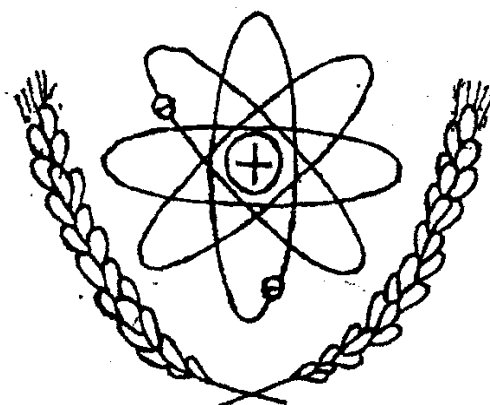


НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ



Лабораторный практикум по физике

Часть I

МЕХАНИКА

Новосибирск 2018

УДК

Кафедра теоретической и прикладной физики

Составители: ст. препода. *А.П. Минаев*
ст. препода. *И.М. Дзю*
д-р техн. наук, проф. *С.В. Викулов*
канд. техн. наук, доц. *В.Я. Чечуев*
ст. препода. *М.Г. Алешкевич*

Рецензент канд. техн. наук, проф. *Е.П. Матус* (НГАСУ).

Лабораторный практикум по физике. Ч.1: Механика: / Новосиб. гос. аграр. ун-т, Инженер. ин-т.; сост.: А.П. Минаев, И.М. Дзю, С.В. Викулов, М.Г. Алешкевич. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2018. – с.

Лабораторный практикум предназначен для студентов всех форм и направлений подготовки, реализуемых в НГАУ.

Утвержден и рекомендован к изданию методическим советом Инженерного института протокол (№8 от 28 марта 2017 г.).

© Новосибирский ГАУ 2018

*«Эксперимент никого не обманывает,
обманчивы наши суждения».*
Леонардо да Винчи

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторно - практические занятия по физике позволят студентам, во - первых, познакомиться с основными методами точных физических измерений и овладеть наиболее важными приборами, во-вторых, более подробно изучить некоторые явления и законы природы, для полного понимания которых одного лекционного материала по физике бывает недостаточно. Задачи второго рода тоже носят характер измерительных, хотя на первое место в них выступает не выполнение измерений, а изучение самого явления.

Предварительное изучение работ является непременным условием их последующего выполнения в лабораториях. В целях повышения эффективности этой предварительной работы студентов описания лабораторных работ содержат достаточно полные теоретические введения и подробные указания по проведению опытов. Готовность студентов к выполнению лабораторных работ проверяется преподавателем. Неподготовленные студенты к выполнению работ не допускаются. Отчет по выполненной работе составляется дома.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Содержание отчета

1. Назначение лабораторной работы и фамилия исполнителя.
2. Краткая формулировка цели лабораторной работы, включающая названия измеряемых физических величин и изучаемых физических законов.
3. Перечисление используемых в лабораторной работе приборов и принадлежностей.
4. Теоретическая часть лабораторной работы, включающая описание основных формул и законов физики, используемых в лабораторной работе.
5. Схемы размещения и соединения различных приборов и устройств, включая общий вид всей установки.
6. Таблицы с результатами измерений и вычислений промежуточных и основных величин.
7. Расчеты искомых величин по описанным ранее формулам.
8. Графики зависимостей одних физических величин от других.
9. Выводы о степени разумности и понимания полученных результатов, включая открытие новых закономерностей.

Результаты измерений и их ошибки

Учебный физический эксперимент проводится с целью изучения законов физики. В основе физического эксперимента лежат прямые или косвенные измерения.

При прямых измерениях значение искомой величины находят непосредственно по шкале прямо показывающих приборов (линейка, секундомер, вольтметр и т.п.). При косвенных измерениях значение физической величины находят на основании известной зависимости (формулы) между ней и другими величинами, значение которых получают в результате прямых измерений.

Измерить физическую величину абсолютно точно невозможно, так как всякое измерение с помощью приборов сопровождается той или иной ошибкой или погрешностью, т.е. отклонением результата, полученного в опыте, от истинного значения измеряемой величины.

Все погрешности, получаемые при измерениях, подразделяют на систематические, случайные и промахи. Систематическими называются погрешности, которые изменяют результат измерений в одну определенную сторону (уменьшая или увеличивая результат) и на определенную величину. Они проявляются, когда в процессе измерения не учтены причины, односторонне влияющие на результат измерений. Например, при измерении сопротивления резисторов пренебрегли сопротивлением вспомогательных проводников или сместили нуль шкалы термометра. В лабораторных работах мы этой погрешностью обычно пренебрегаем.

Случайные погрешности обусловлены причинами, искажающими результаты измерений не в определенную сторону, а беспорядочно, от случая к случаю, как в сторону завышения, так и в сторону занижения. Они появляются, например, из-за непостоянства измеряемой величины в процессе измерений (температуры, напряжения источников тока и т. п.).

Промахи – это большие по величине погрешности, сильно искажающие результат измерения. Они могут являться следствием неправильной записи, неверного отсчета, непонимания шкалы измерений и т.п. Например, вместо отсчета на шкале «23» экспериментатор записал «28» или правильно записал «23 В», но не заметил, что шкала допускает значения измеренных величин в пределах от нуля до 100 мВ.

Требования к заполнению таблиц

При оформлении таблиц необходимо придерживаться следующих указаний:

1. Столбцы таблицы вверху должны быть озаглавлены и в них через запятую необходимо указать размерности физических величин.
2. Таблица заполняется только численными значениями величин.
3. Общий множитель (особенно множитель 10 в любой степени) чисел данного столбца можно вывести в заголовок столбца и поставить перед единицей измерения (например, 10 мА).

Построение графиков

1. График выполняют на линованной бумаге или в тетради в клетку.
2. Выбирают масштаб каждого деления таким образом, чтобы в пределах листа и выбранного для нанесения графика прямоугольника можно было указать максимальное и минимальное значение измеренной или вычисленной величины, наносимой на график.

Кривые должны занимать практически все поле чертежа. Через каждые 20-40 мм наносят масштабные деления на координатных осях. Около этих меток проставляются значения данной физической величины, кратные 1, 2, 5, 10 и т.д.

3. Около каждой оси наносят обозначение физической величины и через запятую ее размерность; множитель 10 в любой степени, на который умножается физическая величина, может быть вынесен в обозначение оси.

4. Экспериментальные точки наносят в виде маленьких точек (или вертикальных линий в случае показа ошибок измерений). Затем с помощью линейки или лекала между экспериментальными точками проводят прямую или кривую таким образом, чтобы количество точек и расстояния до них как с одной, так с другой стороны были примерно одинаковыми.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Цель работы: определить коэффициент трения скольжения, используя основной закон динамики поступательного движения.

Материалы и оборудование: модульный учебный комплекс МУК–М2, электронный секундомер, два бруска различной массы.

Теоретическое обоснование

Установка представляет собой наклонную плоскость 1, которую с помощью винта 2 можно устанавливать под разными углами α к горизонту (рис. 1.1). Угол α измеряется с помощью шкалы 3. На плоскость может быть помещен брусок 4 массой m . Предусмотрено использование двух брусков разной массы. Каждый брусок состоит из двух частей, изготовленных из различных материалов: дерево – дюраль и дерево – сталь. Бруски закрепляются в верхней точке наклонной плоскости с помощью электромагнита 5, управление которым осуществляется с помощью электронного секундомера СЭ-1. Пройденное бруском расстояние измеряется линейкой 6, закрепленной вдоль плоскости. Время соскальзывания бруска измеряется автоматически с помощью датчика 7, выключающего секундомер в момент касания бруском финишной точки.

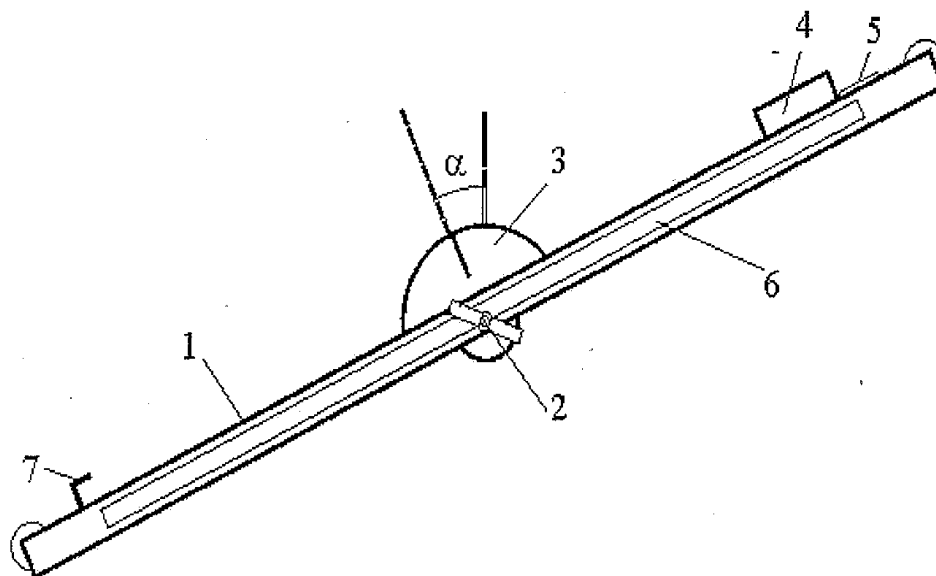


Рис. 1.1

При соскальзывании бруска с наклонной плоскости на него действует несколько сил: сила тяжести $m\vec{g}$, сила нормальной реакции опоры \vec{N} и сила трения скольжения $\vec{F}_{\text{тр}}$ (рис. 1.2).

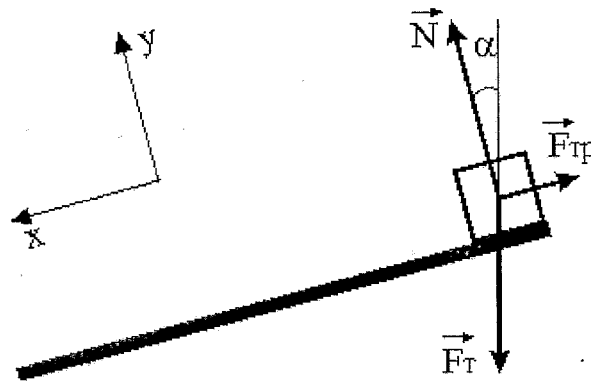


Рис. 1.2

Выберем направление координатной оси X вдоль плоскости вниз, а координатной оси Y перпендикулярно плоскости вверх. Запишем уравнение динамики поступательного движения бруска в проекциях на эти оси:

$$OX : m|\vec{a}| = m|\vec{g}|\sin\alpha - |\vec{F}_{\text{тр}}|; \quad (1.1)$$

$$OY : 0 = |\vec{N}| - m|\vec{g}|\cos\alpha. \quad (1.2)$$

Учтём, что сила трения скольжения равна

$$|\vec{F}_{\text{тр}}| = \mu|\vec{N}|, \quad (1.3)$$

где μ – коэффициент трения скольжения.

Решая систему уравнений (1), (2) и (3), получаем:

$$\mu = \frac{|\vec{g}|\sin\alpha - |\vec{a}|}{|\vec{g}|\cos\alpha} = \text{tg}\alpha - \frac{|\vec{a}|}{|\vec{g}|\cos\alpha}. \quad (1.4)$$

Величину ускорения $|\vec{a}|$ можно найти, измерив пройденный бруском путь S и соответствующее время t :

$$a = \frac{2S}{t^2}. \quad (1.5)$$

Формула получена при нулевом значении начальной скорости, что соответствует условиям опыта. Подставив (1.5) в (1.4), получаем рабочую формулу для определения коэффициента трения скольжения:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2S}{gt^2 \cos \alpha}. \quad (1.6)$$

Измерения и обработка результатов

1. Ослабив винт 2 (см. рис. 1.1), установите плоскость под углом 25° к горизонту, электромагнит при этом должен находиться в верхней части плоскости. Закрепите плоскость в таком положении, зажав винт 2.
2. Включите секундомер СЭ-1. Убедитесь, что он находится в режиме №1.
3. Поместите брусок с большей массой (сталь – дерево) на наклонную плоскость в положении деревом вниз, прижмите торец бруска, на который наклеена металлическая пластина, к электромагниту. Убедитесь, что брусок удерживается в этом положении.
4. Нажмите кнопку «Пуск» секундомера. При этом происходит одновременное отключение электромагнита и включение секундомера. Выключение секундомера происходит автоматически в момент удара бруска по финишному датчику.
5. Рассчитайте среднеарифметическое значение $\langle t \rangle$, вычислите по формуле (1.6) коэффициент трения скольжения μ .
6. Повторите п. 3-6 для других углов α .
7. Повторите п. 3-7, повернув брусок в положение сталью вниз.
8. Повторите п. 3-8 для второго бруска.
9. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 1.1, 1.2.

