

**Кафедра прикладной механики, физики и
инженерной графики**

ФИЗИКА

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
для обучающихся по направлению подготовки
08.03.01 Строительство
Профиль «Промышленное и гражданское строительство»**

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
САНКТ–ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра прикладной механики, физики и инженерной
графики

ФИЗИКА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
для обучающихся по направлению подготовки
08.03.01 Строительство
Профиль «Промышленное и гражданское строительство»

САНКТ–ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 53.01;53.03;53.072
ББК 22.3с;22.33;22.34
Ф 50

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент кафедры «Системный анализ и логистика» ФГАОУВО СПбГУАП Н.Н. Майоров;
доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис» СПбГАУ А.П. Картошкин

Физика: лабораторный практикум/ Составители: А.В. Сумманен, Е.А. Криштанов, А.В. Спирина, Л.П. Глазова. – СПб.: СПбГАУ, 2020. –160 с.

Лабораторный практикум предназначен для обучающихся по дисциплине «Физика» по направлению подготовки 08.03.01 Строительство, профиль подготовки «Промышленное и гражданское строительство». Практикум составлен в соответствии с учебным планом по указанному направлению подготовки бакалавра и рабочей программой дисциплины.

Рекомендован к изданию и публикации на электронном носителе для включения в информационные ресурсы университета согласно лицензионному договору Учебно–методическим советом СПбГАУ, протокол №3 от 28 ноября 2019 года

© Сумманен А.В., Криштанов Е.А., Спирина А.В., Глазова Л.П., 2020
© ФГБОУ ВО СПбГАУ, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ	6
РАЗДЕЛ 1. МЕХАНИКА	12
Теоретическое введение к работе 1.1	12
Работа 1.1 Изучение равноускоренного движения на машине Атвуда	13
Теоретическое введение к работам 1.2а и 1.2б	16
Работа 1.2а Определение модуля Юнга по растяжению проволоки	18
Работа 1.2б Определение модуля Юнга по растяжению проволоки	21
Теоретическое введение к работе 1.3	23
Работа 1.3 Определение модуля Юнга по прогибу стержня	24
Теоретическое введение к работе 1.4	26
Работа 1.4 Изучение упругого удара шаров	29
Теоретическое введение к работам 1.5а и 1.5б	31
Работа 1.5а Определение момента инерции кольца методом крутильных колебаний	34
Работа 1.5б Определение моментов инерции твердых тел с помощью крутильных колебаний	37
Теоретическое введение к работе 1.6	42
Работа 1.6 Проверка основного уравнения динамики вращательного движения	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	158
ЛИТЕРАТУРА	159

ВВЕДЕНИЕ

Физика в переводе с древнегреческого означает Природа. Этим названием довольно точно определяется и объект изучения современной физики. Она изучает наиболее общие и фундаментальные законы и закономерности материального мира.

Описывая окружающий нас мир, она дает ключи к пониманию законов движения и взаимодействия макроскопических тел. Количественные законы, установленные физикой, позволяют выполнить с необходимой точностью расчеты различных машин и механизмов, расчеты параметров средств связи и обработки информации.

Физические термины и законы широко используются в различных технических науках. Понятийный аппарат этих наук построен на фундаменте общей физики. Как правило, она включает в себя такие ключевые термины, как масса, сила, давление, импульс, работа, мощность, энергия, потенциал, сила тока и так далее. Обучающимся весьма трудно будет изучать технические дисциплины, не овладев основными законами и категориями физики. Как показывает анализ изобретательской и рационализаторской деятельности, именно законы физики являются неисчерпаемым источником новых идей и предложений, дающих иногда неожиданные результаты.

Данный лабораторный практикум предназначен для обучающихся 1 курса по направлению подготовки 08.03.01 Строительство, направленность (профиль) программы «Промышленное и гражданское строительство». Практикум направлен на формирование у обучающихся компетенции ОПК–1: способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и математического (компьютерного) моделирования, теоретического и экспериментального исследования.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

По объективным и субъективным причинам никакие измерения нельзя выполнить абсолютно точно. Наши измерения всегда содержат те или иные погрешности, называемые также ошибками измерений.

Погрешности измерений принято подразделять на три основные группы:

1. Случайные погрешности.
2. Систематические погрешности.
3. Промахи или грубые погрешности.

Охарактеризуем каждую из групп подробнее.

Случайные погрешности возникают в результате действия большого числа различных факторов по-разному в каждом из экспериментов. Примером случайной ошибки может служить ошибка измерения давления очень чувствительным барометром. Стрелка такого барометра отклоняется от среднего значения случайным образом. Величина отклонения зависит от того, сколько молекул и с какими скоростями соударяются с измерительной площадкой прибора в данный момент времени.

