

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ С.А. ЕСЕНИНА»

Физико-математический факультет

Кафедра общей и теоретической физики
и методики преподавания физики

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ

Часть I: Механика

Рязань, 2012

УДК 53(075)
ББК 22.3я73
Л 125

Рецензенты

Д.В. Морин, канд. физ.-мат. наук, доц. (РГУ им. С.А. Есенина)
А.Б. Ястребков, канд. физ.-мат. наук, доц. (РГРТУ)

Лабораторный практикум по общей физике. Часть 1: Механика. Методические указания к лабораторным работам / авт.-сост. Н.И. Ермаков, Б.С. Кирьяков, М.Н. Махмудов ; Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина. – Рязань, 2012. – 88 с.

Приводятся лабораторные работы по механике в курсе общей физики и методические рекомендации по их выполнению. В каждой работе дается краткая теория, предлагаются контрольные вопросы.

ББК 22.3я73

© Ермаков Н.И., Кирьяков Б.С., Махмудов М.Н., авт.-сост., 2012
© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», 2012

ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ФИЗИКЕ

1. Общие требования охраны труда

1.1. К проведению лабораторных работ и лабораторного практикума по физике допускаются студенты, прошедшие инструктаж по охране труда, медицинский осмотр и не имеющие противопоказаний по состоянию здоровья.

1.2. Студенты должны соблюдать правила поведения, расписание учебных занятий, установленные режимы труда и отдыха.

1.3. При проведении лабораторных работ и лабораторного практикума по физике возможно воздействие на обучаемых следующих опасных и вредных производственных факторов:

- поражение электрическим током при работе с электроприборами;
- термические ожоги при нагревании жидкостей и различных физических тел;
- порезы рук при небрежном обращении с лабораторной посудой и приборами из стекла;
- возникновение пожара при неаккуратном обращении легковоспламеняющимися жидкостями.

1.4. Кабинет физики должен быть укомплектован медицинской аптечкой с набором необходимых медикаментов и перевязочных средств.

1.5. При проведении лабораторных работ и лабораторного практикума по физике соблюдать правила пожарной безопасности, знать места расположения первичных средств пожаротушения. Кабинет физики должен быть оснащен первичными средствами пожаротушения: порошковым огнетушителем, ящиком с песком или огнезащитной ткани.

1.6. О каждом несчастном случае пострадавший или очевидец несчастного случая обязан немедленно сообщить преподавателю. При неисправности оборудования, приспособлений и инструмента прекратить работу и сообщить об этом преподавателю.

1.7. В процессе работы обучаемые должны соблюдать порядок проведения лабораторных работ и лабораторного практикума, правила личной гигиены, содержать в чистоте рабочее место.

1.8. Обучаемые, допустившие невыполнение или нарушение инструкции по охране труда, привлекаются к ответственности и со всеми обучаемыми проводится внеплановый инструктаж по охране труда.

1.9. Свидетели несчастного случая или аварии (угрозы аварии) обязаны немедленно принять меры для освобождения пострадавшего от дальнейшего воздействия травмирующих факторов. Обесточивать установку отключением рубильника, пакетного выключателя, извлечением вилки из розетки.

Если по каким – то причинам невозможно быстро выключить электрооборудование, надо разъединить пострадавшего и токоведущую часть, приняв предварительные меры, обеспечивающие собственную безопасность:

- встать на изолирующее основание (диэлектрический коврик, сухой пол);
- надеть диэлектрические перчатки или обмотать руки токонепроводящей тканью (шерстяной или шелковой);
- взять пострадавшего только за одежду, не касаясь посторонних предметов, особенно заземленных корпусов установок;
- токоведущую часть (провод) можно отодвинуть книгой, деревянной указкой и т.д.

1.10. После освобождения пострадавшего оказать ему доврачебную помощь и вызвать скорую медицинскую помощь.

1.11. О всех несчастных случаях пострадавший и свидетели должны немедленно сообщить руководителю работ (преподавателю), а также, а также ответственному за охрану труда и технику безопасности в лаборатории и заведующему кафедрой.

2. Требования охраны труда перед началом работы

2.1. Внимательно изучить содержание и порядок проведения лабораторной работы или лабораторного практикума, а также безопасные приемы его выполнения.

2.2. Подготовить к работе рабочее место. Убрать посторонние предметы. Приборы и оборудование разместить таким образом, чтобы исключить их падение и опрокидывание.

2.3. Проверить исправность оборудования, приборов, целостность лабораторной посуды и приборов из стекла.

2.4. Не загромождать столы предметами, не относящимися к выполнению работ (шапки, платки, портфели, сумки, пакеты и т.д.).

2.5. Категорически запрещается сидеть в проходах между оборудованием и ставить посторонние предметы (книги, тетради, ручки, линейки и т.д.).

2.6. Внешним осмотром убедиться в исправности оборудования, приборов, инструментов, защитных средств (заземления, зануления). Особое внимание обратить на состояние сетевых шнуров, вилок, розеток. О выявленных недостатках немедленно сообщить (руководителю работ) преподавателю или персоналу лаборатории. К работе приступать только после устранения всех неисправностей.

3. Требования охраны труда во время работы

3.1. Точно выполнять все указания преподавателя при проведении лабораторной работы или лабораторного практикума, без его разрешения не выполнять никаких работ.

3.2. При работе с газовой горелкой беречь одежду и волосы от воспламенения, не зажигать одну горелку от другой, не задувать пламя горелки ртом, а гасить с помощью специального регулятора.

3.3. Соблюдать осторожность при обращении с приборами из стекла и лабораторной посудой, не бросать, не ронять и не ударять их.

3.4. Следить за исправностью всех креплений в приборах и приспособлениях, не касаться и не наклоняться близко к вращающимся и движущимся частям машин и механизмов.

3.5. При сборке электрической схемы использовать провода с наконечниками, без видимых повреждений изоляции, избегать пересечений проводов, источник тока подключать в последнюю очередь.

3.6. Собранную электрическую схему включать под напряжение только после проверки ее преподавателем или лаборантом.

3.7. Не прикасаться к находящимся под напряжением элементам электрической цепи, к корпусам стационарного электрооборудования, к зажимам конденсаторов, не производить переключений в цепях до отключения источника тока.

При сборке электрических схем строго придерживаться следующих правил:

- элементы электрической схемы соединять только изолированными проводами, сечение которых должно соответствовать протекающему через них току;
- контакты в местах соединений должны быть плотными;
- переплетение проводов (в т.ч. изолированных) не допускается;
- цепь собирать от источника тока, но подключать источник в последнюю очередь;

- при разборке электрической схемы прежде в первую очередь отсоединяется источник тока;
- перед включением все реостаты установить на максимум сопротивления, а потенциометры на нуль подаваемого в контур напряжения;
- все ключи перед сборкой должны быть разомкнуты;
- не производить переключение схемы, находящейся под напряжением.

Первое включение электроустановок производится с разрешения и под наблюдением руководителя работ (преподавателя) или сотрудника лаборатории. В случае прекращения подачи электрического тока все электроустановки немедленно выключить.

- 3.8. Наличие напряжения в электрической цепи проверять только приборами.
- 3.9. Не допускать предельных нагрузок измерительных приборов.
- 3.10. Не оставлять без надзора включенные электрические устройства и приборы.

4. Требования охраны труда в аварийных ситуациях

4.1. При обнаружении неисправностей в работе электрических устройств, находящихся под напряжением, повышенном их нагревании, появлении искрения, запаха горелой изоляции и т.д., немедленно отключить источник электропитания и сообщить об этом преподавателю.

4.2. В случае, если разбилась лабораторная посуда или приборы из стекла, не собирать их осколки незащищенными руками, а использовать для этой цели щетку и совок.

4.3. При получении травмы сообщить об этом преподавателю, немедленно оказать первую помощь пострадавшему и сообщить администрации университета, при необходимости отправить пострадавшего в медпункт.

5. Требования охраны труда по окончании работы

5.1. Отключить источник тока. Разрядить конденсаторы с помощью изолированного проводника и разобрать электрическую схему.

5.2. Привести в порядок в рабочее место, сдать преподавателю приборы, оборудование, материалы и тщательно вымыть руки с мылом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Определение ускорения свободного падения тела

Цель работы: расчет ускорения свободного падения разными методами.

Оборудование: установка ФП26А, шарик.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Согласно второму закону ньютона, для движущегося тела в инерциальной системе отсчета

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

В левой части стоит векторная сумма всех сил, действующих на тело со стороны других тел, \vec{a} – ускорение тела в выбранной инерциальной системе отсчета.

В неинерциальной системе отсчета второй закон Ньютона не выполняется. Уравнение движения тела в такой системе отсчета записывается в таком виде:

$$\sum \vec{F} + \sum \vec{J}_{ин} = m\vec{a}$$

К силам \vec{F} , действующим на тело со стороны других тел, добавляется ещё векторная сумма так называемых сил инерции, обусловленных ускоренным движением системы.

\vec{a} – ускорение тела в выбранной неинерциальной системе отсчета.

Обычно при движении тел на Земле силами инерции пренебрегают, т.к. они малы по сравнению с первым слагаемым. В некоторых задачах ими пренебречь нельзя.

Система отсчета, связанная с Землей, неинерциальна в основном вследствие суточного вращения Земли с постоянной угловой скоростью

$$\omega = 2\pi \frac{\text{Rad}}{\text{сут}} \approx 7,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Rad}}{\text{с}}$$

Если какая-то материальная точка движется по поверхности Земли, то уравнение движения этой материальной точки массы m в неинерциальной системе отсчета, связанной с Землей, имеет вид

$$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_{\text{тяг}} + \vec{J}_{\text{цб}} + \vec{J}_{\text{кор}}, \quad (1.1)$$

где $\vec{J}_{\text{цб}}$ и $\vec{J}_{\text{кор}}$ – центробежная (за счет вращения) и кориолисова (за счет перемещения в неинерциальной системе) силы инерции, $\vec{F}_{\text{тяг}}$ – сила тяготения, \vec{F} – сумма всех остальных сил, действующих на материальную точку, кроме гравитационных.

Если принять, что точка на поверхности Земли покоится, то $\vec{a} = 0$ и $\vec{J}_{\text{кор}} = 0$, тогда уравнение (1.1) запишется в виде

$$\vec{F} + \vec{J}_{\text{цб}} + \vec{F}_{\text{тяг}} = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{где } |\vec{F}_{\text{тяг}}| = \gamma \frac{mM_3}{R_3^2}, \text{ а } |\vec{J}_{\text{цб}}| = \omega^2 r = \omega^2 R \cdot \cos \varphi, \quad (1.3)$$

обусловлена суточным вращением Земли вокруг своей оси (см. рис. 1.1). Силой тяжести называется сила P_φ , приложенная к телу и равная геометрической сумме силы $\vec{J}_{\text{цб}}$ и $\vec{F}_{\text{тяг}}$ (рис.1.1)

$$\vec{P}_\gamma = \vec{J}_{\text{цб}} + \vec{F}_{\text{тяг}} \quad (1.4)$$

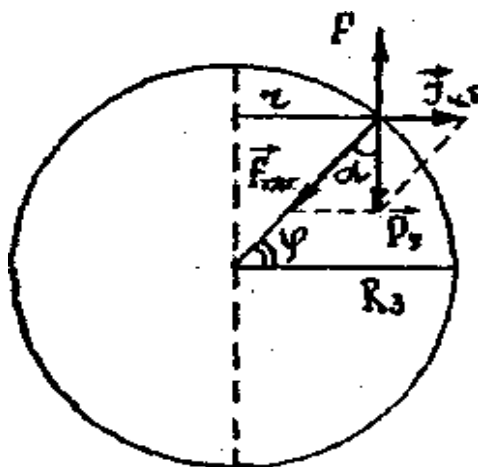


Рис 1.1

В случае покоящегося относительно Земли тела эта сила уравновешивается упругой силой натянутой нити или силой реакции опоры \vec{F} , которая и входит третьим членом уравнения (1.2). Если нить обрезать (или убрать опору), то под действием силы тяжести \vec{P}_φ тело в безвоздушном пространстве будет падать с ускорением свободного падения, величина которого определяется по второму закону Ньютона следующим соотношением:

$$\vec{g}_\varphi = \frac{\vec{P}_\varphi}{m}, \quad (1.5)$$

где m масса тела.

Из уравнений (1.3) и (1.4) видно, что сила тяжести \vec{P}_φ одного и того же тела на разных географических широтах различна, а, следовательно, и ускорение свободного падения \vec{g}_φ изменяется с широтой места. На полюсах, где линейная скорость вращения точек Земли и, следовательно, $J_{цб} = 0$, сила тяжести равна силе тяготения:

$$P_n = F_{тяг} = \gamma \frac{mM_3}{R_3^2} \quad (2.6)$$

$$g_n = 9,8324 \text{ м/с}^2.$$

На экваторе $P_\varphi = F_{тяг} - J_{цб}$. ($\vec{F}_{тяг}$ и $\vec{J}_{цб}$ направлены в разные стороны) и $g_\varphi = 9,7805 \text{ м/с}^2$

Ускорение \vec{g} на широте 45° называется нормальным, оно равно $9,80665 \text{ м/с}^2$. Все указанные числовые значения относятся к определению этой величины на уровне моря.

Направление действия силы тяжести \vec{P}_φ называется отвесным. Отвесное направление (см. рис. 2.1) не совпадает (кроме полюсов и точек на экваторе) с радиусом Земли. Однако это различие (угол α разный для различных географических широт φ) ничтожно мало, так как $J_{цб} = m\omega^2 r \approx 0,034m \cos \varphi$, а $P_\varphi = mg_\varphi \approx 9,8m$. Поэтому величины силы тяжести и силы тяготения в од-

ном и том же месте различаются незначительно. При решении многих практических вопросов их принимают равными друг другу:

$$F_{\text{тяг}} = P_{\varphi} \text{ или } \gamma \frac{mM_3}{R_3^2} = mg_{\varphi}.$$

Так как инертная масса тела, входящая в уравнение динамики, и гравитационная масса того же тела в законе тяготения равны между собой, то

$$g_{\varphi} = \gamma \frac{M_3}{R_3^2}, \quad (2.7)$$

то есть ускорение свободного падения всех тел, независимо от их масс в данном месте Земли одинаково.

Из уравнения (2.5) следует, что ускорение свободного падения можно трактовать и как векторную величину, численно равную силе, действующей на единичную массу в данной точке гравитационного поля Земли. Единицы

$$\vec{g} \text{ в СИ: } [g] = \left[\frac{H}{кг} \right] = \left[\frac{м}{с^2} \right].$$

Поскольку изменение ускорения силы тяжести с изменением широты места невелико, для многих расчетов его можно приблизительно считать равным $9,8 \text{ м/с}^2$, а для более грубых вычислений – 10 м/с^2 .

С подъемом над поверхностью Земли ускорение свободного падения изменяется:

$$g_h = \gamma \frac{M_3}{(R_3 + h)^2} = g \left(\frac{R_3}{R_3 + h} \right)^2,$$

где g_h – ускорение свободного падения на высоте над поверхностью Земли; g – на поверхности Земли.

ПРИМЕЧАНИЕ: Изменение силы тяжести P_{φ} , а, следовательно, и ускорения g_{φ} вызвано еще и сплюснутостью Земли у полюсов: полярный радиус меньше экваториального приблизительно на 21 км. Это различие расстояний от поверхности Земли до ее центра также сказывается на изменении ускорения свободного падения, оно невелико: максимальное различие Δg ,

вызванное этой причиной, составляет приблизительно $0,02 \text{ м/с}^2$, в то время как общее отличие g , от g_n составляет $0,05 \text{ м/с}^2$.

Силу тяжести не следует отождествлять с силой веса или весом тела. Под весом понимают силу, с которой тело действует на опору, или же силу, с которой оно растягивает подвес. Выражение "тело весит" $F \text{ Н}$ означает, что "тело давит", например, на чашку весов или "тело растягивает", например, пружину динамометра с силой F . Отсюда, прежде всего, следует, что вес приложен к опоре или подвесу, а не к самому телу. Вес может и по величине отличаться от силы тяжести. Это возможно в тех случаях, когда тело вместе с подвесом (например, с динамометром) будет двигаться с ускорением a , направленным вертикально вниз или вверх. Тогда вес тела (сила, действующая на пружину динамометра со стороны тела) будет соответственно равен $m(g - a)$ или $m(g + a)$, то есть будет меньше или больше силы тяжести этого тела mg , которая все время остается постоянной.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

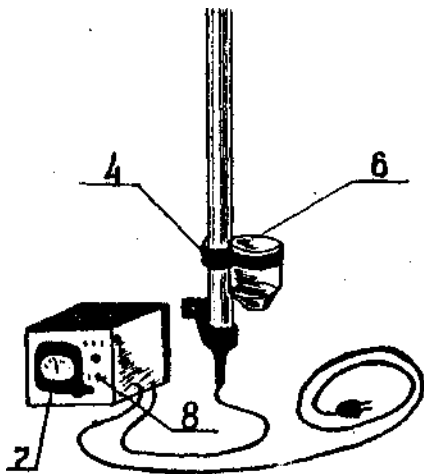


Рис. 1.2

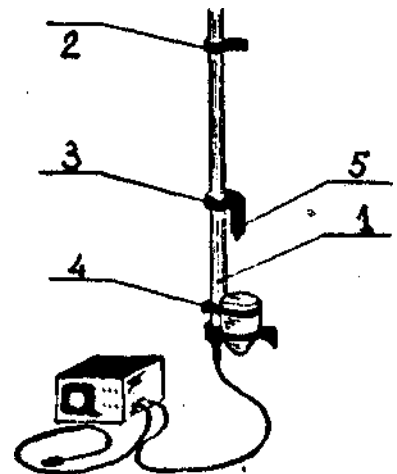


Рис. 1.3

Установка ФП26А предназначена для изучения законов свободного падения тела.