Таблица 1.1

Сталь – дерево													
№ п/п	α , град.	Дерево вниз						Сталь вниз					
		$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$a, \text{м/с}^2$	μ	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$a, \text{м/с}^2$	μ
1													
2													
3													
μ среднее								μ среднее					

Таблица 1.2.

Дюраль – дерево

№ п/п	α , град	Дерево вниз						Дюраль вниз					
		$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$a, \text{м/с}^2$	μ	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$a, \text{м/с}^2$	μ
1													
2													
3													
μ среднее								μ среднее					

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основной закон динамики поступательного движения.
2. Что такое сила? Как её можно охарактеризовать?
3. Какова физическая сущность трения?
4. Что такое сила тяжести?
5. В чём отличие силы тяжести от веса?
6. Что такое сила нормальной реакции опоры?

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

Цель работы: на основании законов сохранения момента импульса и энергии определить скорость полёта пули.

Материалы и оборудование: блок механический БМ-2, пули различной массы.

Теоретическое обоснование

Лабораторная работа выполняется на модульном учебном комплексе МУК-М2, который содержит пружинный пистолет и физический маятник. Пружинный пистолет может стрелять пулями разной массы.

В работе исследуется неупругое взаимодействие пули и физического маятника, для чего маятник содержит ловушку. После удара маятник с пулей отклоняется на некоторый угол, который фиксируется отсчётным устройством (рис. 2.1). По измеренному углу можно рассчитать скорость полёта пули.

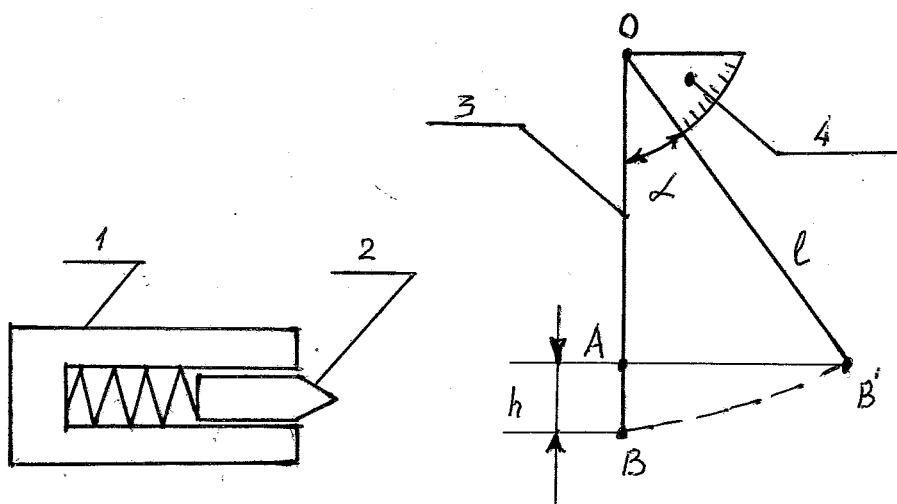


Рис. 2.1. Условные обозначения: 1 – пружинный пистолет; 2 – пуля; 3 – стержень (физический маятник); 4 – шкала прибора (в градусах)

На основании закона сохранения момента импульса имеем:

$$m_{\text{п}} v_{\text{п}} l = J \omega, \quad (2.1)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса пули; $v_{\text{п}}$ – скорость пули перед ударом; J – момент инерции стержня вместе с пулей после удара; ω – угловая скорость стержня вместе с пулей после удара.

Здесь: $J = J_1 + J_2$,

где $J_1 = m_{\text{п}} l^2$ – момент инерции пули после удара; $J_2 = \frac{Ml^2}{3}$ – момент инерции стержня после удара; M – масса стержня; l – длина стержня.

В результате уравнение (2.1) примет вид:

$$\begin{aligned} m_{\text{п}} v_{\text{п}} l &= (J_1 + J_2) \omega \\ m_{\text{п}} v_{\text{п}} l &= \left(m_{\text{п}} l^2 + \frac{Ml^2}{3} \right) \omega, \\ \text{так как } \omega &= \frac{v}{l}, \\ \text{то } m_{\text{п}} v_{\text{п}} l &= \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{3} \right) l^2 \frac{v}{l}, \\ m_{\text{п}} v_{\text{п}} &= \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{3} \right) v. \end{aligned}$$

откуда можем определить скорость пули:

$$v_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}} + \frac{M}{3}}{m_{\text{п}}} v. \quad (2.2)$$

Скорость v можно найти, воспользовавшись законом сохранения энергии. Непосредственно после удара система «стержень – пуля» обладает кинетической энергией:

$$\begin{aligned} E_{\text{к}} &= \frac{J_1 \omega^2}{2} + \frac{J_2 \omega^2}{2}, \\ E_{\text{к}} &= \frac{m_{\text{п}} l^2 v^2}{2l^2} + \frac{Ml^2 v^2}{2 \cdot 3l^2}, \\ E_{\text{к}} &= \frac{3m_{\text{п}} v^2 + Mv^2}{6}, \\ E_{\text{к}} &= \frac{\left(m_{\text{п}} + \frac{M}{3} \right) v^2}{2}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Отклоняясь на угол α , свободный конец стержня в месте с пулей поднимается на высоту h , при этом центр масс стержня поднимается на высоту $\frac{h}{2}$ до тех пор, пока кинетическая энергия $E_{\text{к}}$ полностью не перейдёт в потенциальную:

$$E_{\text{п}} = m_{\text{п}} gh + Mg \frac{h}{2},$$

$$E_{\text{п}} = \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{2} \right) gh. \quad (2.4)$$

Таким образом, закон сохранения энергии можно записать:

$$\frac{\left(m_{\text{п}} + \frac{M}{3} \right) v^2}{2} = \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{2} \right) gh,$$

откуда

$$v = \sqrt{\frac{2gh \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{2} \right)}{\left(m_{\text{п}} + \frac{M}{3} \right)}}. \quad (2.5)$$

Высоту подъёма системы h можно определить из геометрии (см. рис. 2.1):

$$\begin{aligned} OA &= OB - AB, \\ l - h &= l \cos \alpha, \\ h &= l(1 - \cos \alpha). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Тогда скорость полёта пули можно записать:

$$\begin{aligned} v_{\text{п}} &= \frac{m_{\text{п}} + \frac{M}{3}}{m_{\text{п}}} \cdot \sqrt{\frac{2g \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{2} \right) l(1 - \cos \alpha)}{\left(m_{\text{п}} + \frac{M}{3} \right)}}, \\ v_{\text{п}} &= \frac{\sqrt{2g \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{2} \right) \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{3} \right) (1 - \cos \alpha)}}{m_{\text{п}}}. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Проведём преобразования:

$$\begin{aligned} \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{2} \right) \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{3} \right) &= m_{\text{п}}^2 + \frac{5}{6} m_{\text{п}} M + \frac{1}{6} M^2; \\ \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{2} \right) \left(m_{\text{п}} + \frac{M}{3} \right) &\approx (m_{\text{п}} + 0,41M). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Подставляя выражения (2.8) в уравнение (2.7), получим формулу для определения скорости пули:

$$v_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}} + 0,41}{m_{\text{п}}} \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)}. \quad (2.9)$$

Измерения и обработка результатов

1. Вставьте в отверстие пистолета пулю m_1 и закрепите её пусковой скобой.
2. Зафиксируйте на измерительной скобе исходное положение, соответствующее 0° .
3. Произведите выстрел, нажав на спусковую скобу, и зафиксируйте угол отклонения α .
4. Опыт повторите не менее трёх раз. Найдите среднее значение $\langle \alpha \rangle$.
5. Подставьте значения m_1, M, l, g и $\langle \alpha_1 \rangle$ в формулу (2.9) и рассчитайте скорость пули v_1 .
6. С пулями m_2 и m_3 повторите действия пунктов 1 – 5 и рассчитайте их скорости. Результаты занесите в табл. 2.1

Таблица 2.1

Результаты измерений и вычислений

	$m_1 =$			$m_2 =$			$m_3 =$		
α									
$\langle \alpha \rangle$									
$\cos \alpha$									
$v, \text{м/с}^2$									

Контрольные вопросы

1. Какой удар называется абсолютно упругим; абсолютно неупругим?
2. Какие законы сохранения выполняются при абсолютно упругом и абсолютно неупругом ударе?
3. Что такое момент инерции твёрдого тела и как он выводится в данной работе для системы «стержень – пуля»?
4. Сформулируйте закон сохранения энергии для данной лабораторной работы.
5. Какая величина называется моментом импульса?
6. Сформулируйте закон сохранения момента импульса?

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА

Цель работы: экспериментально исследовать зависимость скорости от времени; экспериментально исследовать зависимость ускорения от силы тяжести груза; определить общую массу всей движущейся системы.

Приборы и принадлежности: машина Атвуда, электронный секундомер, ключ для замыкания цепи.

Теоретическое обоснование

Физика изучает законы движения частиц вещества и распространения поля, создаваемого этими частицами. Место нахождения каждой частицы в любой момент времени фиксируется радиусом-вектором \vec{r} , начало которого совпадает с началом отсчета координат, а конец упирается в заданную частицу вещества.

Компоненты x, y, z радиуса-вектора \vec{x} являются координатами частицы в выбранной нами системе отсчета координат. Например, при падении частицы с некоторой высоты координата изменяется от h до нуля, а координаты x и y остаются при этом постоянными.

Геометрическое место точек, которые занимает частица в различные моменты времени в процессе своего движения, называется ее *траекторией*. В классической и квантовой механике траектории по определению являются непрерывными линиями, поэтому для них зачастую оказывается возможным ввести определение вектора *скорости* как производной по времени от радиуса-вектора, который в начальный момент времени равен \vec{r}_0 .

Движение частицы с постоянной скоростью называется *равномерным движением*.

График зависимости скорости от времени в этом случае представляет собой прямую горизонтальную линию.

Равномерное движение широко распространено в природе. Приблизительно равномерно движется Земля вокруг Солнца, что порождает регулярную смену времен года. Свет в пустоте или в любом однородном материале также распространяется равномерно. Равномерно движутся все тела, на которые не действуют силы (по первому закону Ньютона).

Рассмотрим простейший пример равномерного движения по одной из координат x , начиная с начального ее значения x_0 . Тогда при известном постоянном значении скорости $v_0 \approx$:

$$\frac{dx}{dt} = v_0. \quad (3.1)$$

Решение этого уравнения позволяет найти координату x в любой момент времени t .

$$x = x_0 + v_0 t. \quad (3.2)$$

Для характеристики изменения скорости v частицы используется вектор ускорения

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad (3.3)$$

который равен скорости изменения скорости или производной по времени t от вектора \vec{v} скорости. Движение с постоянным по величине ускорением a называется *равноускоренным движением*. График зависимости ускорения от времени представляет собой прямую горизонтальную линию.

В этом случае зависимость скорости (вдоль направления равноускоренного движения) от времени имеет следующий вид:

$$v = v_0 + at_0. \quad (3.4)$$

Из определения скорости при равноускоренном движении (вдоль некоторого направления) с постоянным ускорением a , начальной скорости v_0 и начальной координате x_0 можно найти:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (3.5)$$

График зависимости v от t является прямой наклонной линией, а x зависит от t параболически.

Набор физических величин $\vec{x}, \vec{v}, \vec{a}$ задает кинематическое описание движения частиц без указания причин, его вызывающих. Главной причиной изменения движения является сила. Изучение движений частиц под действием сил осуществляется в динамике.

Сила является результатом взаимодействия вещества и поля. Вещество и поле непосредственно сами с собой никогда не взаимодействуют. Сила появляется только при наличии вещества, например, его массы, гравитационного поля, заряда и электрического поля. Наглядно это было показано Ньютоном, который открыл формулу для вектора силы тяжести:

$$\vec{F} = m\vec{g}. \quad (6)$$

Здесь сила \vec{F} создается произведением массы m вещества на вектор \vec{g} напряженности гравитационного поля. Динамическую величину \vec{g} иногда неправильно называют кинематическим ускорением свободного падения, учитывая ее единицу измерения. На самом деле источником вектора \vec{g} является полная энергия, и никакого прямого отношения напряженность \vec{g} к кинематике не имеет.

В частности, Ньютон для определения g предложил использовать открытый им закон всемирного тяготения:

$$g = \frac{GM}{R^2} \vec{n}, G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}. \quad (3.7)$$

Здесь \vec{n} есть единичный вектор, направленный по расстоянию R от точки приложения силы тяготения mg до начала координат, в котором находится центр масс M гравитирующего (притягивающего) тела.

Связь между динамикой и кинематикой устанавливается с помощью постулата Декарта, который предложил связь между вектором импульса \vec{p} частицы вещества, ее инерционной массой m и скоростью. С помощью этих физических величин можно определить вектор скорости любой частицы вещества.

