине ($|v_1| = |v_2|$), то после упругого взаимодействия шары должны двигаться с первоначальными скоростями в противоположные направления.



В этом случае в первой стадии удара упругая деформация возрастает до максимума за время уменьшения скорости до нуля. Во второй стадии упругая деформация уменьшается до нуля, а скорость за это время возрастает от нуля до максимума.

5. Если массы шаров равны ($m_2 = m_1$), $v_1 \neq 0$, $v_2 = 0$, то после удара $u_1 = 0$, $u_2 \neq 0$.



6. Если $m_2 = \infty$, $v_1 \neq 0$, $v_2 = 0$, то после удара скорость первого шара изменится на противоположную по направлению, оставаясь по абсолютной величине неизменной.



Удары реальных тел даже из упругих материалов не являются абсолютно упругими. Кинетическая энергия шаров до удара всегда несколько больше кинетической энергии после удара. Часть энергии теряется на остаточную деформацию, возникающие звуковые колебания воздуха, нагревание шаров и так далее.

Упругие свойства материала характеризуются *коэффициентом восстановления энергии K*:

$$K = \frac{W_{K.2}}{W_{K.1}} \quad (4.6)$$

где K – коэффициент восстановления энергии;
 W_{K1} – кинетическая энергия шаров до удара;
 $W_{K.2}$ – кинетическая энергия шаров после удара.

Коэффициент восстановления можно вычислить по формуле:

$$K = \frac{m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2}{m_1 v_1^2} \quad (4.7)$$

Величины v_1, v_2, u_1 и u_2 положительные, если они направлены вдоль положительного направления оси ОХ и отрицательные, если они направлены в противоположную сторону. Если шар ударяется о тело, масса которого значительно превосходит массу шара, то коэффициент восстановления находится по формуле:

$$K = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (4.8)$$

где H – высота, с которой падает шар; h – высота, на которую поднимается шар после удара.

Для всех тел коэффициент восстановления заключен в диапазоне от 0 до 1. Для абсолютно упругого удара $K=1$, для абсолютно неупругого удара $K=0$.

Таблица 10 – Значение коэффициентов восстановления

<i>МАТЕРИАЛ</i>	<i>K</i>	<i>МАТЕРИАЛ</i>	<i>K</i>
Дерево	0,50	Алюминий	0,23
Сталь	0,65	Бронза	0,40
Слоновая кость	0,39	Чугун	0,60
Стекло	0,94	Полистирол	0,95

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОРУДОВАНИЯ:

1. Установка для изучения упругого и неупругого ударов шаров
2. Линейка инструментальная (школьная).
3. Источник переменного тока (трансформатор).
4. Ключ, соединительные провода.
5. Линейка ученическая (деревянная).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ:

Установка для изучения ударов шаров представляет собой настольный прибор (рис.8).

На деревянной платформе 1 расположены две трапециевидные стойки 2. Вверху стоек укреплено приспособление 3 для подвеса шаров. Это приспособление имеет устройство 5 для смещения шаров, находящихся в положении равновесия (в положении равновесия шары должны слегка касаться друг друга). Шары подвешиваются на нитях 6 бифилярно, что обеспечивает их движение в одной плоскости.

Перед соударением один шар может удерживаться в отклоненном состоянии от положения равновесия электромагнитом 7. Электромагнит может перемещаться вдоль латунной дуги 8 и закрепляться в любой точке.

За шарами вдоль платформы расположена стальная линейка 9, закрепленная на стойках 10 и предназначенная для определения различных размеров положения шаров в равновесии и в отклоненном состоянии. Проводами 11 электромагнит соединяется через ключ 12 с источником переменного тока (трансформатора) 13, рукояткой которого устанавливается рабочее напряжение.