Основные технические данные:

1. Наибольшая высота падения шарика	2200 мм
2. Питание сети переменного тока	220 В
3. Цена деления секундомера	0,01 с

Описание конструкции и правила пользования

Установка (рис. 1.2) выполнена в виде вертикальной штанги 1 со шкалой и крепится к стенке посредством двух кронштейнов 2.

На самой штанге установлены 2 кронштейна: верхний 3 подвижный и нижний 4 неподвижный (рис. 1.3)

К верхнему кронштейну крепится электромагнит 5, удерживающий металлический шарик, а к нижнему – ловитель 6 с контактной заслонкой.

Время полета шарика отсчитывается по электросекундомеру 7 путем включения тумблера на пульте управления 8.

Одновременно с пуском в ход электросекундомера обесточивается электромагнит и начинается свободное падение шарика.

Остановка электросекундомера происходит при падении шарика на заслонку за счет разрыва электрической цепи.

Высота падения шарика устанавливается по индексу, нанесенному на верхнем подвижном кронштейне и шкале штанги.

ВНИМАНИЕ! При включенном приборе не касаться руками контактов заслонки. Если прибор неисправен, позвать преподавателя или лаборанта.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1.

1. Ознакомиться с описанием работы на установке.
2. Установить подвижную муфту на высоте 2,20 м.
3. С помощью специальной ручки поставить заслонку в горизонтальное рабочее положение.
4. Магнит и секундомер на приборе поставить в положение «включено» и сделать сброс секундомера до нуля, если это необходимо.

5. Измерить более пяти раз падение шарика с установленной высоты и рассчитать t_{cp} .

6. По формуле $h = \frac{gt^2}{2}$ рассчитать $g = \frac{2h}{t^2}$.

7. Определить погрешность по формуле: $\varepsilon = \frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta t}{t_{cp}}\right)^2}$, где

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_{сл}^2 + \Delta t_{инстр}^2}, \Delta h = \Delta h_{инстр}, \text{ т.к. } \Delta h_{сл.} = 0.$$

8. Заполнить таблицу

h	№	t			
2,20	1		g	$\frac{\Delta g}{g}$	Δg
	2				
	3				
	4				
	5				
	ср.				

Задание 2.

1. Т.к. $h = \frac{gt^2}{2}$, то $\sqrt{h} = \sqrt{\frac{g}{2}}t$

Это выражение вида $y = kx$ – уравнение прямой. $k = \sqrt{\frac{g}{2}}$ – можно найти как тангенс угла наклона полученной прямой к оси времени. Измерить время падения шарика для высот: 1221 см, 144 см, 169 см, 196 см, 220 см ($\sqrt{220} = 14,8$). Для каждой высоты опыт повторить не менее пяти раз. Результаты эксперимента изобразить на графике в координатах (t, \sqrt{h}) . Убедиться в том, что точки примерно ложатся на прямую. С помощью полученной прямой найти ускорение свободного падения по формуле $g = 2tg^2\alpha$.

2. Заполнить таблицу

h	121 см	144 см	169 см	196 см	220 см
t₁					
t₂					
t₃					
t₄					
t₅					
t_φ					
\sqrt{h}					

3. Для расчета погрешности на графике по полученным точкам провести две прямые с α_{\max} и α_{\min} . Рассчитать $g_{\max} = 2tg\alpha_{\max}^2$ и $g_{\min} = 2tg\alpha_{\min}^2$, найти $\Delta g = g_{\max} - g_{\min}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему для всех тел в данном месте Земли величина \vec{g} одинакова?
2. Как зависит величина \vec{g} от широты? Чем объясняется эта зависимость?
3. Как зависит величина \vec{g} от высоты?
4. На чем основана гравитационная геологическая разведка?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Проверка основного закона вращения на маятнике Обербека

Цель работы: проверка II закона Ньютона для вращательного движения.

Оборудование: секундомер, штангенциркуль, линейка, установка – крестообразный маятник.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

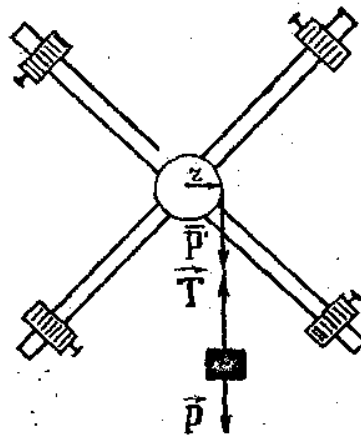


Рис. 2.1

Проверка основного закона вращательного движения $\vec{M} = J\vec{\varepsilon}$ производится на маятнике Обербека, который представляет собой маховик крестообразной формы (см. рис. 2.1). По четырем взаимноперпендикулярным стержням перемещаются грузы для изменения момента инерции, на общей оси находится валик. На валик намотана нить с привязанным к ней грузом. Под действием груза нить разматывается и приводит маховик во вращательное движение. Для данной вращающейся системы основной закон движения можно записать в виде

$$M = J\varepsilon, \quad (2.1)$$

где $M = r P \sin\alpha$ но т.к. $\alpha = 90^\circ$, то

$$M = rP. \quad (2.2)$$

Здесь \vec{P} – сила, приложенная к валику. Ее модуль по III закону Ньютона равен натяжению нити \vec{T} , т.е. $|\vec{P}| = |\vec{T}|$

Во время равноускоренного падения груза $|\vec{T}|$ из II закона Ньютона поступательного движения этого груза

$$|\vec{P}| = |\vec{T}| = m(g - a),$$

где m – масса падающего груза вместе с платформой, a – линейное ускорение груза, g – ускорение свободного падения. Т. к. $a \ll g$, то вращающий момент определяется по формуле

$$M = rP. \quad (2.3)$$

Угловое ускорение ε , находится по связи с линейным ускорением a . Т. к.

$$a = \frac{2h}{t^2} \quad (2.4)$$

$\varepsilon = \frac{a}{r}$, где r – радиус валика, на котором намотана нить, то

$$\varepsilon = \frac{2h}{rt^2} \quad (2.5)$$

Момент инерции маятника Обербека определяется по формуле

$$J_1 = J_0 + J, \quad (2.6)$$

где J_0 – момент инерции маховика без добавочных грузов и равный $(19,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, J – момент инерции добавочных четырех грузов, определяемый по формуле $J = 4mR^2$, где m – масса одного из насаженных грузов, R – расстояние центра масс этих грузов от оси вращения.

Если один и тот же вращающий момент будет действовать на маятник с разными моментами инерции J_1 и J_2 то согласно (2.1) $M = J_1\varepsilon_1$, $M = J_2\varepsilon_2$ и получим

$$\varepsilon_1 : \varepsilon_2 = J_2 : J_1, \quad (2.7)$$

т. е. угловые ускорения обратно пропорциональны моментам инерции.

Если же к маятнику Обербека с неизменным J приложить сначала на вращающий момент M_1 , а затем M_2 , то согласно (2.1)

$$\varepsilon_1 : \varepsilon_2 = M_1 : M_2, \quad (2.8)$$

т.е. угловые ускорения прямо пропорциональны вращающим моментам.

Работа и состоит в проверке соотношений (2.7) и (2.8) и, следовательно, в проверке основного закона вращательного движения (2.1), т.к. они являются его следствиями.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

I. Проверка соотношения (2.8).

Устанавливают грузы на одинаковом расстоянии от оси вращения. Затем пять раз определяют время t_1 падения груза P с высоты h и пять раз определяют время t_2 падения груза P_2 , с той же высоты.

Т.к. h и r в обоих случаях одинаковы, то согласно (2.5) и (2.3)

$$\varepsilon_1 : \varepsilon_2 = \frac{2h}{rt_1^2} : \frac{2h}{rt_2^2} = \frac{t_2^2}{t_1^2} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \quad \text{и} \quad M_1 : M_2 = \frac{P_1 r}{P_2 r} = \frac{P_1}{P_2},$$

т.е. проверка соотношения (2.8) сводится к проверке соотношения

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \quad (2.9)$$

Результаты измерений занести в таблицу:

№	P_1	t_1	P_2	T_2	$\frac{M_1}{M_2} = \frac{P_1}{P_2}$	$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2$	$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2$	$\Delta\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$	$\Delta\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2$
1									
2									
3									
·									
·									
·									
ср.									

Грузы P_1 и P_2 должны отличаться друг от друга по весу примерно в два раза.

II. Проверка соотношения (2.7)

Для этого устанавливают грузы на стержнях крестовины на одинаковом расстоянии R_1 , и определяют время t_1 падения груза P (берут P около 1 кг) с высоты h .

Затем перемещают грузы m на стержнях крестовины на расстояние R_2 , (R_1 и R_2 должны значительно отличаться друг от друга) и опять определяют время падения t_2 того же груза P с той же высоты h .

Так как для обоих случаев h одинакова, то

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \quad J_1 = J_0 + 4mR_1^2$$

$$J_2 = J_0 + 4mR_2^2$$

Тогда проверка соотношения (2.7) сводится к проверке соотношения:

$$\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 = \frac{J_0 + 4mR_2^2}{J_0 + 4mR_1^2} \quad (2.10)$$

Результаты измерений занести в таблицу:

№	m	R_1	t_1	R_2	t_2	$\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$	$\frac{J_2}{J_1} = \frac{J_0 + 4mR_2^2}{J_0 + 4mR_1^2}$	$\Delta\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2$	$\Delta\left(\frac{J_0 + 4mR_2^2}{J_0 + 4mR_1^2}\right)$
1									
2									
3									
·									
·									
·									
ср.									

ПРИМЕЧАНИЕ:

- 1) масса грузов на крестовине находится взвешиванием,
- 2) вес грузов P_1 , и P_2 тоже находится взвешиванием на весах причем надо учитывать и вес платформы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как можно продемонстрировать основной закон динамики вращательного движения?
2. Что такое момент инерции тела относительно оси вращения?
3. Что называется моментом силы относительно оси вращения?
4. Как определить угловое ускорение?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

*Определение моментов инерции твердых тел
методом крутильных колебаний*

Цель работы: определение моментов инерции цилиндра, кольца.

Оборудование: трифилярный подвес; тела, моменты инерции которых определяются (цилиндр, кольцо); весы; секундомер.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ
И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ



Рис. 3.1

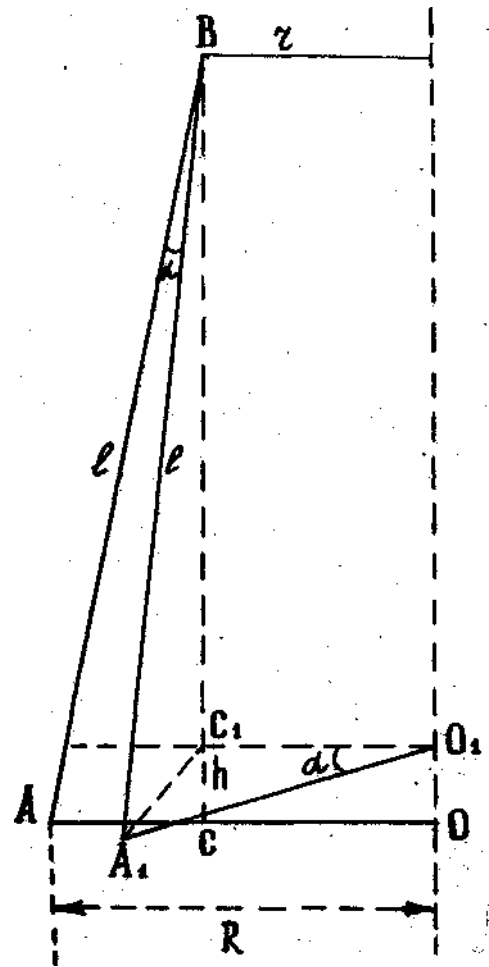


Рис. 3.2

В данной лабораторной работе представлен еще один экспериментальный метод определения момента инерции тел J . Для этого применяют трифилярный подвес. Он используется для измерения моментов инерции тел, имеющих ось симметрии. В данной лабораторной работе трифилярный подвес выполнен в виде круглой платформы, подвешенной на трех симметрично расположенных нитях, укрепленных у краев этой платформы. Наверху эти нити также симметрично прикреплены к диску несколько меньшего диаметра, чем диаметр платформы. Платформа может совершать крутильные колебания вокруг вертикальной оси, перпендикулярной к ее плоскости и проходящей через ее центр и центр верхнего диска. При колебаниях центр тяжести платформы перемещается вверх и вниз вдоль оси вращения.

Период колебаний зависит от массы платформы. Момент инерции, а, следовательно, и период колебаний будут меняться, если платформу нагружать какими-либо телами. Эти и пользуются в данной работе для определения моментов инерции тел (см. рис. 3.1)

Для вывода расчетной формулы воспользуемся законом сохранения механической энергии для изолированной системы:

$$E_n + E_k = const \quad (3.1)$$

Пусть E_k – максимальная кинетическая энергия вращательного движения платформы (в момент прохождения положения равновесия), а E_n – потенциальная энергия платформы в момент ее наивысшего подъема.

В момент прохождения положения равновесия выражение (3.1) дает:

$$E_k = const = \frac{1}{2} J \omega_0^2,$$

а в момент наивысшего подъема $E_n = const = mgh$, где m – масса платформы, ω_0 – ее максимальная угловая скорость, J – момент инерции платформы, h – максимальная высота подъема платформы.

И тогда имеем:

$$mgh = \frac{J \omega_0^2}{2} \quad (3.2)$$

Считая, что платформа совершает гармонические колебания, можно записать выражение для зависимости углового смещения φ от времени в виде

$$\varphi = \varphi_0 \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (3.3)$$

где T – период колебаний, φ_0 – амплитуда колебаний (максимальный угол, на который поворачивается платформа).

Найдем из (3.3) величину максимальной угловой скорости ω_0

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi\varphi_0}{T} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (3.4)$$

Отсюда имеем:

$$\omega_0 = \frac{2\pi\varphi_0}{T} \quad (3.5)$$

Из геометрических соображений можно получить (см. рис. 3.2)

$$h = \frac{Rrd^2}{2l} \quad (3.6)$$

где R – радиус нижней платформы, r – радиус верхней платформы, l – длина подвеса.

Подставляя (3.6) и (3.5) в (3.2) и разрешая полученное соотношение относительно J , находим:

$$J = m \frac{gRr}{4\pi^2 l} T^2 \quad (3.7)$$

или $J = m k T^2$, где $k = \frac{gRr}{4\pi^2 l}$ – постоянная прибора.

Для нашего прибора $k = 4,50 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^2 \pm 0,20 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Зная m и T^2 , по формуле (3.7) сможем рассчитать момент инерции пустой платформы J_0 и момент инерции платформы с изучаемым телом J_m .

Используя аддитивность момента инерции (см. теорию), для момента инерции тела J_m будем иметь:

$$J_T = J - J_0$$

Окончательно получаем, что расчетная формула для момента инерции тела должна иметь вид:

$$J_T = k(mT^2 - m_0T_0^2), \quad (3.8)$$

где m – масса платформы вместе с телом,

m_0 – масса пустой платформы.

T – период колебаний платформы с телом,

T_0 – период колебаний пустой платформы.

Необходимым условием правильного определения момента инерции на установке является вращение платформы вокруг своей вертикальной оси. Всякие другие колебания искажают определяемую величину. Поэтому перед работой необходимо проверить соосность верхнего диска и платформы по отвесу, а также правильность горизонтального положения платформы по уровню. Грузы на платформе надо располагать симметрично относительно центра платформы. Вращательный импульс, необходимый для начала крутильных колебаний, сообщается платформе путем поворота верхнего диска вокруг его вертикальной оси. Для этого нужно потянуть шнур, который приводит во вращение рычажок, связанный с этим диском. Колебания должны быть небольшими (5-10°).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной работе необходимо сделать следующее:

- 1) Определить период колебаний ненагруженной платформы T_0 .
- 2) Определить момент инерции различных тел.