Постулат Декарта

$$\vec{v} = \frac{\vec{p}}{m}. \quad (3.8)$$

Ньютон открыл, что скорость изменения импульса \vec{p} частицы (производная от вектора импульса по времени t всегда равна силе \vec{F}):

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (3.9)$$

Уточним смысл записи второго закона Ньютона. Распространяющееся в пространстве со скоростью света c поле при взаимодействии с веществом создает в каждой точке своего места нахождения силу \vec{F} . По уравнению (3.9), сила \vec{F} изменяет импульс \vec{p} частиц вещества. Изменившийся импульс \vec{p} частицы вызывает изменение скорости \vec{v} этой частицы. По определению \vec{v} , движение частицы изменяет радиус-вектор \vec{r} ее местонахождения.

В данной лабораторной работе нам представляется возможность проверить формулу равноускоренного падения груза в поле тяготения Земли, а также экспериментально проверить (или заново открыть для себя) выполнение второго закона Ньютона, теоретически им предсказанного.

Экспериментальную проверку обсуждавшихся выше физических законов мы будем производить с помощью машины Атвуда, которая состоит из двух грузов-противовесов, связанных нитью через вращающийся блок массой m_δ (рис.3. 1).

При одинаковой массе m_n противовесов система находится в равновесии и неподвижна при расположении правого противовеса на любой высоте от приемной чашечки. Вся система приходит в движение после добавления к одному из противовесов перегрузка массой m . Общая масса M всей системы равна при этом

$$M = m + 2m_n + \frac{m_\delta}{2} \quad (3.10)$$

Здесь эффективная масса блока (для поступательного движения) в 2 раза отличается от фактической, так как блок участвует только во вращательном движении. Векторные обозначения в дальнейшем будем опускать, так как рассматриваемое нами движение является приближенно одномерным. Перегрузок массой m создает силу тяжести $\vec{F} = m\vec{g}$, под действием которой

правый противовес начинает падать с высоты h , а значение импульса изменяется во времени t по второму закону Ньютона:

$$\frac{dp}{dt} = mg. \quad (3.11)$$

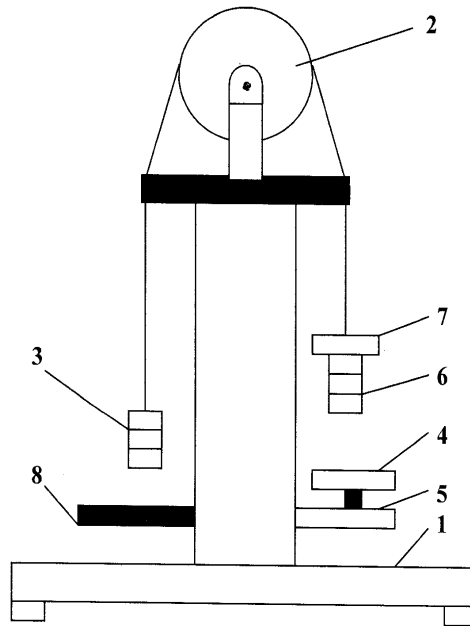


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – платформа, на которой стоит машина Атвуда; 2 – вращающийся блок, жестко связанный с нитью, удерживающей груз; 3 – противовес без перегрузок; 4 – чашка, в которую падает противовес с перегрузками; 5 – принимающая площадка, электрически фиксирующая падающий груз; 6 – противовес, на верх которого кладутся перегрузки; 7 – перегрузки, которые обеспечивают движение механической системы; 8 – пассивная платформа для удержания противовеса без перегрузок

Возьмем интеграл и, учитывая нулевое начальное значение импульса, получим:

$$p = mgt. \quad (3.12)$$

Согласно постулату Декарта,

$$p = m\vec{v}. \quad (3.13)$$

Скорость всей системы при заданной её массе M может быть вычислена по следующей формуле:

$$\vec{v} = \frac{\vec{P}}{M}. \quad (3.14)$$

Подставляя в последнюю формулу значение импульса \vec{P} , получим значение \vec{v} системы грузов машины Атвуда:

$$v = \frac{mg}{M}t. \quad (3.15)$$

Обозначим через a ускорение падающего на подставку груза. Тогда предыдущую формулу можно переписать в следующем виде:

$$v = \frac{mg}{M}t = at,$$

откуда
$$a = \frac{mg}{M}. \quad (3.16)$$

В такой записи очевидно, что движение является равноускоренным, так как ускорение a с большой точностью является постоянной величиной.

Решение дифференциального уравнения для скорости позволяет найти изменение координаты Z от времени t :

$$Z = h + \frac{at^2}{2} \quad (3.17)$$

в процессе падения груза на подставку от начального положения $Z = 0$ правого противовеса до конечного $Z = h$.

Если мы экспериментально измерили время t падения правого противовеса на чашку, то значение ускорения можно найти так:

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (3.18)$$

При точном знании массы M можно определить напряженность \vec{g} гравитационного поля:

$$g = \frac{aM}{m}. \quad (3.19)$$

Считая g известным, мы можем найти массу M всей движущейся системы в машине Атвуда:

$$M = \frac{mg}{a}. \quad (3.20)$$

После экспериментального определения ускорения a нетрудно вычислить скорость падающего груза v и кинетическую энергию K всей системы:

$$K = \frac{M \cdot v^2}{2}. \quad (3.21)$$

Измерения и обработка результатов

1. Проверьте наличие всех приборов и принадлежностей, включая пластинки различной массы, два цилиндрических противовеса, секундомер и запишите перед табл. 3.1 массу m_n противовеса и массу m_δ блока движущейся системы.

2. Подготовьте из набора пластинок перегрузок общей массой m и запишите это значение в табл. 3.1. Одновременно вычислите и запишите в табл.3.1 значение F силы тяжести, создаваемой перегрузком.

3. Поместите подготовленный перегрузок (набор пластинок) массой m на верхнюю часть правого противовеса, висящего на закрепленной магнитом (после нажатия чашечки вниз) нити.

4. Удерживая правый противовес рукой, нажмите верхнюю кнопку «Пуск» секундомера (для освобождения лески от закрепления магнитом) и установите дно противовеса на произвольно заданном расстоянии h от дна чашечки вниз сплошной платформы.

5. Закрепите магнитом леску, удерживающую грузы, на любой выбранной вами высоте h с помощью нажатия вниз чашечки сплошной платформы, принимающей падающий груз.

6. Запишите значение h в табл. 3.1.

7. Установите правый верхний тумблер «Секундомер» в верхнее положение и нажмите кнопку «Установка нуля» отсчета времени на секундомере.

8. После установки начала отсчета времени на секундомере нажмите левую верхнюю кнопку «Пуск» на секундомере и наблюдайте падение противовеса в чашечку, в конце которого произойдет остановка секундомера в момент столкновения противовеса с чашечкой.

9. Отсчитайте по секундомеру и запишите в табл. 3.1 время t падения противовеса под действием силы тяжести, созданной перегрузком.

10. Повторите п. 2 – 9 с различными массами m перегрузков и с другими начальными высотами h падения противовесов.

11. Теперь приступайте к вычислениям и заполнению клеточек соответствующих строчек табл. 3.1. Для этого вначале вычислите и запишите в таблицу ускорение a и скорость v грузов в момент падения в принимающую чашечку.

12. Вычислите и запишите в таблицу значение кинетической энергии E_k всей изучаемой вами системы.

13. Вычислите и запишите в таблицу значение потенциальной энергии E_p перегрузка в начале его падения.

14. Постройте на основе таблицы данных график зависимости ускорения a и скорости v от времени t . Сделайте (рассматривая форму графика) обоснованное заключение о кинематическом виде движения (равномерное, равноускоренное, другое).

15. Постройте график зависимости ускорения a от силы F и сделайте обоснованное заключение о соответствии второму закону Ньютона.

16. Найдите по последнему графику экспериментальное значение массы M и занесите ее значение в табл. 3.1. Оцените качество своей работы, сравнивая изменение M в каждой строчке таблицы. Сравните экспериментальное значение M с теоретически предсказанным M (перед табл. 3.1).

Результаты измерений и вычислений

Таблица 3.1

$m_n =$	$m_\delta =$	$M_{теорет} =$	$g =$						
№ n/n	m , кг	t , с	a , м/с	v , м/с	F , Н	M , кг	g , м/с	E_k , Дж	E_p , Дж
1									
2									
3									
4									
5									

Контрольные вопросы

1. Выведите второй закон Ньютона и решите задачу на вычисление силы.
2. Выведите формулу для мощности и решите задачу на вычисление тягового усилия трактора.
3. Вычислите ускорение при равномерном движении по прямой и по окружности.
4. Выведите формулу зависимости ускорения от силы при массе, линейно изменяющейся во времени.
5. Дайте определение равноускоренного и равномерного движения и выведите формулы для пути и скорости в этих случаях на примере падения тела в вязкой среде.
6. Дайте определение импульса, кинетической и потенциальной энергии и рассчитайте приближенно эти величины для различных движений вашего собственного тела.
7. Получите теоретическое значение массы движущейся системы M .

Лабораторная работа № 4

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ МЕТОДОМ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: научиться измерять скорость пули методом баллистического маятника, используя законы сохранения импульса и энергии.

Приборы и принадлежности: баллистический маятник, пружинный пистолет, пули различной массы, измерительная линейка.

Теоретическое обоснование

Метод основан на применении законов сохранения импульса и энергии при решении реальной физической задачи соударения неупругих тел (удар). Абсолютно неупругий удар – столкновение неупругих тел, в результате которого тела объединяются, двигаясь дальше как единое целое.

Баллистический маятник представляет собой частично заполненный пластилином цилиндр массой M , подвешенный на стержне длиной l (рис. 4.1) Вблизи маятника неподвижно закреплен пружинный пистолет, из которого стреляют в маятник пулями различной массы. При выстреле пуля со скоростью v_0 попадает в пластилин цилиндра и движется вместе с ним со скоростью v , т.е. имеет место неупругий удар. Смещение маятника S фиксируется на линейной шкале прибора.

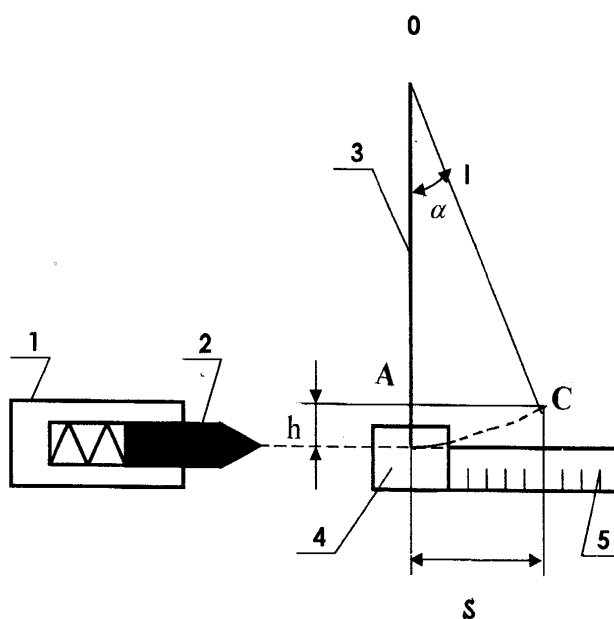


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки:

1- пружинный пистолет, 2 - пуля, 3 - стержень, 4- цилиндр с пластилином,
5 - линейная шкала прибора

На основании закона сохранения импульса (количества движения) системы тел имеем:

$$mv_0 = (m + M) \cdot v, \quad (4.1)$$

где m – масса пули:

M – масса цилиндра;

v_0 – скорость пули перед ударом;

v – скорость цилиндра вместе с нулей после удара.

Уравнение (4.1) дает возможность определить скорость пули:

$$v_0 = \frac{m+M}{m} \cdot v. \quad (4.2)$$

Массы m и M известны. Скорость v можно найти, воспользовавшись законом сохранения энергии. Непосредственно после удара система «цилиндр–пуля» обладает кинетической энергией:

$$E_k = \frac{m+M}{2} v^2.$$

Отклоняясь на угол α (см.рис.4.1), центр массы баллистического маятника поднимается на высоту h до тех пор, пока кинетическая энергия E_k не перейдет полностью в потенциальную:

$$E_p = (m+M) gh.$$

Таким образом, закон сохранения энергии можно записать:

$$\frac{m+M}{2} \cdot v^2 = (m+M) \cdot gh, \quad (4.3)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Высоту подъема системы можно определить из геометрии (см.рис.4.1). По теореме Пифагора, из треугольника ОАС следует:

$$(OC_1)^2 = (OA)^2 + (AC_1)^2 \text{ или } l^2 = (l-h)^2 + S^2.$$

Отсюда $2hl = h^2 + S^2$.

Учитывая, что $(h \ll l)$, получим:

$$h = \frac{S^2}{2l}, \quad (4.4)$$

где S – отклонение маятника от положения равновесия;

l – длина баллистического маятника. Решая (4.3) и (4.4), находим скорость пули:

$$v = \sqrt{2gh} = S \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (4.5)$$

Подставляя выражение (4.5) в (4.2), получаем формулу для определения скорости пули:

$$v_0 = \frac{m+M}{m} \cdot S \sqrt{\frac{g}{l}}. \quad (4.6)$$

Измерения и обработка результатов

1. Взвесьте пули и данные занесите в табл. 4.1.
2. Вставьте в отверстие пистолета пулю m_l и закрепите её пусковой скобой.
3. Зафиксируйте на измеренной линейке при помощи «всадника-указателя» исходное положение цилиндра маятника X_1 .