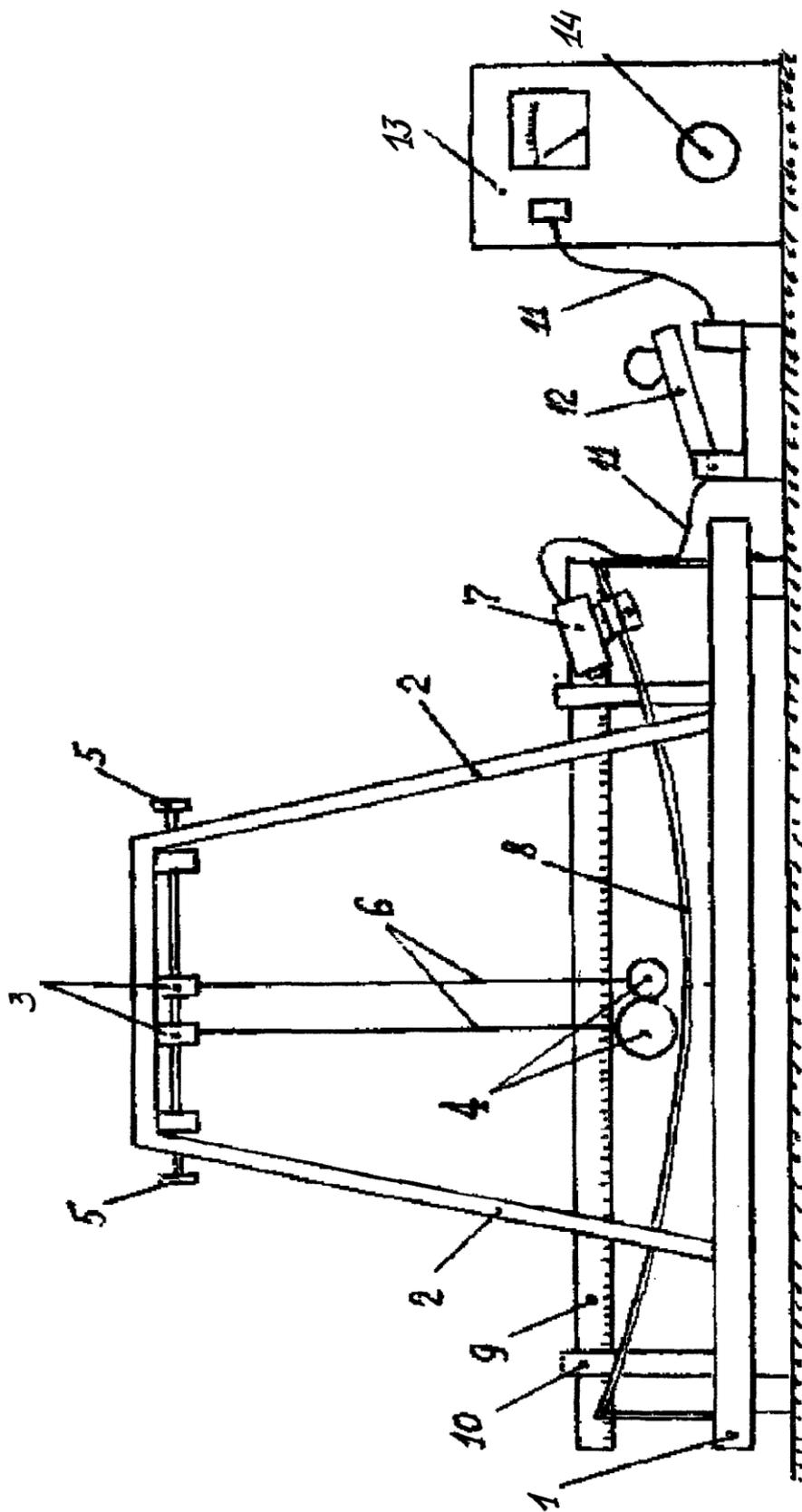


Рисунок 8 – Схема установки

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

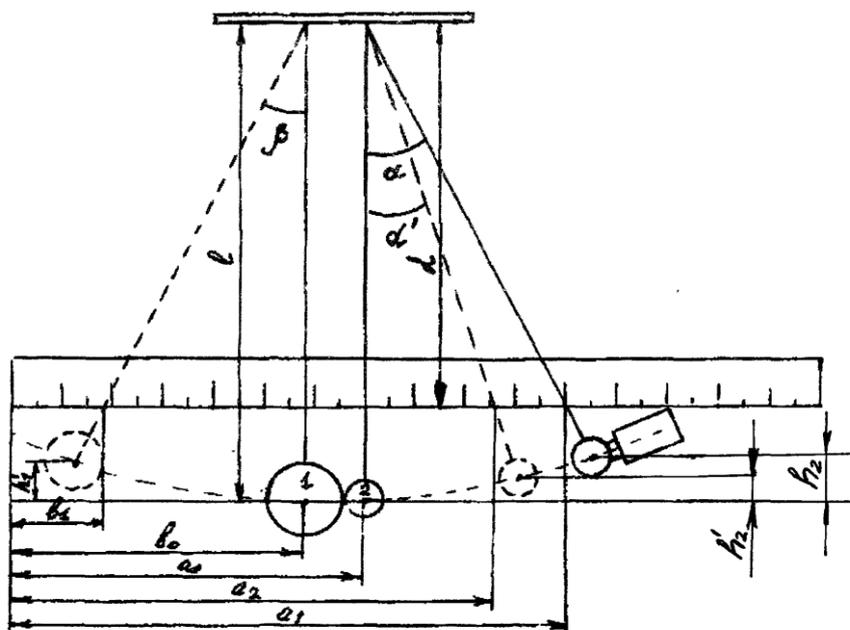


Рисунок 9 – Установка для изучения упругого удара шаров.

1. Линейкой ученической измерить расстояния l , d , a , b_0 и результаты занести в таблицу 11. Значения масс шаров m_1 и m_2 также занести в таблицу 1.
2. Замкнуть ключ, отвести правый шар к электромагниту (электромагнит должен удерживать шар) и измерить расстояние a_1 , соответствующее отклоненному положению шара. Значение внести в таблицу 11. Левый шар установить в положение равновесия.
3. Разомкнуть ключ и отметить по стальной линейке расстояния a_2 и b_1 , соответствующие максимальному отклонению каждого шара после удара (отсчет проводят два студента, каждый следит за своим шаром)
4. Результаты внести в таблицу 11.
5. Замкнуть ключ, отвести правый шар к электромагниту и, успокоив левый шар (он должен находиться в положении равновесия), провести измерения величин a_2 и b_1 по пункту 3 еще семь раз. Результаты занести в таблицу 11.
6. Разомкнуть ключ, установить шары в положение равновесия и вынуть вилку шнура источника питания из сети.
7. Вычислить средние значения величин $\langle a_2 \rangle$ и $\langle b_1 \rangle$ по формулам:

$$\langle a_2 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^8 a_i}{8} \text{ и } \langle b_1 \rangle = \frac{\sum_{i=1}^8 b_i}{8} \quad (4.9)$$

Результаты внести в таблицу 11.

Таблица 11 – Результаты измерений и вычислений

№	Измерено									Вычислено	
	m_1 кг	m_2 кг	ℓ , м	d , м	a_0 , м	b_0 , м	a_1 , м	a_2 , м	b_1 , м	a_2 , м	b_1 , м
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											

8. Вычислить значения тангенсов углов отклонения по формулам:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{a_1 - a_0}{d}, \quad \operatorname{tg}\alpha' = \frac{\langle a_2 \rangle - a_0}{d}, \quad \operatorname{tg}\beta = \frac{b_0 - \langle b_1 \rangle}{d}. \quad (4.10)$$

Результаты внести в таблицу 12.

Таблица 12 – Результаты измерений и вычислений

$\operatorname{tg}\alpha$		v_1 , м/с	
$\operatorname{tg}\alpha$		v_2 , м/с	
$\operatorname{tg}\beta$		u_1 , м/с	
α , град		u_2 , м/с	
α' , град		$m_1 v_1$, м/с	
β , град		$m_2 v_2$, м/с	
h_1 , м	0	$m_1 u_1$, м/с	
h_1' , м		$m_2 u_2$, м/с	
h_2 , м		K	
h_2' , м		ΔW , Дж	

9. По формулам:

$$h_2 = \ell(1 - \cos \alpha) = 2\ell \sin^2 \frac{\alpha}{2}, \quad v_2 = \sqrt{2gh_2},$$

$$h_1' = \ell(1 - \cos \beta) = 2\ell \sin^2 \frac{\beta}{2}, \quad u_1 = \sqrt{2gh_1'},$$

$$h_2' = \ell(1 - \cos \alpha') = 2\ell \sin^2 \frac{\alpha'}{2}, \quad u_2 = \sqrt{2gh_2'}.$$

Рассчитать все указанные величины и внести результаты в таблицу 12.