3) Проверить формулу $J = \sum_{k=1}^n J_k$

4) Проверить формулу Штейнера $J_u = J_0 + md^2$.

1. Определение периода колебаний ненагруженной платформы.

При помощи шнура сообщить платформе небольшие колебания, секундомером определить продолжительность 10-15 крутильных колебаний и вы-

числить период колебаний. Опыт проводить не менее трех раз. Результат записать в таблицу.

№	Число колебаний n	Время всех колебаний $t, \text{ с}$	Период колебаний $T_0, \text{ с}$	$\Delta T_0, \text{ с}$	$\frac{\Delta T_0}{T_0}$
1					
2					
3					
ср.					

II. Определение момента инерции тела.

Поместить на платформу тело так, чтобы ось вращения платформы совпадала с геометрической осью тела. Способом, указанным выше, определяют период колебания системы T . Используя формулу (3.8), находят момент инерции тела J_m . Полученные результаты записывают в таблицу.

Кольцо

№	Число колебаний n	Время всех колебаний $t, \text{ с}$	Период колебаний $T, \text{ с}$	Момент инерции тела $J_k, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\Delta J_k, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\frac{\Delta J_k}{J_k}$
1						
2						
3						
ср.						

Масса платформы (см. на установке).

Цилиндр

№	Число колебаний n	Время всех колебаний $t, \text{ с}$	Период колебаний $T, \text{ с}$	Момент инерции тела $J_{ц}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\frac{\Delta J_{ц}}{J_{ц}}$	$\Delta J_{ц}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
1						
2						
3						
ср.						

Полученные результаты сравнить с теоретическими.

Результаты экспериментов считают совпадающими с теоретическими, когда теоретический результат равен экспериментальному в пределах ошибки:

$$J_{теор} = J_{эксп} \pm \Delta J$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Вывести расчетную формулу, указав, при каких допущениях она выводится?
2. Можно ли пользоваться предложенным методом для определения моментов инерции тел, если ось вращения платформы не проходит через центр их тяжести?
3. Сформулировать и доказать теорему Штейнера.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Определение ускорения свободного падения методом обратного маятника

Цель работы: рассчитать ускорение свободного падения с помощью физического маятника.

Оборудование: физический маятник, секундомер.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Метод обратного маятника основан на свойстве сопряженности центра качания и точки подвеса. Это свойство заключается в том, что для любой точки подвеса физического маятника можно найти сопряженную точку так что при последовательном подвешивании маятника в этих точках период его колебания останется одним и тем же.

Период колебаний физического маятника $T = 2\pi\sqrt{\frac{l_{np}}{g}}$, где $l_{np} = \frac{J}{md}$

называется приведенной длиной физического маятника.

Приведенной длиной физического маятника l_{np} называется длина такого математического маятника, период колебаний которого равен периоду колебаний физического маятника.

На основании теоремы Штейнера момент инерции физического маятника J , относительно оси качания, проходящей через т. О, можно представить как

$$J = J_c + md^2,$$

где J_c – момент инерции физического маятника относительно оси, проходящей через центр инерции C маятника и параллельной его оси качения, m – масса маятника, d – расстояние от оси качения до центра масс, т.е.

$$l_{np} = \frac{j}{md} = \frac{J_c + md^2}{md} = d + \frac{J_c}{md} > d \quad (4.1)$$

Согласно уравнению (4.1) для сопряженных точек имеем:

$$\frac{J_c + md_1^2}{d_1} = \frac{J_c + md_2^2}{d_2} \quad \text{или} \quad \frac{J_c}{m} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) = d_2 - d_1.$$

Откуда, подставляя значение $\frac{J_c}{m}$ в выражение для периода

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_c + md_1^2}{mgd_1}} = 2\pi \sqrt{\frac{J_c + md_2^2}{mgd_2}}, \quad \text{получим, что}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{d_1 + d_2}{g}} \quad (4.2)$$

Таким образом, приведенная длина механического маятника равна расстоянию между сопряженными точкам.

Физический маятник, используемый в эксперименте, представляет собой универсальный маятник заводского изготовления, предназначенный для изучения колебания физического маятника и определения свободного падения (схематически изображен на рис. 4.1)

Основные технические данные:

Длина стержня маятника, мм	1200
Диаметр стержня, мм	13
Диаметр чечевицы, мм	125
Цена деления шкалы, мм	1
Расстояние между опорными призмами, мм	730
Вес чечевицы, кг	2,3
Габаритные размеры	12200×300×128
Вес, кг	10,65

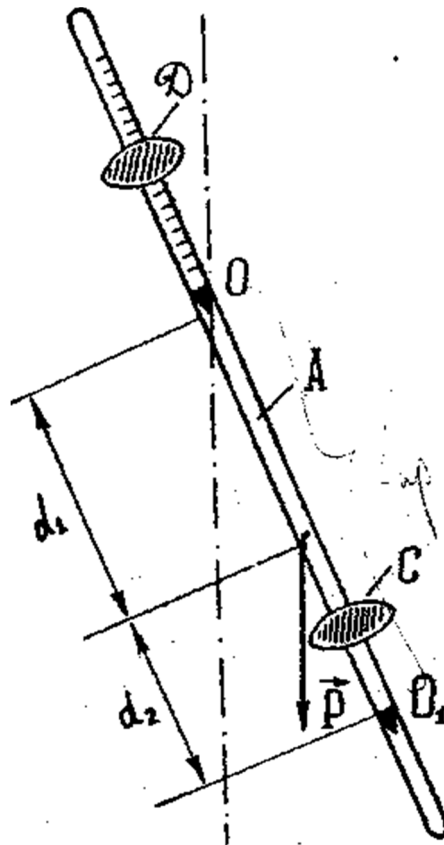


Рис. 4.1

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В эксперименте расстояние между точками подвеса O и O_1 задано заранее (расстояние между опорными призмами). Чтобы эти точки были сопряженными, поступают следующим образом: последовательно подвешивают маятник в этих точках и измеряют время колебаний для различных положений чечевицы D (таких положений следует выбрать 6-7 для каждой точки подвеса).

По полученным данным строят график в координатах (x, t) , где x - расстояние чечевицы D от нуля шкалы около призмы O . Пересечение кривых, полученных для точек подвеса O и позволяет определить положение чечевицы D , при котором точки O и O_1 являются сопряженными и расстояние между ними равно приведенной длине физического маятника. Зная $d_1 + d_2$ - расстояние между призмами и определив T для этого положения с помощью графика, определяют g по формуле (4.2).

1. Закрепляя подвижную чечевицу в положениях 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 и отклонив маятник на угол до отметки, заставляют маятник колебаться. После двух полных колебаний маятника включают секундомер и измеряют время 30-ти колебаний в указанных положениях чечевицы.

2. Переворачивают маятник на другую точку подвеса и проделывают ту же самую операцию.

Данные измерений сводятся в таблицу:

t_1 , с точка подвеса 1	t_2 , с точка подвеса 2	x , мм
		0
		2
		4
		6
		8
		10
		12

3. Строят в координатах(x , t) графики зависимости $t = f(x_1)$ и $t = f(x_2)$ и по их пересечению определяют положение чечевицы x , при котором время 30 колебаний будет в 2-х точках подвеса одинаковым.

4. Определяют период колебаний в сопряженных точках из графика по формуле $T = \frac{t}{n}$, где $n=30$, t – координата точки пересечения вдоль оси времени.

5. Зная из паспортных данных d_1+d_2 (расстояние между двумя опорными призмами) по формуле (4.2) $T = 2\pi \sqrt{\frac{d_1 + d_2}{g}}$, определяют ускорение сво-

бодного падения $g = \frac{4\pi^2(d_1 + d_2)}{T^2}$, вычисляют погрешности.

6. Результаты записывают в виде $g \pm \Delta g$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение физического маятника, приведенной длины физического маятника и сопряженных точек.
2. Показать, что расстояние между сопряженными точками равно приведенной длине.
3. От чего зависит ускорение силы тяжести?
4. Вывести формулу периода колебаний физического маятника.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Изучение свободных колебаний физического маятника

Цель работы: определение логарифмического декремента, коэффициента натяжения маятника и добротности.

Оборудование: физический маятник со съемной пластиной, секундомер.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Уравнение $\alpha = \alpha_0(\sin \omega t + \varphi_0)$ – это уравнение гармонических колебаний, совершаемых под действием квазиупругой силы при отсутствии сил трения. (Квазиупругой называется сила, которая пропорциональна смещению подобно упругой силе, но по своей природе не являющаяся упругой).

Колебания, которые описываются уравнением $\alpha = \alpha_0(\sin \omega t + \varphi_0)$, являются незатухающими. Реально осуществить их очень трудно.

Собственные колебания реально колеблющегося тела всегда затухающие. Они происходят при наличии сил трения. Тогда уравнение движения маятника $J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -mgd \cdot \sin \alpha$ переписывается таким образом:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -mgd \sin \alpha + M_{mp} \quad (5.1)$$

Как видно, в уравнение добавился новый член – $M_{тр}$. Это тормозящий момент силы трения. Будем считать, что он пропорционален угловой скорости $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$, что справедливо для движения тел в вязкой среде с маленькими скоростями:

$$M_{mp} = -r \frac{d\alpha}{dt} \quad (5.2)$$

Знак « \leftarrow » в формуле (5.2) указывает на то, что тормозящий момент противодействует движению. Коэффициент r называют коэффициентом сопротивления.

Перепишем уравнение (5.1) с учетом (5.2): ($\sin\alpha \approx \alpha$)

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{r}{J} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \frac{mgd}{J} \alpha = 0 \quad (5.3)$$

$$\text{или } \frac{d^2\alpha}{dt^2} + 2\beta \frac{d\alpha}{dt} + \omega_0^2 \alpha = 0, \quad (5.4)$$

где обозначили $\beta = \frac{r}{2J}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{mgd}{J}}$.

Уравнение (5.4) есть дифференциальное уравнение и его решением для случая $\beta^2 \ll \omega_0^2$ (малое сопротивление среды) будет выражение вида:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\beta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_0), \quad (5.5)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – угловая частота свободных колебаний, $\beta = \frac{r}{2J}$ – коэффициент затухания;

$\alpha_t = \alpha_0 \cdot e^{-\beta t}$ (5.6) — мгновенная амплитуда затухающих колебаний, α_0 и φ_0 соответственно начальная амплитуда и начальная фаза колебаний.

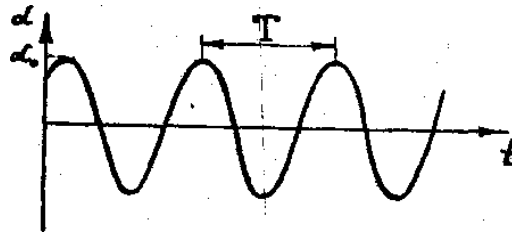


Рис. 5.1

График уравнения $\alpha = \alpha_0 (\sin \omega t + \varphi_0)$ имеет вид, показанный на рис. 5.1.

В результате совместного действия квазиупругой силы и сил трения система совершает колебательное движение, амплитуда которого $\alpha_t = \alpha_0 \cdot e^{-\beta t}$, убывает с течением времени по экспоненциальному закону, другими словами, в системе возникают затухающие колебания. График уравнения (5.5) имеет вид:

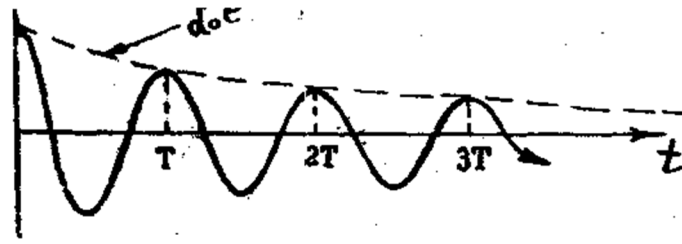


Рис. 5.2

Для характеристики затухающих колебаний вводится понятие декремента затухания. Это безразмерная величина δ равная натуральному логарифму отношения значений амплитуды затухающих колебаний в моменты времени t и $t+T$ (T – условный период колебаний):

$$\delta = \ln \frac{\alpha_t}{\alpha_{t+T}} = \ln \frac{\alpha_0 e^{-\beta t}}{\alpha_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T \quad (5.7)$$

ПРИМЕЧАНИЕ:

Для прямолинейных колебаний физического маятника (пружинный маятник, колеблющийся вдоль вертикальной оси) уравнения (5.1-5.7) выразятся соответственно

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F_{mp} \quad (5.1^*)$$

$$F_{mp} = -r \frac{dx}{dt} \quad (5.2^*)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (5.3^*)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (5.4^*),$$

где $\beta = \frac{r}{2m}$ $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$

$$x = x_0 e^{-\beta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_0) \quad (5.5^*)$$

$$x_t = x_0 \cdot e^{-\beta t} \quad (5.6^*)$$

$$\delta = \ln \frac{x_t}{x_{t+T}} = \ln \frac{x_0 e^{-\beta t}}{x_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T \quad (5.7^*)$$

При анализе колебательной системы широко используется также такой параметр, как добротность. Добротность Q определяется относительной убылью энергии колебаний за одно полное колебание.

$$Q = 2\pi \frac{E}{A_{mp}} = \frac{\omega_0^2}{2\beta\omega_1}, \quad (5.8)$$

где E - полный запас энергии системы, A_{mp} - энергия, теряемая за одно полное колебание. При малых колебаниях с небольшим трением ($\beta \ll \omega_0, \omega_1 \approx \omega_0$) выражение для добротности принимает вид:

$$Q = \frac{\omega_1}{2\beta} \approx \frac{\omega_0}{2\beta}. \quad (5.9)$$

В настоящей работе определяется логарифмический декремент затухания и добротность.

Маятник представляет собой стержень с прикрепленным к нему прозрачным кругом (тормозящей пластиной) на нижнем конце. Подвешенный с помощью игольчатых опор на специальном кронштейне маятник может совершать колебания в вертикальной плоскости.

Отсчет амплитуды колебаний производится по шкале, расположенной на стене. Тормозящая пластина устанавливается в двух взаимноперпендикулярных положениях: а) перпендикулярно шкале, б) параллельно шкале. Для этого предусмотрены специальные винты.

При неизменной массе маятника в случае а) – тормозящий момент пластины – максимальный; в случае б) — минимальный.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить условный период колебаний. Для этого надо измерить время t 20 полных колебаний. Начальное отклонение рекомендуется брать в 12-25 делений.

2. Определить логарифмический декремент затухания для случаев, когда тормозящая пластина (прозрачный круг) своей плоскостью подвешена перпендикулярно шкале.

Так как согласно (5.7) логарифмический декремент затухания – это отношение двух последовательных амплитуд, отличающихся на период, поэтому отклонив маятник на 15 делений, фиксируют значения амплитуд через каждый период и заполняют таблицу:

Ампл. №	α_0	α_T	α_{2T}	α_{3T}	α_{4T}	α_{5T}	α_{6T}	α_{7T}	α_{8T}	α_{9T}	α_{10T}
1											
2											
3											
ср.											

Зная период колебаний и амплитуду через каждый период, строят график в переменных t, α , аналогично рис. 5.2 для этого случая. Определяют логарифмический декремент затухания по формуле

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_n}{n}, \text{ где } \delta_1 = \ln \frac{\alpha_T}{\alpha_{2T}}; \delta_2 = \ln \frac{\alpha_{2T}}{\alpha_{3T}}.$$

3. Определить коэффициент затухания для 2-х случаев, когда тормозящая пластина (прозрачный круг):

- своей плоскостью стоит перпендикулярно шкале,
- параллельно шкале.

Коэффициент β определяется из графика зависимости амплитуды колебаний от времени.

Т.к. (5.6) $\alpha_t = \alpha_0 \cdot e^{-\beta t}$ или $\frac{\alpha_t}{\alpha_0} = e^{-\beta t}$, то прологарифмировав по \ln , по-

$$\text{лучим } \ln \frac{\alpha_t}{\alpha_0} = -\beta t \text{ или } \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_t} = \beta t$$

Видно, что это график зависимости $y=kx$. В нашем случае коэффициент пропорциональности $k=\beta$, $y = \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_t}$.

Маятнику дается начальное отклонение несколько больше 15 делений шкалы. Секундомер включают, когда амплитуда колебаний становится равной 15 делениям шкалы и фиксируют показание секундомера, когда амплитуда принимает значение, равное 13 делениям шкалы. Снова отклоняют маятник на прежний угол и включают секундомер, когда амплитуда становится равной 15 делениям. Теперь фиксируют показания секундомера, когда амплитуда станет равной 11 делениям шкалы. Все повторить снова и фиксировать показания секундомера, когда амплитуда будет равна 9, 7, 5, 3 делениям шкалы. Результаты заносят в две одинаковые таблицы для 2-х случаев: а) плоскость пластины параллельна шкале, б) плоскость пластины перпендикулярна шкале.