4. Произведите выстрел, нажав на спусковую скобу, и зафиксируйте максимальное отклонение маятника X_2 .
5. Определите максимальное смещение маятника от положения равновесия $S = X_2 - X_1$.
6. Опыт повторите не менее трех раз. Найдите среднее значение $\langle S \rangle$.
7. Подставьте значения m_1, M, l и $\langle S \rangle$ в формулу (4.6) и рассчитайте скорость v_{0l} пули.
8. С пулями m_2 и m_3 повторите действия п. 2 - 6 и рассчитайте их скорости. Результаты занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты измерений и вычислений

Величины	$m_1 =$			$m_2 =$			$m_3 =$		
$S, м$									
$\langle S \rangle$									
$v_0, м/с$									

Контрольные вопросы

1. Какой удар называется упругим; неупругим?
2. Какие законы сохранения используют при расчете скоростей после взаимодействия при упругом и неупругом ударе? Почему?
3. На пули после выстрела действует внешняя сила - сила тяжести, на маятник с пулей действуют внешние силы - сила тяжести, сила реакции опоры в оси и сила трения в оси маятника. Таким образом, очевидно, что рассматриваемая система не является замкнутой. Объясните, на каком основании вы используете законы сохранения импульса и энергии.
4. Выведите рабочую формулу (4.6).

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

Цель работы: 1) изучить основной закон динамики вращательного движения.

2) исследовать зависимость момента инерции маятника от распределения грузов относительно оси вращения.

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

Теоретическое обоснование

Вращательное движение твердого тела возникает при действии на него силы, обладающей моментом относительно оси вращения тела. Сила – величина векторная. Если вектор силы лежит в плоскости, перпендикулярной к оси вращения, то моментом силы будет являться векторная физическая величина, определяемая векторным произведением радиуса-вектора \vec{r} , проведенного перпендикулярно от оси вращения в точку приложения силы, на вектор силы \vec{F} :

$$\vec{M} = [\vec{r} \cdot \vec{F}], \quad (5.1)$$

где \vec{M} – псевдовектор, по направлению совпадающий с поступательным движением правого винта при вращении его головки от \vec{r} к \vec{F} . Направление псевдовектора совпадает с осью вращения маятника.

Маятник Обербека (рис. 5.1) представляет собой крестовину, которая образована четырьмя стержнями и имеет ось вращения, закрепленную в стене или на стойке в портативном варианте прибора. На ось насажена втулка с двумя шкивами разных диаметров D_1 и D_2 .

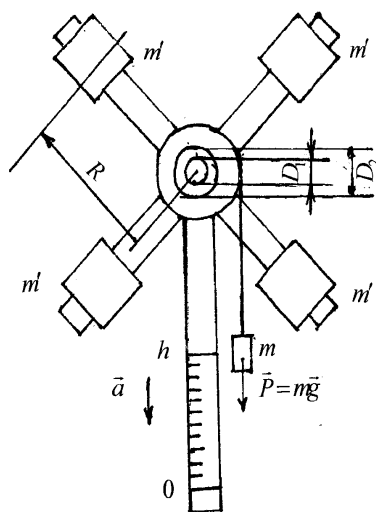


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки

Стержни ввинчены во втулку под прямыми углами друг к другу. На стержни надеваются одинаковые тела массами m' каждое, которые могут быть закреплены симметрично на расстоянии R от оси вращения. На один из шкивов наматывается нить, к свободному концу которой прикрепляется груз массой m . Если груз отпустить, то он будет двигаться вниз с линейным ускорением a . Под действием груза нить разматывается и приводит маятник

в ускоренное вращательное движение с угловым ускорением ε . Положение груза m отмечается по вертикальной шкале измерительной линейки.

Изучим экспериментально основной закон динамики вращательного движения

$$M = J \cdot \varepsilon, \quad (5.2)$$

где J – момент инерции маятника;

ε – угловое ускорение.

За время t груз опустится с высоты h до нулевой отметки (например, до пола). При этом потенциальная энергия, которой обладает груз m в момент начала движения $t = 0$, равная mgh , переходит в кинетическую энергию вращательного движения маятника Обербека и кинетическую энергию поступательного движения груза m . Запишем закон сохранения энергии для маятника, пренебрегая трением:

$$mgh = \frac{J \cdot \omega^2}{2} + \frac{mv^2}{2}, \quad (5.3)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

ω – угловая скорость маятника в момент времени, когда груз достиг нулевой отметки;

v – линейная скорость груза m в этот же момент времени.

Если нет проскальзывания между нитью и шкивом, то

$$\omega = \frac{2v}{D}, \quad (5.4)$$

где D – диаметр шкива.

Из уравнения (5.3) с учетом (5.4) получим:

$$J = \frac{mD^2}{4} \left(\frac{2gh}{v^2} - 1 \right). \quad (5.5)$$

Если предположить, что опускание груза происходит равноускоренно, то линейное ускорение может быть представлено так:

$$a = \frac{2h}{t^2}, \quad a = \frac{v^2}{2h}. \quad (5.6)$$

Приравняв правые части уравнений (5.6), получим:

$$v^2 = \frac{4h^2}{t^2}. \quad (5.7)$$

Подставляя (5.7) в (5.5), имеем:

$$\left. \begin{aligned} J &= \frac{mD^2}{4} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right) \\ J &= \frac{mD^2 g}{8h} t^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

С другой стороны, момент инерции маятника может быть представлен как сумма моментов инерции стержней со шкивами J_0 и четырех грузов массой $4m$, закрепленных на расстояниях R (см.рис. 5.1) от оси вращения, $J_1 = 4m' \cdot R^2$ (учитываем, что размеры этих грузов малы по сравнению с R). Следовательно,

$$J = J_0 + J_1 = J_0 + 4m' \cdot R^2, \text{ откуда}$$

$$J_0 = J - J_1 = J - 4m' \cdot R^2. \quad (5.9)$$

Так как уравнение (5.2) связывает момент силы M , момент инерции J и угловое ускорение ε , то по определению (5.1)

$$M = m(g - a) \cdot \frac{D}{2}, \quad (5.10)$$

где a – линейное ускорение – определяется по первой формуле уравнений (5.6). Угловое же ускорение можно рассчитать по экспериментальным данным как

$$\varepsilon = \frac{2a}{D} = \frac{4h}{Dt^2}. \quad (5.11)$$

Измерения и обработка результатов

Задание 1. Для изучения второго закона динамики вращательного движения необходимо выполнить следующие действия.

1. Снимите четыре груза массой m' со спиц.
2. На подвеску положите груз массой m' , поднимите его на высоту h , наматывая нить на шкив малого диаметра D_1 .
3. Время опускания груза с высоты h измерьте с помощью секундомера. Измерения повторите три раза. Среднее значение времени по трем замерам запишите в табл. 5.1.
4. На подвеску положите второй груз массой m_2 и повторите замеры времени по п. 3.
5. После выполнения п. 4 на подвеску с грузами m_1 и m_2 положите груз массой m_3 и повторите замеры времени.
6. Рассчитайте по формулам (5.6), (5.10) и (5.11) соответственно линейные ускорения a , моменты сил M и угловые ускорения ε для всех опытов. Результаты расчетов занесите в табл. 3.
7. По результатам измерения M и ε постройте график зависимости M от ε .
8. Повторите опыты со шкивом большого диаметра D_2 и другими грузами m .
9. Проанализируйте полученные результаты.

Задание 2. Для исследования зависимости момента инерции маятника Обербека от расстояния четырех грузиков от оси вращения необходимо выполнить следующие измерения при $M = \text{const}$ на подвеске.

1. Расположите на спицах четыре грузика m' симметрично относительно оси маятника на максимальном расстоянии R , измерьте его и занесите в табл. 5.2.
2. Измерьте время t опускания грузов m с высоты h три раза и среднее его значение запишите в табл. 5.2.

3. Измените R на три деления (в сторону оси) на спицах и выполните замеры R и t согласно п. 2.

4. Передвиньте грузы m' еще на три деления и снова повторите все замеры R и t .

5. Замеры t выполняйте до пяти значений R .

6. По формуле (5.8) рассчитайте J , результаты занесите в табл. 5.2.

7. По результатам измерений постройте график зависимости J от R^2 .

8. По формуле (5.9) для каждого R рассчитайте моменты инерции J_0 (маятник без грузиков m'). Определите их среднее значение \bar{J}_0 . Результаты расчетов занесите в табл. 5.2.

9. Сравните среднее значение \bar{J}_0 с полученным значением J_0 в задании 1 (взять из графика $M = f(\varepsilon)$).

10. Повторите опыты со шкивом другого диаметра D_2 и другими грузами m . Для каждого D и m подготовьте новые таблицы.

11. Проанализируйте полученные результаты.

Таблица 5.1

Результаты измерений и вычислений по заданию 1

№ п/п	m , кг	t , с	t^2 , с ²	a , м/с	M , Н·м	ε , рад/с ²
1						
2						
3						
и т.д.						

Таблица 5.2

Результаты измерений и вычислений по заданию 2

№ п/п	R , м	R^2 , м	t , с	t^2 , с ²	J , кг·м ²	J_1 , кг·м ²	J_0 , кг·м ²
1							
2							
3							
и т.д.							

Контрольные вопросы

1. Что называется моментом силы? Как определяется направление вектора момента силы \vec{M} ?
2. Выведите основное уравнение динамики вращательного движения.

3. Что такое момент инерции твёрдого тела и от чего он зависит?
4. Выведите рабочую формулу (5.8) для определения момента инерции маятника Обербека.
5. Каково соотношение между моментом силы и угловым ускорением, если $J = \text{const}$?
6. Каково соотношение между моментом инерции и угловым ускорением, если $M = \text{const}$?
7. Как зависит момент инерции маятника Обербека от положения грузов на стержнях?
8. Запишите закон сохранения энергии для маятника Обербека.
9. Сформулируйте теорему Штейнера.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ

Цель работы: изучить характеристики и законы вращательного движения твёрдых тел.

Приборы и принадлежности: тело вращения в подшипниках, набор грузов, секундомер, отсчетная линейка.

Теоретическое обоснование

Вращательным называется такое движение, при котором все точки твердого тела описывают окружности, центры которых лежат на одной и той же прямой, называемой осью вращения. Важнейшими характеристиками вращательного движения являются угловая скорость ω и угловое ускорение ε .

Угловой скоростью называется величина, равная изменению угла поворота твердого тела за единицу времени, т. е.

$$\omega = \frac{d\phi}{dt}. \quad (6.1)$$

Угловое ускорение описывает быстроту изменения угловой скорости:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\phi}{dt^2}. \quad (6.2)$$

При вращательном движении угловая скорость и угловое ускорение для всех частиц твердого тела одинаковы. Линейная скорость точки вращающегося тела связана с угловой скоростью соотношением

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{r \cdot d\phi}{dt} = r \cdot \omega, \quad (6.3)$$

где r – расстояние от точки до оси вращения.

Из этой формулы видно, что линейные скорости различных точек различны.

Для описания динамики вращательного движения понятий силы и массы недостаточно. Действительно, если при поступательном движении определенная сила вызывает вполне определенные изменения движения тела, то во вращательном движении результат действия силы зависит от того, на каком расстоянии от оси вращения она приложена. Произведение величины силы, приложенной к данной точке тела, на ее кратчайшее расстояние до оси вращения называется моментом силы

$$M = F \cdot r. \quad (6.4)$$

Произведение массы i -й материальной точки на квадрат расстояния ее до оси вращения называется моментом инерции материальной точки:

$$J_i = m_i \cdot r_i^2. \quad (6.5)$$

Момент инерции всего тела равен сумме моментов инерции составляющих его материальных точек:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2. \quad (6.6)$$

Момент инерции характеризует инертность тела во вращательном движении и, как видно из (6.6), зависит от характера распределения массы относительно оси вращения r_1 . По аналогии с поступательным движением, кинетическая энергия вращающегося тела равна

$$E_{\text{вр}} = \frac{J \cdot \omega^2}{2}. \quad (6.7)$$

Пусть твердое тело вращается под действием приложенной к нему силы F . Рассмотрим достаточно малый промежуток времени t , такой, чтобы

угловую скорость можно было считать постоянной. Тогда за время dt тело повернется с угловой скоростью ω на угол $\phi = \omega dt$. При этом точка приложения силы описывает дугу $ds = r \cdot d\phi$. Элементарная работа в этом случае равна:

$$dA = F \cdot ds = F \cdot r \cdot d\phi = F \cdot r \cdot \omega \cdot dt. \quad (6.8)$$

Эта работа идет на изменение кинетической энергии вращающегося тела, т. е.

$$dA = d\left(\frac{J \cdot \omega^2}{2}\right) = J \cdot \omega \cdot d\omega. \quad (6.9)$$

Из равенства формул (6.8) и (6.9) следует:

$$F \cdot r \cdot \omega \cdot dt = J \cdot \omega \cdot d\omega, \\ M \cdot dt = J \cdot d\omega \quad \text{или} \quad M \cdot dt = d(J \cdot \omega). \quad (6.10)$$

Величина $L = J \cdot \omega$ называется моментом импульса (или моментом количества движения). Произведение $M \cdot dt$ называется импульсом вращающегося момента силы. Последнее выражение можно переписать в виде

$$M \cdot dt = dL, \quad (6.11)$$

т.е. импульс момента силы равен изменению момента импульса вращающегося твердого тела. Это основной закон динамики вращательного движения. Закону можно придать и другую формулировку. Из (6.10) следует:

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \varepsilon \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{M}{J}, \quad (6.12)$$

т.е. угловое ускорение, приобретаемое телом под действием вращающегося момента M , прямо пропорционально величине этого момента и обратно пропорционально моменту инерции тела J относительно оси вращения.