Систематические погрешности возникают в результате действия различных факторов одинаковым образом в каждом из экспериментов. Эти погрешности можно подразделить на три основные подгруппы:

а) погрешности известной величины или погрешности, величина которых может быть рассчитана по формуле. Такие погрешности называются поправками и могут быть устранены с помощью введения соответствующей поправки. Примеры: измерение тока прибором со сбитым на несколько делений началом отсчета; измерение времени по спешащим или отстающим часам; измерение веса тела с учетом действующей на него со стороны воздуха выталкивающей силы;

б) погрешности известного происхождения, но неизвестной величины. К такому типу ошибок относятся, в частности, погрешности измерительных приборов. Они возникают вследствие трения в подвижных частях приборов и из-за деформации этих частей. Приборные ошибки обычно могут быть оценены только сверху (т. е. указывается предельная погрешность измерений такая, что реальная погрешность всегда меньше этой предельной погрешности). Для механических измерительных приборов это обычно цена минимального деления измерительной шкалы или цена деления нониуса для приборов, снабженных нониусом; для электроизмерительных приборов погрешность определяется классом точности прибора и составляет определенный процент от всего действующего значения шкалы прибора, по которой производится данное измерение;

в) погрешности неизвестного происхождения, о существовании которых экспериментатор даже и не подозревает. Например, при измерении плотности материала цилиндра экспериментатор может и не знать, что внутри цилиндра содержатся полости, и поэтому получит неправильное значение измеряемой плотности. Это один из самых коварных видов ошибок. Для их устранения надо совершенствовать методику измерений, пытаясь устранить те или иные ошибки подобного типа.

Промахи или грубые погрешности возникают в результате неправильных действий экспериментатора или его ошибок. К типичным видам промахов относятся: путанье шкал приборов, похожих цифр (1 и 7, 3 и 8) при нечеткой записи. К сожалению, этот тип погрешностей наиболее часто встречается в учебной физической лаборатории. Обучающиеся чаще всего допускают следующие промахи: ошибки в арифметических вычислениях, неперевод всех единиц измерений в систему СИ, неумение оперировать с отрицательными степенями числа, неспособность различать абсолютную и относительную ошибки измерений.

Ошибки прямых измерений

Прямым называется измерение, выполняемое непосредственно измерительным прибором, например, длины — линейкой или силы тока — амперметром. Если в ходе прямых измерений получено n значений измеряемой величины x_1, x_2, \dots, x_n , то возникает вопрос: какое из этих значений ближе всего к истинному?

Наиболее вероятно, что ближе всего к истинному — среднее арифметическое этих измерений

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}. \quad (1)$$

Его в дальнейшем мы и примем за истинное значение, поскольку само истинное значение нам неизвестно. Затем находится отклонение каждого измерения от среднего арифметического

$$\Delta x_1 = |\bar{x} - x_1|, \Delta x_2 = |\bar{x} - x_2|, \dots, \Delta x_n = |\bar{x} - x_n|. \quad (2)$$

Потом рассчитывается среднее отклонение $\overline{\Delta x}$

$$\overline{\Delta x} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n}. \quad (3)$$

Далее среднее отклонение сравнивается с приборной погрешностью Δx_{np} и в качестве окончательной ошибки прямого измерения выбирается:

$$\Delta x = \max(\overline{\Delta x}, \Delta x_{np}). \quad (4)$$

Ошибка, найденная по формуле (4), называется абсолютной ошибкой прямого измерения. Для характеристики качества измерений вводят также понятие относительной ошибки

$$\delta x = \frac{\Delta x}{\bar{x}}. \quad (5)$$

Здесь под \bar{x} мы понимаем истинное значение измеряемой величины. Относительная ошибка часто выражается в процентах

$$\delta x \% = \delta x \cdot 100 \% = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100 \%. \quad (6)$$

Типичные относительные ошибки, допускаемые в ходе лабораторного практикума, варьируются от единиц процента до примерно 20%. Окончательный результат прямого измерения записывается в виде^

$$x = (\bar{x} \pm \Delta x) [\text{ед.изм.}], \text{ при } \delta x = \dots \% \quad (7)$$

Запись (7) означает, что истинное значение x лежит в интервале $\bar{x} - \Delta x \leq x \leq \bar{x} + \Delta x$. Это событие считается вероятным. Правда, само значение вероятности того, что x попадает в данный интервал, в элементарной теории погрешностей не оценивается. Существует более строгий подход к вычислению погрешностей, при котором указывается доверительный интервал, в котором лежит истинное значение и соответствующая ему доверительная вероятность. При этом необходимо принимать гипотезу о том или ином законе распределения случайной погрешности.