а) Плоскость пластины параллельна шкале

α_t	15	13	11	9	7	5	3
t	0						

б) Плоскость пластины перпендикулярна шкале

α_t	15	13	11	9	7	5	3
t	0						

Находят отношения $\frac{15}{13}, \frac{15}{11}, \frac{15}{9}, \dots, \frac{15}{3}$. Находят их натуральные логарифмы $\frac{15}{13}, \frac{15}{11}, \dots, \frac{15}{3}$. (Значения логарифмов даны в таблице на установке). На миллиметровке, выбрав соответствующий масштаб, для случаев а) и б) строят графика зависимости $\ln \frac{\alpha_0}{\alpha_t} \beta t$ в переменных $\left(t, \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_t} \right)$ и по ним определяют коэффициенты:

β_a для случая а),

β_b для случая б).

4. Вычислить добротность маятника по формуле (5.9) $Q = \frac{\omega_1}{2\beta} \approx \frac{\omega_0}{2\beta}$ для случаев а) и б), т. к. $\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$, то используя результат первого задания, получим, что $\omega = \frac{2\pi N}{T}$.

Зная ω , β_a и β_b , рассчитать Q_a и Q_b .

5. Так как согласно (4.18), логарифмический декремент затухания равен $\delta = \beta T$, вычислить его, согласно этому соотношению для случаев а) и б) и сравнить с результатом, полученным в задании 2 для случая а).

Окончательные результаты занести в таблицу:

n	t	T	ω	Задание 2	β_a	β_b	Q_a	Q_b	Задание 5	
				δ_a				Q_b	δ_a	δ_b
Ср.										

ПРИМЕЧАНИЕ: при сдаче лабораторной работы представить промежуточные расчеты, графики, таблицы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие колебания называют свободными?
2. Какой маятник называется физическим?
3. Что называется условным периодом затухающих колебаний?
4. Получите выражение добротности колебательной системы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Исследование собственных колебаний струны методом резонанса

Цель работы: рассчитать скорость и частоту распространения импульса деформации вдоль струны теоретически и из экспериментальных данных и сравнить результаты.

Оборудование: закрепленная на штативе медная струна с подвеской для грузов, набор разновесов, генератор электрических колебаний, магнит, линейка.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Примером колебательной системы, в которой можно получить стоячие волны, может служить струна, натянутая между двумя точками. Так как точки закрепления струны являются узлами стоячих волн, то в струне возбуждаются колебания лишь таких частот, при которых на длине струны укладывается целое число полуволн бегущей волны или, как говорят, укладывается целое число стоячих волн (длина стоячей волны равна половине длины волны бегущей). Исходя из этого, можно записать

$$l = n \frac{\lambda_n}{2}, \quad (6.1)$$

где l – длина струны, $n=1, 2, 3, \dots$, – число стоячих волн,

λ_n – длина бегущей волны при разных v и, следовательно, разных n .

Учитывая связь скорости распространения импульса деформации вдоль струны v с частотой колебаний струны ν соотношением $v = \lambda \nu$, получаем

$$V_n = \frac{n}{2l} v, \quad (6.2)$$

Струна, следовательно, может колебаться не с одной частотой, а с целым спектром частот, что соответствует тому факту, что струна может рассматриваться как система, состоящая из бесконечного числа материальных точек.

Опыт показывает, что скорость распространения импульса деформаций вдоль струны определяется величиной натяжения P струны и линейной плотностью $\tau = \frac{m}{l}$ материала струны.

$$v = f(P, \tau)$$

Эта зависимость может быть раскрыта, если применить метод размерностей. Пусть

$$v = f(P, \tau) = P^m \tau^n \quad (6.3)$$

но $P = mg$, т.е. $[P] = [кг \cdot м / с^2]$ или $[P] = MLT^{-2}$.

M – размерность массы, L – длины, T – времени.

Аналогично $[\tau] = ML^{-1}$, т. к. $\tau = \frac{m}{l}$, $[v] = LT^{-1}$, следовательно, по формуле (6.3), имеем

$$LT^{-1} = (MLT^{-2})^m (ML^{-1})^n \quad \text{или} \quad LT^{-1} = M^{m+n} \cdot L^{m-n} \cdot T^{-2m}.$$

Приравнивая показатели степеней левой и правой частей уравнения, получим

$$m - n = 1 \quad 2m = 1 \quad m + n = 0$$

Из этих трех уравнений получаем

$$m = \frac{1}{2} \quad n = -\frac{1}{2}$$

Таким образом, имеем

$$v = f(P, \tau) = P^m \tau^n = \sqrt{\frac{P}{\tau}}. \quad (6.4)$$

Отсюда получаем окончательное выражение для частот колебаний струны

$$v = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{P}{\tau}}. \quad (6.5)$$

Выражения (6.4) и (6.5) можно записать и через объемную плотность ρ материала струны. В самом деле, т.к. $\tau = \frac{m}{l}$, а $\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{Sl}$, то имеем

$$\rho = \frac{\tau}{S} = \frac{4\tau}{\pi d^2}, \quad (6.6).$$

Для струны $S = \frac{\pi d^2}{4}$ (d – диаметр струны).

Подставив значение τ из (6.6) в (6.4) и (6.5), получаем:

$$v = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{P}{\pi\rho}} \quad (6.7)$$

$$v_n = \frac{n}{ld} \sqrt{\frac{P}{\pi\rho}} \quad (6.8)$$

Выражения (6.1) и (6.8) позволяют вычислить частоты наиболее простых, так называемых, собственных или нормальных колебаний струн. Наиболее общим случаем колебания струн является колебание, в котором одновременно присутствуют все n собственных колебаний. Любое сложное колебание струны может быть представлено как наложение (суперпозиция) многих собственных колебаний, отличающихся не только величинами своих частот, но и величинами своих амплитуд для отдельных точек струны. Распределение амплитуд отдельных точек струны при собственных колебаниях для различных значений n имеет вид, изображенный на рис. 6.1.

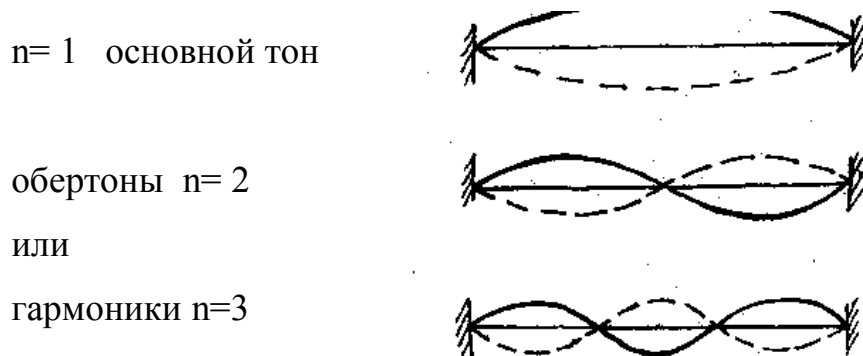


Рис. 6.1

В схеме установки, представленной на рис. 6.2, струна натягивается на некоторой высоте между стойками подставки. Один ее конец закреплен неподвижно, а к другому концу, перетянному через блок прикреплена чашка с грузами, с помощью которых в струне создается натяжение.

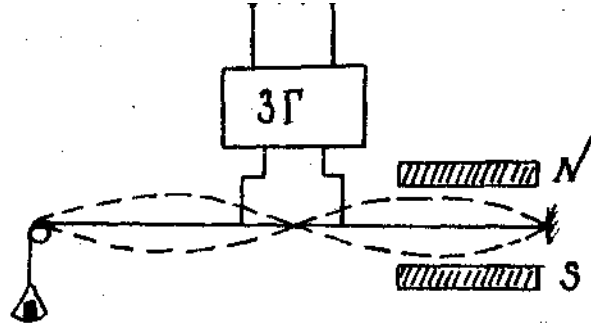


Рис. 6.2

Звуковой генератор вырабатывает электромагнитные колебания, частоты которых находятся в интервале частот слышимого звука (20–20000 Гц). Задание и изменение частоты производится ручкой, снабженной круглым лимбом, на котором нанесены деления от 20 до 200. Если ручка, с надписью «частота» стоит в положении $x1$, то частота генерируемых колебаний равна значениям, нанесенным на лимбе. При постановке этой ручки в положение $x10$ или $x100$ значения частоты, указываемой на лимбе, увеличиваются соответственно в 10 или 100 раз. Регулировка громкости звука производится поворотом ручки с надписью «рег. вых. напряжения». От генератора электрических колебаний на струну подается переменное напряжение. Вдоль струны, по подставке, на которой она закреплена, может свободно перемещаться магнит.

Участок струны с текущим по нему переменным током попадает в поле постоянного магнита. Благодаря этому на струну действует внешняя периодическая сила – (сила Ампера). Частота изменения этой силы равна частоте переменного тока. В том случае, когда частота генератора будет совпадать с одной из собственных частот колебаний струны, а положение полюсов магнита с пучностью стоячей волны, соответствующей данной частоте, наблюдается явление резонанса: на струне устанавливается стоячая волна.

Струна должна быть из немагнитного материала, иначе она будет притянута к одному из полюсов электромагнита, и ее колебания будут нарушены.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить генератор звуковых частот.
2. Создать натяжение а струне, поместив на чашку для грузов разновесок с $m = 50$ г (при определении натяжения учитывается вес чашки).
3. Установив магнит посредине струны и, плавно изменяя частоту генератора при положении переключателя «Множитель» $\times 1$, добиться устойчивых колебаний основного тона. Затем, передвигая магнит, получить устойчивые колебания последующих обертонов.

4. Записать в таблицу 1 частоты звукового генератора, при которых на струне устанавливаются стоячие волны для $n = 1$ и еще для любых двух значений n .

5. Для этих значений n вычертить профили стоячих волн и определить λ_n по формуле (6.1). Все расчеты вести в СИ.

$$\lambda_n = \frac{2l}{n}$$

6. Рассчитать скорость распространения импульса деформации вдоль струны:

$$v = \lambda_n \cdot \nu_n,$$

где ν_n – частоты, найденные на шкале генератора.

7. Взвесить на аналитических весах определенную длину струны (лучше выбрать длину $l=1$ м), определить τ в (кг/м).

8. Рассчитать v и v по формулам (6.4) $v = \sqrt{\frac{P}{\tau}}$ и (6.5) $v = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{P}{\tau}}$ и сравнить с v и v , найденными экспериментально.

9. Повторить все операции для нагрузок P_2 и P_3 . В этом случае τ можно считать известной величиной.

ПРИМЕЧАНИЕ: Все расчеты вести в СИ.

Таблица 1

Натяжение струны	№	Форма собственных колебаний	n	№ №	Собственная частота		Скорость распространения поперечных колебаний	
					Показания по лимбу генератора $\nu_n \pm \Delta\nu$	По формуле $\nu_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{P}{\tau}}$	По экспериментальным данным $\nu_n \pm \Delta\nu$	По формуле $v = \sqrt{\frac{P}{\tau}}$
P_1	1		$n=1$	1				
	2		$n=$	2				
	3		$n=$	3				
P_2	1		$n=1$	1				
	2		$n=$	2				
	3		$n=$	3				
P_3	1		$n=1$	1				
	2		$n=$	2				
	3		$n=$	3				

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Вывести уравнение стоячей волны.
2. Почему при отражении от закрепленной точки струны происходит потеря половины длины волны?
3. Вывести выражение (6.4), применяя метод размерностей.
4. каковы источники погрешностей в данном эксперименте?
5. Чем стоячая волна отличается от бегущей?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

***Измерение скорости звука с помощью
электронного осциллографа и звукового генератора***

Цель работы: определение скорости звука в воздухе методом сложения взаимно перпендикулярных колебаний.

Оборудование: установка, состоящая из электронного осциллографа, звукового генератора, репродуктора, микрофона и оптической скамьи.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Хорошо известно, что уравнение гармонического колебания материальной точки, если колебание точки происходит вдоль какой-то оси, имеет вид:

$$x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (7.1)$$

где x – отклонение материальной точки от положения равновесия оси ОХ в момент времени t , x_0 — максимальное отклонение от положения равновесия,

$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}$ – циклическая частота, а φ_1 – начальная фаза колебаний в момент времени $t=0$.

Если материальная точка участвует в двух взаимно перпендикулярных колебаниях, то вдоль осей ОХ и ОУ уравнения колебаний материальной точки можно записать так:

$$x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (7.2)$$

$$y = y_0 \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (7.3)$$

Эти же уравнения будут справедливы и для колебаний электронного луча осциллографа вдоль осей Х и Y, где опять же Х и Y – смещение луча в горизонтальном и вертикальном направлениях для любого момента времени t , x_0 и y_0 – амплитудные значения этих смещений, ω – циклическая частота. Считаем, что частоты колебаний вдоль оси Х и Y будут одинаковы, т.к. в

данной работе будет выполняться именно этот случай. Электронный луч на экране осциллографа будет колебаться вдоль осей X и Y с одинаковой частотой, согласно уравнениям (7.2) и (7.3). Чтобы определить уравнение траектории результирующего колебания, надо из уравнений (7.2) и (7.2) исключить время. Перепишем эти уравнения:

$$\frac{x}{x_0} = \cos \omega t \cdot \cos \varphi_1 - \sin \omega t \cdot \sin \varphi_1 \quad (7.4)$$

$$\frac{y}{y_0} = \cos \omega t \cdot \cos \varphi_2 - \sin \omega t \cdot \sin \varphi_2 \quad (7.5)$$

Умножая (7.4) на $\cos \varphi_2$ и (7.5) на $\cos \varphi_1$ и беря их разность, получим

$$\frac{x}{x_0} \cos \varphi_2 - \frac{y}{y_0} \cos \varphi_1 = \sin \omega t \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7.6)$$

Умножая (7.4) на $\sin \varphi_2$ и (7.5) на $\sin \varphi_1$ и беря их разность, получим

$$\frac{x}{x_0} \sin \varphi_2 - \frac{y}{y_0} \sin \varphi_1 = \cos \omega t \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7.7)$$

Возводя в квадрат и складывая почленно последние два уравнения, находим уравнение траектории:

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} - \frac{2xy}{x_0 y_0} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (7.8)$$

Уравнение (7.8) представляет собой уравнение эллипса в декартовых координатах. При выполнении условия, когда разность фаз

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi n, \quad (7.9)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$, эллипс превращается в отрезок прямой

$$y = \frac{y_0}{x_0} x, \quad (7.10)$$

проходящий через 1-й и 3-й координатные углы. Для доказательства этого подставим (7.9) в уравнение (7.8), откуда следует:

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} - \frac{2xy}{x_0 y_0} = 0 \Rightarrow \left(\frac{x}{x_0} - \frac{y}{y_0} \right)^2 = 0 \Rightarrow \frac{x}{x_0} = \frac{y}{y_0} \Rightarrow y = \frac{xy_0}{x_0} \quad (7.11)$$

Аналогично при $\varphi_2 - \varphi_1 = (2n + 1)$ (7.12) получаем решение

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} = 1 \quad (7.13)$$

При $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi(2n + 1)$ (7.14) получаем уравнение прямой, проходящей через 2-й и 4-й координатные углы:

$$y = -\frac{xy_0}{x_0} \quad (7.15)$$

Все это можно наглядно наблюдать на экране электронного осциллографа (ЭО). Т. к. электронный луч осциллографа может отклоняться двумя парами пластин по оси ОХ и оси ОУ (см. учебник физики 9 кл.), то на его экране мы можем наблюдать результирующие колебания, получающиеся от сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний, в зависимости от разности их фаз. Эти результирующие колебания называются фигурами Лиссажу. (Как мы уже указывали, при равных частотах слагаемых колебаний это будет эллипс или окружность, или отрезок прямой в определенных координатных углах).

Схема установки представлена на рис. 7.2. На одну пару пластин ЭО подается синусоидальное напряжение, подводимое к электродинамическому репродуктору Р (источник звука) от звукового генератора (ЗГ). На другую пару пластин ЭО подается синусоидальное напряжение той же частоты, которое индуцируется в микрофоне (приемник звука), находящемся на расстоянии L от репродуктора.

Разность фаз между этими двумя напряжениями, частоту которого можно определить во ЗГ, зависят от расстояния L , от скорости звука v в среде, разделяющей репродуктор и микрофон (в данном случае в воздухе), от частоты колебаний ν , а также от граничных условий (условий в излучателе и приемнике звука).

