

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Тверской государственный технический университет

КАФЕДРА ФИЗИКИ

**Лабораторные занятия
по Ф И З И К Е**

Часть 1

*Методические указания
к лабораторным работам по механике
и молекулярной физике*

Тверь 2005

УДК 531/534(057.8)

ББК 22.2+22.3я7

Предназначены для студентов, выполняющих лабораторные работы по разделам «Механика» и «Молекулярная физика» курса общей физики.

Вводный раздел знакомит студентов с общими требованиями кафедры физики к проведению и оформлению результатов лабораторных работ и их защите.

Основную часть указаний составляют описания методов, экспериментальных установок и порядка проведения лабораторных работ. В конце каждого описания работы приведены рекомендуемая литература и контрольные вопросы для подготовки к защите лабораторной работы.

Методика обработки результатов экспериментов, правила построения и оформления графиков при выполнении лабораторных работ, соотношения между внесистемными единицами и единицами СИ, а также множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования вынесены в приложения.

Обсуждены на заседании кафедры физики и рекомендованы к печати (протокол № 4 от 14.12.04).

Составители: В.М. Алексеев, А.Н. Болотов, А.Ф. Гусев, В.В. Измайлов, Ю.И. Морозова.

Под редакцией В.М. Алексеева.

ВВЕДЕНИЕ

Инструкция по проведению занятий в учебных лабораториях

Перед выполнением лабораторных работ все студенты в обязательном порядке должны пройти инструктаж по технике безопасности, о чем расписываются в специальном журнале. Очередность выполнения лабораторных работ и их защиты определяется графиком, имеющимся в лаборатории: одну работу выполняют не более двух студентов.

Допуск студентов к выполнению лабораторных работ

1. Студент должен иметь тетрадь (лабораторный журнал), предназначенную только для лабораторных работ.

2. Студент должен быть подготовлен к выполнению лабораторных работ как минимум в объеме описания к данной работе.

3. Допуск студентов к выполнению лабораторных работ проводится преподавателем путем опроса.

4. К выполнению текущей лабораторной работы допускаются только те студенты, которые:

а) показали достаточную подготовку к занятиям, а именно: понимание сущности явлений, знание физических величин и законов, которые лежат в основе данной работы, цели работы и принципа устройства измерительных приборов, применяемых в работе;

б) оформили полностью отчет по предыдущей работе;

в) имеют в тетради форму отчета по выполняемой работе (в форму отчета включаются пункты 1-6 раздела 3 настоящей инструкции).

5. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы, занимаются в лаборатории подготовкой к ней с целью получить разрешение (допуск) к выполнению работы.

6. Студенты, не допущенные к выполнению лабораторной работы или не явившиеся на занятия, выполняют пропущенную работу в часы дополнительных занятий (в лабораторной тетради студента обязательно должно быть разрешение преподавателя на выполнение этой работы).

7. Экспериментальные данные, полученные студентами в процессе выполнения лабораторной работы, подписываются ведущим преподавателем или лаборантом.

8. После окончания занятий студент обязан привести приборы и оборудование в исходное положение, убрать рабочее место.

Защита лабораторных работ

К защите лабораторных работ студент обязан:

1. Предоставить отчет о проделанной работе, выполненный в соответствии с требованиями раздела 3 настоящей инструкции.

2. Знать необходимый теоретический материал (как минимум в объеме контрольных вопросов и заданий, которые имеются в данных методических указаниях).

3. Уметь кратко рассказать о содержании проведенного им эксперимента и сделать выводы по работе.

4. Уметь быстро приближенно производить оценку точности своих измерений.

5. Допуск, отчет и защита лабораторных работ оцениваются преподавателем по рейтинговой системе.

Требования к отчету по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие разделы:

1. *Дата выполнения лабораторной работы, ее номер и название.*

2. *Цель работы.*

3. *Приборы и принадлежности.*

4. *Основные расчетные формулы и законы.*

Раздел содержит законы, проверяемые в работе, и формулы по которым производится расчет экспериментальных результатов.

5. *Схема экспериментальной установки.*

Раздел содержит рисунок установки (схематический) и ее описание.

6. *Таблица(ы) результатов эксперимента.*

7. *Обработка результатов эксперимента.*

В этом разделе представляются: численный расчет одного из опытов полностью, график (если он требуется) на миллиметровой бумаге размером в тетрадный лист, расчет ошибки результатов эксперимента, расчеты по дополнительным заданиям.

8. *Результат работы.*

Раздел содержит конечный результат работы, расчетные значения по дополнительным заданиям и выводы по работе.

Лабораторная работа № 1-1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА.

Цель работы. Изучение законов движения тел в вязкой среде и применение этих законов к экспериментальному определению коэффициента вязкости жидкости.

Приборы и принадлежности: цилиндрический сосуд с жидкостью, секундомер, микрометр, шарики.

Описание метода измерений и экспериментальной установки

На всякое тело, движущееся в жидкой или газообразной среде, действует сила сопротивления, обусловленная вязкостью или внутренним трением. При малых скоростях движения тела (не более нескольких метров в секунду в жидкости или десятков метров в секунду в газе) сила сопротивления пропорциональна его скорости

$$\vec{F} = -b \cdot \vec{v}, \quad (1)$$

где b – коэффициент сопротивления, \vec{v} – скорость тела. Знак « - » означает, что сила сопротивления всегда направлена противоположно скорости тела.

Величина коэффициента сопротивления зависит от размеров и формы тела, природы жидкости и условий, при которых она находится.

Теоретическое определение коэффициента сопротивления представляет значительные трудности. Стоксу удалось теоретически установить силу сопротивления для шара радиусом R , получившую название силы Стокса, в виде

$$F_c = 6\pi\eta Rv. \quad (2)$$

Величина η , зависящая от природы жидкости и внешних условий, называется коэффициентом внутреннего трения, или коэффициентом вязкости. Как следует из приведенной формулы единицей измерения коэффициента вязкости в СИ является Па·с.

Зависимость силы сопротивления от коэффициента вязкости лежит в основе применяемого в работе метода его определения.

Для вывода расчетных зависимостей воспользуемся уравнением движения шарика радиусом R , погружающегося в жидкости (рис. 1).

На шарик действуют: сила тяжести \vec{P} , выталкивающая сила (сила Архимеда) $\vec{F}_{арх}$ и сила сопротивления \vec{F}_c . Согласно второму закону Ньютона уравнение движения шарика в проекциях на направление движения имеет вид

$$ma = P - F_c - F_{арх}, \quad (3)$$

где m – масса шарика, a – ускорение шарика.

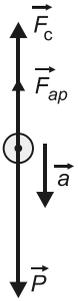


Рис. 1

Особенностью этого уравнения является присутствие в правой части силы сопротивления F_c , зависящей от скорости движения. Так как $P - F_{арх} = const$, а сила трения растет со скоростью, то модуль ускорения шарика будет уменьшаться от начального значения до 0 и, начиная с некоторого момента времени, шарик начнет погружаться с постоянной, «установившейся» скоростью v_0 . В этом случае уравнение (3) принимает вид

$$P - F_c - F_{арх} = 0. \quad (4)$$

Так как сила тяжести

$$P = mg = \rho V \cdot g,$$

а сила Архимеда

$$F_{арх} = \sigma \cdot g \cdot V, \quad (5)$$

где g - ускорение свободного падения, σ - плотность жидкости, ρ - плотность материала шарика, $V = \frac{4}{3} \pi R^3$ - его объем, из уравнения (4) имеем

$$\frac{4}{3} \pi R^3 g \cdot (\rho - \sigma) - 6\pi\eta Rv = 0. \quad (6)$$

Откуда, полагая $R = D/2$, где D - диаметр шарика, для определения коэффициента вязкости получим следующее выражение

$$\eta = \frac{(\rho - \sigma) \cdot g \cdot D^2}{18 \cdot v_0}. \quad (7)$$

Из закона равномерного движения установившаяся скорость движения шарика

$$v_0 = \frac{S}{t},$$

где t - время прохождения шариком пути S . Тогда

$$\eta = \frac{(\rho - \sigma) \cdot g \cdot D^2 \cdot t}{18 \cdot S}. \quad (8)$$

Таким образом коэффициент вязкости может быть рассчитан по формуле (8), если при известных значениях плотности жидкости и материала шарика по результатам эксперимента определить время t , за которое шарик диаметром D проходит путь S .

Для определения времени погружения шарика в работе используется стеклянный цилиндрический сосуд 1 (рис. 2), укрепленный на жестком штативе. Сверху сосуда установлен центрирующий конус 4, обеспечивающий движение шарика по оси сосуда. Сосуд заполнен исследуемой жидкостью с плотностью 1300 кг/м^3 . На поверхности цилиндра, на расстояниях H_1 и H_2 от дна сосуда установлены две горизонтальные метки 2.

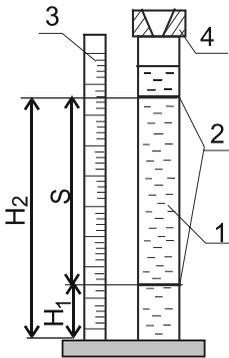


Рис. 2

Расстояние между метками $S = H_2 - H_1$ определяется по шкале 3. Время погружения шарика измеряется по секундомеру с точностью до 0,2 с. Диаметр шарика измеряется микрометром с точностью до 0,01 мм.

Порядок выполнения работы

1. Измерить расстояние S между метками на стенке сосуда.
2. Выбрать один из предложенных для эксперимента шариков и измерить его диаметр в пяти различных направлениях. Результаты измерений занести в таблицу.
3. Опустить шарик в центрирующий конус сосуда и измерить время его движения между метками на поверхности сосуда. Полученное значение занести в таблицу.
4. Повторить пункты 2 и 3 для второго, третьего, четвертого и пятого шариков.

Таблица результатов эксперимента

$\sigma = 1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$		$\rho = \dots \text{ кг/м}^3$			$S = \dots \text{ м}$	
№ шарика	D , мм	$\langle D \rangle =$	t , с	η_i , Па·с	$\Delta \eta_i$	$\Delta \eta_i^2$
1	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
2 и т.д.	2					

$$\langle \eta \rangle =$$

$$\sum \Delta \eta_i^2 =$$

Обработка результатов эксперимента

1. Рассчитать среднее значение диаметра каждого шарика по формуле

$$\langle D \rangle = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5}{5}$$

и полученные значения занести в таблицу.