10. Проверить выполнение закона сохранения импульса по выражению:

$$m_2 v_2 = -m_2 u_2 + m_1 u_1. \quad (4.11)$$

Расхождения между значениями левой и правой частей равенства не должны превышать 6%.

11. Вычислить значение коэффициента восстановления K по формуле (4.7) и сравнить его с табличным.

12. Рассчитать необратимую потерю кинетической энергии по формуле:

$$\Delta W = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} - \frac{m_1 u_1^2}{2} - \frac{m_2 u_2^2}{2} \quad (4.12)$$

13. По указанию преподавателя выполнить действия по пунктам 1 – 10 для неупругого удара (один шар из пластилина, другой – стальной).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какое взаимодействие тел называется абсолютно упругим ударом?
2. Какое взаимодействие тел называется абсолютно неупругим ударом?
3. Выведите для абсолютно упругого и абсолютно неупругого ударов шаров формулы для определения скорости шаров до момента соударения и после соударения?
4. Что называется коэффициентом восстановления, как его определить?
5. Выведите закон сохранения и превращения энергии
6. Как определить необратимую потерю кинетической энергии?
7. Как проверить справедливость закона сохранения импульса?
8. Как определить силу взаимодействия при упругом ударе?
9. В каком случае можно воспользоваться формулой коэффициента восстановления (8) – ?, (9) – ?.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 1, Механика. Молекулярная физика, М., Наука, 1982, §24, §§27-28.
2. Трофимова Т.П., Курс физики, М., Высшая школа, 2007, §9, §12, §15.

Лабораторная работа №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Определить показатель адиабаты уравнения Пуассона по отношению $\frac{C_p}{C_v}$.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Теплоемкостью (истинной) C тела называется отношение элементарного количества тепла δQ , сообщенного телу в каком-либо процессе, к соответствующему изменению температуры тела:

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (5.1)$$

Удельной теплоемкостью C называется теплоемкость единицы массы однородного вещества:

$$C = \frac{c}{m} \quad (5.2)$$

где m —масса тела.

Для смеси n газов имеем:

$$C_{см} = c_{см} \cdot m_{см} = c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_n m_n = \sum_{i=1}^n c_i m_i,$$

отсюда:

$$C_{см} = \frac{c_{см}}{m_{см}} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i m_i}{m_{см}} = \sum_{i=1}^n c_i \frac{m_i}{m_{см}},$$

где c_1, c_2, \dots, c —удельные теплоемкости компонентов смеси, а m_1, m_2, \dots, m_n —массы компонентов.

Молярной теплоемкостью называется теплоемкость одного моля вещества:

$$C_{\mu} = \mu \cdot c \quad (5.3)$$

где μ — молярная масса, c — удельная теплоемкость.

Метод адиабатического расширения основан на применении уравнений адиабатического и изотермического процессов.

Процесс, при котором отсутствует теплообмен между газом и окружающей средой, называется **адиабатическим**, строго говоря, такой процесс невозможен, но его можно воспроизвести с большой степенью точности в трех случаях:

1. При большой скорости протекания процесса (выстрел из огнестрельного оружия, сжатие воздуха в цилиндре дизельного двигателя);
2. Хорошей теплоизоляции;
3. В недрах огромных масс воздуха при некоторых атмосферных процессах (например, в восходящих или нисходящих воздушных потоках), в следствие плохой теплопроводности воздуха.

Первое начало термодинамики в применении к адиабатическому процессу:

$$dU = -\delta \cdot A, \text{ т. к. } \delta Q = 0.$$

Это означает, что при отсутствии теплообмена с окружающей средой, газ совершает работу за счет своей внутренней энергии и охлаждается; если же работа совершается над газом, он нагревается, т.к. работа внешних сил идет на увеличение внутренней энергии газа.