Эта разность фаз возникает вследствие того, что скорость распространения звуковых колебаний от репродуктора до микрофона очень мала по

сравнению со скоростью распространения электрических колебаний вдоль соединительных проводов.

Если на горизонтально отклоняющие пластины осциллографы подается напряжение от репродуктора, меняющееся во времени по закону

$$U_x = U_0 x \cos \omega t, \quad (7.16)$$

то смещение электронного луча на экране осциллографа ввиду его безынерционности будет меняться во времени по такому же закону

$$x = x_0 \cos \omega t \quad (7.17)$$

Напряжение, индуцируемое в микрофоне, будет меняться во времени тоже по этому закону, однако оно будет поступать на вертикально отклоняющие пластины с запаздыванием на время τ , необходимое для того, чтобы звуковое колебание распространилось от репродуктора до микрофона. Поэтому напряжение, поступающее на вертикально отклоняющие пластины, будет изменяться по закону

$$U_y = U_0 y \cos \omega(t - \tau) \quad (7.18)$$

В соответствии с этим смещение луча в вертикальном направлении будет

$$y = y_0 \cos \omega(t - \tau) \quad (7.19)$$

Время запаздывания τ определится соотношением

$$\tau = \frac{L}{v}, \quad (7.20)$$

где v – фазовая скорость распространения звуковых колебаний в воздухе, L расстояние между репродуктором и микрофоном.

Разность фаз между колебаниями луча в вертикальном и горизонтальном направлениях

$$\Delta\varphi = \omega\tau = \frac{2\pi L}{Tv} = \frac{2\pi Lv}{v} = \frac{2\pi L}{\lambda} \quad (7.21), \text{ т.к. } v = \lambda\nu,$$

где T – период, ν – линейная частота колебаний, L – в данном случае представляет собой разность хода двух волн, одной идущей непосредственно от

ЗГ на ось осциллографа, и другой, распространяющейся от репродуктора по воздуху до микрофона (звуковая волна) и от микрофона до вертикально отклоняющих пластин осциллографа (волна электрического напряжения).

Если эта разность фаз $\Delta\varphi = 2\pi n$, то согласно (7.20) получим на экране не прямую в 1-ом и 3-ем координатных углах, если $\Delta\varphi = (2n + 1)\pi$, то согласно (7.15) прямая проходит через 2-ой и 4-ый координатные углы, а если $\Delta\varphi = (2n + 1)\frac{\pi}{2}$, на экране будет эллипс (7.13). Т.е. изменяя L при неизменной ν (или наоборот), можем получить на экране осциллографа определенную фигуру, а по сдвигу микрофона по скамье измерить длину волны.

На рис. 7.1 схематически показаны полученные фигуры при положениях микрофона 1, 2, 3, 4 и расстояние в длинах волн между этими положениями.

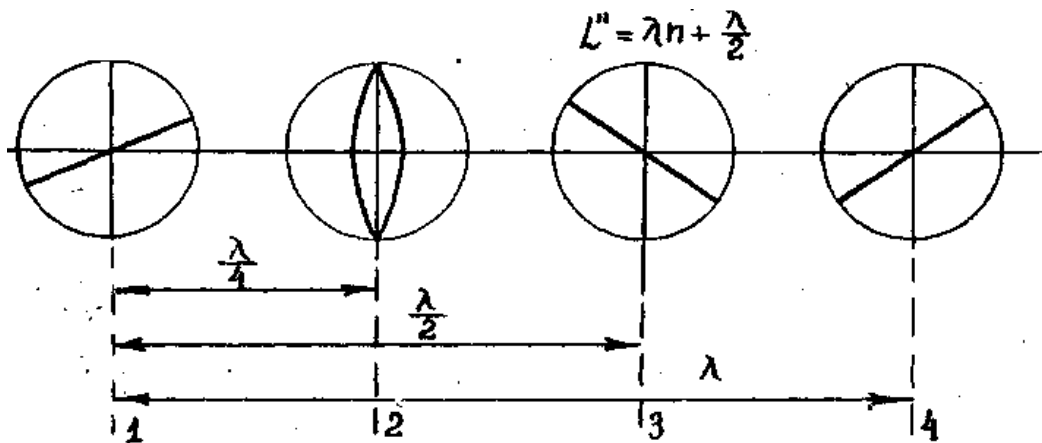


Рис. 7.1

Таким образом, зная две положения микрофона, можно найти λ , а по формуле $v = \lambda \nu$ – скорость звука, где ν – частота генератора. Следует иметь в виду, что скорость звука существенно зависит от температуры среды. Эта зависимость выражается формулой:

$$v_t = v_0 \sqrt{1 + 0,004t \circ C}, \quad (7.22)$$

где v_0 – скорость звука при 0°C и давлении 760 мм рт. ст., она равна 331 м/с.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Измерительная схема изображена на рис. 7.2.

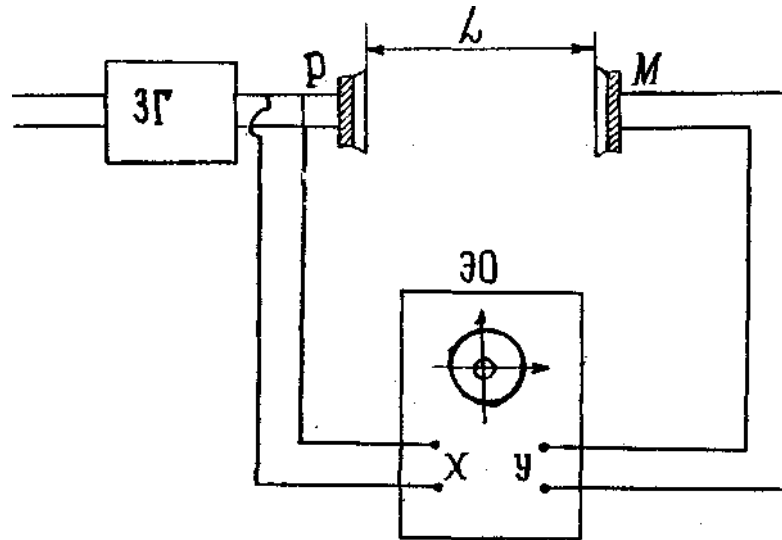


Рис. 7.2

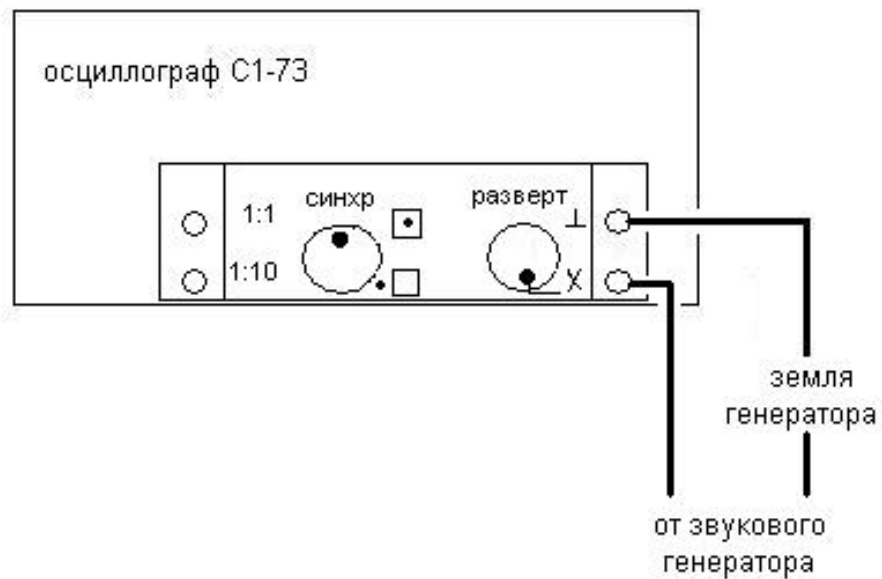


Рис. 7.3

1. Электронный осциллограф ЭО предназначен для фиксирования выполнения условий (7.19), (7.22), (7.16). Положение ручек осциллографа С1-73 в режиме отключенного генератора горизонтальной развертки показано на рисунке 7.3. Также показано правильное подключение звукового генератора к X-разъему осциллографа.

2. Звуковой генератор ЗГ представляет собой источник электрических колебаний звуковой частоты. В настоящей работе используется звуковой ге-

нератор типа ЗГ-10, позволяющий получать синусоидальные электрические колебания, частоту которых можно менять в диапазоне от 20 до 20000 Гц,,

3. Электродинамический репродуктор предназначен для преобразования электрических колебаний поступающих от звукового генератора в звуковые колебания.

4. Микрофон предназначен для преобразования звуковых колебаний, излучаемых репродуктором, в электрические.

5. Оптическая скамья снабжена шкалой и отсчетным устройством для точного измерения расстояний, на которые перемещается микрофон при производстве опыта.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить репродуктор и микрофон на оптической скамье.

2. Включить осциллограф. Отрегулировать горизонтальное усиление осциллографа так, чтобы луч описывал горизонтальную прямую длиной в третью часть диаметра экрана.

3. Поставить ручку вертикального усиления осциллографа на максимальное усиление.

4. Меняя частоту генератора и расстояние между репродуктором и микрофоном, получить на экране прямую линию.

5. Добейтесь, чтобы угол наклона прямой линии к осям координат составил примерно 45° для этого необходимо подобрать соответствующее ослабление сигнала (с помощью переключателей ослабителей и переключателя нагрузки) и горизонтальное усиление осциллографа.

6. Зафиксируйте положение микрофона L_1 . Перемещая его по оптической скамье, добивайтесь, чтобы электронный луч опять начал описывать прямую линию, расположенную в тех же координатных углах, что и при первоначальном положении микрофона. Расстояния между последующими и предыдущими положениями микрофона в этом случае равно длине волны

$$\lambda_i = L_{i+1} - L_i$$

7. Запишите в две одинаковые таблицы, составленные для $\nu_1 = 800$ Гц и $\nu_2 = 1500$ Гц, значения измеренных величин.

№	L_i	$\lambda_i = L_{i+1} - L_i$	$\Delta\lambda$	ν	$\Delta\nu$	ν	$\frac{\Delta\nu}{\nu}$	$\Delta\nu$
1								
2								
3								
4								
5								
	Ср.							

8. Проведите необходимые вычисления и определить погрешности измерений ($\frac{\Delta\nu}{\nu}$ и $\Delta\nu$) для обоих случаев

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких факторов зависит скорость звука?
2. В каких областях техники используются звуковые колебания?
3. Вывести формулы (7.8), (7.21).
4. Для каких целей в настоящей задаче используется электронный осциллограф?
5. Для чего применяется звуковой генератор

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Определение продолжительности упругого удара

Цель работы: Определение времени удара двух стальных шаров.

Оборудование: Установка для упругого удара, зеркальный гальванометр со шкалой, сухая батарея 1,30 В, двухполюсный переключатель, ключ, реостат, конденсатор, электромагнит.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Удар двух тел называется абсолютно упругим, если деформации, возникшие в телах при ударе, полностью исчезают. Значит, что, остаточных деформаций после удара нет и нет нагревания взаимодействующих тел. Поэтому при абсолютно упругом ударе полная механическая энергия системы двух взаимодействующих тел не меняется.

Если скорости тел массой m_1 и m_2 до удара \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , то на основании законов сохранения импульса и механической энергии системы взаимодействующих тел можно рассчитать их скорости \vec{U}_1 и \vec{U}_2 после абсолютно упругого удара.

$$m_1\vec{U}_1 + m_2\vec{U}_2 = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 \quad (8.1)$$

$$\frac{m_1U_1^2}{2} + \frac{m_2U_2^2}{2} = \frac{m_1v_1^2}{2} + \frac{m_2v_2^2}{2} \quad (8.2)$$

Решив систему уравнений относительно \vec{U}_1 и \vec{U}_2 можно получить

$$\vec{U}_1 = \frac{(m_1 - m_2)\vec{v}_1 + 2m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2} \quad (8.3)$$

$$\vec{U}_2 = \frac{(m_2 - m_1)\vec{v}_1 + 2m_1\vec{v}_2}{m_1 + m_2} \quad (8.4)$$

В частности, если массы тел одинаковы, то при рассматриваемом ударе тела обмениваются скоростями:

$$\vec{U}_1 = \vec{v}_2 \qquad \vec{U}_2 = \vec{v}_1$$

Если масса $m_2 \gg m_1$, то

$$\vec{U}_1 = 2\vec{V}_2 - \vec{V}_1 \qquad \vec{U}_2 \approx \vec{V}_2$$

При ударе двух тел промежутком времени, протекающий от первого момента соприкосновения поверхностей ударяющихся тел до последнего их соприкосновения, называют продолжительностью удара.

Если удар носит упругий характер, например, удар двух стальных шаров, то явление, которое при этом возникает, может быть описано следующим образом. В течение первой фазы оба шара деформируются так, что точка их соприкосновения заменяется круглой площадкой, при этом кинетическая энергия шаров переходит в потенциальную энергию упругой деформации. Упругие силы, возникающие в шарах, постепенно возрастают по мере увеличения деформации и достигают максимума в момент наибольшего сжатия шаров, когда их кинетическая энергия становится минимальной, или в частном случае, равной нулю. После этого начинается вторая фаза упругого удара, при которой процессы протекают в обратном направлении, т.е. вследствие упругости шары начинают восстанавливать свою форму, и потенциальная энергия упругой деформации постепенно переходит вновь в кинетическую энергию. В результате этого шары под действием равных по величине, но обратных по направлению импульсов, отталкиваются друг от друга.

Продолжительность удара зависит от их упругих свойств, т.е. от их материала, от их скоростей в момент начала удара и, наконец, от их радиусов. Целью настоящей работы и является определение времени упругого удара двух стальных шаров.

Для определения продолжительности удара в этой работе применяется метод конденсатора, измерение при этом методе сводится к определению количества электричества, которое теряет заряженный конденсатор определяемой емкости, если его обкладки оказываются замкнутыми в течение промежутка времени, равного продолжительности удара двух исследуемых шаров.

Если начальный заряд конденсатора определенной емкости C обозначить через q_0 , то можно записать:

$$q_0 = CV_0, \quad (8.5)$$

где V_0 – начальное значение разности потенциалов, приложенной к обкладке конденсаторов.

Пусть обкладки конденсатора оказываются замкнутыми на сопротивление R в течение времени τ , равного продолжительности удара. За этот промежуток времени конденсатор частично потеряет свой заряд, и разность потенциалов на его обкладках уменьшится до некоторого значения V . Очевидно, имеем $q = CV$ (8.6), где q – заряд, оставшийся на конденсаторе.

Предполагая, что в течение времени τ разрядка конденсатора совершается равномерно, т.е. с постоянной силой тока, можно считать, что по проводнику с сопротивлением R проходит ток J , который определяется выражением:

$$J = \frac{q_0 - q}{\tau} \quad (8.7)$$

причем на основании закона Ома можно написать:

$$J = \frac{\frac{1}{2}(V_0 + V)}{R} \quad (8.8)$$

где в числителе взята средняя разность потенциалов конденсатора за время τ . Из уравнения $W_n + W_k + W_{вр} = W_{полн} = const$ и (8.4) имеем

$$\tau = \frac{(q_0 - q)R}{\frac{1}{2}(V_0 + V)} \quad (8.9)$$

или, подставляя в это выражение значения V_0 и V из формул (8.5) и (8.6), находим:

$$\tau = \frac{2CR(q_0 - q)}{(q_0 + q)} \quad (8.10)$$

Для измерения зарядов конденсатора и применяется баллистический гальванометр (в нашем случае зеркальный гальванометр) из теории которого

следует, что первое отклонение его катушки пропорционально количеству электричества, прошедшему через нее. Поэтому, если разряжать конденсатор через гальванометр, то его отклонения будут пропорциональны зарядам конденсатора.

Если начальный заряд конденсатора вызывает отклонение гальванометра n_0 , в остаточный заряд q – отклонение n (отклонения прямо пропорциональны зарядам), то (8.10) можно переписать так

$$\tau = 2CR \frac{n_0 - n}{n_0 + n} \quad (8.11)$$

Величины C и R известны (задаются), а величины n_0 и n определяются из наблюдений. Формула (8.11) является приближенной, так как она выведена в предположении, что разряд конденсатора в промежутке времени τ совершается равномерно, это оправдывается достаточно точно только при условии, что q незначительно отличается от q_0 , т.е., что в процессе разряда через проводник проходит лишь небольшая часть начального заряда конденсатора. Последнее обстоятельство требует, чтобы емкости конденсатора и сопротивление были достаточно велики.