В погрешности Δx при записи конкретного числа оставляют одну значащую цифру, в случае, если она равна единице, сохраняют две значащие цифры. Результат следует округлить до последней значащей цифры погрешности. Если есть общий множитель в виде степени числа 10, его выносят за скобку.

Например, время наступления некоторого события может быть записано в виде:

$$t = (1,95 \pm 0,13) \cdot 10^3 \text{ с, при } \delta t = 6,7\%. \quad (8)$$

Напомним, что значащими являются любые цифры числа, кроме нулей в начале числа. В промежуточных вычислениях нужно учитывать минимум четыре значащих цифры.

Ошибки косвенных измерений

Косвенным называется измерение, полученное с помощью расчета по формулам. Например, объем куба можно найти по формуле $V = a^3$, где a – ребро куба, измеряется непосредственно, а объем уже вычисляется. Пусть косвенное измерение y связано с прямым измерением x с помощью функциональной зависимости

$$y = f(x). \quad (9)$$

Рассмотрим теперь ошибки косвенных измерений в том случае, когда измеряемая величина является функцией от нескольких прямых измерений

$y = f(a_1, a_2, \dots, a_m)$. Здесь a_1, a_2, \dots, a_m прямые измерения различных физических величин. Тогда, дифференцируя y , найдем

$$\Delta y \approx \left| \frac{\partial f}{\partial a_1} \right| \Delta a_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial a_2} \right| \Delta a_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial a_m} \right| \Delta a_m, \quad (10)$$

где $\partial f / \partial a_i$ – частная производная от функции f по аргументу a_i . Другие аргументы при взятии частной производной по данному аргументу считаются постоянными.

Заметим, что при проведении конкретных численных расчетов, учитывая точность измерений в учебной лаборатории, необходимо на каждом этапе вычислений удерживать, как минимум, четыре значащих цифры. Для косвенных измерений выводится формула относительной погрешности.

Класс точности и оценка погрешностей электрических измерений. Все электроизмерительные приборы делятся по классу точности, значения которого могут быть: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Класс точности указывает, что погрешность показаний прибора в любом месте шкалы не должна превышать 0,1%, 0,2%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,5%, 4,0% соответственно.

Максимальную (предельную) абсолютную погрешность прибора можно оценить по формуле:

$$\Delta A = \frac{k}{100} \cdot A',$$

где k – класс точности прибора; A' – максимально возможное показание прибора на выбранной шкале.

Например, абсолютная погрешность измерения напряжения в 30 В вольтметром, класс точности которого 1,0 и предел измерения 100 В ($A' = 100$), составляет

$$\Delta U = 0,01 \cdot 100 = 1 \text{ В}.$$

Относительная погрешность прибора будет тем больше, чем меньше измеряемая величина. Если, например, при помощи указанного вольтметра измерить напряжение 30 В, то относительная погрешность будет составлять:

$$\frac{\Delta U}{U} \cdot 100 = \frac{1}{30} \cdot 100 = 3,3 \%,$$

а при измерении напряжения 10 В – 10%.

При точных измерениях следует пользоваться такими приборами, чтобы предполагаемое значение измеряемой величины составляло примерно 75% от максимального значения.

Чувствительностью называется величина, равная отношению углового или линейного перемещения указателя прибора к измеряемой величине, вызвавшей это перемещение, т.е.

$$S = \frac{n}{x},$$

где x – измеряемая величина; n – перемещение (число делений шкалы).

Пример. Если вольтметр рассчитан на напряжение в 2,5 В и шкала прибора имеет $n = 50$ делений, то чувствительность прибора равна:

$$S = 50/2,5 = 20 \text{ дел/В.}$$

Цена деления C является величиной, обратной чувствительности S :

$$C = \frac{1}{S} = \frac{x}{n}.$$

В предыдущем примере $C = 0,5$ А/дел.

Пределы измерений. Значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы, называется пределом измерений этого прибора. Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерения. Необходимо помнить, что у многопредельных приборов цена деления на различных пределах будет различна, поэтому необходимо уметь определять цену деления, которая равна значению измеряемой величины, соответствующей одному делению прибора.