2. Привести формулу (8) к виду

$$\eta = K \cdot D^2 \cdot t,$$

где $K = \frac{(\rho - \sigma) \cdot g}{18 \cdot s}$ и рассчитать значение этого коэффициента в СИ.

3. Для каждого опыта по среднему значению диаметра рассчитать значение коэффициента вязкости в СИ.

4. Согласно приложению 1 рассчитать среднее значение коэффициента вязкости $\langle \eta \rangle$, доверительный интервал $\Delta \eta$ и относительную погрешность E . Доверительную вероятность принять $\alpha = 0,95$.

Результат работы

1. Записать значение коэффициента вязкости в виде:

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta \eta ; \quad E = \quad .$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения скорости и ускорения поступательно движущегося тела. Как по скорости и ускорению найти закон движения тела?

2. Запишите законы равномерного, равноускоренного и равнозамедленного движений тела. Постройте графики зависимостей $S(t)$, $v(t)$, $a(t)$ для этих движений.

3. Сформулируйте второй закон Ньютона.

4. Какая сила называется силой сопротивления и от чего она зависит?

5. Какие силы действуют на шарик, движущийся в жидкости? Изобразите их на чертеже. Составьте уравнение движения шарика для случаев $\rho > \sigma$ и $\rho < \sigma$.

6. Как с течением времени изменяются ускорение и скорость шарика, погружающегося в жидкости? Постройте примерные графики зависимостей $a(t)$, $v(t)$, $v(h)$, $a(h)$, где h – глубина погружения.

7. Что называется коэффициентом вязкости жидкости? От чего он зависит? Каков его физический смысл? В каких единицах он измеряется?

8. При каких условиях шарик погружается в жидкости ускоренно, замедленно?

9. Выведите формулу (8).

10. В чем заключается сущность метода Стокса?

Библиографический список дополнительной литературы

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк., 1994, § 31
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.1 М.: Наука, 1992.
3. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. М.: Высш. шк., 1981. Стр. 23,24.

Лабораторная работа № 1-2 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАЯТНИКЕ ОБЕРБЕКА

Цели работы: 1. Экспериментальное определение величины момента инерции твердого тела и момента сил трения в подшипниках. 2. Проверка выполнения основного закона динамики вращательного движения. 3. Проверка выполнения закона сохранения энергии.

Приборы и принадлежности: маятник Обербека, секундомер, линейка, набор гирь.

Описание установки и методики проведения эксперимента

Для изучения законов вращательного движения в данной работе используется маятник Обербека (рис.1), который состоит из четырех спиц 2, укрепленных во втулке под прямым углом друг к другу и образующих крестовину маятника. На концах спиц 2 укреплены грузы 3 массой m_0 каждый.

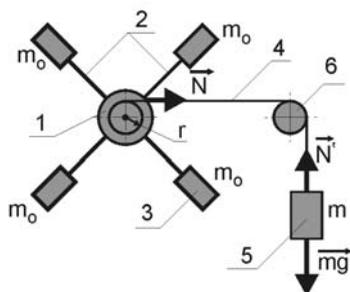


Рис. 1

Втулка и два шкива 1 различных радиусов закреплены на общей оси. Ось вращается в подшипниках. Таким образом, вся система совершает вращательное движение вокруг неподвижной горизонтальной оси. На один из шкивов намотана нить 4, к которой привязан подвес с гирями 5. Шнур перекинут через блок 6. При падении гирь 5 маятник совершает ускоренное вращательное движение относительно неподвижной горизонтальной оси.

Пренебрегая сопротивлением воздуха, уравнение движения маятника согласно основному закону динамики для вращательного движения представим в виде

$$J \cdot \varepsilon = M - M_{тр}, \quad (1)$$

где J - момент инерции маятника; ε - угловое ускорение; M - момент силы натяжения нити N , приводящей маятник во вращение; $M_{тр}$ - момент силы трения в подшипниках.

Так как момент сил трения $M_{тр}$ и момент инерции маятника J постоянны, то из уравнения (1) следует линейная зависимость углового ускорения ε от момента M вида

$$\varepsilon = \frac{1}{J} \cdot M - \frac{M_{тр}}{J}, \quad (2)$$

график которой приведен на рис.2.

Уравнение (2) – это уравнение прямой линии вида $y = a_0 + kx$, где $y = \varepsilon$,

$k = 1/J$, $a_0 = -M_{mp}/J$, $x = M$. Таким образом, если построенный по результатам эксперимента график зависимости $\varepsilon = f(M)$ будет иметь вид прямой линии (рис.2), то это и будет подтверждением выполнения основного закона динамики вращательного движения для маятника Обербека.

Выражение (2) также дает возможность определить по построенному графику момент инерции маятника J как отношение приращения момента силы натяжения нити ΔM к соответствующему приращению углового ускорения $\Delta \varepsilon$ (см. рис.2):

$$J = \frac{\Delta M}{\Delta \varepsilon}. \quad (3)$$

Момент сил трения M_{mp} определяется как отрезок OA , отсекаемый линией графика на оси абсцисс (см.рис.2).

Для построения графика (рис.2) необходимо знать угловое ускорение маятника ε и момент силы M , приводящий маятник во вращение. Угловое ускорение ε может быть найдено через линейное ускорение a падающей гири

$$\varepsilon = \frac{a}{r}. \quad (4)$$

Величину линейного ускорения гири можно определить из уравнения её движения

$$a = \frac{2 \cdot h}{t^2}, \quad (5)$$

где h - высота падения гири, t - время падения гири. Величины h и t легко определяются экспериментально.

Момент силы, приводящий маятник во вращение, определяется формулой $M = Nr$.

Если пренебречь моментом инерции блока и моментом сил трения в его опоре, то по третьему закону Ньютона сила N , приводящая маятник во вращение, равна силе N' , действующей на гирю. Силу N' можно найти из уравнения движения гири. Согласно второму закону Ньютона для гири

$$ma = mg - N',$$

откуда

$$N = N' = m \cdot (g - a).$$

Тогда, по определению, момент силы

$$M = N \cdot r = m \cdot (g - a) \cdot r. \quad (6)$$

Найденные из опыта значения момента инерции маятника J и момента сил трения $M_{тр}$ позволяют осуществить проверку закона сохранения энергии. При подъеме гири на высоту h системе сообщается потенциальная энергия

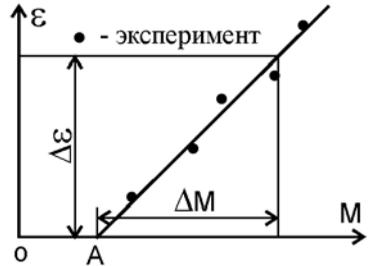


Рис. 2

mgh . При падении гири эта энергия превращается в кинетическую энергию поступательного движения гири $mv^2/2$, кинетическую энергию вращательно-го движения маятника $J\omega^2/2$ и затрачивается на работу против сил трения в подшипниках маятника $A = M_{тр}\varphi$, где $\varphi = h/r$ - угол, на который поворачивается маятник за время падения гири. Таким образом, закон сохранения энергии для маятника Обербека имеет вид

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + M_{тр}\varphi + \Delta W, \quad (7)$$

где ΔW - неконтролируемые в процессе эксперимента потери энергии. Это равенство и подлежит экспериментальной проверке.

Порядок выполнения работы

1. Познакомиться с установкой и указаниями к ней.
2. Намотать нить на шкив с большим радиусом так, чтобы основание подвеса находилось на расстоянии $h = 120 - 130$ см от пола. Значения радиуса шкива r и высоты h занести в таблицу.

Таблица результатов эксперимента

$h = \dots$ см,

$r = \dots$ мм.

№ опыта	$m, \text{ г}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$\langle t \rangle, \text{ с}$	$a, \text{ м/с}^2$	$\mathcal{E}, \text{ 1/с}^2$	$M, \text{ Нм}$
1								
2								
3								
4								
5								

3. Поместить на подвес одну из гирь, входящих в комплект установки и трижды измерить время t падения груза с высоты h . Величину массы гири вместе с подвесом m и полученные значения t_1, t_2, t_3 занести в таблицу.

4. Выполнить пункты 2 и 3 еще четыре раза, добавляя каждый раз на подвес 5 по одной гире и записывая в таблицу суммарную массу всех гирь вместе с подвесом.

Обработка результатов эксперимента

1. По результатам каждого из пяти опытов рассчитать среднее время падения гири $\langle t \rangle$, её линейное ускорение a (формула (5)), угловое ускорение маятника \mathcal{E} [формула (4)] и момент силы натяжения нити M [формула (6)]. Записать эти величины в таблицу.

2. По данным таблицы построить график зависимости $\mathcal{E} = f(M)$.

3. По графику определить момент инерции маятника J [формула (3)] и момент сил трения $M_{тр}$ (отрезок ОА).

4. Исходя из формулы (7) вычислить потери энергии в процессе эксперимента ΔW и выразить их в процентах от исходного значения энергии mgh .

Результат работы

1. Записать найденные значения момента инерции маятника и момента сил трения:

$$J = \dots \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad M_{\text{тр}} = \dots \text{ Нм}$$

2. Записать вывод о том, выполняется ли основной закон динамики вращательного движения.

3. Записать вывод о том, с какой погрешностью выполняется закон сохранения энергии, если не учитывать рассеивание энергии в окружающее пространство

Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Сформулируйте основной закон динамики вращательного движения. Запишите его формулу для маятника Обербека.
3. Что называется моментом силы? Как определяется величина момента силы M относительно оси? В каких случаях момент силы равен нулю?
4. Что называется моментом инерции тела относительно данной оси? Каков его физический смысл? От чего он зависит?
5. Для какого тела определяется момент инерции в данной работе?
6. В чем заключается метод определения момента инерции в данной работе?
7. Как определяется момент сил трения?
8. Как в работе рассчитывается вращающий момент?
9. Как рассчитывается кинетическая энергия при вращательном движении?
10. Как рассчитывается работа при вращательном движении?
11. Как зависит угловое ускорение маятника Обербека от положения грузов 3 (рис. 1)?
12. Каким образом можно теоретически рассчитать момент инерции маятника Обербека?
13. Почему равенство (7) является приближенным? Какая часть равенства (7) – левая или правая – больше и почему?

Библиографический список дополнительной литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. М.: Наука, 1989. § 8, 12, 19, 22, 24, 26, 28, 31, 32, 33.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк., 1994. § 8, 11-13, 16-18.

Лабораторная работа № 1-3 ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА

Цель работы: 1. Исследование затухающих колебаний. 2. Исследование вынужденных колебаний и явления резонанса.