Адиабатический процесс можно назвать процессом с нулевой теплоемкостью, т. к.

$$\delta Q=0, C = \frac{\delta Q}{dT} = 0.$$

Зависимость между параметрами данной массы газа при адиабатическом процессе выражается **уравнением Пуассона**:

$$PV^\gamma = const \quad (5.4)$$

где P —давление, V —объем данной массы газа,

$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ = показатель адиабаты,

c_p – теплоемкость газа в изобарическом процессе (при постоянном давлении),

c_v – теплоемкость газа в изохорическом процессе (при постоянном объеме).

Изотермический процесс, протекающий при постоянной температуре, т.е. без изменения внутренней энергии газа: $dU=0$, $\delta Q=\delta A$ и описываемый **уравнением Бойля – Мариотта**:

$$PV=const \quad (5.5)$$

напротив, может быть назван процессом с бесконечно большой теплоемкостью:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}, \text{ но } dT=0 \quad (5.6)$$

Этот процесс также является идеальным и в точности неосуществимым, но при медленном сжатии и расширении газа может быть воспроизведен сколь угодно точно.

Между этими идеальными процессами лежат реальные процессы, теплоемкость которых $0 < C < \infty$ – постоянная, а показатель степени в уравнении $PV^n = \text{const}$ (показатель политропы) $1 < n < \frac{c_p}{c_v}$.

Адиабатический и изотермический процессы являются предельными случаями **политропного процесса**.

Показатель адиабаты любого газа можно получить, исходя из статистического закона о равномерном распределении энергии молекул по степеням свободы.

Конечно, в любой момент времени энергии молекул различные, а у отдельно взятой молекулы, вообще говоря, отличаются друг от друга кинетические энергии, обусловленные поступательными движениями молекул вдоль осей координат.

Так же отличаются от них и друг от друга кинетические энергии вращательного движения молекул вокруг осей координат.

Но так как молекул очень много, то средние значения этих энергий равны между собой.

В статистической физике показывают, что на каждую степень свободы (на каждую независимую координату, совокупность которых однозначно определяет положение молекулы в пространстве, приходится в среднем одно и то же количество кинетической энергии

$$W_{к1} = \frac{1}{2} kT \quad (5.7)$$

так, что средняя кинетическая энергия хаотического движения одной молекулы:

$$W_{ки} = \frac{i}{2} kT \quad (5.8)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-28}$ Дж/град – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура газа;

i – число степеней свободы молекулы.

Изменение кинетической энергии хаотического движения моля газа при нагревании:

$$\delta W_{к} = \frac{1}{2} k dT \cdot N_a = \frac{i}{2} R dT \quad (5.9)$$

т.к. по определению: $k = \frac{R}{N_a}$, здесь

dT – изменение температуры;

N_A – число Авогадро (число молекул в 1 моле);

R – универсальная газовая постоянная.

Так как молекулы газа взаимодействуют лишь путем отталкивания, то при нагревании суммарная потенциальная энергия взаимодействия молекул газа не изменяется, и изменение внутренней энергии газа равно изменению суммарной кинетической энергии всех его молекул.

$$dU = \delta W_{\kappa} = \frac{i}{2} R dT \quad (5.10)$$

Отсюда, количество теплоты, которое требуется для нагревания 1 моля газа в изохорическом процессе на 1°K (**молярная теплоемкость при постоянном объеме**):

$$C_{\mu,v} = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R \quad (\delta Q = dU) \quad (5.11)$$

поскольку работа:

$$A = \int p dv = 0 \quad (V_1 = V_2 = \text{const}).$$

Количество теплоты, которое требуется для нагревания 1 моля газа при изобарическом процессе на 1°K (**молярная теплоемкость при постоянном давлении**):

$$C_{\mu,p} = \frac{\delta Q}{dT} = \frac{dU + A}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{pdV}{dT} = C_{\mu,v} + R \quad (5.12)$$

т.к. при $P = \text{const}$ и $\frac{m}{\mu} = 1$ на основании закона Менделеева - Клапейрона

имеем:

$$pdv = \frac{m}{\mu} R dT; \quad pdv = R dT; \quad \frac{pdT}{dT} = R.$$

Мы видим, что молярная теплоемкость газа при постоянном давлении больше его теплоемкости при постоянном объеме, т.к. в первом случае, кроме увеличения внутренней энергии газа, совершается работа над внешними телами в результате его расширения при нагревании, а во втором случае объем не меняется, и тепло расходуется лишь на увеличение внутренней энергии газа. Величина же работы 1 моля любого газа при нагревании его на 1 K при постоянном давлении и есть универсальная газовая постоянная R .