Пример. Амперметр с наружным шунтом имеет два предела измерений – 1,5 А и 3,0 А. Шкала имеет 150 делений. Цена деления в этих случаях будет равна $1,5:150 = 0,01$ А/дел и $3,0:150 = 0,02$ А/дел.

По принципу действия приборы могут иметь разные конструкционные системы.

Система определяется физическим явлением, которое положено в основу действия электроизмерительных приборов. Системы бывают магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, ферродинамические, индукционные, термоэлектрические, вибрационные, тепловые, детекторные, электронные, фотоэлектрические, электролитические, электростатические и др.

В наших учебных лабораториях в основном применяются измерительные приборы магнитоэлектрической и электромагнитной систем.

Магнитоэлектрическая система имеет условное обозначение \sphericalangle , которое можно найти на панели прибора. Основана эта система на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита (и-образного) и магнитного поля рамки с током. Сила этого взаимодействия прямо пропорционально зависит от силы тока в рамке, связанной со стрелочным механизмом прибора. Такая измерительная система является высокочувствительной и высокоточной, но недостатком её является подверженность внешним электромагнитным полям. Кроме того, приборы этой системы работают только в режиме постоянного тока, что обозначается на панели прибора горизонтальной прямой —.

Электромагнитная система имеет условное обозначение \S . В этой системе вместо постоянного магнита используется электромагнит, что снижает чувствительность, точность прибора, но даёт возможность использования его и в режиме постоянного, и в режиме переменного тока, что соответствует обозначению \simeq .

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются ошибки физических измерений?
2. Ошибки какого типа чаще всего встречаются в учебной физической лаборатории?

3. Какие измерения называются прямыми?
4. Как определяется абсолютная погрешность прямого измерения?
5. Что такое относительная погрешность измерения?
6. Сколько значащих цифр надо оставлять в абсолютной погрешности прямого измерения?
7. Какие измерения называются косвенными? Приведите примеры.
8. Сколько значащих цифр надо удерживать в промежуточных вычислениях?

РАЗДЕЛ 1. МЕХАНИКА

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТЕ 1.1

В работе изучается равноускоренное движение системы связанных грузов. Движение грузов описывается основным уравнением динамики (II законом Ньютона)

$$m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F}_i, \quad (1.1)$$

где m – масса тела, \vec{a} – ускорение этого тела, $\sum \vec{F}_i$ – векторная сумма сил, действующих на тело.

Машина Атвуда (рисунок 1.1) представляет собой блок, через который перекинута нить с грузами массой m_1 и m_2 . Если массы грузов имеют одинаковые значения, система находится в безразличном равновесии, и грузы неподвижны. В случае, если массы грузов отличаются на величину Δm , система придет в движение и грузы начнут перемещаться с ускорением a .

Запишем уравнение динамики в проекции на вертикальную ось для первого груза:

$$-m_1 \cdot a = T - m_1 g \quad (1.2)$$

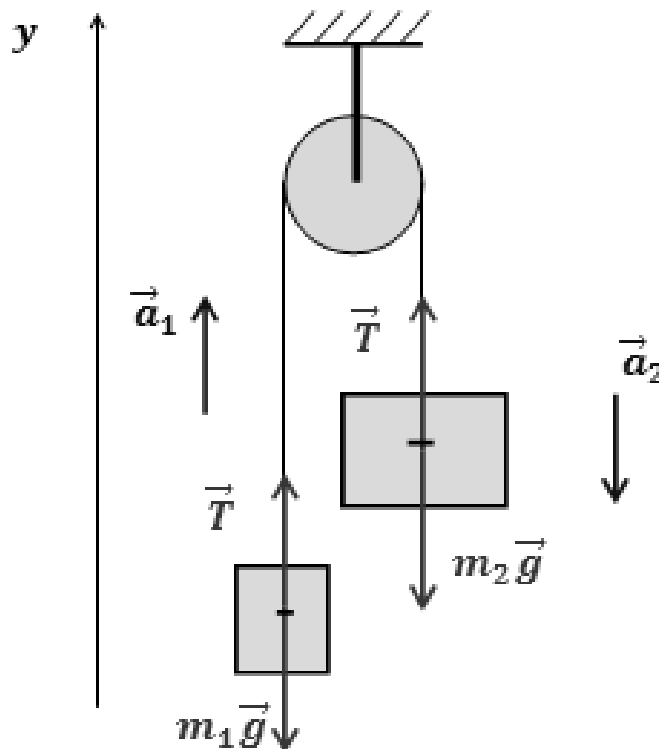


Рисунок 1.1 – Связанные тела

Запишем уравнение динамики в проекции на вертикальную ось для второго груза:

$$m_2 \cdot a = T - m_2 \cdot g \quad (1.3)$$

Вычитая из уравнения (1.2) уравнение (1.3) и учитывая, что натяжение нити для первого и второго груза одинаковы в приближении невесомости блока, получим выражение:

$$(m_1 + m_2) \cdot a = (m_1 - m_2) \cdot g \quad (1.4)$$

Отсюда следует:

$$g = \frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} \cdot a \quad (1.5)$$