Приборы и принадлежности: _крутильный маятник, электродвигатель, реостат, секундомер.

Описание экспериментальной установки и законов движения крутильного маятника

Крутильный маятник (рис. 1) состоит из диска 1, способного колебаться вокруг горизонтальной оси 2. Спиральная пружина 3 одним концом соединена с осью, а другим - с рычагом 4. Рычаг с помощью направляющей 5 и эксцентрика 6 связан с электродвигателем 7. Амплитуда колебаний определяется по шкале 8.

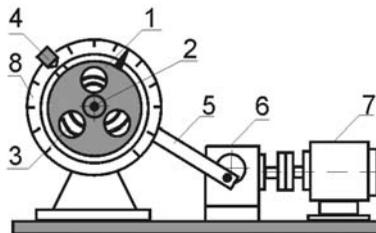


Рис.1

При выключенном электродвигателе маятник, выведенный из положения равновесия и предоставленный самому себе, совершает свободные затухающие колебания.

При работе электродвигателя рычаг, совершая колебательное движение, раскручивает или закручивает пружину, вызывая вынужденные колебания маятника. Частота вынуждающего момента зависит от числа оборотов электродвигателя и может быть изменена с помощью реостата, включенного в его электрическую цепь.

Затухающие колебания

На диск маятника, выведенного из положения равновесия, действует крутящий момент, пропорциональный углу поворота:

$$M_1 = -k_1 \cdot \alpha, \quad (1)$$

где k_1 - коэффициент крутильной жесткости пружины, α - угол поворота диска.

При движении маятника на него также действует момент сил сопротивления, пропорциональный его угловой скорости.

$$M_2 = -k_2 \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2)$$

где k_2 - коэффициент сопротивления.

Тогда согласно основному закону механики для вращательного движения уравнение движения диска маятника выведенного из положения равновесия и предоставленного самому себе принимает вид

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_1 + M_2, \quad (3)$$

где J - момент инерции диска маятника.

Решением дифференциального уравнения (3) является уравнение затухающих колебаний (зависимость угла поворота от времени)

$$\alpha = A_0 e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (4)$$

где

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t} - \quad (5)$$

амплитуда затухающих колебаний, уменьшающаяся с течением времени по экспоненциальному закону (рис.2, пунктирная кривая); $\beta = 2k_2 / J$ - коэффициент затухания.

Коэффициент затухания характеризует быстроту убывания амплитуды колебаний с течением времени.

График затухающих колебаний представлен на рис. 2 (сплошная кривая).

Частота затухающих колебаний

ω зависит от частоты собственных колебаний маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_1}{J}},$$

коэффициента затухания и определяется следующим образом:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (6)$$

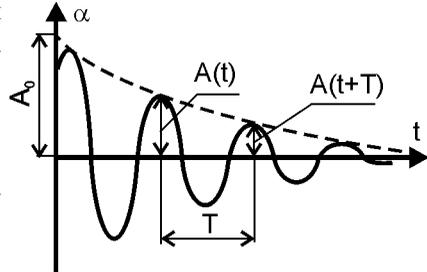


Рис. 2.

Для оценки быстроты затухания колебаний с числом колебаний существует логарифмический декремент затухания λ , определяемый как натуральный логарифм отношения двух последовательных амплитуд (см. рис. 2):

$$\lambda = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T. \quad (7)$$

Тогда закон убывания амплитуды колебаний можно представить в виде

$$A(N) = A_0 e^{-\lambda N}, \quad (8)$$

где N - число колебаний.

Эта зависимость в дальнейшем используется для экспериментального нахождения величины λ .

Вынужденные колебания

Вынужденными называются колебания диска маятника, происходящие под действием периодически изменяющегося момента внешней силы, получившего название вынуждающего момента

$$M = M_0 \sin \Omega t,$$

где M_0 — амплитуда, Ω - частота вынуждающего момента,

Дифференциальное уравнение движения диска маятника в этом случае

имеет вид

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -k_1 \alpha - k_2 \frac{d\alpha}{dt} + M_o \sin \Omega t . \quad (9)$$

Решением уравнения (8) является уравнение вынужденных колебаний

$$\alpha = A \cdot \sin(\Omega \cdot t - \varphi), \quad (10)$$

где A и Ω - амплитуда и частота колебаний, φ - сдвиг фаз между вынуждающим моментом и вызываемыми им колебаниями.

Из приведенного уравнения следует, что вынужденные колебания происходят с частотой Ω , равной частоте вынуждающего момента.

Амплитуда вынужденных колебаний

$$A = \frac{M_o}{J \sqrt{(\omega_o^2 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2 \Omega^2}} . \quad (11)$$

Сдвиг фаз φ определяется из уравнения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\beta \cdot \Omega}{\omega_o^2 - \Omega^2} . \quad (12)$$

Из формулы (11) следует, что при стремлении частоты вынуждающего момента к собственной частоте колебаний маятника происходит резкое возрастание амплитуды колебаний. При частоте вынуждающего момента

$$\Omega_p = \sqrt{\omega_o^2 - 2\beta^2} \quad (13)$$

амплитуда вынужденных колебаний достигнет максимального значения.

Это явление носит название резонан-

са, а частота Ω_p называется резонансной частотой. Графики зависимости амплитуды колебаний от частоты вынуждающего момента, получившие название резонансных кривых, при различных значениях коэффициента затухания ($\beta_1 > \beta_2$) приведены на рис. 3

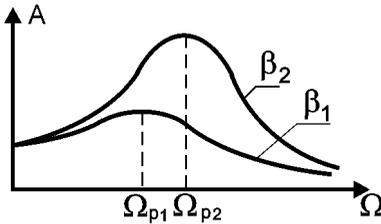


Рис. 3

Порядок выполнения работы

Исследование затухающих колебаний

1. Отклонить маятник на угол 110° - 120° в любую сторону (угол отсчитывается по указателю на кольце).
2. Отпустить маятник и одновременно включить секундомер. Измерить время, за которое совершается N ($N = 5$) полных колебаний маятника.
3. Повторить опыт еще 4 раза и результаты занести в табл. 1 Начальные отклонения диска от положения равновесия A_0 во всех пяти опытах брать

одинаковыми.

4. Отклонить маятник на угол 120° .
5. Отпустить маятник и измерить по шкале амплитуды 1-го, 2-го, 3-го, 4-го и 5-го колебаний.
6. Прodelать пункты 4 и 5 еще два раза и данные занести в табл. 2.

Таблицы результатов эксперимента

Таблица 1

N° п/п	N	t, c	T, c
1			
2			
3			
4			
5			

Таблица 2

Число колебаний N	A_{1i}	A_{2i}	A_{3i}	$\langle A \rangle$	$\ln A$
0	120°	120°	120°		
1					
2					
3					
4					
5					

Примечание. A_1, A_2, A_3 - амплитуды в первом, во втором и третьем опытах соответственно.

Таблица 3

N° п/п	N	t, c	T, c	$\omega, 1/c$	$A_B, ^\circ$
1					
2					
3					
⋮					
10					

Исследование вынужденных колебаний

1. Получив разрешение преподавателя или лаборанта, включить электродвигатель маятника в сеть.
2. Установить движок реостата таким образом, чтобы двигатель работал с минимальным числом оборотов.
3. Перемещая движок реостата с шагом около одной десятой длины реостата, найти положение движка, при котором амплитуда колебаний диска

маятника достигает наибольшей величины. Это положение поделит длину реостата на две части: область «высоких частот» и область «низких частот».

Примечание. Так как вынужденные колебания устанавливаются не сразу, а по истечении некоторого времени, то прежде чем отсчитывать амплитуду колебаний, необходимо убедиться в том, что угол отклонения маятника действительно максимален.

4. Последовательно устанавливая движок реостата, измерить время пяти полных колебаний рычага t и амплитуду колебаний диска маятника A_B не менее чем при 5 положениях движка реостата в области «высоких частот» и не менее чем при 5 положениях движка реостата в области «низких частот». Результаты измерений занести в табл. 3.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 1 рассчитать период T затухающих колебаний по формуле

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

и результаты занести в табл. 1.

2. Вычислить среднее значение величины T_{cp} и определить круговую частоту колебаний $\omega = 2\pi / T_{cp}$. Результаты занести в табл. 4.

3. По данным табл. 2 рассчитать средние значения амплитуды i -х колебаний $\langle A \rangle$ и найти их натуральные логарифмы $\ln A$.

4. Построить график зависимости $\ln A$ от числа колебаний N и определить логарифмический декремент λ следующим образом.

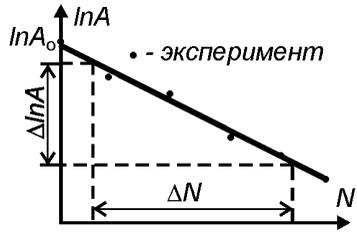


Рис. 4

Так как зависимость амплитуды затухающих колебаний от числа колебаний имеет вид (8), то после логарифмирования этого выражения получим

$$\ln A = \ln A_0 - \lambda N.$$

Графически эта зависимость выражается прямой, отсекающей на оси ординат отрезок, равный $\ln A_0$ (рис.4). Логарифмический декремент затухания λ определится как тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс $\lambda = \Delta \ln A / \Delta N$.

4. По уравнению (7) рассчитать коэффициент затухания β .

5. Определить φ_0 , подставив начальные условия $t = 0$, $\alpha = A_0$ в уравнение (4).

6. Данные для написания уравнения затухающих колебаний занести в табл. 4.

Таблица 4

T_{cp} , с	ω , 1/с	λ	β , 1/с	A_0 , °	φ_0 , рад
--------------	----------------	-----------	---------------	-----------	-------------------

--	--	--	--	--	--

7. Записать уравнение (4) через найденные величины.

8. Рассчитать период и частоту вынужденных колебаний по формулам

$$T = \frac{t}{N}, \quad \Omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Результаты занести в табл. 3

9. По данным табл. 3 построить график зависимости амплитуды вынужденных колебаний A_B от частоты вынуждающего момента Ω .

10. Для указанной преподавателем частоты рассчитать по формуле (12) сдвиг фаз φ и написать уравнение вынужденных колебаний (10) с числовыми коэффициентами.

Результат работы

1. Записать полученное уравнение затухающих колебаний.
2. Записать полученное уравнение вынужденных колебаний.