Экспериментальная установка представляет собой маховик, насаженный на вал, который может вращаться на шарикоподшипниках вокруг горизонтальной оси. На стене лаборатории вертикально закреплена измерительная линейка. На вал намотана нить, к концу которой прикреплен груз массой m . Груз под действием силы тяжести будет опускаться, приводя во вращение маховик. Поскольку груз и маховик связаны нитью, то после того как груз опустится на полную длину нити h_1 , маховик, вращаясь по инерции, поднимет груз снова на какую-то высоту h_2 , (рис. 6.1), меньшую h_1 , т.к. некоторая часть первоначальной потенциальной энергии израсходуется на работу против сил трения $A_{\text{тр}}$.

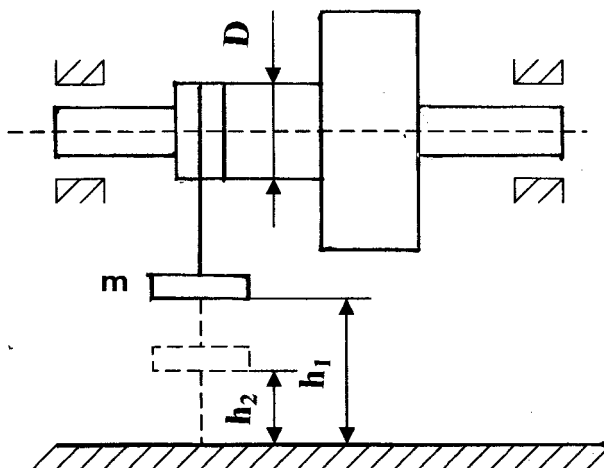


Рис. 6.1. Установка для определения момента инерции маховика

Закон сохранения энергии для рассматриваемой системы запишется следующим образом:

$$mgh_1 = \frac{mv^2}{2} + \frac{J \cdot \omega^2}{2} + A_{\text{тр}}, \quad (6.13)$$

где $\frac{mv^2}{2}$ – кинетическая энергия поступательного движения;

$\frac{J \cdot \omega^2}{2}$ – кинетическая энергия вращательного движения;

$A_{\text{тр}} = F \cdot h_1$ – работа по преодолению сил трения F :

$$mgh_1 - mgh_2 = F(h_1 + h_2).$$

Считаем, что сила трения постоянна. Тогда

$$F = mg \cdot \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}. \quad (6.14)$$

Так как движение груза m равноускоренное, то в нижней точке груз имеет скорость, определяемую из уравнений кинематики

$$v = \frac{2h_1}{t}, \quad (6.15)$$

где t – время опускания груза от начального положения в нижнее.

Угловая скорость вращения вала связана с линейной скоростью соотношением

$$\omega = \frac{2v}{D}, \quad (6.16)$$

где D – диаметр вала.

Подставляя в (6.13) соотношения (6.14), (6.15) и (6.16) и учитывая, что $A_{\text{тр}} = F \cdot h_1$, получаем:

$$J = \frac{mD^3}{4} \cdot \left[\frac{gt^2 \cdot h_2}{h_1(h_1 + h_2)} - 1 \right]. \quad (6.17)$$

Таким образом, для определения момента инерции тела вращения необходимо измерить время t и высоту h_1 первого опускания груза, высоту первого поднятия груза h_2 , массу груза m и диаметр вала D .

Измерения и обработка результатов

1. Взвесьте груз с помощью технических весов.
2. Измерьте штангенциркулем диаметр вала D .
3. При полностью размотанном шнуре отметьте по шкале наименьшую координату платформы l_1 .
4. Намотайте шнур на вал и отметьте наибольшую координату l_2 .
Очевидно, $h_1 = l_1 - l_2$.
5. Придерживая маховик, поставьте на платформу груз и отпустите маховик, включив секундомер в момент начала движения системы. В момент, когда шнур полностью разматывается, выключите секундомер и снимите показание времени t падения груза.
6. Отметьте по шкале максимальную координату l_3 подъема груза и определите высоту $h_2 = l_3 - l_1$.
7. Опыт повторите 3 раза при различных массах груза и результаты измерений занесите в табл. 6.1.
8. По формуле (6.17) вычислите момент инерции J . Для всех опытов определите среднее значение $J_{\text{ср}}$ и среднюю абсолютную погрешность $J_{\text{ср}}$. Результаты вычислений занесите в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	m , кг	l_1 , м	l_2 , м	h_1 , м	t , с	l_3 , м	h_2 , м	J , кг/м ²	ΔJ , кг/м ²
1									
2									
3									
$D =$ м Средние значения:								$J_{\text{ср}}$	$\Delta J_{\text{ср}}$

9. Окончательный результат представьте в виде

$$J = (J_{\text{ср}} \pm \Delta J_{\text{ср}}), \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Контрольные вопросы

1. Что называется моментом инерции тела и каков его физический смысл?

2. Выведите формулу кинетической энергии вращающегося тела.
3. Как рассчитывается кинетическая энергия тела, одновременно участвующего в поступательном и вращательном движении?
4. Выведите формулу основного уравнения динамики вращательного движения твердого тела.
5. Исходя из закона сохранения энергии, выведите расчетную формулу для момента инерции махового колеса без учета сил трения.
6. Оцените момент инерции установки, используемой в данной работе, не прибегая к опыту.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОБОРОТНОГО МАЯТНИКА

Цель работы: 1) изучить гармоническое колебательное движение на примере малых колебаний физического маятника; 2) определить ускорение свободного падения методом оборотного маятника.

Приборы и принадлежности: оборотный физический маятник, секундомер.

Теоретическое обоснование

Периодические смещения тела относительно некоторого устойчивого положения (положения равновесия) называют колебательным движением или просто колебаниями. Колебательные движения в общем случае представляют собой сложные физические процессы. Учение о колебаниях служит основой целого ряда прикладных дисциплин (акустика, теория машин и механизмов, сейсмология и др.).

Простейшим видом колебаний является гармоническое колебательное движение. Гармонические колебания тела возникают при действии силы F , пропорциональной смещению x и направленной противоположно смещению, т.е.

$$F = -kx.$$

Эту силу называют возвращающей. Природа возвращающей силы может быть различной (сила упругости, сила тяжести и др.). При гармоническом колебательном движении зависимость смещения x (пути) от времени t выражается функцией синуса или косинуса:

$$x = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (7.1)$$

где A – амплитуда колебаний (максимальное смещение колеблющейся точки от среднего положения);

$\omega = 2\pi/T$ – круговая (циклическая) частота;

T – период колебаний (время одного полного колебания);

φ_0 – начальная фаза колебания.

Ускорение a тела, совершающего гармонические колебания, пропорционально смещению и направлено противоположно смещению:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot x. \quad (7.2)$$

Гармонические колебания совершают маятники под действием силы тяжести при малых углах отклонения от положения равновесия.

Твердое тело произвольной формы, способное совершать малые колебания около положения равновесия, представляет собой физический маятник (например, тело, подвешенное в точке, не совпадающей с центром тяжести).

Всякое твердое тело можно рассматривать как совокупность материальных точек с массами m_1, m_2, \dots, m_l и т.д. При отклонении физического маятника от положения равновесия на угол φ (рис.7.1) на каждый его элемент будет действовать момент силы тяжести относительно оси вращения O . Сумма моментов всех этих сил равна моменту равнодействующей силы тяжести P , приложенной к центру тяжести маятника (точка C) относительно оси вращения. Величина момента

$$M = -mgl \cdot \sin \varphi,$$

где m – масса маятника;

l – расстояние от оси вращения O до центра тяжести маятника C ;

$l \cdot \sin \varphi$ – плечо силы тяжести P маятника;

g – ускорение силы тяжести в данном месте.

Момент M имеет такое направление, что стремится вернуть маятник в положение равновесия, поэтому угловое смещение φ и момент силы M имеют противоположные знаки. При малых φ можно записать:

$$M \cong -mgl\varphi. \quad (7.3)$$

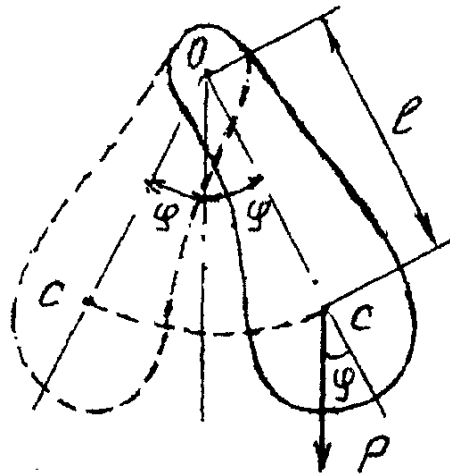


Рис.7.1. Физический маятник

Под действием момента силы тяжести маятник совершает колебания, при этом центр тяжести движется по дуге окружности с угловым ускорением

$$\varepsilon = \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \quad \text{или} \quad M = J \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2}, \quad (7.4)$$

а по второму закону Ньютона уравнение вращательного движения запишется как

$$M = J \cdot \varepsilon,$$

где J – момент инерции маятника относительно оси вращения.

Подставив в уравнение (7.4) значение M из (7.3) и решив его относительно углового ускорения, получим:

$$\varepsilon = \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{mgl}{J} \cdot \varphi. \quad (7.5)$$

Уравнение (7.5) отличается от уравнения (7.2) только тем, что в него входят угловые величины в место линейных. Из сравнения уравнений (7.2) и (7.5) следует, что

$$\omega^2 = \frac{mgl}{J}, \text{ или } \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{mgl}{J}},$$

откуда для периода колебаний физического маятника имеем:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}. \quad (7.6)$$

Во всяком физическом маятнике можно найти такие две точки, при последовательном подвешивании за которые период маятника остается неизменным. Расстояние между этими точками называется приведённой длиной $l_{пр}$ данного маятника.

По теореме Штейнера, момент инерции маятника J можно записать в следующем виде:

$$J = J_0 + ml^2, \quad (7.7)$$

где J_0 – момент инерции относительно оси, параллельной оси вращения и проходящей через центр инерции маятника.

Из формул (7.6) и (7.7) имеем:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_0 + ml^2}{mgl}}. \quad (7.8)$$

Пусть в данном обратном маятнике мы нашли два таких положения оси подвеса, что периоды колебаний относительно их одинаковы. Тогда на основании формулы (7.8) можно записать:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J_0 + ml_1^2}{mgl_1}}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{J_0 + ml_2^2}{mgl_2}},$$

где l_1 и l_2 – расстояния от центра инерции обратного маятника до обеих осей.

Выразим из каждой формулы для T величины J_0 и приравняем полученные выражения. После преобразования получим:

$$\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \cdot g \cdot (l_1 - l_2) = l_1^2 - l_2^2.$$

Так как оси расположены на различных расстояниях от центра инерции, т.е. $l_1 \neq l_2$, то можно сократить $(l_1 - l_2)$ и получить

$$g = \frac{4\pi^2(l_1 + l_2)}{T^2}.$$

Величина $l_{пр} = l_1 + l_2$, равная расстоянию между осями маятника с одинаковыми периодами, является приведенной длиной $l_{пр}$ данного обратного маятника. Таким образом, при определении ускорения свободного падения обратным маятником нужно найти две асимметричных относительно центра инерции оси, при колебаниях относительно которых период колебания T остается неизменным. Расстояние между этими осями дает величину $l_{пр} = l_1 + l_2$. При этом нет

необходимости определять положение самого центра инерции обратного маятника.

Оборотный маятник (рис. 7.2) состоит из стержня с нониусом 1, чечевицы подвижной 2 и неподвижной 3, опорных призм 4 и 5. Маятник одной из опорных призм устанавливается на подушке кронштейна, прикрепленного к стене. Расстояние между призмами 4 и 5 постоянное и равно $l_{\text{пр}} = 0,73 \text{ м}$.