Для определения ускорения a используем законы равноускоренного прямолинейного движения. Пройденный путь определяется формулой:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (1.6)$$

При движении с нулевой начальной скоростью $v_0 = 0$

$$s = \frac{at^2}{2}$$

Тогда экспериментальное значение ускорения связанных тел можно определить по формуле:

$$a_{\text{экс}} = \frac{2s}{t^2} \quad (1.7)$$

РАБОТА 1.1 ИЗУЧЕНИЕ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА

Цель работы: изучение законов прямолинейного равноускоренного движения грузов в поле тяготения Земли.

Описание установки

Машина Атвуда (рисунок 1.2) состоит из легкого блока (2) в виде сплошного диска, способного вращаться вокруг неподвижной горизонтальной оси, расположенной в верхней части вертикальной стойки (1). На стойке нанесена шкала с сантиметровыми отметками. Через блок перекинута легкая нить, на концах которой закреплены грузики в виде цилиндров (3,4) разной массы m_1 и m_2 . В левой верхней части стойки установлено электромагнитное пусковое устройство, позволяющее фиксировать положение грузиков. При освобождении нити грузики приходят в движение, одновременно включается электронный секундомер. Пройдя путь S , правый цилиндр попадает своим нижним основанием в кронштейн (6), на котором установлен фотодатчик, останавливающий секундомер.

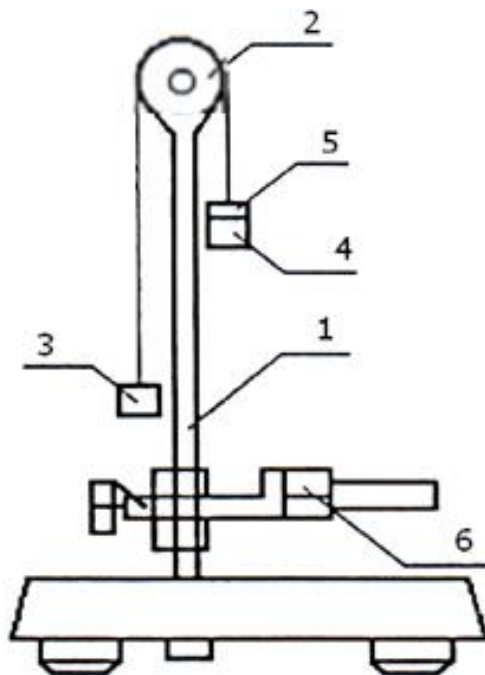


Рисунок 1.2 – Внешний вид машины Атвуда

Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть шнур питания прибора.
2. Перекинуть нить с двумя грузами через блок и убедиться, что система находится в равновесии.
3. Установить кронштейн с фотодатчиком в нижней части шкалы вертикальной стойки так, чтобы плоскость кронштейна, окрашенная в красный цвет, совпала с одной из рисок шкалы, а правый груз при движении вниз проходил в центре рабочего окна фотодатчика.
4. Переместить нить с грузами так, чтобы правый груз занял верхнее положение.
5. Нажать на кнопку «СЕТЬ» секундомера, при этом должно включиться табло индикации и электромагнит, удерживающий систему в положении покоя.
- ВНИМАНИЕ! Для предотвращения перегрева катушки электромагнитного тормоза – время его непрерывной работы не должно превышать 15 секунд, затем необходим перерыв не менее, чем на 5 секунд.**
6. Положить на правый груз один из перегрузков, указанных преподавателем.
7. Нажать кнопку «Старт» секундомера. При этом происходит растормаживание электромагнитного тормоза. Правый груз начинает двигаться вниз, а таймер секундомера начинает отсчет времени.
8. При пересечении правым грузом оптической оси фотодатчика отсчет времени прекратится. Записать показания таймера, т.е. время движения грузов.
9. При помощи визира по шкале стойки определить пройденный грузом путь, как расстояние от нижней плоскости груза в верхнем положении груза до оптической оси фотодатчика.
10. Повторить опыт не менее 3 раз.
11. Результаты измерений записать в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений и вычислений

№ опыта	$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$s, \text{м}$	$t, \text{с}$	$a, \text{м/с}^2$	$a_{cp}, \text{м/с}^2$	$g_{cp}, \text{м/с}^2$	$\delta g, \%$	$\Delta g, \text{м/с}^2$
1									
2									
3									

12. Зная пройденный путь и время движения, определить значение ускорения по a формуле (1.7).