Из (5.11) и (5.12)

$$C_{\mu,p} = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R \quad (5.13)$$

Разделив (5.13) на (5.12), получим теоретическое значение отношения теплоемкостей:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_{\mu,p}}{c_{\mu,v}} = \frac{i+2}{i},$$

что для двухатомных молекул воздуха (три координаты для поступательного и две для вращательного движения) $i=5$ дает $\gamma=1,4$; для одноатомных молекул инертных газов ($i=3$), $\gamma=1,667$; для молекул, состоящих из трех и более атомов ($i=6$), $\gamma=1,333$.

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОРУДОВАНИЯ:

1. Установка ФПТ1–6 предназначенная для определения отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ:

Экспериментальная установка представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из основных частей: на лицевой панели приборного блока, находятся органы управления, элементы световой индикации, пневмотумблер для сброса воздуха в атмосферу.

Визуально приборный блок разделен на два модуля:

1. Модуль питания «СЕТЬ» с тумблером включения питания микропроцессора и светодиодом;
2. Модуль «ВОЗДУХ» с тумблером включения подачи воздуха в колбу и светодиодом.

Внутри приборного блока установлен микропроцессор, колба, электропневмо-клапан, который установлен для предотвращения сброса давления в ресивере и открыт при работающем компрессоре.

На задней панели приборного блока установлены:

1. Сетевой предохранитель;
2. Подведен шнур питания.

Блок манометра предназначен для измерения давления в колбе. В верхней части блока манометра размещена ловушка для воды.

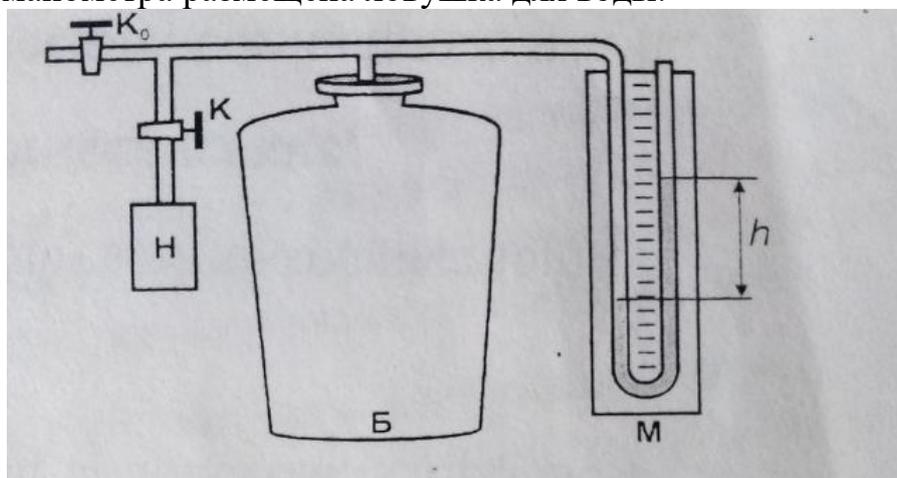


Рисунок 10 – Схема установки

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

Задание 1.

Изучение изопроцессов в газе

Прежде чем приступить к измерениям, изучите газовые процессы, необходимые для определения отношения теплоёмкостей γ , и дайте их описание в таблице 13.

1. Закройте кран K_0 , откройте кран K , включите компрессор и накачайте воздух в баллон до избыточного давления 230...250 мм рт. ст. Компрессор работает, когда нажата и удерживается кнопка.

2. При закрытых кранах K_0 и K выждите 2-3 мин, пока установится постоянное давление в баллоне (отсчёт H), это состояние воздуха 1 (см. график рис.11).