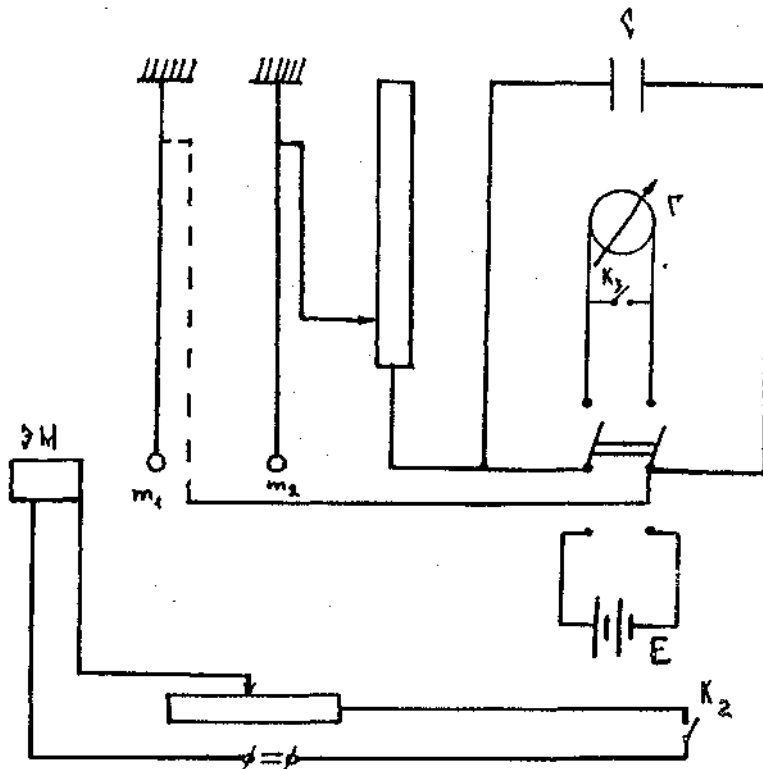


Рис. 8.1

Все приборы собираются по схеме, представленной на рис. 8.1, где m_1, m_2 – стальные шары, R – сопротивление, C — конденсатор 04 мкФ, Γ – зеркальный гальванометр со шкалой, K_1 – двухполюсный переключатель, K_2 – ключ, ЭМ – электромагнит, E – источник тока, K — ключ гальванометра, служащий для быстрого успокаивания колебаний «зайчика» на шкале.

Зеркальный гальванометр установлен на отдельной консоли на стене. Его отклонения отсчитываются по шкале (объективный отсчет). Стальные шары бифилярно подвешены на проводниках так, чтобы линия их центров перемещалась параллельно рейкам, на которых расположен электромагнит и стопорный механизм S (см. рис. 8.2). Последний служит для того, чтобы исключать возможность повторных соударений шаров. Если ручка переключателя переброшена в положение (1), то конденсатор включается в цепь источника тока и получает заряд q_0 если же теперь перебросить ручку переключателя в положение (2), то заряд q пройдет через гальванометр Γ , давая n_0 – отклонение «зайчика» по шкале. Если снова ручку переключателя перебросить в положение 1, а затем произвести удар шаров, то за время удара произойдет частичная разрядка конденсатора через шары и сопротивление R и при перебрасывании ручки переключателя в положение 2, сразу же после удара шаров, через гальванометр пройдет остаточный заряд конденсатора и вызовет отклонение n . Работа сводится к отсчету отклонений n_0 и n «зайчика» гальванометра по шкале.

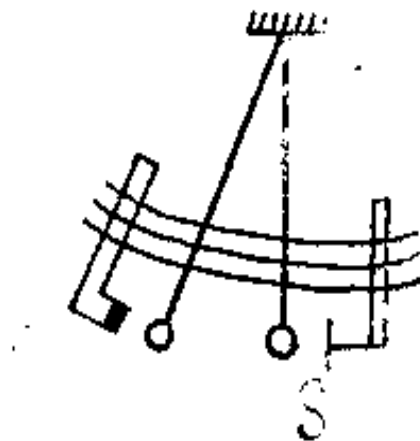


Рис. 8.2

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для отсчетов отклонений n_0 и n выполняют следующее:

1. Устанавливают и отсчитывают нулевую точку гальванометра на шкале.

2. Перебрасывают ручку переключателя в положение (1) и производят зарядку конденсатора, для полного заряда конденсатора требуется держать ручку в положении (1) в течение времени не менее одной секунды.

3. Перебрасывают ручку переключателя из положения (1) в (2) и, наблюдая вызванное этим отклонение «зайчика» гальванометра, отсчитывают точку его поворота (наибольшее отклонение). Из расчетов нулевой точки и точки поворота гальванометра определяют величину его отклонения n_0 . Это делается не менее 10 раз, каждый раз отсчитывая нулевую точку и точку поворота при наибольшем отклонении. Для успокоения колебаний «зайчика» по шкале накоротко замыкают гальванометр.

4. Отводят один из шаров к электромагниту и замыкают ключ K_2 , чтобы этот шар задержался электромагнитом (расстояние между шарами должно быть около 15 см).

5. Вновь отсчитывают нулевую точку гальванометра и снова заряжают конденсатор, перекидывая ручку переключателя в положение (1) на время не менее одной секунды и переводят его в среднее (нейтральное положение). Затем, разомкнув цепь гальванометра ключом K_3 и произведя удар шаров размыканием ключа K_2 , перебрасывают ручку переключателя K_1 , в положение (2) и отсчитывают отброс по шкале гальванометра n , так же, как и в первом случае. Определение n_0 и n произвести не менее семи раз и найти их среднее значение. Подставив их в формулу (8.11), определяют τ .

Результаты измерений заносят в таблицу:

№	C	R_1	n_0	n	τ_1	$\frac{\Delta\tau_1}{\tau}$	$\Delta\tau_1$	R_2	n_0	n	τ_2	$\frac{\Delta\tau_2}{\tau}$	$\Delta\tau_2$	τ_ϕ	$\Delta\tau_\phi$
1															
2															
3															
.															
.															
.															
		Ср.													

Проделав измерения для одного сопротивления (сопротивление R_1 следует брать R_{max} , повторяют то же самое для другого ($R_2 = \frac{1}{2} R_{max}$)).

При выполнении работы следует обратить особое внимание на быстроту и четкость разрядки конденсатора через шары при ударе и через гальванометр, ибо при малейшей медлительности заряд с конденсатора стекает, и его разрядка будет сопровождаться меньшим отклонением гальванометра (не весь заряд учитывается).

Формула вычисления погрешности:

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta R}{R} + \Delta n_0 \left(\frac{1}{n_0 - n} - \frac{1}{n_0 + n} \right) + \Delta n \left(\frac{1}{-n_0 - n} - \frac{1}{n_0 + n} \right)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется ударом, абсолютно упругим ударом?
2. Вывести выражения (8.3) и (8.4).
3. Вывести выражение (8.11).
4. Сформулировать закон сохранения механической энергии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Определение скорости пули с помощью крутильно-баллистического маятника

Цель работы: Измерить скорость пули, вылетающей из пружинного пистолета.

Оборудование: крутильно-баллистический маятник ФП8А, секундомер, пружинный пистолет, пуля, заряжающая штанга, линейка или рулетка.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В данной работе для изучения законов сохранения и изменения механической энергии используется крутильно-баллистический маятник типа ФП8А, с помощью которого определяется скорость пули, вылетающей из пружинного пистолета и попадающей в мишень, покрытую пластилином. Это пример абсолютно не упругого удара двух тел, после которого оба тела движутся как одно целое, а деформации, возникшие в процессе удара, полностью сохраняются.

Некоторые технические характеристики маятника ФП8А:

Момент инерции:	
а) максимальный (грузы (3) находятся на максимальном расстоянии)	0,402 кг·м ²
б) минимальный (расстояние между грузами минимальное)	0,216 кг·м ²
Длина отвеса	1200 мм
Длина подвеса	1200 мм
Диаметр мишени	154 мм
Вес груза	1,695 кг

Маятник крутильно-баллистический выполнен в виде крестовины (1) с двумя неподвижными грузами (2), двумя передвигаемыми грузами (3), мишенью (4) и балансирующим грузом (5) (рис. 9.2).

Крестовина подвешена на проволочном тросике (6) к настенному кронштейну (8). Два больших перемещающихся груза (3) по одному с каждой стороны служат для изменения момента инерции подвижной системы прибора. Груз (5) также перемещается. Крестовина подвешена на проволочном тросике (6) к настенному кронштейну (8). Два больших перемещающихся груза (3) по одному с каждой стороны служат для изменения момента инерции подвижной системы прибора. Груз (5) также перемещается по штанге и служит для уравнивания мишени. Мишень (4) в виде диска жестко прикреплена к горизонтальной штанге и покрыта пластилином для задержания пули.

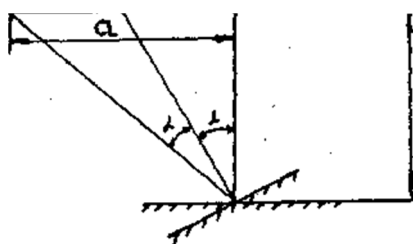


Рис. 9.1

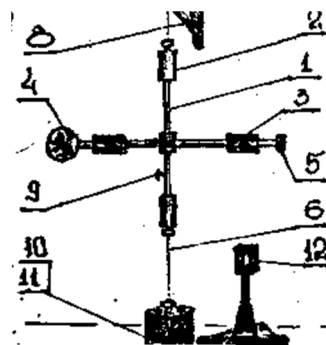


Рис. 9.2

Угол отклонения мишени при попадании в нее пули отсчитывается при помощи светового «зайчика», отраженного от зеркала (9), закрепленного на вертикальном стержне крестовины. Зеркало может перемещаться по стержню и с помощью винта фиксироваться в нужном направлении. Для устранения колебаний крестовины к вертикальной штанге подвешен тяжелый груз (10), имеющий два отверстия, в которые входят направляющие пальцы фланца (11) прикрепляемого к полу помещения.

Вывод расчетной формулы основан на двух законах сохранения:

1) законе сохранения момента импульса

$$mvr = J\omega, \quad (9.1)$$

где mvr – момент импульса пули в момент удара (m – масса пули, v – скорость пули, r – расстояние от оси вращения до точки попадания),

$J\omega$ – момент импульса системы (маятник плюс пуля), J – момент инерции системы, ω – угловая скорость вращения маятника после удара;

2) законе сохранения механической энергии

$$k \frac{\alpha^2}{2} = \frac{J\omega^2}{2} \quad (9.2)$$

где $k \frac{\alpha^2}{2}$ – потенциальная энергия закрученной нити при максимальном отклонении маятника на угол α , k – постоянная кручения, $\frac{J\omega^2}{2}$ – кинетическая энергия вращательного движения маятника в момент прохождения положения равновесия.

Из (9.1) и (9.2) получаем

$$v = \frac{J\omega}{mr} = \frac{J\alpha \sqrt{\frac{k}{J}}}{mr} \quad (9.3)$$

Известно, что период маятника, совершающего гармонические крутильные колебания, определяется формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}}, \quad (9.4)$$

отсюда имеем

$$\sqrt{\frac{k}{J}} = \frac{2\pi}{T} \quad (9.5)$$

Подставляя (9.5) в (9.3), получаем расчетную формулу

$$v = \frac{2\pi J\alpha}{mrT} \quad (9.6)$$

где J – момент инерции маятника,

α – максимальный угол поворота маятника после попадания пули,

m – масса пули,

r – расстояние от оси вращения до места попадания пули,

T – период колебаний маятника.

Угол отклонения определим следующим образом (см. рис. 9.1).

8. Рассчитать скорость пули по формуле (9.6).
9. Рассчитать относительную и абсолютную ошибки измерений.
10. Записать окончательный результат

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение абсолютно неупругого удара.
2. Записать законы сохранения энергии и импульса для неупругого удара двух тел, аналогичные выражениям (8.1) и (8.2) для упругого удара.
3. Получить выражение (9.4) $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k}}$ (по аналогии с выводом $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ для пружинного маятника).
4. Вывести расчетную формулу (9.6) и дать объяснение всем величинам, входящим в нее.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Определение коэффициентов сил трения качения

Цель работы: Рассчитать коэффициенты сил трения качения для различных поверхностей.

Оборудование: Установка Лебедева, набор различных подстилающих поверхностей.

**КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ
И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

Трение качения относится к сухому трению и возникает при качении одного тела по поверхности другого. При этом возникает особая сила – сила трения качения, которая препятствует движению.

Как показывает опыт, сила трения качения при тех же материалах соприкасаемых тел всегда меньше трения скольжения. Этим обстоятельством пользуются на практике, заменяя подшипники скольжения шариковыми или роликовыми подшипниками.

Кулон опытным путем установил, что сила трения качения пропорциональна силе N нормального давления, оказываемого на соприкасающиеся поверхности, и обратно пропорциональна радиусу катящегося цилиндра (или колеса)

$$F_k = \mu_k \frac{N}{R}, \quad (10.1)$$

где μ_k – коэффициент трения качения. Это положение именуется законом Кулона. Коэффициент трения качения имеет размерность длины и в СИ измеряется в метрах, а в системе CGS – в сантиметрах. Коэффициент трения качения не зависит от скорости качения и радиуса цилиндра, но зависит от материала, из которого изготовлены взаимодействующие тела, а также от состояния их поверхностей. Обычно μ_k уменьшается с увеличением твердости

материала и чистоты его обработки. Рассмотрим причины появления силы трения качения.

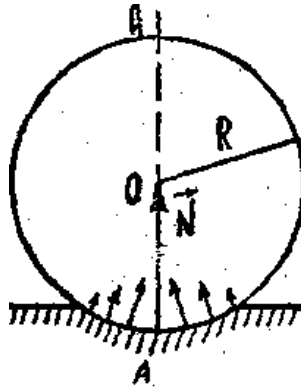


Рис. 10.1

Пусть на горизонтальной плоскости покоится цилиндр. Под действием силы, прижимающей цилиндр к плоскости (этой силой может быть сила тяжести), цилиндр и плоскость деформируются. Для упрощения рассуждений будем считать, что деформируется только плоскость (рис. 10.1). Это упрощение мало повлияет на результат рассуждений. Силы упругости, действующие на каждый малый элемент цилиндра со стороны плоскости, будут симметричны, относительно вертикальной плоскости AA, проходящей через ось цилиндра O. Поэтому результирующая сила «реакции опоры» вертикальная и проходит через ось цилиндра. Она и уравнивает силу тяжести.

$$\vec{N} = -m\vec{g}$$

При движении цилиндра по плоскости картина распределения элементарных сил упругости существенно меняется. Это происходит по следующим двум причинам: 1) Абсолютно упругих тел в природе не существует, поэтому, строго говоря, всякая деформация твердого тел (как бы она мала ни была) в какой-то степени неупругая. Хотя при малых деформациях реальных твердых тел остаточные деформации весьма малы и ими обычно пренебрегают, здесь они приобретают принципиальное значение и пренебрегать ими нельзя.

2) Все реальные тела (и упругие в том числе) обладают свойством последующего действия (последействия или упругим гистерезисом), состоящим в том, что тела не сразу восстанавливают свою форму после снятия нагрузки.

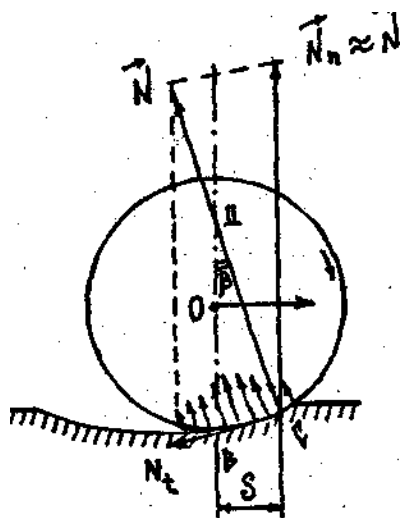


Рис. 10.2

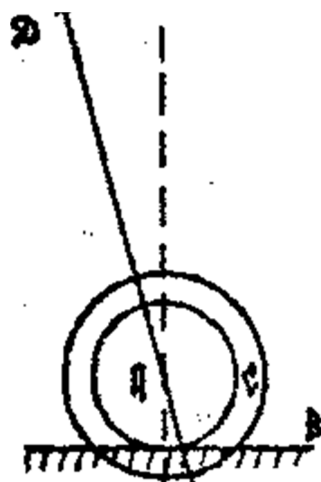


Рис. 10.3

При движении колеса эти факторы проявляются в том, что деформация плоскости качения становится несимметричной (рис. 10.2).

Сзади колеса деформация плоскости не исчезает или исчезает лишь спустя некоторое время. Поэтому равнодействующая всех элементарных сил реакции плоскости оказывается наклоненной к поверхности качения и не проходит через ось цилиндра. Результирующая сила \vec{N} реакции плоскости должна проходить впереди оси, как показано на рис. 10.2. При этом момент силы препятствует движению. (Если бы сила \vec{N} проходила сзади оси, момент этой силы способствовал бы движению, а если бы результирующая сила \vec{N} реакции плоскости проходила через ось, то она не оказывала бы на движение никакого влияния).