13. Определить среднее значение ускорений a_{cp} по формуле:

$$a_{cp} = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3}. \quad (1.8)$$

14. Рассчитать ускорение свободного падения по формуле (1.5).

15. Вычислить относительную погрешность по формуле:

$$\delta g = \frac{m_1 \Delta m_1 + m_2 \Delta m_2}{(m_1^2 - m_2^2)} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{2\Delta t}{t}. \quad (1.9)$$

16. Вычислить абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta g = g \cdot \delta g. \quad (1.10)$$

17. Записать окончательный результат в виде:

$$g = (g_{cp} \pm \Delta g_{cp}) \text{ м/с}^2 \text{ при } \delta g = \dots \%$$

18. Сравнить теоретическое и экспериментальное значения ускорения свободного падения, определив величину

$$\varepsilon = \frac{|g_{cp} - g_{теор}|}{g_{теор}} \cdot 100\%$$

Контрольные вопросы

1. Что такое траектория, путь, перемещение материальной точки?
2. Что называется скоростью?
3. Что называется ускорением?
4. Какое движение называется равномерным?
5. Какое движение называется равноускоренным?
6. Как зависит скорость от времени при прямолинейном равноускоренном движении?

7. Как зависит пройденный путь от времени при прямолинейном равноускоренном движении?
8. Сформулируйте законы Ньютона.
9. Объясните ход работы.
10. Выведите формулу для определения ускорения свободного падения.
11. Какие причины влияют на расхождение теоретического и экспериментального значений ускорения свободного падения?

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТАМ 1.2а И 1.2б

Под действием внешних сил твердые тела испытывают деформации, т.е. изменяют свою форму и объем. Существует два типа деформации: упругая и пластическая. Деформация называется упругой, если после прекращения действия внешних сил тело принимает первоначальные размеры и форму. Деформация имеет упругий характер, в случае, если внешняя сила не превосходит определенного значения, которое называется пределом упругости. При превышении этого предела деформация становится пластической. Пластической называется деформация, которая сохраняется в теле после прекращения действия внешних сил на тело.

В зависимости от того, как приложены силы к телу, различают следующие виды деформации: растяжение, сжатие, изгиб, кручение и сдвиг.

Деформация приводит к возникновению в теле силы упругости, которая уравнивает внешние силы, вызвавшие деформацию. Силы упругости обусловлены взаимодействием между частицами (молекулами и атомами) тела. Вследствие взаимодействия отдельных частей твердого тела друг с другом действие приложенной к нему силы передается во все точки тела, и все оно оказывается в напряженном состоянии. В связи с этим вводится понятие нормального напряжения, т.е. величины, численно равной силе упругости, действующей на единицу площади поперечного сечения тела:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1.11)$$

где σ – нормальное напряжение, Па.

Если к концу однородного стержня (рисунок 1.1), площадь поперечного сечения которого равна S , приложить направленную вдоль оси растягивающую силу \vec{F} , то первоначальная длина стержня L изменяется на $\Delta\ell$, которая называется абсолютным удлинением стержня.

Стержень испытывает упругую деформацию одностороннего растяжения ($\Delta\ell$ положительно).

Количественной мерой, характеризующей степень деформации тела, является его *относительное удлинение* ε , равное отношению абсолютного удлинения $\Delta\ell$ к первоначальной длине стержня L :

$$\varepsilon = \frac{\Delta \ell}{L} \quad (1.12)$$

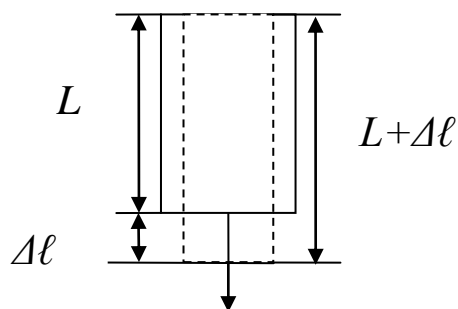


Рисунок 1.3 – Деформация стержня под действием силы

В пределах упругих деформаций нормальное напряжение σ прямо пропорционально относительному удлинению ε (закон Гука):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1.13)$$

где E – коэффициент пропорциональности, называемый модулем Юнга (модулем упругости) материала образца.