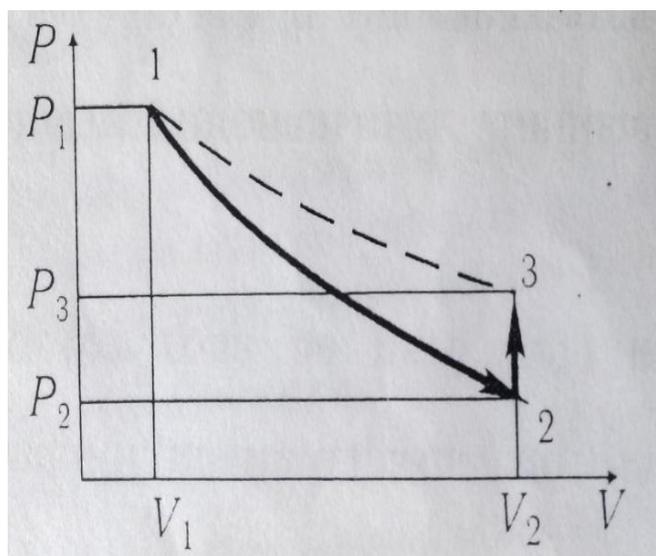


Рисунок 11 – График зависимости P от V

Таблица 13 – Результаты наблюдений

Процесс	Название процесса	Направление процесса (сжатие или расширение, нагревание, охлаждение)	Соотношение параметров воздуха в баллоне P_i, T_i и в лаборатории P_l, T_l			
			начальные		конечные	
1 - 2			$P_1 > P_l$	$T_1 = T_l$	$P_1 = P_l$	$T_2 < T_l$
2 - 3			$P_2 = P_l$	$T_2 < T_l$	$P_3 > P_l$	$T_3 = T_l$

3. Открыв кран K_0 , соедините баллон с атмосферой и после выравнивания давлений закройте кран K_0 , состояние газа в этот момент обозначено 2.

4. Выждите 2-3 мин до достижения состояния 3, при котором установится постоянное давление в баллоне (отсчёт h').

Задание 1.

Определение отношения теплоёмкостей γ

1. Создайте в баллоне постоянное избыточное давление H , как описано в задании 1, п. 1.2.

2. Открывая кран K_0 , соедините баллон с атмосферой и одновременно включите секундомер. Оставьте кран K_0 открытым в течение $t = 5$ с и затем быстро закройте его.

3. Выждите 2 – 3 мин, пока в баллоне установится постоянное давление, и сделайте отсчёт по манометру h' .

4. Проведите аналогичные измерения с различным временем сообщения баллона с атмосферой ($t = 10, 15, 20$ и 25 с), но при одинаковом начальном значении H . Для его получения воздух накачайте медленно, приближаясь к нужной величине со стороны меньших значений давления. Результаты всех измерений H и h записывайте в таблицу 14.

Таблица 14 – Результаты измерений и вычислений

H = мм	t, с	5	10	15	20	25	0	Координаты средней точки
	h', мм						h =	t =
	lnh'						lnh =	lnh' =

5. Найдите значения $\ln h'$ и нанесите опытные точки на поле графика в координатах $\ln h - t$.

6. Продолжая прямую до пересечения с осью ординат ($t = 0$), определите величину $\ln h$.

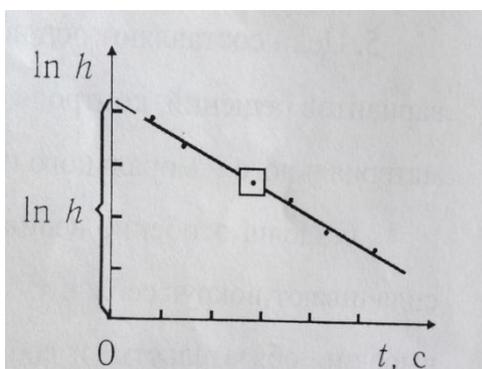


Рисунок 12 – График зависимости $\ln h$ от t

7. По найденному значению $\ln h$ определите h и рассчитайте величину γ по формуле $\gamma = \frac{H}{H - h}$.

8. Вычислите по формуле $\gamma = \frac{i+2}{i}$ теоретическое значение величины отношения теплоёмкостей γ , считая, что воздух состоит, в основном, из двухатомных молекул.