Контрольные вопросы

1. Какое движение называется колебательным?
2. Что называется амплитудой, периодом, частотой и фазой колебания?
3. Как изменяются с течением времени смещение и амплитуда собственных (незатухающих и затухающих) и вынужденных колебаний? Показать графически.
4. От чего зависят частота, период и начальная фаза собственных незатухающих колебаний?
5. От чего зависят частота и период затухающих колебаний?
6. Что называется коэффициентом затухания и логарифмическим декрементом затухания? Какая между ними связь? От чего они зависят?
7. Какие существуют аналитические и графические методы определения коэффициента затухания и логарифмического декремента затухания?
8. От чего зависят амплитуда и фаза вынужденных колебаний?
9. В чем состоит явление резонанса?
10. Приведите примеры затухающих и вынужденных колебаний в природе и технике, укажите их вредное действие.
11. Запишите дифференциальное уравнение собственных (незатухающих, затухающих) и вынужденных колебаний и приведите их решения.

Библиографический список дополнительной литературы

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк., 1994. §140-142, 146-148.
2. Савельев И.В. Курс физики. Т.2. М.: Наука, 1989. §63-65, 70,71.

Лабораторная работа № 1-5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ МЕТОДОМ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА

Цель работы: ознакомление с одним из методов определения ускорения силы тяжести.

Приборы и принадлежности: оборотный маятник, секундомер.

Описание метода измерений и экспериментальной установки

Физическим маятником называется твердое тело, способное колебаться под действием силы тяжести относительно горизонтальной оси подвеса O (рис.1).

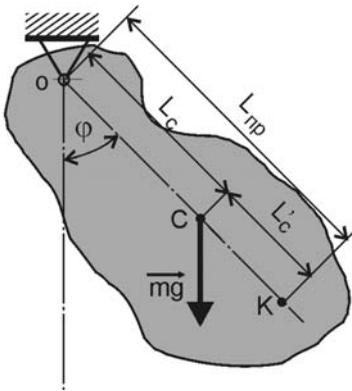


Рис. 1

Уравнение движения такого тела, выведенного из положения равновесия и предоставленного самому себе, согласно основному закону механики для вращательного движения имеет вид

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -mgL_c \sin \varphi, \quad (1)$$

где J - момент инерции тела относительно оси подвеса; L_c - расстояние от оси подвеса до центра тяжести тела C ; m - масса маятника; g - ускорение силы тяжести.

В случае малых колебаний ($\varphi \leq 5 \dots 7^\circ$) $\sin \varphi \approx \varphi$. Тогда уравнение (1) принимает вид

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + mgL_c \varphi = 0. \quad (2)$$

Решением уравнения (2) является функция вида

$$\varphi = \varphi_0 \sin(\omega t + \alpha_0), \quad (3)$$

согласно которому маятник совершает гармонические колебания с частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{mgL_c}{J}}.$$

В этом нетрудно убедиться, подставив выражение (3) в уравнение (2). Тогда период колебаний маятника

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgL_c}} = 2\pi \sqrt{\frac{L_{пр}}{g}}. \quad (4)$$

Величина

$$L_{пр} = \frac{J}{mL_c} \quad (5)$$

называется приведенной длиной физического маятника. Она равна длине нити математического маятника, имеющего одинаковый с физическим маятником период колебаний.

Согласно теореме Штейнера, момент инерции маятника относительно оси подвеса

$$J = J_c + mL_c^2, \quad (6)$$

где J_c - момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр тяжести и параллельной оси подвеса.

Тогда, подставляя (6) в (5), для приведенной длины маятника получаем

$$L_{пр} = L_c + \frac{J_c}{mL_c}, \quad (7)$$

откуда следует, что $L_{пр}$ всегда больше L_c .

Отложив из точки О по направлению прямой ОС отрезок длиной $L_{пр}$, получим точку К (см.рис.1), которая называется центром колебаний. Если ось подвеса переместить в центр колебаний, то приведенная длина маятника станет равной

$$L'_{пр} = L'_c + \frac{J_c}{mL'_c}, \quad (8)$$

где L'_c - расстояние от центра колебаний до центра тяжести. Сопоставляя(7) и (8) с учетом того, что $L'_c = L_{пр} - L_c$, можно показать, что приведенная длина,

а следовательно, и период колебаний не изменяются, то есть точки О и К обратимы. Это свойство обратимости и используется в оборотном маятнике для определения приведенной длины $L_{пр}$.

Оборотный маятник (рис.2) представляет собой цилиндрический стержень, на котором укреплены две треугольные опорные призмы 1 и 2. Расстояние между ними неизменно и равно $L = 73$ см. На стержень надеты две массивные чечевицы 3 и 4. Одна из них (чечевица 3) может перемещаться вдоль стержня и закрепляется винтом 6. Для отсчета положения чечевицы N на стержне имеется миллиметровая шкала с нониусом 5. В рабочем состоянии маятник опирается одной из призм 1 на подушку кронштейна 7, укрепленного в стене.

Перемещая подвижную чечевицу 3 по стержню, можно добиться такого ее положения, при котором периоды колебаний маятника относительно обеих опорных призм будут одинаковы, то есть $T_1 = T_2 = T$.

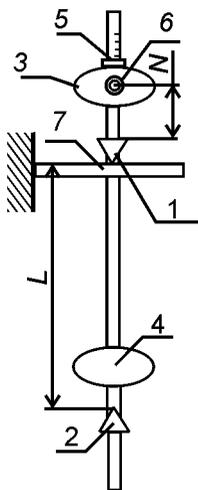


Рис. 2

В этом случае расстояние между опорами L маятника станет равным его приведенной длине $L_{пр}$, и тогда для ускорения силы тяжести с учетом формулы (4) получим

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2}. \quad (9)$$

Необходимый для расчета период колебаний маятника T легко определить, измерив время t , за которое маятник совершает n полных колебаний

$$T = \frac{t}{n}. \quad (10)$$

Порядок выполнения работы

1. Установить подвижную чечевицу маятника в положение $N = 0$ по шкале 5 и закрепить винтом 6.
2. Установить маятник на кронштейне в рабочее состояние на одну из опорных призм.
3. Отвести маятник влево на угол $5-7^\circ$. Включив секундомер, одновременно опустить маятник и определить время t_1 , за которое совершается 20 полных колебаний n .
4. Установить маятник на другую опорную призму и также определить время t_2 , за которое совершается 20 полных колебаний.
5. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица результатов эксперимента

n	20							50
$N, \text{см}$	0	3	6	9	12	15	18	$N_p =$
t_1								$t_{1p} =$
t_2								$t_{2p} =$

6. Повторить пункты 1-5, устанавливая подвижную чечевицу последовательно в положения $N = 3, 6, 9, 12, 15, 18$ см.
7. По полученным данным построить графики зависимости t_1 и t_2 от N .
8. По точке пересечения графиков определить положение подвижной чечевицы N_p , при котором периоды колебаний маятника одинаковы относительно обеих опорных призм.
9. Установить чечевицу в положение N_p и определить время t_{1p}, t_{2p} пятидесяти полных колебаний относительно призм 1 и 2.
10. Результаты измерений занести в таблицу.

Обработка результатов эксперимента

1. По формуле (10) для $n = 50$ и t_{1p}, t_{2p} рассчитать периоды колебаний маятника T_1 и T_2 и найти их среднее значение T .

2. По формуле (9) рассчитать ускорение силы тяжести.
3. Сравнить полученный результат g с табличным значением ускорения силы тяжести g_T и рассчитать относительную погрешность результата по формуле

$$E = \left| \frac{g - g_T}{g} \right| \cdot 100\%.$$

Результат работы

1. Записать полученное значение ускорения свободного падения и погрешность результата в виде

$$g = \dots, \quad E = \dots$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какой маятник называется физическим, математическим?
2. Составьте уравнение движения физического маятника.
3. От чего зависит период колебаний физического маятника?
4. Что называется приведенной длиной физического маятника?
5. Что называется центром тяжести, точкой подвеса, точкой колебаний?
6. Сформулируйте теорему Штейнера.
7. В чем заключается метод обратного маятника?
8. Что называется ускорением силы тяжести, силой тяжести, силой тяготения?
9. На основании закона всемирного тяготения вывести формулу для ускорения силы тяжести.
10. Как влияет вращение Земли на ускорение силы тяжести?
11. От чего зависит ускорение силы тяжести? Как оно меняется с удалением от центра Земли, от широты местности? Постройте графики этих зависимостей.

Библиографический список дополнительной литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. М.: Наука, 1989. § 12, 26, 31, 32, 37, 55-57.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк., 1994. § 16,18, 22-24, 27, 142.

Лабораторная работа № 1-6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ.

Цель работы: познакомиться с одним из методов экспериментального определения величины момента инерции тел.

Приборы и принадлежности: крутильный маятник, секундомер, штангенциркуль, кольца.

Описание экспериментальной установки и метода измерений.

Для определения момента инерции тел в работе используется крутильный маятник (см. рис.), состоящий из стойки 1, к которой на упругой стальной нити 2 подвешен диск 3. Диск маятника позволяет размещать на своей торцевой поверхности тела 4, момент инерции которых подлежит определению.

При повороте диска маятника вокруг вертикальной оси на угол φ нить создает действующий на диск крутящий момент, пропорциональный углу поворота:

$$M_{кр} = -k\varphi, \quad (1)$$

где k - коэффициент крутильной жесткости нити.

Тогда согласно основному закону механики для вращательного движения уравнение движения диска маятника выведенного из положения равновесия и предоставленного самому себе принимает вид

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{k}{J_d}\varphi = 0, \quad (2)$$

где J_d - момент инерции диска маятника относительно его оси.

Решением уравнения (2) является уравнение движения вида

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha_0), \quad (3)$$

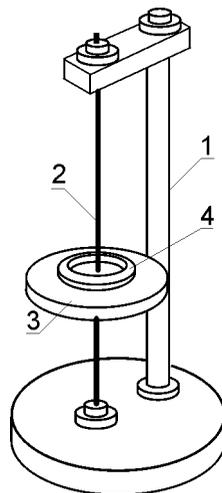
согласно которому маятник совершает гармонические колебания с амплитудой φ_0 , начальной фазой α_0 и периодом

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{J_d}{k}}, \quad (4)$$

в чем нетрудно убедиться, подставив функцию (3) с учетом (4) в уравнение (2).