Модуль Юнга характеризует упругие свойства материала, измеряется в паскалях (Па). Формально физический смысл модуля Юнга можно определить следующим образом. Модуль Юнга численно равен такому внутреннему напряжению, при котором длина стержня может измениться в два раза (на самом деле стержень испытывает разрыв гораздо раньше, чем его длина удвоится). Для металлов модуль Юнга достигает значений 10^{10} – 10^{11} Па. Из (1.3) с учетом (1.1) и (1.2) модуль Юнга:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{S \cdot \varepsilon} = \frac{F \cdot L}{S \cdot \Delta \ell}. \quad (1.14)$$

Все вышеизложенное остается справедливым и для деформации одностороннего сжатия.

Изучение деформации изгиба показывает, что верхняя часть стержня удлиняется, нижняя часть стержня укорачивается, средняя часть почти не оказывает сопротивления изгибу. Это обстоятельство применяется в технике (стержни, работающие на изгиб, делают полыми) и находит отражение в природе (стебли злаковых растений, кости птиц имеют трубчатое строение и т.п.). Все виды деформации могут быть сведены к одновременно происходящим деформациям растяжения или сжатия и сдвига. Зависимость нормального напряжения σ от относительного удлинения ε (диаграмма напряжений) изображена на рисунке 1.2. При малых деформациях (от 0 до ε_n) выполняется закон Гука; это практически линейный участок $0a$. Максимальное напряжение σ_n , соответствующее этому участку, называется пределом пропорциональности.

Предел упругости σ_y – это максимальное напряжение, при котором еще сохраняются упругие свойства тела. На участке *ab* деформация нелинейная, но еще упругая (обычно этот участок очень малый: σ_y больше σ_n на доли процента). При напряжениях, больших σ_y , деформация становится пластической: в теле после снятия нагрузки наблюдается остаточная деформация ϵ_0 . При напряжениях σ_T удлинение нарастает практически без увеличения нагрузки. Это область текучести материала (участок *cd*). Материалы, для которых область текучести значительна, называются вязкими, для которых она практически отсутствует – хрупкими. На участке *de* происходит некоторое упрочнение образца. После достижения максимального значения σ_d – предела прочности – напряжение резко уменьшается, и образец разрушается (точка *f* на графике).

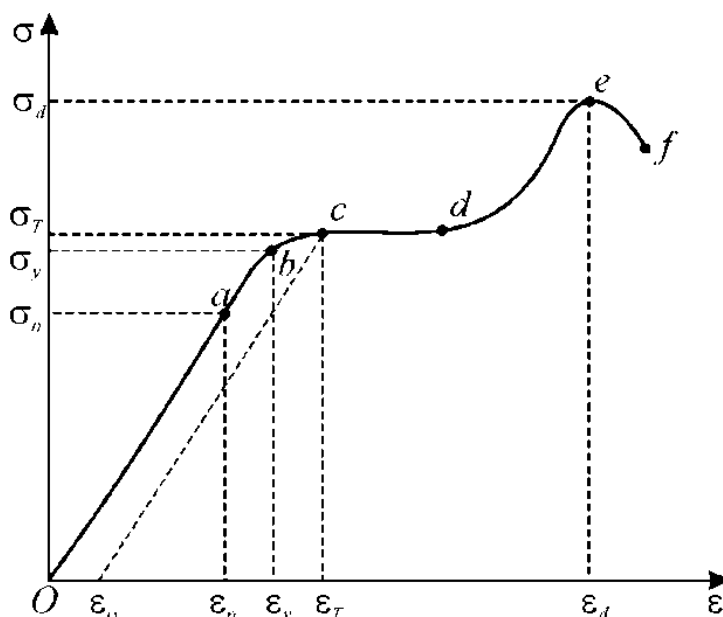


Рисунок 1.4 – Зависимость нормального напряжения σ от относительного удлинения ϵ

Диаграмма напряжений для реальных твердых тел зависит от различных факторов. Одно и то же твердое тело может при кратковременном действии сил проявлять себя как хрупкое, а при длительных воздействиях являться текучим.

РАБОТА 1.2а ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ПО РАСТЯЖЕНИЮ ПРОВОЛОКИ

Цель работы: исследование малого упругого продольного растяжения проволоки и определение модуля Юнга материала проволоки.