Для воздуха это значение равно $\gamma = \frac{i+2}{i}$, где $i = 5$, тогда $\gamma = 1,40$.

9. Сравните экспериментальное значение γ с теоретическим и сделайте вывод по работе.

Задание 3.

Расчет погрешности измерений

1. Вычислить среднее значение $\langle \gamma \rangle$ по формуле: $\langle \gamma \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{10} \gamma}{10}$.

2. Рассчитать относительную и абсолютную погрешность результата 10 измерений по формуле Стьюдента.

3. Вычислить погрешности отдельных измерений:

$$\Delta \gamma_i = |\langle \gamma \rangle - \gamma_i|$$

4. Вычислить квадраты погрешностей отдельных измерений: $(\Delta \gamma_i)^2$.

5. Определить среднюю квадратичную погрешность результата серии измерений:

$$\Delta S_{\gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \gamma_i)^2}{n(n-1)}}$$

6. При заданном значении надежности $\alpha = 0,95$, определить коэффициент Стьюдента $t_{\gamma}(n)$, где n – число произведенных измерений (по таблице).

7. Найти границы доверительного интервала (погрешность результата измерений)

$$\Delta \gamma = t_{\gamma}(n) \Delta S_{\gamma}$$

8. Окончательный результат записать в виде: $\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta \gamma$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Что называется теплоемкостью тела, удельной, молярной теплоемкостью?
2. Почему для газов теплоемкость зависит от условий нагревания? Почему C_p больше C_v ? Вывести уравнение Майера.
3. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?
4. Дать определения изобарического, изотермического, изохорического процессов. Сформулировать и записать уравнение, описывающие их, первое начало термодинамики и применение к этим процессам.
5. Дать определение адиабатического процесса. Сформулировать и записать уравнение, описывающие его, первое начало термодинамики в применении к этому процессу.

6. Сформулировать закон равномерного распределения энергии по степеням свободы.
7. Чему равна внутренняя энергия одного моля газа, любой массы газа?
8. Вывести расчетную формулу $\gamma = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2}$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Савельев И.В., Курс общей физики, т. 1, Механика. Молекулярная физика, М., Наука, 1982, §24, §§27-28.
2. Трофимова Т.П., Курс физики, М., Высшая школа, 2007, §50-55.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров Н.В., Курс общей физики. Механика (текст): учебное пособие / Н.В.Александров, А.Я.Яшкин. - М. : «Просвещение»,1978. - 416 с.
2. Архангельский М.М., Курс физики. Механика (текст): учебное пособие/ М.М. Архангельский. - 3-е изд. –М.: «Просвещение»,1975. - 424 с.
3. Детлаф А.А., Курс физики (текст): учебное пособие для втузов/ А.А.Детлаф. – М.: « Высшая школа», 1973. – 384 с.
4. Дмитриева В.Ф., Основы физики (текст): учебное пособие/ В.Ф.Дмитриева. – М.: «Высшая школа»,2001.
5. Зисман Г.А., Курс общей физики, т. 1 (текст): учебное пособие/Г.А.Зисман, О.М.Тодес. – М.: «Наука», 1969. – 368 с.
6. Савельев И.В., Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика (текст): учебное пособие/ И.В.Савельев. – М.: « Наука», 1982.
7. Стрелков С.П., Механика. (текст): учебное пособие для университетов/ С.П. Стрелков. – М.: « Наука», 1975. – 560 с.
8. Трофимова Т.И., Курс физики (текст): учебное пособие/ Т.И.Трофимова. – 3-е изд.. испр. - М.: «Высшая школа», 2007. – 542 с.

ОЖЕГОВА СВЕТЛАНА МИХАЙЛОВНА

МЕХАНИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

для студентов направлений подготовки

09.03.03 Прикладная информатика

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

15.03.02 Технологические машины и оборудование

13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

22.03.02 Metallургия

18.03.01 Химическая технология

38.03.01 Экономика

очной и заочной форм обучения

Подписано в печать 16.12.2020 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 211	Печать цифровая Тираж 30 экз.	Уч.-изд.л. 3,25

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: nf@misis.ru

Контактный тел. 8 (3537) 679729.