Если на диске маятника разместить какое-либо тело, то момент инерции диска маятника относительно его оси возрастет на величину момента инерции этого тела относительно той же оси J_x и станет равным

$$J_1 = J_d + J_x, \quad (5)$$



а период колебаний выведенной из положения равновесия и представленной самой себе системы согласно формулам (2)-(4) примет значение

$$T_x = 2\pi\sqrt{\frac{J_1}{k}}, \quad (6)$$

Исключив из формул (4)-(6) неизвестные J_1 и k , для определения момента инерции J_x получим выражение

$$J_x = \frac{J_d(T_x^2 - T_d^2)}{T_d^2}. \quad (7)$$

Формула (7) дает значение момента инерции тела J_x относительно оси, совпадающей с осью диска маятника. Если положение центра масс тела не совпадает с этой осью, то момент инерции тела J_{x0} относительно оси, проходящей через центр масс тела параллельно оси диска маятника, следует рассчитывать на основании теоремы Штейнера по формуле

$$J_{x0} = J_x - m \cdot r^2, \quad (8)$$

где m - масса тела, r - расстояние от центра масс тела до оси диска маятника.

Таким образом имеется возможность определить момент инерции любого тела, способного разместиться на диске маятника, относительно различных осей, если при известном значении момента инерции J_d по результатам эксперимента определить периоды колебаний маятника T_d и T_x .

Момент инерции диска маятника можно предварительно определить по этой же методике, если по результатам эксперимента определить период колебаний T_k диска маятника с помещенным на него симметрично относительно нити телом (например, кольцом), с известным моментом инерции относительно оси, совпадающей с нитью маятника. Тогда из формулы (7) для определения момента инерции диска маятника по результатам эксперимента получим выражение

$$J_d = \frac{J_k T_d^2}{(T_k^2 - T_d^2)}. \quad (9)$$

Необходимую для расчета величину момента инерции кольца J_k можно рассчитать, зная его массу M_k , внутренний R_B и наружный R_H радиусы, по формуле

$$J_k = 0,5 \cdot M_k \cdot (R_H^2 + R_B^2). \quad (10)$$

Период колебаний маятника можно рассчитать, по определению, измерив предварительно в эксперименте время t , за которое совершается N колебаний маятника

$$T = \frac{t}{N}. \quad (11)$$

Порядок выполнения работы

Определение момента инерции диска маятника

1. Повернуть диск вокруг вертикальной оси на угол $10 - 15^\circ$ и, предоставив его самому себе, измерить время t_d , за которое совершается N полных колебаний. Измерения повторить 5 раз, меняя N от 10 до 30 колебаний. Результаты занести в табл. 1.

2. На диск маятника симметрично относительно его центра поместить кольцо с известной массой M_k и измерить время t_k , за которое совершается N полных колебаний маятника согласно п.1.

3. С помощью штангенциркуля измерить внутренний и наружный диаметры кольца. Результаты измерений и информацию о массе кольца записать в табл. 1.

Таблица 1

$M_k =$		$D_H =$		$D_B =$		$J_k =$		
№ п/п	N	t_d, c	t_k, c	T_d, c	T_k, c	$J_d, кгм^2$	ΔJ_{di}	ΔJ_{di}^2
1	10							
2	15							
3	20							
4	25							
5	30							

$$\langle J_d \rangle = \quad \Sigma \Delta J_d^2 =$$

Определение момента инерции произвольного тела

1. Повернуть диск вокруг вертикальной оси на угол $10 - 15^\circ$ и, предоставив его самому себе, измерить время t_d , за которое совершается N полных колебаний. Измерения повторить 5 раз, меняя N от 10 до 30 колебаний. Результаты занести в табл. 2.

2. На диск маятника поместить тело, момент инерции которого J_x подлежит определению, и измерить время t_x , за которое совершается N полных колебаний согласно п.1.

Таблица 2

№ п/п	N	t_d, c	t_x, c	T_d, c	T_x, c	$J_x, кгм^2$	ΔJ_x	ΔJ_x^2
1	10							
2	15							
3	20							
4	25							
5	30							

$$\langle J_x \rangle = \quad \Sigma \Delta J_x^2 =$$

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл.1 и 2 рассчитать периоды T_d , T_k и T_x по формуле (11).
2. По формуле (10) вычислить момент инерции кольца J_k .
3. По формуле (9) вычислить момент инерции J_d для каждой строчки табл.1.
4. По формуле (7) вычислить момент инерции J_x для каждой строчки табл.2.
5. Согласно приложению 1 рассчитать среднее значение моментов инерции $\langle J_d \rangle$, $\langle J_x \rangle$, доверительные интервалы ΔJ_d , ΔJ_x и относительные погрешности E_d , E_x . Доверительную вероятность принять $\alpha = 0,95$.

Результат работы

1. Записать полученные значения моментов инерции в виде

$$J_d = \langle J_d \rangle \pm \Delta J_d; \quad E_d = ; \quad ; \quad J_x = \langle J_x \rangle \pm \Delta J_x; \quad E_x = .$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой крутильный маятник?
2. Как в работе определяется период колебаний крутильного маятника?
3. В чем заключается метод определения момента инерции тел, применяемый в работе?
4. Что называется упругой силой, крутильным моментом, от чего они зависят?
5. Что называется коэффициентом жесткости пружины, коэффициентом крутильной жесткости?
6. Сформулируйте основной закон динамики для вращательного движения. Какие из величин, входящие в уравнение этого закона, являются векторными? Как направлены эти векторы?
7. Что называется моментом инерции твердого тела? От чего он зависит? Каков его физический смысл?
8. Сформулируйте теорему Штейнера.
9. Запишите уравнение основного закона динамики для крутильного маятника .
10. Выведите формулы (7) и (9).
11. Используя формулу для расчета момента инерции диска относительно его оси, выведите формулу (10).
12. Как с помощью метода крутильных колебаний определить момент инерции несимметричных сплошных тел?

Библиографический список дополнительной литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. М.: Наука, 1989. § 36-39.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк., 1994. § 16-18.

Лабораторная работа № 1-8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН

Цель работы: познакомиться с одним из методов определения скорости звука в воздухе при комнатной температуре.

Приборы и принадлежности: стеклянная трубка с поршнем на горизонтальной панели, звуковой генератор, осциллограф.

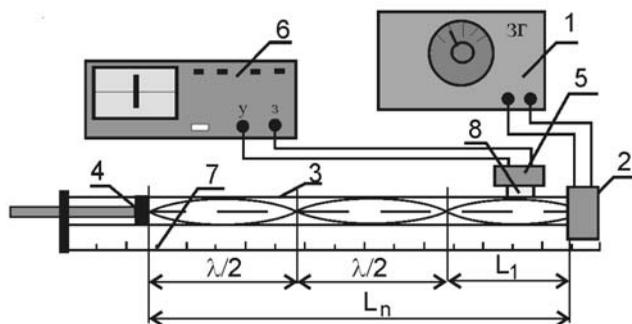
Описание экспериментальной установки и метода измерений .

Скорость распространения звука в воздухе можно найти по формуле

$$v = \lambda \cdot \nu, \quad (1)$$

если в процессе эксперимента измерить длину волны λ , создаваемой источником звука известной частоты ν .

Для измерения длины волны в работе применяется метод стоячих волн. Схема используемой для этого установки изображена на рис..



Синусоидальный электрический ток заданной частоты, поступающий от звукового генератора (ЗГ) 1, приводит в колебание с той же частотой мембрану телефона 2, расположенного на одном из концов полый трубы 3. Второй конец трубы закрыт порш-

нем 4, который может перемещаться вдоль трубы.

Колебания мембраны телефона возбуждают в столбе воздуха звуковую волну, уравнение которой имеет вид

$$\xi = A \cos(\omega \cdot t - k \cdot x), \quad (2)$$

где ξ - смещение точки от положения равновесия, x - координата точки, ω -

круговая частота колебаний точек, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число.

Эта волна интерферирует с волной, отраженной от поверхности поршня

$$\xi = A \cos(\omega \cdot t + k \cdot x). \quad (3)$$

Если частота колебаний мембраны совпадает с одной из частот собственных колебаний воздушного столба (явление резонанса), то в трубе возника-

ет стоячая волна, которая описывается уравнением

$$\xi = 2A \cos(k \cdot x) \cos(\omega \cdot t), \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что в каждой точке волнового поля колебания происходят с одной и той же частотой ω и амплитудой $A_{cm} = |A \cdot \cos(2\pi x/\lambda)|$, зависящей от координаты точки. Точки, в которых колебания происходят с удвоенной амплитудой, называются пучностями стоячей волны. Точки, в которых амплитуда колебаний равна нулю, называются узлами стоячей волны.

Распределение узлов и пучностей стоячей волны в трубе в момент, когда у патрубков микрофона 8 образуется пучность показано на рис.1. У поверхности поршня 4 фаза колебания меняется на противоположную, и там всегда образуется узел стоячей волны. Поэтому на длине резонирующего столба воздуха укладывается нечетное число четвертей длин волн соответствующих частоте колебаний мембраны телефона.

При резонансе колебания воздуха имеют максимальную интенсивность. Усиления или ослабления колебаний воздуха при перемещении поршня воспринимаются микрофоном 5 и уже в виде электрического сигнала подаются на осциллограф 6.

Обозначим через L_1 положение поршня (отсчет по миллиметровой шкале 7), соответствующее резонансу при минимальной длине воздушного столба. При этом патрубков микрофона 8 должен находиться между телефоном и поршнем. Через L_n обозначим положение поршня, соответствующее максимальной длине столба воздуха, при котором наблюдается резонанс. Пусть n - число наблюдаемых максимумов, включая крайние положения (см. рис.). Как следует из рисунка, между этими положениями поршня уместятся $(n - 1)$ полуволн $(\lambda / 2)$. Тогда длину волны λ можно определить по формуле

$$\lambda = \frac{2(L_n - L_1)}{n-1}. \quad (5)$$

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой, включить в сеть осциллограф и звуковой генератор (при этом должны загореться контрольные лампочки). Дать приборам прогреться в течение 3-5 мин.

2. Записать в таблицу три заданные преподавателем значения рабочей частоты звукового генератора.

3. Установить по шкале частот на звуковом генераторе первую из заданных преподавателем частоту.

4. Установить поршень вблизи микрофона, не перекрывая патрубков между микрофоном и телефоном. Постепенно удаляя поршень от микрофона, и контролируя величину амплитуды колебаний на экране осциллографа, найти первое положение поршня, при котором амплитуда колебаний достигает

максимума. Значение длины воздушного столба L_1 , соответствующее этому положению поршня, записать в таблицу.

5. Продолжая выдвигать поршень и считая возникающие максимумы амплитуды колебаний, найти положение поршня L_n , соответствующее последнему максимуму. Значение длины воздушного столба L_n и число наблюдавшихся максимумов n занести в таблицу.