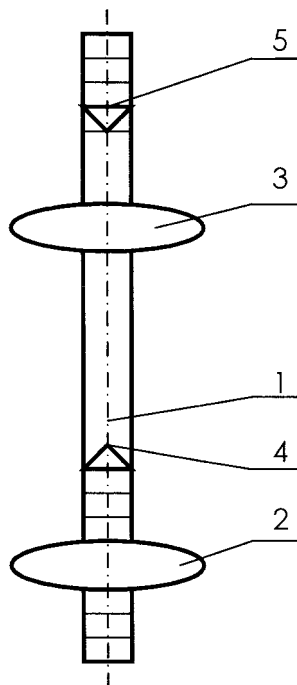


Рис. 7.2. Оборотный маятник

Измерения и обработка результатов

1. Установите обратный маятник на подушку кронштейна призмой 5, расположенной со стороны неподвижной чечевицы 3.
2. Поставьте чечевицу 2 на деление 8 см. Отклоните маятник на небольшой угол (размах нижнего конца стержня 4–6 см) и по секундомеру определите время t_1 20–30 полных колебаний n .
3. Вычислите период колебаний $T_1 = \frac{t_1}{n}$ с точностью до 0,01 с.
4. Переверните маятник и установите его на подушку кронштейна призмой 4, расположенной со стороны подвижной чечевицы 2. Определите период $T_2 = \frac{t_2}{n}$ согласно п. 2 и п. 3.
5. При каждом установленном положении чечевицы 2 определите периоды T_1 и T_2 , поочередно подвешивая маятник на ту и другую призмы. Это следует проделать, перемещая чечевицу 2 в пределах от 8 до 11 делений (сантиметров) основной шкалы. Данные занесите в табл. 7.1.

6. Добейтесь совпадения периодов колебаний маятника относительно обеих осей ($T = T_1 = T_2$).
7. По формуле (7.9) вычислите ускорения силы тяжести g .

Таблица 7.1

Результаты измерений и вычислений

Номер опыта	h , см	Ось колебаний со стороны чечевицы 3			Ось колебаний со стороны чечевицы 2		
		n	t_1 , с	T_1 , с	n	t_2 , с	T_2 , с

Контрольные вопросы

1. Что называется гармоническим колебанием? Запишите уравнение гармонического колебания.
2. Дайте определение смещения, амплитуды, частоты, периода и фазы колебания.
3. Что называется моментом инерции материальной точки и твердого тела?
4. Сформулируйте теорему Штейнера.
5. Выведите формулу (7.6) для периода физического маятника.
6. Что называется центром качания, приведенной длиной физического маятника?
7. Выведите рабочую формулу (7.9).
8. Как определить ускорение свободного падения на основе закона всемирного тяготения и второго закона Ньютона?

Лабораторная работа № 8

ИЗУЧЕНИЕ СВОБОДНЫХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы: 1) экспериментально изучить зависимость периода свободных колебаний математического маятника от его длины; 2) по результатам измерений периода колебаний и длины маятника рассчитайте ускорение свободного падения (напряженность гравитационного поля Земли); 3) рассчитать логарифмический декремент затухания и коэффициент затухания.

Приборы и принадлежности: математический маятник, линейка, секундомер.

Теоретическое обоснование

Математическим маятником называется «точечная» масса, подвешенная на нерастяжимой нити. В лабораторных условиях это шарик массой m , подвешенный на прочной и легкой нити, размеры которого по сравнению с длиной нити l незначительны.

При отклонении маятника от положения равновесия на угол φ (рис. 8.1) на шарик действуют две силы: сила тяжести \vec{P} и сила натяжения нити \vec{T} . Результирующая этих сил перпендикулярна нити и равна по модулю

$$F = P \cdot \sin \varphi, \quad (8.1)$$

что следует из рассмотрения $\triangle FO_1P$.

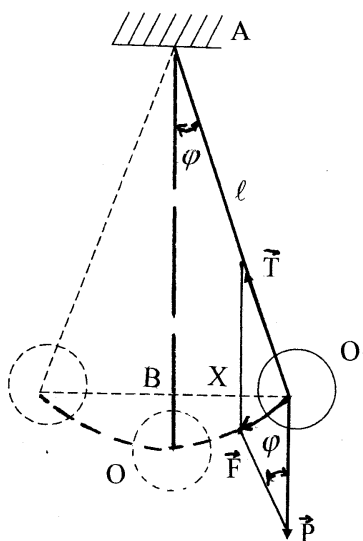


Рис. 8.1. Схема математического маятника

При малых углах отклонения маятника, не превышающих $5-10^\circ$, можно с

достаточной точностью принять, что отрезок O_1B равен дуге O_1O , т.е. отклонению (смещению) маятника от положения равновесия. Обозначив отклонение маятника через x , а его длину AO_1 через l , запишем:

$$\sin \varphi = \frac{x}{l}.$$

Подставляя это значение $\sin \varphi$ в уравнение (8.1), получим:

$$F = -\frac{mgx}{l}. \quad (8.2)$$

Знак «минус» в уравнении (8.2) поставлен потому, что сила F направлена всегда в сторону, противоположную смещению маятника из положения равновесия или, поясняя иначе, величина смещения маятника x отсчитывается от точки равновесия, а сила F – в сторону равновесия.

Из уравнения (8.2) следует, что сила, вызывающая гармонические колебания при малых углах отклонения, пропорциональна смещению колеблющегося тела, т.е.

$$F = -kx, \quad (8.3)$$

где $k = \frac{mg}{l}$ – коэффициент квазиупругой силы.

При движении на шарик, кроме возвращающей силы F , действует сила вязкого сопротивления среды (воздуха) F_c . Эта сила при малых скоростях, когда выполняется условие ламинарного обтекания, пропорциональна скорости движения v . По закону Стокса

$$F_c = -6\pi\eta R_{ш}v, \quad (8.4)$$

где η – коэффициент вязкости воздуха;

$R_{ш}$ – радиус шарика.

Знак «минус» в уравнении (8.4) указывает на то, что сила сопротивления направлена против смещения, а величина $r = 6\pi\eta R_{ш}$ называется коэффициентом сопротивления. Тогда

$$F_c = -rv. \quad (8.5)$$

По второму закону Ньютона, с учетом одномерного движения,

$$ma = -F - F_c.$$

Таким образом, мы приходим к дифференциальному уравнению затухающих колебаний:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - r \frac{dx}{dt},$$

или

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{r}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0. \quad (8.6)$$

Введем обозначения: $\beta = \frac{r}{2m}$ – коэффициент затухания, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – собственная циклическая частота и запишем уравнение (8.6) в стандартной форме:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (8.7)$$

решение которого имеет вид:

$$x = A_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\omega t + \phi_0), \quad (8.8)$$

где A_0 – начальное отклонение маятника от положения равновесия;

t – время;

ϕ_0 – начальная фаза колебаний, которую можно приравнять к нулю для момента времени $t_0 = 0$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – циклическая частота затухающих колебаний;

$e = 2,72$ – основание натуральных логарифмов.

Период затухающих колебаний определяется равенством

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (8.9)$$

Затухающие колебания (рис.4.2) можно рассматривать как гармонические с изменяющейся по экспоненциальному закону амплитудой

$$A = A_0 \cdot \exp(-\beta t). \quad (8.10)$$

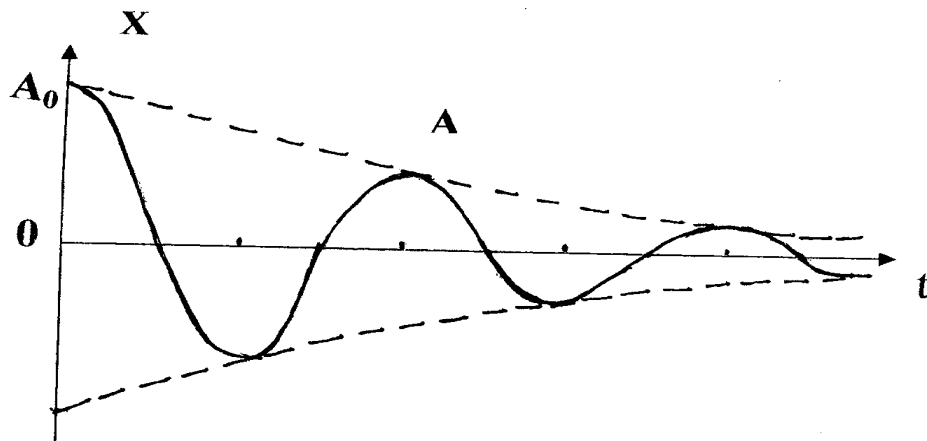


Рис. 8.2. График затухающих колебаний

Мерой затухания колебаний является логарифмический декремент затухания δ , который равен натуральному логарифму отношения двух последовательных амплитуд:

$$\delta = \ell \cdot n \frac{A_n}{A_{n+1}} = \ell \cdot n \frac{A_0 \cdot e^{-\beta t}}{A_0 \cdot e^{-\beta(t+T)}}. \quad (8.11)$$

В данной лабораторной работе для определения логарифмического декремента затухания определяются величины не двух последовательных амплитуд, а амплитуд, взятых через число колебаний n . За амплитуду A_0 принимается амплитуда в момент времени $t=0$, а за амплитуду A_n – амплитуда n -го колебания в момент времени nT . При этом приближенно

считается, что при небольших колебаниях период T близок к периоду собственных колебаний: $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$. Произведение nT выражает время t числа полных колебаний.

Тогда имеем:

$$\ln \frac{A_0}{A_n} = \ln \frac{A_0}{A_0 \cdot e^{-\beta n T}} = \beta n T.$$

Отсюда с учетом формулы (8.11) получим:

$$\delta = \frac{\frac{A_0}{A_n}}{n}. \quad (8.12)$$

Амплитуды A_0 и A_n определяются экспериментально.

Так как при малых значениях декремента затухания $T = T_0$, то

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}.$$

Отсюда

$$g = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2}. \quad (8.13)$$

Измерения и обработка их результатов

1. Измерьте длину нити математического маятника l от точки подвеса до пояса шарика и запишите результат в табл.8.1.
2. Отклоните шарик маятника от положения равновесия, задайте начальную амплитуду A_0 (в пределах 5-10 см). Определите время t 20 полных колебаний ($n = 20$) и амплитуду 20-го колебания A_n . Занесите результаты в табл.8.1.
3. Изменяя длину нити на 10-15 см, повторите все измерения для 4-5 длин маятника.
4. Для каждого опыта вычислите по формуле (8.12) логарифмический декремент затухания δ , период затухающих колебаний $T = \frac{t}{n}$, по формуле $\beta = \frac{\delta}{T}$ коэффициент затухания (на основании формулы (8.11)) и ускорение свободного падения g по формуле (8.13). Результаты занесите в табл.8.1.
5. Для ускорения свободного падения определите среднее значение g_{cp} и сравните с табличным значением $g_{табл} = 9,81 \text{ м/с}^2$. Для этого вычислите относительную погрешность:

$$\delta g_{cp} = \frac{(g_{cp} - g_{табл})}{g_{cp}}$$

и абсолютную погрешность Δg_{cp} измерений:

$$\Delta g_{cp} = \delta g_{cp} \cdot g_{cp}.$$

Результат запишите в виде $g = (g_{cp} \pm \Delta g_{cp})$, м/с².

6. Постройте график зависимости периода колебаний T от длины l маятника.

Таблица 8.1

Результаты измерений и вычислений

№ n/n	L , м	n	t , с	A_0 , м	A_n , м	δ	T , с	β , с ⁻¹	g , м/с ²
1									
2									
3									
4									

Контрольные вопросы

1. Какие колебания называются затухающими?
2. Напишите уравнения затухающих колебаний.
3. Что называется коэффициентом затухания, логарифмическим декрементом затухания?
4. Как изменится характер колебания маятника, если его поместить в воду?

Лабораторная работа № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ И СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СТОЯЧИХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Цель работы: изучить процессы распространения колебаний в газах, условия возникновения стоячих волн и результаты их интерференции. На основе этого экспериментально определить длину волны и скорость распространения звука в воздухе.

Приборы и принадлежности: две стеклянные трубы (подвижная и неподвижная), звуковой генератор, электронный осциллограф, электронный усилитель, микрофон, телефон, соединительные провода, измерительная линейка.

Теоретическое обоснование

Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется волновым процессом или волной. При распространении волны происходит перенос энергии, а частицы среды лишь колеблются около своих положений равновесия.

Упругие волны бывают продольные и поперечные. Продольные волны могут распространяться в средах, в которых возникают упругие силы при деформации сжатия и растяжения, т. е. в твердых, жидких и газообразных телах.

Поперечные волны могут распространяться в средах, в которых возникают упругие силы при деформации сдвига, т.е. фактически в твердых телах.

Таким образом, звуковые волны в воздухе представляют собой последовательные сгущения и разрежения частиц воздуха, т.е. они являются продольными волнами. Частоты их лежат в пределах восприятия человеческого уха (16-20000 Гц).