Точка C приложения силы \vec{N} смещается в сторону движения на некоторое расстояние S , называемое коэффициентом момента силы трения качения. Угол β и смещение, как показывает опыт, очень малы. Разложи силу \vec{N} реакции плоскости на нормальную \vec{N}_n и касательную \vec{N}_t составляющие в плоскости качения. Так как угол β мал, то $\vec{N}_n \approx \vec{N}$, а \vec{N}_t направлено почти по касательной к ободу колеса.

$$N_t = N \sin \beta \approx N \frac{S}{R},$$

т.е. получим формулу Кулона (10.1) $N_t = F_k, \mu = S$

$$F_k = \mu_k \frac{N}{R} \quad (10.1)$$

Касательная N_t есть как раз та сила, которая препятствует движению цилиндра вперед. Ее и называют силой трения качения. Действие силы трения качения вызывает нагревание контактирующих тел.

В настоящей работе пользуются методом, предложенным С.Ф. Лебедевым. В качестве тела качения используется стальной цилиндр А, находящийся на плоской металлической плите В (рис. 10.3). Цилиндр закреплен в обойме С, которая имеет стержень Д и Е. Первый является стрелкой к шкале Н. На втором находится груз G. Подвижная часть установки может быть названа маятником. При отклонении ее от положения равновесия она совершает затухающие колебания. Ось цилиндра при этом двигается поступательно, сам цилиндр вращается вокруг этой оси. Отклонение стрелки по шкале будет (рис. 10.3, 10.4), следовательно, суммой двух отклонений.

$$a_1 = r \operatorname{tg} \alpha \quad (10.2)$$

$$a = L \operatorname{tg} \alpha \quad (10.3)$$

где α – угол поворота цилиндра, r – его радиус, L – расстояние от оси цилиндра до шкалы, a_1 – отклонение оси цилиндра, a – отклонение, вызванное вращением цилиндра вокруг его оси.

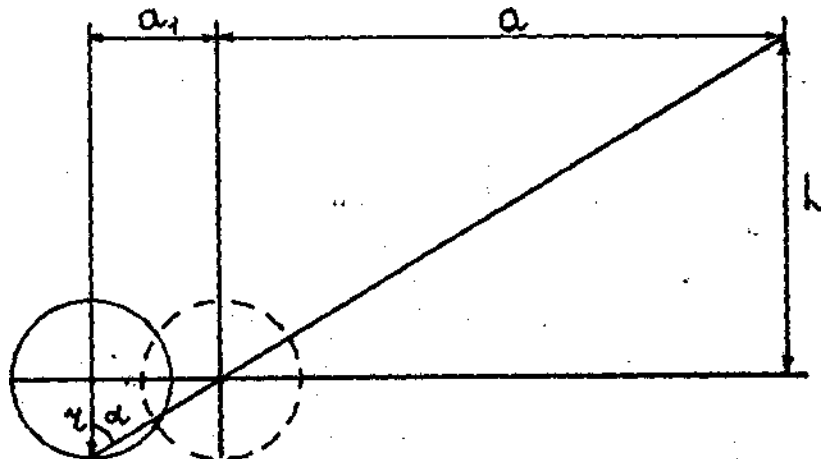


Рис. 10.4

Для суммарного отклонения получим:

$$S = a \left(1 + \frac{r}{L} \right) \quad (10.4)$$

При $r \ll L$ можно пренебречь величиной $\frac{r}{L}$ и считать за отклонение по шкале величину

$$S = a = L \operatorname{tg} \alpha. \quad (10.5)$$

При малых углах отклонения ($\alpha < 5^\circ$) для начального отклонения a_0, α_0 и отклонения после n полных периодов колебаний a_n, α_n соответственно получим:

$$\alpha_0 = \frac{a_0}{L}, \quad \alpha_n = \frac{a_n}{L}, \quad (10.6)$$

Уменьшение угла отклонения за известное число периодов колебания маятника дает возможность вычислить величину коэффициента трения качения.

Под цилиндр могут подкладываться плоские пластинки из различного материала. Это позволяет определить коэффициент трения качения различных пар материалов и сравнить их между собой.

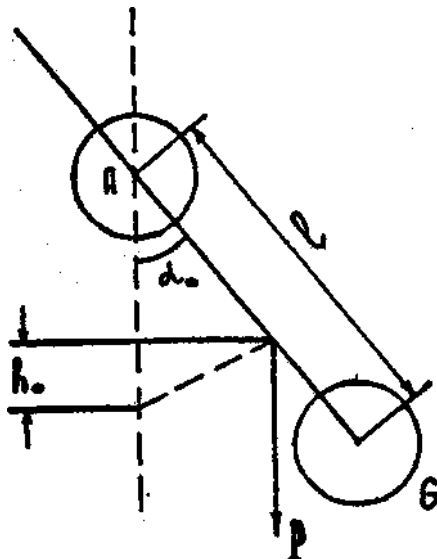


Рис. 10.5

Выведем формулу для расчета коэффициента трения качения на описанной установке. Считая его независимым от скорости движения маятника,

воспользуемся законом сохранения энергии. При начальном отклонении маятника на угол α_0 его потенциальная энергия может быть представлена (рис. 10.5) в виде:

$$E_0 = Ph_0 = Pl(1 - \cos \alpha_0), \quad (10.7)$$

где h_0 – перемещение по вертикали центра тяжести маятника, P – его вес, l – расстояние между точкой центра тяжести и осью маятника. Через один полный период колебаний маятника аналогично получим:

$$E_1 = Pl(1 - \cos \alpha_1), \quad (10.8)$$

где α_1 – угол отклонения маятника через один, полный период колебания. Уменьшение потенциальной энергии будет:

$$\Delta E = 2Pl \left(\sin^2 \frac{\alpha_0}{2} - \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} \right) \quad (10.9)$$

При $\alpha < 5^\circ$ – получим:

$$\Delta E = 0,5Pl(\alpha_0^2 - \alpha_1^2) \quad (10.10)$$

Это уменьшение энергии, если пренебречь силами трения о воздух, вызвано работой сил трения. За один период эта работа может быть записана так

$$\Delta A = P\mu_k(\alpha_0 + \alpha_0' + \alpha_0' + \alpha_1), \quad (10.11)$$

где α_0 – начальное отклонение, α_0' – угол отклонения после одного полупериода, α_1 – угол отклонения маятника, один полный период колебаний. (Действительно, работа по определению $A = FS \cos \beta$. В нашем случае $F = \mu_k \frac{P}{r}$ $S = r(\alpha_0 + \alpha_0' + \alpha_0' + \alpha_1)$ – общая длина дуги, по которой прокатывается цилиндр за один период, а $|\cos \beta| = 1$, т.к. сила направлена по касательной к цилиндру. Исключим из уравнения (10.11) α_0' . Пусть $\Delta \alpha$ – уменьшение угла отклонения за один полупериод. Пользуясь этим, можно написать:

$$\alpha_0' = \alpha_0 - \Delta \alpha \quad \alpha_1 = \alpha_0' - \Delta \alpha \quad (10.12)$$

Из уравнений (10.11) и (10.12) получим

$$\Delta A = 2P\mu_k(\alpha_0 + \alpha_1) \quad (10.13)$$

Приравняв (10.10) и (10.13), получим:

$$\mu_k = \frac{1}{4}l(\alpha_0 - \alpha_1) \quad (10.14)$$

Для n полных колебаний имеем:

$$\mu_k = \frac{1}{4}l \frac{(\alpha_0 - \alpha_1)}{n} \quad (10.15)$$

Пользуясь уравнением (10.6), окончательно получаем:

$$\mu_k = \frac{1}{4} \frac{l}{L} \frac{a_0 - a_n}{n} \quad (10.16)$$

или

$$\mu_k = \frac{K}{n}, \quad (10.17)$$

где

$$K = \frac{1}{4} \frac{l(a_0 - a_n)}{L}$$

этой формулой и воспользуемся для вычисления коэффициента трения качения, где L – расстояние от оси цилиндра до шкалы, l – расстояние между точкой центра тяжести и осью маятника, a_0 – начальная амплитуда, a_n – амплитуда после n полных колебаний.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Совместить нуль шкалы с концом стрелки покоящегося маятника.
2. Задаться значением $a_0 - a_n$ (В данной работе выбрано значение $a_0 - a_n = 1,5$ см, $a_0 = 2,5$ см, $a_n = 1$ см).
3. Рассчитать значение K в формуле (10.17).
4. Отклонить стрелку на значение a_0 и, отпустив ее, считать число полных колебаний до тех пор, пока амплитуда не станет равной a_n . Отсчет проводится не менее пяти раз. Найти $n_{ср}$.

5. Рассчитать значение μ_k для стали по стали по формуле (10.17) для n_{cp} .
6. Заполнить таблицу и рассчитать погрешности измерений.

Материал	№№ опыта	n	n_{cp}	μ_k М	$\frac{\Delta\mu_k}{\mu_k}$	$\Delta\mu_k$
Сталь-сталь	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

7. Осторожно приподнять цилиндр со стрелкой и подложить другую поверхность (дерево, плексиглас, резину и т.д.).
8. С различными поверхностями повторить пункты 4-6.
9. Для каких материалов μ_k имеет максимальное, минимальное значение. Почему?

ПРИМЕЧАНИЕ: Перекачивание цилиндра при отклонении маятника не должно сопровождаться его проскальзыванием по плите. После определения коэффициента трения качения для пары сталь-материал пластины, их определяют и для других пар материалов. Для этого под цилиндр подкладывают пластинки различных указанных на установке материалов. Поверхность пластинок обрабатывалась на обычном станке и не шлифовалась. Профиль шероховатости поэтому не одинаков в разных направлениях. Естественно, что при перекачивании цилиндра вдоль по длине пластинка и поперек ее получают несколько различные коэффициенты трения качения. Не следует поэтому изменять положение пластинок при повторных измерениях.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды трения вы знаете?
2. Какова причина возникновения силы трения качения?
3. Вывести формулу (10.16).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11

***Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей
по методу Стокса***

Цель работы: вычислить коэффициент вязкости глицерина.

Оборудование: стеклянный цилиндр с жидкостью (глицерин), лупа с окулярным микрометром с ценой деления 0,01 см, секундомер, линейка, свинцовые шарики, пинцет.

**КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ
И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

В жидкостях и газах в случае нарушения пространственной однородности плотности, температуры или скорости упорядоченного движения возникают явления переноса. При этом происходит упорядоченный направленный перенос массы (диффузия), внутренней энергии (теплопроводность), импульса (внутреннего трения).

Силы вязкости или силы внутреннего трения, возникают при относительном движении слоев жидкости (газа). Они приложены к слоям жидкости и действуют по касательной к ним. Два слоя, движущихся друг относительно друга, взаимодействуют вдоль поверхности раздела с равными по модулю и противоположными по направлению силами внутреннего трения. Физические причины появления таких сил различна для жидкостей и газов. В жидкостях эти силы обусловлены главным образом силовым взаимодействием между молекулами, принадлежащими к разным слоям. В газах взаимодействие между молекулами слабое, а их подвижность, наоборот, велика. Поэтому образование сил внутреннего трения в газах происходит в основном за счет обмена молекулами между движущимися слоями. Однако, опыт показывает, что в жидкостях и газах силы внутреннего трения подчиняются одному

и тому же закону. Поясним его на примере течения газа, при котором в слое газа или жидкости движутся параллельно друг другу с, разными скоростями.

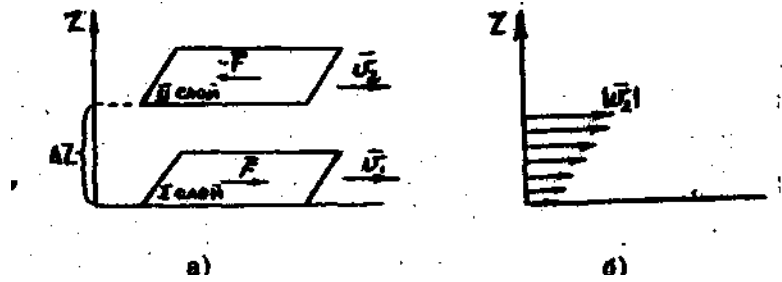


Рис. 11.1

Выделим в потоке два параллельных, равных по площади слоя, отстоящих друг от друга на расстоянии ΔZ (рис. 11.1,а). Опыт показывает, что на каждый слой действует сила, пропорциональная площади слоев и величине, характеризующей изменение скорости слоев на единицу длины при переходе от слоя к слою, т. е. в направлении, перпендикулярном к слоям (по оси Z):

$$F \sim S \frac{\Delta V}{\Delta Z} \quad (11.1)$$

Величину $\frac{\Delta V}{\Delta Z}$ называют градиентом скорости. Градиент скорости есть физическая величина, равная увеличению скорости v упорядоченного движения молекул при переходе на единицу длины в направлении наиболее быстрого возрастания скорости.

Введя коэффициент пропорциональности η , переходим от пропорциональной зависимости (11.1) к равенству (формула Ньютона):

$$F = \eta S \frac{\Delta V}{\Delta Z} \quad (11.2)$$

или, если переходить к бесконечно малым приращениям,

$$F = \eta S \frac{dV}{dZ} \quad (11.3)$$

Коэффициент пропорциональности η зависит от рода жидкости или газа и характеризует их вязкие свойства. Он называется динамической вязкостью или просто вязкостью.

Из (11.2) имеем:

$$\eta = \frac{F}{S \frac{dV}{dZ}} \quad (11.4)$$

Отсюда легко понять смысл динамической вязкости. Это физическая величина, численно равная силе внутреннего трения, действующей на единичную площадку слоя газа или жидкости при единичном градиенте скорости.

Если в формулу (11.4) подставить $F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$ согласно второму закону

Ньютона, то она примет вид:

$$\eta = \frac{\Delta P}{\Delta t S \frac{\Delta V}{\Delta Z}}, \quad (11.5)$$

где P – импульс (количество движения), т.е. другими словами, динамическая вязкость – это физическая величина, численно равная импульсу, который переносится в единицу времени через единичную площадку при единичном градиенте скорости.

Единица измерения вязкости устанавливается из соотношения (11.5)

$$\eta = \frac{F}{S \frac{dV}{dZ}}$$

За единицу вязкости в СИ принимается вязкость такой жидкости в которой между двумя слоями площадью 1 м^2 при градиенте скорости $\frac{dV}{dZ} = 1 \text{ с}^{-1}$ возникнет сила внутреннего трения F , равная 1 Н . Эту единицу называют «Ньютон-секунда на метр в квадрате», или паскаль-секунда.

$$[\eta] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Па} \cdot \text{с}]$$

Вязкость газов в сотни раз меньше вязкости жидкостей. Вязкость зависит от температуры: в жидкостях с повышением температуры вязкость уменьшается, в газах — увеличивается.

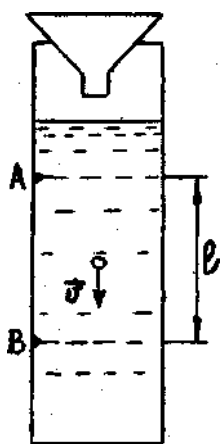


Рис. 11.2

В настоящей работе измеряется динамическая вязкость, глицерина по методу Стокса. Схеме установки изображена на рис. 11.2. Она представляет собой цилиндрический сосуд, заполненный исследуемой жидкостью. На внешней поверхности цилиндра имеются две отметки А и В, расположенные друг от друга на расстоянии l сверху цилиндр закрыт воронкой, отверстие которой располагается по оси сосуда. В процессе опыта жидкость через воронку бросают небольшой шарик и измеряют время его падения Δt на участке АВ. Шарик берут достаточно маленьким, чтобы его радиус был много меньше радиуса сосуда R .

На шарик, падающий в вязкой жидкости, действует три силы: сила тяжести, подъемная сила (сила Архимеда) и сила сопротивления движению, обусловленная силами внутреннего трения жидкости (рис. 11.2). Подчеркнем, что здесь играет роль не трение шарика о жидкость, а трение отдельных слоев жидкости, друг о друга; ближайший к поверхности шарика слой жидкости движется со скоростью шарика, остальные – со все уменьшающейся скоростью.

Если шарик падает в жидкости, простирающейся безгранично по всем направлениям, не оставляя за собой никаких завихрений (малая скорость падения, маленький шарик), то, как показал Стокс, сила сопротивления равна

$$F = 6\pi r \eta v \quad (11.6)$$

где η – коэффициент внутреннего трения жидкости, v – скорость шарика, r – его радиус.