6. Для заданной частоты пункты 4,5 выполнить еще два раза.

7. Выполнить пункты 3 - 6 для всех записанных в таблице значений рабочих частот генератора.

8. По окончании опыта записать значение температуры t воздуха лаборатории.

Таблица результатов эксперимента

Температура воздуха в лаборатории $t =$

N ^o п.п	$\nu, \text{Гц}$	$L_1, \text{мм}$	$L_n, \text{мм}$	n	$\lambda, \text{м}$	$V_i, \text{м/с}$	ΔV_i	ΔV_i^2
1		1						
		2						
		3						
		Ср.						
2		1						
		2						
		3						
		Ср.						
3		1						
		2						
		3						
		Ср.						

$\langle V \rangle =$

$\sum \Delta V_i^2 =$

Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого значения частоты:

- рассчитать средние значения минимальной и максимальной длины воздушного столба L_1 и L_n ,
- по средним значениям минимальной и максимальной длины воздушного столба рассчитать по формуле (5) длину звуковой волны,
- по формуле (1) рассчитать скорость звука.

2. Согласно приложению 1 рассчитать среднее значение скорости звука $\langle V \rangle$, доверительный интервал ΔV и относительную погрешность E . Доверительную вероятность принять $\alpha = 0,95$.

3. На основании температурной зависимости скорости звука в газах

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (6)$$

где γ - показатель адиабаты, R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,3$ Дж/моль/К), T – абсолютная температура газа, μ - молярная масса газа (для воздуха $\gamma = 1,4$, $\mu = 29,10^{-3}$ кг/моль), рассчитать скорость звука в воздухе V при температуре воздуха в лаборатории.

4. Сравнить полученное значение скорости звука в воздухе с рассчитанным по формуле (б).

Результат работы

1. Записать значение скорости звука в воздухе при температуре эксперимента в виде

$$V = \langle V \rangle + \Delta V, \quad E =$$

2. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое волна?
2. Чем отличаются упругие продольные волны от поперечных? От чего зависит скорость распространения этих волн?
3. Что называется длиной волны?
4. Составьте уравнение гармонического колебания.
5. Сделайте вывод уравнения плоской волны.
6. Что называется фазой колебания? Как изменяется фаза колебания с течением времени для колеблющейся точки? Постройте график зависимости фазы от времени.
7. Какая волна называется стоячей? Как она создается? Чем отличается от бегущей?
8. Что такое узел стоячей волны, пучность?
9. В каких фазах колеблются точки между двумя соседними узлами, по обе стороны от узла?
10. Построить графические зависимости амплитуд стоячей и бегущей волн от положения точки x . Написать уравнение $A = f(x)$.
11. Построить графики зависимости смещения точек стоячей и бегущей волн $\xi = f(x)$ для моментов времени t_1 , $t_1 + T/4$; $t_1 + 2T/4$; $t_1 + T$.
12. Волна с периодом колебаний 1,2 с и амплитудой 2 см распространяется со скоростью 15 м/с. Чему равно смещение от положения равновесия точки, находящейся на расстоянии 45 м от источника волны в момент времени 4 с от начала колебаний источника?

Библиографический список дополнительной литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.2. М.: Наука, 1989. § 72-75, 77, 78.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая шк., 1994. § 153, 154, 157, 158.

Лабораторная работа № 2-1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: изучение термодинамических процессов в идеальном газе и экспериментальное определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянных давлении и объеме.

Приборы и принадлежности: прибор Клемана-Дезорма, насос, манометр.

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

Отношение теплоемкостей газов $\gamma = C_p/C_v$, где C_p - теплоемкость при постоянном давлении, C_v - теплоемкость при постоянном объеме, играет важную роль в теории идеальных газов. Величина является показателем степени в уравнении адиабатического процесса, поэтому ее еще называют показателем адиабаты. Теоретически величина γ зависит от числа степеней свободы молекул i и ее можно оценить по формуле

$$\gamma = \frac{i+2}{i}. \quad (1)$$

Метод Клемана-Дезорма, используемый в данной работе, основан на изучении изменения состояния газа, заключенного в стеклянном баллоне.

Прибор (рис.1) состоит из баллона 1, соединенного трубками с водяным манометром 2 и насосом. Посредством клапана 3 баллон может сообщаться с атмосферой. Зажим 4 служит для предотвращения неконтролируемой утечки газов из баллона через насос. В начале опыта клапан 3 открывается, для этого нужно нажать на клапан сверху, и в баллоне установятся давление P_1 и температура T_1 , равные давлению и температуре окружающей среды а объем единицы массы газа (удельный объем) принимает значение $V_1 = V_{\text{баллн}}/m = 1/\rho$, где m - масса газа в баллоне, ρ - его плотность. Этому состоянию газа на диаграмме (рис.2) соответствует точка 1.

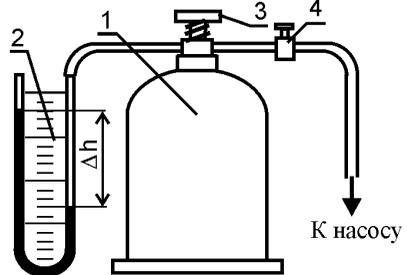


Рис. 1

Если при закрытом клапане 3 и открытом зажиме 4 быстро накачать насосом воздух в баллон до давления P_2 , а затем зажим 4 закрыть, то удельный объем уменьшится до V_2 . При этом температура газа повысится до значения T_2 , поскольку из-за быстрого протекания процесса и низкой теплопроводности стенок сосуда теплообмен с окружающей средой не успевает произойти и работа, затраченная на сжатие газа, идет на увеличение его внутренней энергии. В результате

единица массы газа перейдет в состояние (P_2, V_2, T_2) , которому будет соответствовать точка 2. Процесс 1-2 можно считать близким к адиабатическому.

Далее при закрытых клапане 3 и зажиме 4, вследствие теплообмена с окружающей средой, температура газа в баллоне при постоянном значении удельного объема $(V_2 = V_3)$ понизится и примет первоначальное значение

$T_3 = T_1$, а давление уменьшится до величины P_3 . При этом единица массы газа перейдет в состояние (P_3, V_3, T_3) , соответствующее точке 3 на рис.2. Установившееся значение давления P_3 связано с давлением окружающей среды P_1 соотношением

$$P_3 = P_1 + \Delta P_1, \quad (2)$$

где ΔP_1 - избыточное по сравнению с P_1 , определяемое по разности уровней жидкости в манометре.

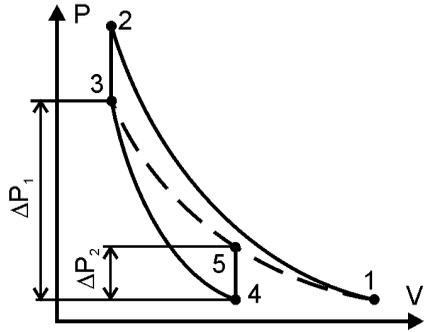


Рис. 2

Если теперь на короткое время открыть клапан 3 и сбросить давление

в баллоне до атмосферного P_1 , то удельный объем газа увеличится до значения V_4 . Расширение газа сопровождается уменьшением его внутренней энергии, в результате чего температура газа понизится до величины T_4 и он перейдет в состояние, обозначенное на диаграмме с параметрами P_4, V_4, T_4 (точка 4 на рис.2), причем $P_4 = P_1$. Вследствие кратковременности процесса расширения и низкой теплопроводности стенок баллона, препятствующих теплообмену с окружающей средой, процесс расширения единицы массы газа 3-4 можно считать близким к адиабатическому. Тогда, используя уравнение адиабатического процесса, можно записать

$$P_3 V_3^\gamma = P_4 V_4^\gamma \quad \text{или} \quad P_3 V_2^\gamma = P_1 V_4^\gamma, \quad (3)$$

так как

$$V_3 = V_2 \quad \text{и} \quad P_4 = P_1.$$

В дальнейшем вследствие теплообмена с окружающей средой температура воздуха в баллоне изохорически $(V_4 = V_5)$ повысится до значения T_5 , равного температуре окружающей среды T_1 , а давления возрастет до величины P_5 . Установившееся давление P_5 связано с давлением окружающей среды P_1 соотношением

$$P_5 = P_1 + \Delta P_2, \quad (4)$$

где ΔP_2 - избыточное по сравнению с атмосферным давлением, определяемое по манометру.

В состояниях 1, 3, 5 температура воздуха равна температуре окружающей среды T_1 , т.е. на диаграмме состояний (рис.2) эти точки принадлежат одной изотерме. Тогда, используя уравнение изотермы, можно записать

$$P_3 V_3 = P_5 V_5 \quad \text{и} \quad P_3 V_2 = P_5 V_4, \quad (5)$$

Возведем обе части уравнения (5) в степень γ и разделим на уравнение (3), тогда

$$\frac{P_3^\gamma V_3^\gamma}{P_3 V_3^\gamma} = \frac{P_5^\gamma V_4^\gamma}{P_1 V_4^\gamma},$$

откуда

$$\left(\frac{P_5}{P_3}\right)^\gamma = \frac{P_1}{P_3}. \quad (6)$$

Учитывая, что из (2) и (4), $P_1 = P_3 - \Delta P_1$; $P_5 = P_1 + \Delta P_2 = P_3 - (\Delta P_1 - \Delta P_2)$, величину γ из формулы (6) находим в виде

$$\gamma = \frac{\ln \frac{P_1}{P_3}}{\ln \frac{P_5}{P_3}} = \frac{\ln \left(1 - \frac{\Delta P_1}{P_3}\right)}{\ln \left(1 - \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{P_3}\right)}. \quad (7)$$

Так как величины $\Delta P_1/P_3$ и $(\Delta P_1 - \Delta P_2)/P_3$ много меньше единицы, то можно воспользоваться приближенной формулой $\ln(1+x) \approx x$ при $x \ll 1$

В результате из (7), учитывая что $\Delta P_1 = \rho \cdot g \cdot \Delta h_1$, где Δh_1 - разница уровней жидкости в коленях U-образного манометра, ρ - плотность жидкости в манометре, окончательно для нахождения показателя адиабаты данным методом получим

$$\gamma = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_1 - \Delta h_2}. \quad (8)$$

Порядок выполнения работы

1. Открыть клапан 3 и поднять зажим 4.
2. Быстро накачать насосом в баллон столько воздуха, чтобы разность уровней жидкости в манометре 2 составила 250-300 мм (процесс 1-2, рис.2). Опустить зажим 4 и выждать время (2-3 минуты), пока благодаря теплообмену температура в баллоне не станет равной комнатной (процесс 2-3). Затем измерить разницу уровней жидкости в коленях U-образного манометра Δh_1 и записать ее значение в таблицу.