Распределение волн в однородной изотопной среде описываются волновым уравнением. Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси X , волновое уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial X^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial t^2}, \quad (9.1)$$

где S – смещение частиц;

v – скорость волны (фазовая скорость);

$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2}$ – вторая частная производная от смещения по координате X ;

$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2}$ вторая частная производная от смещения по времени t .

Решением волнового уравнения (9.1) является уравнение плоской волны

$$\begin{aligned} S(x, t) &= A \cdot \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right), \text{ или} \\ S(x, t) &= A \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right), \end{aligned} \quad (9.2)$$

где A – амплитуда колебаний волны;

ω – циклическая частота.

Если плоская волна распространяется в противоположном направлении от оси X , то

$$\begin{aligned} S(x, t) &= A \cdot \cos \omega \left(t + \frac{x}{v} \right), \text{ или} \\ S(x, t) &= A \cdot \sin \omega \left(t + \frac{x}{v} \right). \end{aligned} \quad (9.3)$$

Рассмотрим две плоские волны, распространяющиеся навстречу друг другу вдоль оси X . Амплитуды волны равны $A_1 = A_2 = A$.

Преобразуем фазу плоской волны: $\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = \omega t - \frac{\omega x}{v}$.

Учитывая, что $\omega = 2\pi f$ и $v = \frac{\lambda}{f}$, получим:

$$\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = \omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}, \quad (9.4)$$

где f – частота колебаний;

λ – длина волны.

С учетом выражения (9.4) окончательно уравнения волн (9.2) и (9.3) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} S_1(x, t) &= A \cos \left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right), \\ S_2(x, t) &= A \cos \left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} \right). \end{aligned} \quad (9.5)$$

Сложив уравнения (9.5), получим уравнение стоячей волны:

$$\begin{aligned} S(x, t) &= S_1(x, t) + S_2(x, t), \text{ или} \\ S(x, t) &= 2A \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \cos \omega t. \end{aligned} \quad (9.6)$$

Из уравнения (9.6) вытекает, что в каждой точке стоячей волны происходят колебания той же частоты ω с амплитудой

$$A_{cm} = \left(2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right).$$

В точках среды, где $\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm(n\pi)$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), амплитуда колебаний достигает максимального значения, равного $2A$. Точки, в которых амплитуда

колебаний максимальна ($A_{cm} = 2A$), называются пучностями стоячей волны. Координаты пучности:

$$X_n = \pm n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (9.7)$$

В точках среды, где $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), амплитуда колебаний обращается в нуль. Точки, в которых амплитуда колебаний равна нулю ($A_{cm} = 0$), называются узлами стоячей волны. Координаты узлов:

$$X_{уз} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (8)$$

Из формул (9.7) и (9.8) следует, что расстояние между двумя пучностями (узлами) (рис. 9.1)

$$X_n = X_{уз} = \frac{\lambda}{2}.$$

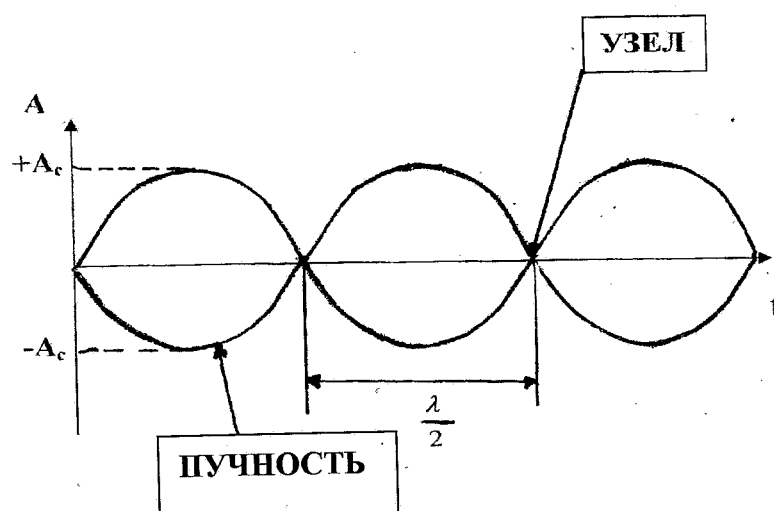


Рис. 9.1. График стоячей волны

Измерив расстояние между соседними пучностями или узлами, можно определить длину волны:

$$\lambda = 2 \cdot \Delta X_n \quad \text{или} \quad \lambda = 2 \cdot \Delta X_{уз}. \quad (9.9)$$

Определив по формуле (9.9) длину волны λ и зная частоту f , можно найти скорость распространения волны

$$v = \lambda \cdot f. \quad (9.10)$$

Для измерения скорости звука в воздухе служит установка, схема которой представлена на рис. 9.2.

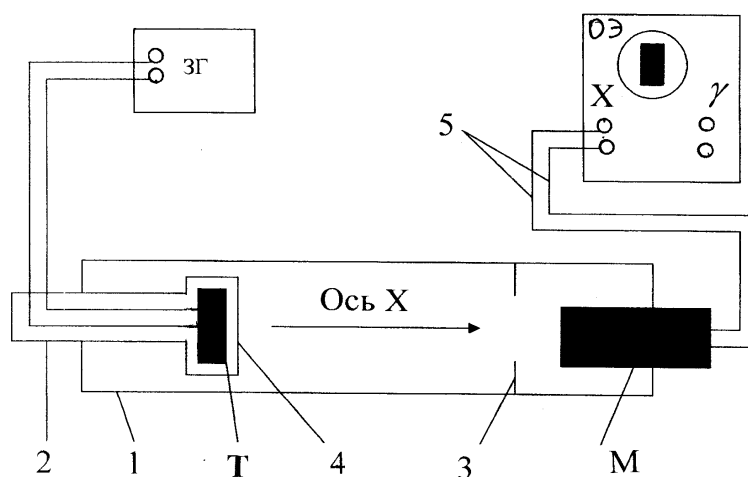


Рис. 9.2. Схема экспериментальной установки для измерения скорости звука в воздухе

Звуковые колебания в неподвижной трубе 1 возбуждаются телефоном T , закрепленным на конце подвижной трубы 2. Мембрана телефона приводится в движение переменным током звуковой частоты от звукового генератора $ЗГ$.

Колебания улавливаются микрофоном M , закрепленным на конце неподвижной трубы 1. Возникающий в микрофоне сигнал по соединительным проводам 5 через электронный усилитель (при слабом сигнале) подается на клеммы Y электронного осциллографа $ОЭ$. Звуковая волна распространяется вдоль трубы от телефона, отражается от металлической пластины 3 и распространяется в обратном направлении, дойдя до пластины 4, вновь отражается и т.д. Звуковые колебания в трубе являются наложением всех отраженных волн и, вообще говоря, очень сложны. Для упрощения расчетов рассматривают две волны, распространяющиеся навстречу друг другу вдоль оси X , направленной вдоль трубы от телефона к микрофону.

Из теории следует, что если бегущая и отраженная волны совпадают по фазе, то волны усиливают друг друга вследствие интерференции. Амплитуда звуковых колебаний при этом резко возрастает - наступает резонанс. Возникновение резонанса легко наблюдать на осциллографе по резкому увеличению амплитуды колебаний.

Если постепенно перемещать поршень с телефоном вдоль трубы, то на экране осциллографа будем наблюдать чередование максимальных и минимальных амплитуд колебаний. Расстояние между соседними максимумами (резонансами) $\Delta X = \frac{\lambda}{2}$.

Отсюда следует:

$$\lambda = 2\Delta X_{ik}, \quad (9.11)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ – номер текущего резонанса;

k – номер последующего резонанса.

Осциллограф в сеть включается следующим образом: следует визуально

ознакомиться с ручками управления осциллографа, тумблер выключателя сети установить в положение «Вкл», при этом должна загореться сигнальная лампа. Через 1-2 минуты после включения на экране осциллографа должен появиться яркий горизонтальный штрих. Для приведения луча в центр экрана необходимо медленно вращать ручку «Смещение Y» (сдвиг луча по вертикали) до тех пор, пока штрих луча не окажется в центре экрана. Сдвиг луча по горизонтали производится ручкой «Смещение X». Затем ручкой «Фокус» нужно установить четкое изображение, уменьшая или увеличивая при необходимости яркость луча ручкой «Яркость».

Измерения и обработка результатов

1. Проверьте, соответствует ли сборка установки схеме, представленной на рис. 9.2 (схему обязательно должен проверить лаборант или преподаватель).

2. Выполните все операции, рассмотренные выше, по включению осциллографа.

3. Переключателем диапазонов звукового генератора установите заданную частоту (измерения производить на трех частотах: 1000, 1500 и 2000 Гц).

4. Включите звуковой генератор (тумблер «Сеть» на его панели).

5. Установите поршень с телефоном на расстоянии 3 - 5 см от микрофона.

6. Ручками «Усиление Y» и «Усиление X» установите на экране величину изображения, удобную для рассмотрения (0,65 - 0,75 размера экрана).

7. Ручкой «Частота плавно» установите такую частоту развертки, при которой на экране наблюдается один или несколько неподвижных периодов колебаний.

8. Медленно отодвигая поршень от микрофона, отметьте по измерительной линейке положения X_1 1-го резонанса и X_2 2-го резонанса. Вычислите расстояние между этими максимумами $\Delta X_{21} = X_2 - X_1$.

9. По формуле (9.11) определите длину волны. Аналогично рассчитайте длину волны по последующим резонансам.

10. По формуле (9.10) определите скорость звука в воздухе для каждого измерения.

11. Повторите измерения для другой заданной частоты.

12. Рассчитайте средние значения скорости $\bar{v} = \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{n}$ для всех опытов.

Здесь $i = 1, 2, \dots, n$ – номер i -го измерения; n – общее число измерений.

13. Рассчитайте абсолютные погрешности отдельных измерений скорости $\Delta v_i = |v_i - \bar{v}|$, затем определите средние значения абсолютных погрешностей всех измерения рассматриваемых величин.

14. Результаты измерений и вычислений представьте в табл.9.1.

Таблица 9.1

Результаты измерений и вычислений

Номер опыта							
1							
2							
3							
и т.д.							
Среднее значение							

15. Окончательные результаты запишите в виде

$$v = (v \pm \Delta v), \text{ м/с.}$$

Контрольные вопросы

1. Механизм распространения звуковых волн в воздухе.
2. Природа продольных и поперечных волн.
3. Уравнение волны и ее характеристики.
4. Интерференция волн. Стоячие волны и их характеристики.
5. Зависимость скорости звука от температуры газа.

Лабораторная работа № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ МЕТОДОМ СЛОЖЕНИЯ ВЗАИМНО-ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: изучить процессы распространения колебаний в газах, механизм сложения взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты и на основе этого экспериментально определить скорость распространения звука в воздухе.

Приборы и принадлежности: две стеклянные трубы (подвижная и неподвижная), звуковой генератор, электронный осциллограф, электронный усилитель, микрофон, телефон, соединительные провода, измерительная линейка.

Теоретическое обоснование

Рассмотрим результат сложения двух гармонических колебаний одинаковой частоты ω , происходящих во взаимно-перпендикулярных направлениях вдоль осей X и Y . Для простоты начало отсчета выберем так, чтобы начальная фаза первого колебания была равна нулю:

$$\begin{aligned}x &= A \cos \omega t, \\y &= B \cos (\omega t + \phi).\end{aligned}\quad (10.1)$$

Разность фаз обоих колебаний равна ϕ , A и B – амплитуды складываемых колебаний.

Уравнение траектории результирующего колебания находится исключением из выражений (10.1) параметра t . Записываем складываемые колебания в виде

$$\begin{aligned}\frac{x}{A} &= \cos \omega t, \\ \frac{y}{B} &= \cos (\omega t + \phi) = \cos \omega t \cos \phi - \sin \omega t \sin \phi.\end{aligned}$$

Заменяя во втором уравнении $\cos t$ на $\frac{x}{A}$ и $\sin \omega t$ на $\sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2}$, получим после несложных преобразований уравнение эллипса, оси которого ориентированы относительно координатных осей произвольно:

$$\left(\frac{x^2}{A^2}\right) - \cos \frac{2\phi}{y} + \frac{y^2}{B^2} = \sin^2 \phi. \quad (10.2)$$

Так как траектория результирующего колебания имеет форму эллипса, то такие колебания называются эллиптически поляризованными.

Ориентация осей эллипса и его размеры зависят от амплитуд складываемых колебаний и разности фаз ϕ . Рассмотрим некоторые частные

случаи, представляющие физический интерес:

1. $\varphi = n\pi (\pi = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$. В данном случае эллипс вырождается в отрезок прямой

$$y = \pm \left(\frac{B}{A} \right) x, \quad (10.3)$$

где знак плюс соответствует нулю и четным значениям n (рис.10.1а), а знак минус - нечетным значениям n см. рис.10.1,б. Результирующее колебание является гармоническим колебанием с частотой ω и амплитудой $\sqrt{A^2 + B^2}$, совершающимся вдоль прямой (10.3), составляющей с осью X угол $\phi = \arctg \left(\frac{B}{A} \cos n\pi \right)$. В данном случае имеем дело с линейно - поляризованными колебаниями.