В случае падения шарика в жидкости все три силы будут направлены по вертикали: сила тяжести – вниз, подъемная сила и сила сопротивления – вверх. Сила сопротивления с увеличением скорости движения шарика возрастает и шарик достигает такой скорости, при которой все три силы будут в сумме равны нулю. При этом шарик движется по инерции с постоянной скоростью (установившиеся движения). Для этого случая имеем:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g - 6\pi\eta r V_0 = 0 \quad (11.7)$$

Решая уравнение (11.7) относительно коэффициента внутреннего трения жидкости, получаем расчетную формулу:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho - \rho_1}{v_0} g r^2, \quad (11.8)$$

где ρ – плотность материала шарика (свинец),

ρ_1 – плотность исследуемой жидкости,

g – ускорение свободного падения,

r – радиус шарика,

V_0 – скорость равномерного движения шарика.

Т.к. $r = \frac{d}{2}$ и $v_0 = \frac{l}{\Delta t}$ (11.9), где l – длина участка АВ и d – диаметр шарика, поэтому формулу (11.8) можно преобразовать к виду

$$\eta = K d^2 \Delta t, \quad (11.9)$$

$$\text{где } K = \frac{\rho_1 - \rho_2}{18l} g \quad (11.10)$$

Следует заметить, что участок АВ выбирают на таком удалении от поверхности жидкости где, с достаточной точностью падение шарика можно рассматривать как равномерное движение со скоростью V_0 . Для жидкостей, вязкость которых превышает вязкость воды более чем в сто раз, участок АВ можно взять на расстоянии нескольких сантиметров от поверхности. Если при этом радиус шарика $r \leq 1$ мм и его скорость v_0 в момент попадания в жидкость практически равна 0, то погрешность формулы (11.9) будет меньше 0,1 %.

В работе опыт проводят несколько раз. Диаметры шариков измеряют микроскопом. Плотность исследуемой жидкости (глицерина) определяют ареометром. Длину участка l между двумя метками А и В измеряют линейкой, время падения Δt – секундомером. В качестве ρ_1 используют табличное значение плотности материала шарика.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерьте температуру глицерина в момент проведения опыта.
2. С помощью ареометра определите плотность глицерина. Для этого осторожно опустите ареометр в сосуд с глицерином и снимите отсчет плотности по шкале на уровне поверхности жидкости в сосуде.
3. Измерьте длину участка АВ линейкой с точностью до 0,1 мм.
4. По формуле (11.10) рассчитайте постоянную K . Найдите относительную погрешность. Результаты занесите в таблицу 1.
5. Отберите из набора пять шариков. Тщательно протрите их фильтровальной бумагой.
6. Измерьте диаметр одного из шариков с помощью микроскопа. Для этого поместите шарик на часовое стекло, укрепленное на специальной подставке. Поднимая и опуская тубус микроскопа, добейтесь резкого изображения шарика в поле зрения микроскопа. Сделайте отсчет диаметра в делениях шкалы окулярного микроскопа. Воспользовавшись ценой деления шкалы (она приведена в техническом паспорте микроскопа), определите диаметр шарика.
7. Смочите шарик глицерином. С помощью пинцета опустите шарик через горлышко воронки в глицерин. Измерьте секундомером время падения шарика на участке АВ.
8. Повторите все операции и измерения, отмеченные в пунктах 6-7, для оставшихся четырех шариков.
9. Все результаты измерений занесите в таблицу 2. Найдите средние значения измеренных величин.
10. Рассчитайте вязкость глицерина по формуле (11.9). Оцените погрешность найденного значения.

Таблица 1

$\rho_1, \text{кг/м}^3$	$\rho_2, \text{кг/м}^3$	$l, \text{м}$	$K, \text{кг/с}^2$	$\frac{\Delta K}{K}, \%$

Таблица 2

№	d , м	Δt , с	η , Па·с	$\Delta\eta$, Па·с	$\frac{\Delta\eta}{\eta}$, %	t , °С
1						
2						
3						
4						
5						
Ср.						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Вывести рабочую формулу.
2. Какова природа вязкого трения?
3. Каков физический смысл динамической вязкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №12

Измерение величины силы Архимеда и координат точки ее приложения

Цель работы: экспериментальная проверка закона Архимеда.

Приборы и принадлежности: лабораторные весы с набором разновесов, катетометр, штангенциркуль, микрометр, кювета с водой.

Одним из основных законов статики жидкостей и газов является закон, открытый опытным путем в 3 в. до н.э. Архимедом: *“Жидкость или газ действуют на погруженное в них тело выталкивающей силой, равной весу вытесненной телом жидкости (газа), направленной по вертикали вверх и приложенной к центру масс вытесненного объема”*.

Для определения условий равновесия погруженного тела и его устойчивости важно знать не только величину, но и точку приложения силы Архимеда. Способ экспериментальной проверки закона Архимеда, реализованный в настоящей лабораторной работе, основан на условиях равновесия тела:

- 1) векторная сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю.
- 2) алгебраическая сумма моментов всех сил относительно оси, проходящей через произвольную точку, равна нулю.

Момент силы относительно оси равен произведению модуля силы на плечо силы - кратчайшее расстояние от оси вращения до прямой, вдоль которой направлена сила. Момент силы относительно оси считается положительным или отрицательным в зависимости от того, будет ли вращать эта сила тело по или против часовой стрелки. Через какую именно точку проведена возможная ось вращения, роли не играет. Если есть закрепленная точка, вокруг которой может вращаться тело, проще всего рассматривать моменты сил относительно оси, проходящей через эту точку, так как при проверке второго условия не надо учитывать силы, линия действия которых проходит через закрепленную точку, – их моменты равны нулю.

Для равновесия тела необходимо и достаточно одновременное выполнение обоих условий. Рассмотрим эти условия для анализа положения равновесия тонкого однородного стержня, подвешенного на нити в некоторой точке O и частично погруженного в жидкость, плотность которой ρ_1 больше плотности ρ_2 материала стержня (рис. 12.1). На стержень действуют сила натяжения нити T , приложенная к точке O , сила Архимеда F , приложенная к точке A , и сила тяжести mg (m – масса стержня, g – ускорение свободного падения). Поскольку все эти силы направлены вертикально, первое условие равновесия в рассматриваемой ситуации имеет вид:

$$T + F - mg = 0 \quad (12.1)$$

При вычислении моментов сил следует учесть что часть стержня длиной L_1 находится слева от точки O , а другая часть длиной L_2 – справа ($L_1 + L_2 = L$). Сила тяжести, действующая на левую часть стержня, приложена к центру отрезка L_1 и стремится повернуть тело против часовой стрелки, в то время как сила тяжести, действующая на правую часть стержня, стремится повернуть его по часовой стрелке. Поэтому условие равенства нулю суммы моментов сил относительно оси, проходящей через точку O , имеет вид:

$$Fd - m_1gd_1 + m_2gd_2 = 0, \quad (12.2)$$

где d – плечо силы Архимеда, $d_1 = 0,5L_1\cos\alpha$, $d_2 = 0,5L_2\cos\alpha$, α – угол между стержнем и горизонтальной поверхностью жидкости, $m_{1,2}$ – массы левой и правой частей стержня, соответственно ($m_1 + m_2 = m$).

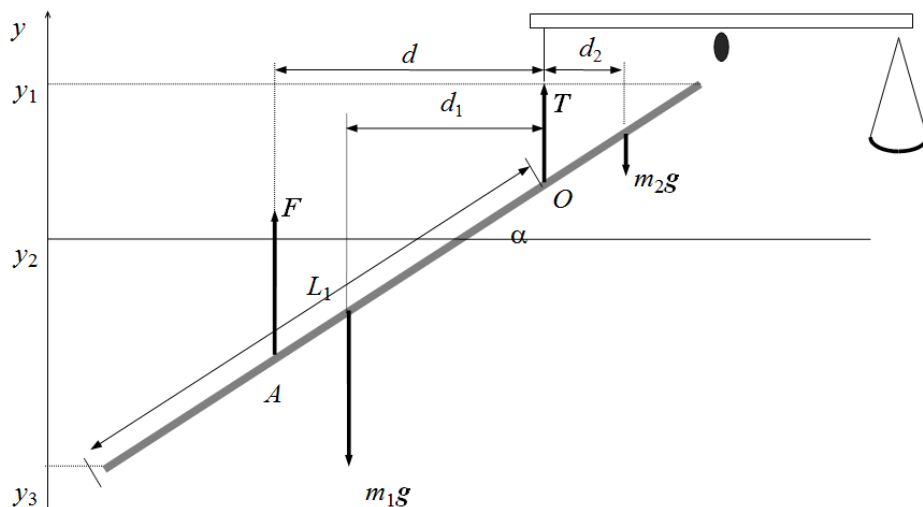


Рис. 12.1

Уравнения (12.1) и (12.2) дают возможность определить величину силы Архимеда и положение точки ее приложения A по измеренным силе натяжения нити T , длинам соответствующих отрезков, массе стержня и углу его наклона α .

Для измерения силы натяжения нити верхний конец последней прикреплен к левому плечу лабораторных весов. Произведение массы уравновешивающего груза m' , находящегося на правой чашке весов, на ускорение свободного падения и равно по величине силе натяжения нити. Таким образом, из уравнения (12.1) получим:

$$F = (m - m')g \quad (12.3)$$

Подстановка (12.3) в уравнение (12.2) позволяет найти плечо силы Архимеда:

$$d = \frac{(m_1 L_1 - m_2 L_2) \cos \alpha}{2(m - m')} \quad (12.4)$$

Поскольку стержень однороден $m_{1,2} = mL_{1,2}/L$, что позволяет представить формулу (12.4) в виде:

$$d = \frac{m(2L_1 - L) \cos \alpha}{2(m - m')} \quad (12.5)$$

Опытная проверка закона Архимеда заключается в данном случае, во-первых, в сравнении величины силы Архимеда, определенной в соответствии с выражением (12.3), с величиной, вычисленной в соответствии с законом:

$$F = \rho_1 g l \pi \frac{D^2}{4}, \quad (12.6)$$

где D – диаметр стержня, l – длина погруженной части стержня, и, во-вторых, в сравнении положения точки приложения силы Архимеда с положением центра погруженной части стержня.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. С помощью штангенциркуля измерьте длину стержня L и расстояние от конца стержня до точки подвеса L_1 .

Используя микрометр определите диаметр стержня в 5 разных точках, найдите среднее значение диаметра и случайную составляющую погрешности его измерения, вызванную неидеальностью стержня. Результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 1

L , мм	L_1 , мм	D , мм	$\langle D \rangle$, мм	δD , мм

2. Уравновесьте весы и, подвесив стержень к левому плечу весов, измерьте его массу.

3. Опустите стержень, подвешенный к левому плечу весов, в кювету, наполненную водой. Добейтесь такого положения стержня, когда он не касается стенок и дна кюветы. После этого снова уравновесьте весы и определите массу уравновешивающего груза m' . В соответствии с формулой (12.3) найдите экспериментальную величину силы Архимеда и погрешность ее косвенного измерения. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

m , г	δm , г	m' , г	$\delta m'$, г	F , мН	δF , мН

4. Включите лампочку подсветки кюветы и катетометр. Настройте катетометр таким образом, чтобы увидеть с помощью его зрительной трубы изображение стержня (изображение получается перевернутым). Измерьте с помощью катетометра вертикальные координаты верхнего конца стержня y_1 , уровня воды в кювете y_2 и нижнего конца стержня y_3 . Обратите внимание, чтобы в процессе измерений равновесие весов не нарушалось.

Угол наклона стержня α и длину погруженной части стержня l рассчитайте по формулам:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{|y_3 - y_1|}{L}\right), \quad (12.7)$$

$$l = \frac{|y_3 - y_2|}{\sin \alpha} = L \frac{|y_3 - y_2|}{|y_3 - y_1|}, \quad (12.8)$$

а теоретическое значение силы Архимеда с помощью соотношения (12.6). Плотность воды принять равной 1 г/см^3 . Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 3.

Таблица 3

U_1 , мм	U_2 , мм	U_3 , мм	α , град.	$\delta\alpha$, град.	l , мм	δl , мм	F , мН	δF , мН

5. С помощью выражения (12.5) определите экспериментальное значение плеча силы Архимеда и погрешность его косвенного измерения. Теоретическую величину плеча рассчитайте с помощью формулы:

$$d = \cos\alpha \left(L_1 - \frac{l}{2} \right) \quad (12.9)$$

Сравните теоретические и экспериментальные значения величины силы Архимеда и плеча этой силы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Действует ли закон Архимеда на искусственном спутнике Земли?
2. В чем заключается причина появления силы Архимеда?
3. При каком условии равновесие тела, плавающего на поверхности жидкости, будет устойчивым?
4. Действует ли сила Архимеда на камень, лежащий на дне реки?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА*Основная литература:*

1. Айзензон А. Е. Курс физики: Учебное пособие. – М.: Абрис, 2012. – 373 с. [<http://www.biblioclub.ru/book/117626/>]
2. Бутиков Е. И. , Кондратьев А. С. Физика. Книга 1. Механика. Учебное пособие в 3-х книгах. – М.: Физматлит, 2008. – 352 с. [<http://www.biblioclub.ru/book/75492/>]
3. Иродов И. Е. Механика. Основные законы. 10-е издание - М.: БИНОМ, 2010. – 310 с. [<http://www.biblioclub.ru/book/95480/>]
4. Постников Е. Б. Механика. Конспект лекций. Учебное пособие. – М.: А-Приор, 2007. – 207 с. [<http://www.biblioclub.ru/book/56335/>]

Дополнительная литература:

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 т. Том 1. Механика. – М.: Физматлит, 2005. – 560 с. [<http://www.biblioclub.ru/book/82978/>]
2. Савельев И. В. Курс общей физики: В 5-ти кн.: учебное пособие для вузов. Кн.1 : Механика / И.В.Савельев. – М. : АСТ, 2005. – 336 с.
3. Бондарев Б. В. Курс общей физики: в 3 кн.: учебное пособие. Кн. 1 : Механика / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирин. – М. : Высшая школа, 2003. – 352 с.
4. Трофимова Т. И. Курс физики : учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 7-е изд., стереотип. – М. : Высшая школа, 2002. – 542 с.

Интернет-ресурсы:

1. <http://www.biblioclub.ru> – Университетская библиотека online.
2. <http://library.rsu.edu.ru> – Библиотека РГУ имени С.А. Есенина.
3. <http://elibrary.ru> - Научная электронная библиотека.
4. <http://e.lanbook.com/> - Издательство «Лань». Электронно-библиотечная система.
5. <http://www.library.knigafund.ru> – Электронно-библиотечная система «Книгафонд»

Содержание

Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ и лабораторного практикума по физике.....	3
Лабораторная работа № 1	7
<i>Определение ускорения свободного падения тела.....</i>	<i>7</i>
Лабораторная работа № 2	15
<i>Проверка основного закона вращения на маятнике Обербека.....</i>	<i>15</i>
Лабораторная работа № 3	20
<i>Определение моментов инерции твердых тел методом крутильных колебаний.....</i>	<i>20</i>
Лабораторная работа № 4	27
<i>Определение ускорения свободного падения методом обратного маятника</i>	<i>27</i>
Лабораторная работа № 5	32
<i>Изучение свободных колебаний физического маятника</i>	<i>32</i>
Лабораторная работа № 6	39
<i>Исследование собственных колебаний струны методом резонанса</i>	<i>39</i>
Лабораторная работа №7	45
<i>Измерение скорости звука с помощью электронного осциллографа и звукового генератора.....</i>	<i>45</i>
Лабораторная работа № 8	53
<i>Определение продолжительности упругого удара.....</i>	<i>53</i>
Лабораторная работа № 9	60
<i>Определение скорости пули с помощью крутильно-баллистического маятника</i>	<i>60</i>
Лабораторная работа № 10.....	65
<i>Определение коэффициентов сил трения качения.....</i>	<i>65</i>
Лабораторная работа №11.....	73
<i>Определение коэффициента внутреннего трения жидкостей по методу Стокса</i>	<i>73</i>
Лабораторная работа №12.....	80
<i>Измерение величины силы Архимеда и координат точки ее приложения..</i>	<i>80</i>
Рекомендуемая литература.....	85

Для заметок

Методические указания к лабораторным работам

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ
ЧАСТЬ 1: МЕХАНИКА

Авторы-составители:

Ермаков Николай Иванович
Кирияков Борис Сергеевич
Махмудов Марат Наильевич

Подписано в печать __. __. 2012. Бумага офсетная. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Гарнитура Times New Roman. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 5,11. Уч.-изд. л. 6,02. Тираж ___ экз. Заказ № ___

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина»
390000, г. Рязань, ул. Свободы, 46

Редакционно-издательский центр РГУ имени С.А. Есенина
390023, г. Рязань, ул. Урицкого, 22