Таблица результатов эксперимента

№ п.п.	Δh_1	Δh_2	γ	$\Delta \gamma_i$	$(\Delta \gamma_i)^2$
1					
2					
3					
...					
10					

$$\langle \gamma \rangle = \frac{\sum (\Delta \gamma_i)^2}{n}$$

3. Быстро нажать и отпустить клапан 3, не выжидая, пока успокоятся колебания уровней в коленах манометра (процесс 3-4). Выждать 2-3 минуты, пока газ, охлажденный при адиабатическом расширении, нагреется до комнатной температуры (процесс 4-5). Измерить разницу уровней жидкости в коленах U-образного манометра Δh_2 и записать ее значение в таблицу.

4. Повторить пункты 1 – 3 еще девять раз.

Обработка результатов эксперимента

1. Для каждой строчки таблицы результатов вычислить значение γ по формуле (8).

2. В соответствии с приложением 1 рассчитать среднее значение величины $\langle \gamma \rangle$, доверительный интервал Δ_γ и относительную погрешность результата $E = \Delta_\gamma / \langle \gamma \rangle$. Доверительная вероятность $\alpha = 0,95$.

3. По формуле (1) рассчитать теоретическое значение γ .

Результат работы

1. Записать полученное значение показателя в виде

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta_\gamma ; \quad E = \dots$$

2. Сравнить полученный результат с теоретическим значением γ .

Контрольные вопросы

1. Какие процессы происходят в газе при выполнении опыта?
2. Что такое удельный объем? Как он связан с плотностью вещества?
3. Какие процессы, протекающие в газах, называются изохорическими, изотермическими, изобарическими, адиабатическими?
4. Записать уравнения этих процессов. Какой газ называется идеальным?
5. В чем сущность первого начала термодинамики?
6. Какой вид принимает уравнение первого начала в изохорном, изотермическом, изобарном, адиабатическом процессах?
6. Что называется теплоемкостью? Какая теплоемкость называется молярной, удельной?
7. От чего зависит теплоемкость газа?
8. Чему равна теплоемкость газа в изохорном, изотермическом, изобарном, адиабатическом процессах?
9. Почему теплоемкость газа при изобарическом процессе больше теплоемкости этого же газа при изохорическом процессе?
10. Почему адиабата идет всегда круче изотермы?
11. Вычертить в координатах P и V ; P и T ; V и T (V - удельный объем) графики, изображающие ход процессов, протекающих в сосуде во время опыта.

Библиографический список дополнительной литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. М.: Наука, 1989. §§ 60-62, 65-72.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М., Высш. шк., 1990. §§ 41, 42, 50-55.

Лабораторная работа № 2-2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы: изучение явлений переноса и экспериментальное определение коэффициента вязкости, средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха.

Приборы и принадлежности: прибор по определению вязкости газов, мерный стакан, секундомер.

Описание метода измерений и экспериментальной установки.

Внутреннее трение возникает между слоями потока газа, движущимися относительно друг друга (рис.1). Величина силы внутреннего трения действует на границе смежных слоев и определяется формулой

$$F = \eta \frac{du}{dx} S, \quad (1)$$

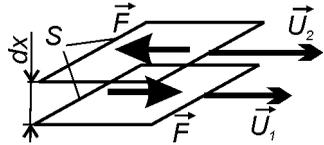


Рис. 1

где η - коэффициент вязкости или внутреннего

трения, $\frac{du}{dx}$ - поперечный градиент скорости слоев, S – площадь соприкасающихся слоев.

Молекулярно-кинетическая теория газов позволяет связать величину коэффициента вязкости с параметрами, характеризующими тепловое движение молекул

$$\eta = \frac{1}{3} v \lambda \rho, \quad (2)$$

где

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \quad (3)$$

- средняя арифметическая скорость движения молекул,

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 P} \quad (4)$$

– средняя длина свободного пробега молекул,

$$\rho = \frac{mP}{kT} = \frac{\mu P}{RT} \quad (5)$$

– плотность газа. Здесь k – постоянная Больцмана, T - абсолютная температура,

m – масса молекулы, R – универсальная газовая постоянная, μ – молярная масса газа, d – эффективный диаметр молекул, P – давление газа.

Из приведенных зависимостей следует, что по экспериментально определенному значению коэффициента вязкости газа можно оценить среднюю длину свободного пробега его молекул и их эффективный диаметр.

Так из формулы (2) с учетом (3) и (5) для средней длины свободного пробега молекул получим следующее выражение

$$\lambda = 1,9 \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{kT}{m}} = 1,9 \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{RT}{\mu}}, \quad (6)$$

а, из формулы (4) для оценки эффективного диаметра молекул –

$$d = \sqrt{\frac{kT}{4,4\lambda P}}. \quad (7)$$

Существуют различные способы определения коэффициента вязкости газов. В этой работе применяется метод основанный на движении газа по капиллярной трубке с внутренним радиусом r и длиной L . Вследствие внутреннего трения слоев на концах трубки возникает перепад давлений ΔP , величина которого при установившемся движении газа определяется формулой Пуазейля

$$\Delta P = \frac{8\eta LV}{\pi r^4 \tau}, \quad (8)$$

где V – объем газа, протекающего через капилляр за время τ .

Из приведенного соотношения следует

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P \tau}{8LV}. \quad (9)$$

Установка для экспериментального определения коэффициента вязкости воздуха (рис. 2) состоит из капилляра 1, U-образного манометра 2, сосуда 3 с крышкой 4, краном 5 и мерного стакана 6 с чашкой 7. Крышка 4 плотно перекрывает отверстие, через которое сосуд наполняется водой. Кран 5 предназначен для регулирования расхода воды, вытекающей из сосуда. U-образный манометр служит для измерения перепада давления на капилляре. Величина перепада давления рассчитывается по формуле

$$\Delta P = \rho g \Delta h,$$

где ρ – плотность жидкости в манометре (в данном случае воды), g – ускорение свободного падения. Δh – разность уровней жидкости в коленях манометра.

Если при плотно завернутой крышке 4 открыть кран 5, то из сосуда

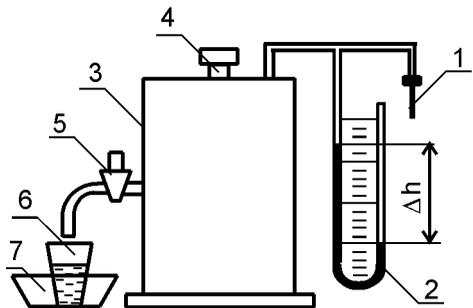


Рис. 2

начинает вытекать вода, давление в нем понижается и через капилляр засасывается воздух. В установившемся режиме (о чем свидетельствует постоянная во времени разность уровней жидкости в U-образном манометре) объем воздуха, прошедшего через капилляр за время τ , равен объему воды, вытекающей из сосуда за это же время. Для определения объема воды служит мерный стакан 6. Время наполнения стакана определяется секундомером.

Порядок выполнения работы

1. Отвинтите крышку 4 и наполните сосуд 3 водой.
2. Поставьте под кран чашку 7 и, открыв с очень малым расходом кран, плотно заверните крышку.
3. Откройте кран так, чтобы перепад давления по манометру был не менее 20 мм, и после установления стационарного режима течения (разность уровней в коленах манометра должна оставаться постоянной) подставьте мерный стакан 6, одновременно включив секундомер.
4. Зафиксируйте время наполнения 150 – 250 см³ объема мерного стакана. Полученные значения ΔP , V и τ занесите в таблицу.

Таблица результатов эксперимента

$r = \dots$ мм, $L = \dots$ мм, $t = \dots$ °С, $P_{ат} = \dots$ Па.

N° п.п.	Δh , мм	ΔP , Па	V , см ³	τ , с	η , Па·с	$\Delta\eta_i$	$(\Delta\eta_i)^2$
1							
2							
3							
4							
5							

$$\langle \eta \rangle = \quad \quad \quad \Sigma \Delta \eta_i^2 =$$

5. Прделайте опыт не менее 5 раз с разным расходом воды (регулирование расхода осуществляется путем поворота рукоятки крана 5 на разные углы).

6. По барометру и термометру определить давление и температуру воздуха в лаборатории.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным таблицы рассчитайте значения коэффициента вязкости воздуха по формуле (9).

2. Согласно приложению 1 рассчитайте среднее значение коэффициента вязкости $\langle \eta \rangle$, доверительный интервал $\Delta\eta$ и относительную погрешность $E = \Delta\eta / \langle \eta \rangle$. Доверительную вероятность принять $\alpha = 0,95$.

3. По формулам (6) и (7) определите среднюю длину свободного про-

бега молекул воздуха и их эффективный диаметр. Молярную массу воздуха M принять $29 \cdot 10^{-3}$ кг/кмоль.

Результат работы

1. Записать полученное значение коэффициента вязкости в виде

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta \eta; \quad E =$$

2. Записать полученное значение средней длины свободного пробега молекул воздуха.
3. Записать полученное значение эффективного диаметра молекул воздуха.
4. Сравнить полученные результаты с табличными значениями.

Контрольные вопросы

1. Каков механизм возникновения силы внутреннего трения в газах и жидкостях? От чего зависит сила внутреннего трения? Поясните формулу (1) с помощью рисунка.

2. Что называется коэффициентом внутреннего трения?

3. В чем заключается суть данного метода определения коэффициента внутреннего трения?

4. Выведите формулу (2) на основании положений молекулярно-кинетической теории.

5. Почему коэффициент внутреннего трения газов при обычных условиях не зависит от давления?

6. Что понимается под средней длиной свободного пробега молекул? От чего она зависит? Сделайте приближенный вывод зависимости от эффективного диаметра молекул.

7. Что такое эффективный диаметр молекулы. От чего он зависит?

8. Построить графики зависимостей коэффициента внутреннего трения η от температуры T (при неизменном эффективном диаметре молекулы) и давления P .

9. Построить графики зависимостей длины свободного пробега молекул λ от давления P (при неизменной температуре T); и температуры T (при неизменном давлении P и неизменном эффективном диаметре молекул).

10. Как изменится длина свободного пробега молекул воздуха, если при неизменной температуре его давление увеличить в три раза?