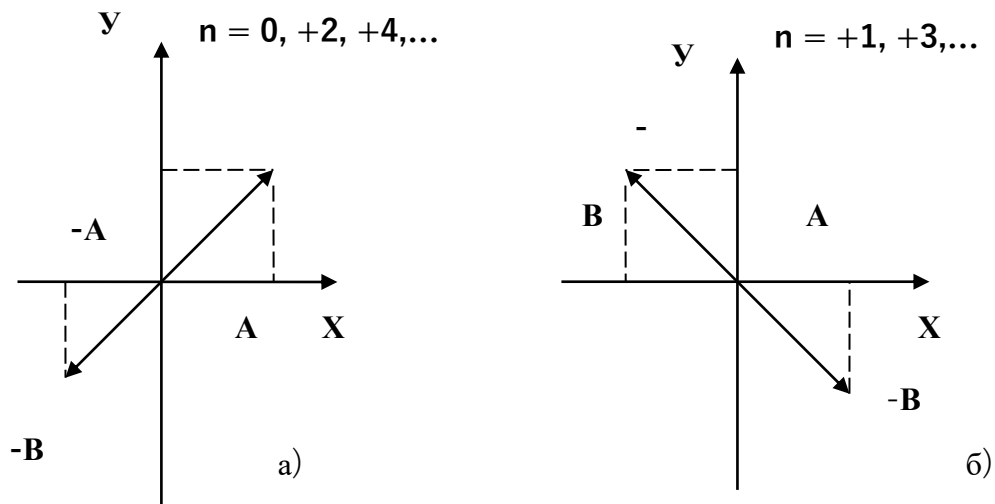


Рис. 10.1. График сложения колебаний при разности фаз $\varphi = n\pi$

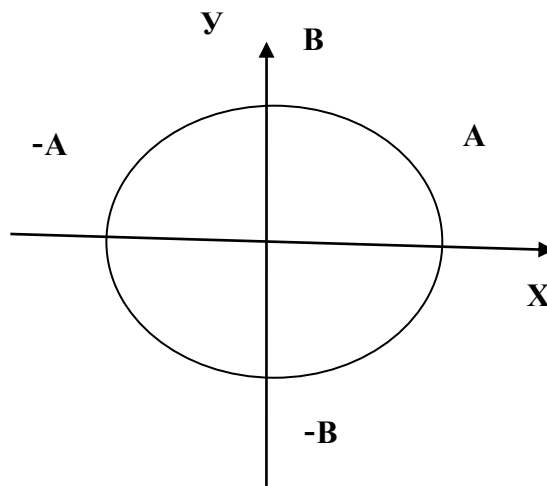


Рис. 10.2. График сложения колебаний при разности фаз $\varphi = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{2}$

2. $\varphi = (2n+1) \cdot \frac{\pi}{2}$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). В данном случае уравнение примет вид

$$\frac{X^2}{A^2} + \frac{Y^2}{B^2} = 1. \quad (10.4)$$

Это уравнение эллипса, оси которого совпадают с осями координат, а его полуоси равны соответствующим амплитудам (рис. 10.2). Кроме того, если $A = B$, то эллипс (10.4) вырождается в окружность. Такие колебания называются колебаниями, поляризованными по кругу.

В общем случае замкнутые траектории, прочерчиваемые точкой, совершающей одновременно два взаимно-перпендикулярных колебания, называются фигурами Лиссажу. Форма этих кривых зависит от соотношения амплитуд, частот и разности фаз складываемых колебаний.

Физическая природа звуковых волн в газе и механизм их распространения в воздухе достаточно подробно изложены в лабораторной работе 7. В бегущей звуковой волне смещения колебаний двух точек, находящихся на расстоянии друг от друга, сдвинуты по фазе на $\kappa = \frac{2\pi l}{\lambda}$.

Отсюда $\lambda = 2 \cdot \pi \cdot \frac{l}{\varphi}$, а скорость звука в воздухе с учетом того, что $v = \lambda f$, определится выражением

$$v = \frac{2\pi l f}{\varphi}. \quad (10.5)$$

Формула (10.5) может быть использована для экспериментального определения скорости распространения звука в газе по измеренным значениям величин f, l, φ .

Для измерения скорости звука в воздухе служит установка, схема которой представлена на рис. 10.3.

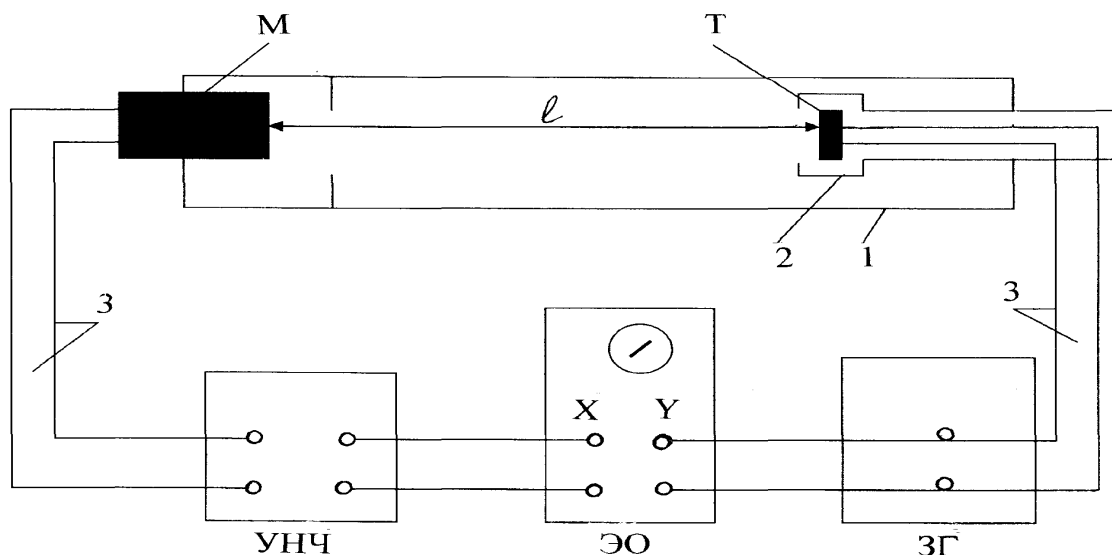


Рис. 10.3. Схема экспериментальной установки для измерения скорости

Звуковые колебания в неподвижной трубе 1 возбуждаются телефоном T , закрепленным на конце подвижной грубы 2. Мембрана телефона приводится в движение переменным током звуковой частоты от звукового генератора $ЗГ$. Звуковая волна достигает микрофона M и порождает в его цепи переменное напряжение, которое усиливается усилителем низкой частоты (УНЧ).

Между переменным напряжением на выходе звукового генератора и напряжением, возникающим в цепи микрофона, существует сдвиг по фазе φ , зависящий от взаимного расположения микрофона и телефона. При перемещении подвижной трубы 2 с телефоном T вдоль неподвижной трубы 1 на расстояние $l = \lambda n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) составляющее целое число волн, разность фаз изменяется на $\varphi = 2\pi n$. Расстояние определяется при помощи измерительной линейки. Сдвиг фаз φ можно определить по форме эллипса, описываемого на экране осциллографа ЭО электронным лучом, если вертикальные пластины X осциллографа соединить проводами $З$ с выходом звукового генератора $ЗГ$, а горизонтальные Y – с микрофоном M через усилитель (УНЧ). Как было выяснено ранее (см. рис.10.1, а), при разности фаз $\varphi = 2\pi n$ эллипс вырождается в прямую, проходящую через первый и третий квадранты координатной плоскости, если $n = 1, 2, \dots$. Подставляя принятую разность фаз $\varphi = 2\pi n$ в формулу (10.5), получим:

$$v = \ell n f / n, \quad (10.6)$$

где ℓn – расстояние, соответствующее n -му числу повторения прямой на экране осциллографа

Измерения и обработка результатов

1. Проверьте, соответствует ли сборка установки схеме, представленной на рис.10.3 (схему обязательно должен проверить лаборант или преподаватель).
2. Включите и настройте осциллограф.
3. Переключением диапазонов звукового генератора и его шкалой установите необходимую частоту (измерения производить на трех частотах: 1000, 1500, 2000 Гц).
4. Включите звуковой генератор и усилитель (тумблер «Сеть» на панелях).
5. Установите подвижную трубу с телефоном на расстояние 3-5 см от микрофона.
6. Ручками усиления сигналов УНЧ, ЗГ и ЭО настройте по осям X и Y изображение эллипса так, чтобы оно вписывалось в квадрат и занимало 0,5 – 0,75 размера экрана осциллографа. Генератор развертки осциллографа при этом должен быть выключен.
7. Медленно отодвигайте подвижную трубу с телефоном от микрофона,

отметьте по измерительной линейке положение l_1 , при котором на экране осциллографа видна первая прямая линия (см. рис.10.1,а). Продолжая передвигать телефон, считайте число $n(n=2, 3,...)$ повторений такой же прямой на экране и отмечайте соответствующее ему положение l_n .

8. По формуле (10.6) рассчитайте скорость звука v для каждого измерения.

9. Повторите измерения для другой заданной частоты f .

10.Рассчитайте среднее значение скорости

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$$

для всех опытов. Здесь $i=1, 2,...$; n – номер i – го измерения; n – общее число измерений.

11.Рассчитайте абсолютные погрешности отдельных измерений скорости

$$\Delta v_i = |v_i - \bar{v}|.$$

Затем определите среднее значение абсолютной погрешности измерений величины

$$\Delta \bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta v_i}{n}.$$

12. Результаты измерений и вычислений представьте в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Результаты измерений и вычислений

Номер опыта	f , Гц	n	l_n , м	v , м/с	Δv , м/с
1					
2					
3					
и т.д.					
	Среднее значение			\bar{v}	$\Delta \bar{v}$

13. Окончательные результаты измерений и вычислений запишите в виде:

$$v = (\bar{v} \pm \Delta \bar{v}), \text{ м/с.}$$

Контрольные вопросы

1. Что такое свободные колебания, гармонические колебания? Приведите примеры.
2. Дайте определение понятиям амплитуды, фазы, периода, частоты, циклической частоты колебания.
3. В каких колебаниях должна участвовать точка, чтобы ее траекторией была прямая линия, окружность или эллипс? От чего зависит форма

- замкнутой траектории, прочерчиваемой точкой?
4. Как образуются фигуры Лиссажу?
 5. Уравнение бегущей волны и ее анализ.

Библиографический список

1. *Грабовский Р.И.* Курс физики. - М.: Высш. шк., 2007. - 607 с.
2. *Грибов Л.А.* Основы физики / Л.А. Грибов, И.И. Прокофьева. - М.: Высш. шк., 2009.-430 с.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Механика, Молекулярная физика. - М.: Наука, 2006.-Т. 1.-432 с.
4. *Трофимова Т.П.* Курс физики. - М.: Высш. шк., 2007.-560 с.

Содержание:

Введение.....	5
Общие требования к выполнению лабораторных работ	
1. Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента трения скольжения.....	6
2. Лабораторная работа №2. Изучение законов сохранения при вращательном движении.....	10
3. Лабораторная работа №3. Изучение законов кинематики и динамики поступательного движения на машине Атвуда.....	14
4. Лабораторная работа № 4. Измерение скорости пули методом баллистического маятника.....	21
5. Лабораторная работа № 5. Изучение законов динамики вращательного движения с помощью маятника Обербека.....	24
6. Лабораторная работа № 6. Определение момента инерции тела вращения.....	29
7. Лабораторная работа №.7. Определение ускорения свободного падения с помощью обратного маятника.....	34
8. Лабораторная работа № 8. Изучение свободных затухающих колебаний математического маятника.....	39
9. Лабораторная работа № 9. Определение длины волны и скорости звука в воздухе методом интерференции стоячих акустических волн	44
10. Лабораторная работа №10. Определение длины волны и скорости звука в воздухе методом сложения взаимно перпендикулярных колебаний.....	50
Библиографический список	56

Составители: Минаев Александр Павлович
Дзю Искра Михайловна
Викулов Станислав Викторович
Чечуев Владимир Яковлевич
Алешкевич Марина Георгиевна

Лабораторный практикум по физике

Часть I

Механика

Редактор Т.К. Коробова
Компьютерная верстка Т.А. Измайлова

Подписано в печать ... 2018 г.
Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Объём 2,7 уч.-изд.л., 2,9 усл.-печ. л.
Тираж 100 экз. Изд. №... Заказ №

Отпечатано в издательстве
Новосибирского государственного аграрного университета
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, каб. 106.
Тел./факс (267-09-10. E-mail: 2134539 @ mail.ru