Библиографический список дополнительной литературы

1. Савельев И.В. Курс физики. Т.1. М.: Наука, 1989. § 78-80.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк., 1990. § 46, 48.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Расчет ошибки эксперимента.

Пусть в результате эксперимента получено n значений измеряемой величины u : $u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n$.

Расчет ошибки эксперимента включает в себя следующие этапы:

1. Рассчитывается среднее значение измеряемой величины

$$\langle u \rangle = \frac{\sum u_i}{n} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_i + \dots + u_n}{n}. \quad (1)$$

2. Рассчитывается абсолютная погрешность каждого результата

$$\Delta u_i = |u_i - \langle u \rangle|. \quad (2)$$

3. Рассчитываются квадраты абсолютных погрешностей Δu_i^2 и находится их сумма

$$\sum (\Delta u_i)^2 = \sum (u_i - \langle u \rangle)^2. \quad (3)$$

4. Рассчитывается доверительный интервал

$$\Delta_u = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum (\Delta u_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (4)$$

где $t_{\alpha, n}$ коэффициент Стьюдента, значение которого определяется по таблице 1 приложения в зависимости от числа значений n и доверительной вероятности α . Чем выше вероятность α , тем больше будет ошибка. Рекомендуется брать $\alpha = 0,95$.

5. Рассчитывается относительная погрешность результата

$$E = \frac{\Delta_u}{\langle u \rangle} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Результат работы представляется в виде

$$u = \langle u \rangle \pm \Delta_u; \quad E = \dots \%$$

Таблица 1

$\alpha \backslash n$	3	4	5	10	15
0,70	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1
0,95	4,3	3,2	2,8	2,3	2,1

Приложение 2

Правила построения и оформления графиков при выполнении лабораторных работ по физике

Графическое представление результатов работы используют для наглядного изображения функциональной зависимости одной физической величины "у" от другой "х": $y = f(x)$. График позволяет получить максимум наглядной информации об изучаемой зависимости: области возрастания и убывания; точки максимумов и минимумов; области наибольшей и наименьшей скорости изменения, периодичности и т.д. По графику можно определить значения функции у для промежуточных значений аргумента х, которые в опыте непосредственно не наблюдались.

График удобно использовать для совместной обработки результатов многих измерений, определения вида функции $y = f(x)$ и ее параметров.

1. График следует вычерчивать аккуратно, простым карандашом на листе миллиметровой бумаги, который затем подклеивается в тетрадь с отчетом о лабораторной работе. Размер стороны листа должен быть не менее 100 – 150 мм.

2. В прямоугольной системе координат по оси абсцисс откладывают переменную, принятую за независимую величину - аргумент, а по оси ординат - функцию. В конце координатных осей указывают буквенные обозначения откладываемых величин и их размерность.

3. Масштабы по координатным осям выбирают независимо друг от друга так, чтобы оси абсцисс и ординат имели примерно одинаковую длину. При этом минимальные, полученные в эксперименте, значения должны соответствовать началу координатной оси, а максимальные располагались бы вблизи ее конца. Точку начала координат (точку 0,0) не обязательно помещать на графике, если это специально не требуется в данной работе. При правильно выбранном масштабе график занимает все поле чертежа и большая часть экспериментальной кривой имеет одинаковый наклон как к оси абсцисс, так и к оси ординат.

4. На осях координат размечают равномерные шкалы, пользуясь которыми можно легко нанести на график экспериментальные точки или, наоборот, определить численное значение аргумента и функции, соответствующее любой точке на графике. Расстояние между соседними делениями шкалы (единицу масштаба) обычно берут равным 10, 20 или 25 мм. Это расстояние должно соответствовать "круглому" числу единиц измеряемой величины (1, 2, 3, ... или те же цифры, умноженные на $10n$, где $n = +1, +2, +3$, и т.д.). Шкалы оцифровывают, указывая на оси значения величин, кратные единице масштаба. Если недостаточно места, то оцифровывают не все деления, а, например, каждое второе или каждое четвертое деление.

Значения величин, полученные в эксперименте, на координатных осях не отмечают.

5. Если значения величин много больше или много меньше единицы, то обычно множитель 10^n , определяющий порядок величины, записывают в конце оси, включая его в единицы измерения. Например: $V, 10^2 \text{ м/с}$ или $I, 10^6 \text{ А}$.

6. Точки на график нужно наносить точно и аккуратно. Чтобы точка была хорошо видна, ее обводят кружком или другим знаком (треугольником, ромбом и т.д.) или помечают крестиком.

7. Экспериментальную линию проводят возможно ближе к экспериментальным точкам так, чтобы точки располагались равномерно по обеим ее сторонам. Обычно физические зависимости соответствуют линейным или плавно меняющимся функциям, поэтому линии не должны иметь резких изломов и перегибов. Не следует соединять точки ломаной линией.

8. Наиболее легко обнаруживается на графике и удобна для анализа линейная зависимость между измеряемыми величинами вида

$$y = kx + b.$$

График этой зависимости - прямая линия. Коэффициент k определяет наклон прямой к оси x , величина b определяет отрезок, отсекаемый прямой на оси y (при $x = 0$). Для определения углового коэффициента k на прямой, проведенной "на глаз" согласно п.7, выбирают произвольно две точки, по возможности дальше отстоящие друг от друга. По шкалам на осях графика находят координаты этих точек (x_1, y_1) и (x_2, y_2) и вычисляют

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Размерность коэффициента определяется размерностями величин x и y

$$[k] = \frac{[y]}{[x]},$$

а погрешность для k находим как $\Delta k = \frac{\Delta y_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}}$,

где Δy_{\max} - наибольшее отклонение ординаты экспериментальной точки от проведенной прямой; x_{\max} , x_{\min} - координаты крайних точек, использованных при проведении прямой.

9. В физике часто встречается степенная зависимость вида

$$y = a \cdot x^k,$$

которую можно преобразовать в линейную в логарифмических координатах

$$\ln y = \ln a + k \ln x.$$

В этом случае по оси абсцисс откладывают $\ln x$, а по оси ординат - $\ln y$. Показатель степени k определяют по графику (см.п.8)

$$k = \frac{\ln(y_2) - \ln(y_1)}{\ln(x_2) - \ln(x_1)}.$$

10. Иногда требуется проверить соответствие эксперимента какому-либо физическому закону, где показатель степени k заранее известен. В этом случае на графике должна получиться прямая линия, если по оси ординат откладывать величину y , а по оси абсцисс - величину x^k .

11. График показательной зависимости

$$y = a \cdot e^{kx}$$

будет линейным в полулогарифмических координатах $(\ln y, x)$, где эта функция имеет вид

$$\ln y = \ln a + kx.$$

В этом случае по оси абсцисс откладывается сама измеряемая величина x , а по оси ординат - $\ln y$. Коэффициент k определяется по графику (см. п.8)

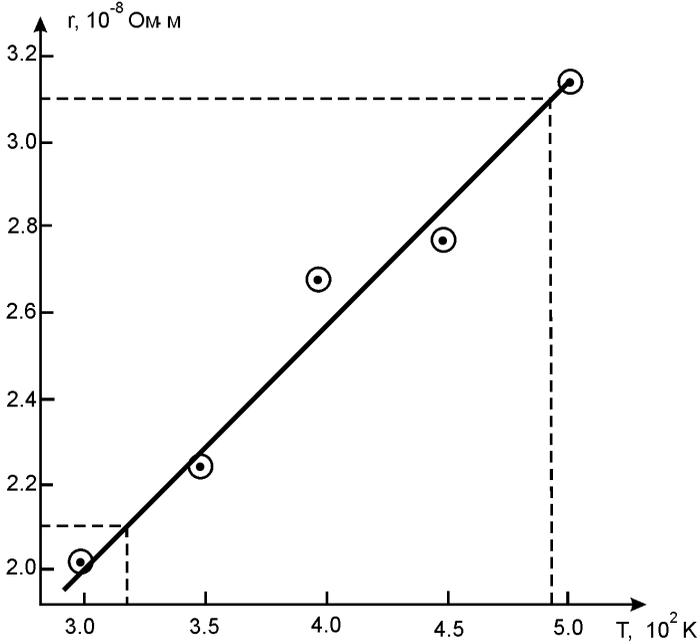
$$k = \frac{\ln(y_2) - \ln(y_1)}{x_2 - x_1}.$$

Пример построения графика

Результаты эксперимента по определению температурной зависимости удельного электросопротивления металла приведены в табл. 2

Таблица 2

Температура	T, K	300	350	400	450	500
Удельное электросопротивление	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м} \times 10^{-8}$	2,05	2,24	2,68	2,77	3,14



По графику $k = \frac{3,1 - 2,1}{4,9 - 3,2} = 0,59$

Приложение 3

Соотношения между внесистемными единицами и единицами СИ

Длина 1 ангстрем (\AA) = 10^{-10} м.

Объем 1 л = 10^{-3} м³.

Сила 1 кГ = 9,81 Н.

Работа, энергия 1 кГ м = 9,81 Дж.

Давление 1 мм рт.ст. = 133 Па.

1 бар = 10^5 Па.

1 атм = $1,01 \cdot 10^5$ Па.

1 мм вод. ст. = 9,8 Па.

Приложение 4

Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

Множитель	Приставки	
	Наименование	Обозначение
10^9	гига	Г
10^6	мега	М
10^3	кило	к
10^2	гекто	г
10^1	дека	да
10^{-1}	деци	д
10^{-2}	санти	с
10^{-3}	милли	м
10^{-6}	микро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	пико	п
10^{-15}	фемто	ф

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа № 1-1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА.....	5
Лабораторная работа № 1-2 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАЯТНИКЕ ОБЕРБЕКА.....	9
Лабораторная работа № 1-3 ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ КРУТИЛЬНОГО МАЯТНИКА	13
Лабораторная работа № 1-5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ МЕТОДОМ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА.....	19
Лабораторная работа № 1-6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ.....	23
Лабораторная работа № 1-8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН	27
Лабораторная работа № 2-1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ.....	31
Лабораторная работа № 2-2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА	35
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	39

Лабораторные занятия по Ф И З И К Е

Часть 1

Методические указания к лабораторным работам по механике и молекулярной физике

Редактор Е.В. Маняшина

Технический редактор Г.В. Комарова

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Физ. печ. л. 2,75

Тираж 250 экз.

Усл. печ. л. 2,56

Заказ № 45

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 2.39

Цена 25 руб.

Издательство ТГТУ

170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22

© Тверской государственный
технический университет, 2005