Описание лабораторной установки

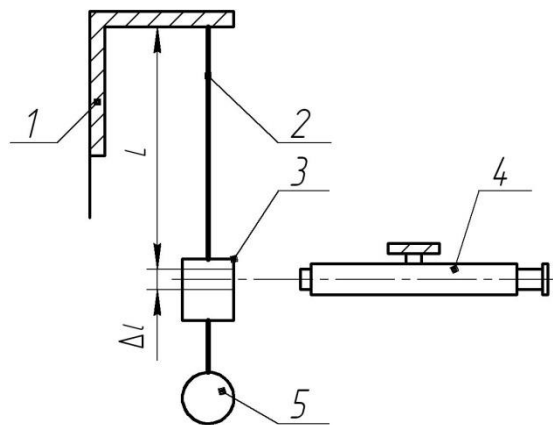


Рисунок 1.5 – Схема экспериментальной установки

В экспериментальной установке, изображенной на рисунке 1.5. металлическая проволока 2 одним концом неподвижно укреплена в верхнем кронштейне 1 прибора. Нижний конец закреплен в оправе 3, в середине которой имеется матовое стекло. На стекло нанесена горизонтальная черта. Эту черту и ее перемещение рассматривают в зрительную трубу 4, которая имеет вертикальную шкалу. Нижний конец проволоки нагружен постоянным грузом 5 для натяжения проволоки.

Методика определения модуля Юнга по растяжению проволоки

1. Осторожно и медленно фокусируя зрительную трубу, добиться отчетливого изображения горизонтальной черты на шкале.
2. Записать в таблицу 1.2 число делений n_0 , соответствующее начальному положению горизонтальной черты без нагрузки.
3. Нагрузить проволоку последовательно грузом весом в 1,96 Н; 4,9 Н; 9,8Н и произвести отчеты положения n горизонтальной черты на шкале соответственно.
4. Вычислить удлинение проволоки по формуле:

$$\Delta \ell = k \cdot (n - n_0), \quad (1.15)$$

где k – цена деления шкалы ($k = 1,35 \times 10^{-5}$ м).

5. Вычислить площадь поперечного сечения проволоки по формуле:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (1.16)$$

где d – диаметр проволоки ($d=0,7$ мм).

6. Произвести вычисление модуля Юнга для нагрузок 1,96Н; 4,9 Н; 9,8Н по рабочей формуле:

$$E = \frac{P \cdot L}{S \cdot \Delta \ell}, \quad (1.17)$$

где L – длина проволоки ($L=1,61$ м).

Таблица 1.2 – Результаты измерений и вычислений

P , Н	n_0 , дел	n , дел.	$\Delta \ell$, м	S , м ²	L , м	E , Па	E_{cp} , Па	ΔE , Па	δE , %
1,96									
4,9									
9,8									

7. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу 1.2

8. Вычислить относительную погрешность по формуле (1.18). Для всех трех измерений она почти одинакова. Рекомендуется брать погрешность, соответствующую первому измерению, как максимальную.

$$\delta E = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \pi}{\pi} + 2 \frac{\Delta D}{D}. \quad (1.18)$$

Значения абсолютных погрешностей: $\Delta P = 0,005\text{Н}$, $\Delta L = 0,0005\text{м}$, $\Delta \pi = 0,0005$ (при $\pi = 3,142$), $\Delta D = 0,01 \cdot 10^{-3}\text{ м}$.

9. Зная относительную погрешность, вычислить абсолютную погрешность:

$$\Delta E = E_{cp} \cdot \delta E \quad (1.19)$$

10. Записать окончательный результат в виде:

$$E = (E_{cp} \pm \Delta E) \text{ Па, при } \delta E = \dots \%$$

Контрольные вопросы

1. Что такое деформация?
2. Какая деформация тела называется упругой?
3. Что называется нормальным напряжением и в каких единицах оно измеряется в СИ?
4. Что такое относительное удлинение?
5. Сформулируйте и поясните закон Гука.
6. Объясните физический смысл модуля Юнга.
7. От чего зависит и в каких единицах измеряется модуль Юнга?
8. Какая деформация тела называется пластической?
9. Какие бывают виды деформации?
10. Дайте определение предела упругости.
11. Изложите порядок выполнения работы и запишите рабочую формулу.

РАБОТА 1.26 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ПО РАСТЯЖЕНИЮ ПРОВОЛОКИ

Цель работы: исследование малого упругого продольного растяжения проволоки и определение модуля Юнга проволоки.

Описание лабораторной установки

На рисунке 1.6 представлен внешний вид лабораторной установки. Исследуемая проволока закреплена в стойке левой опоры 2 станины 1, пропущена через отверстие в пластине с индикатором 6 и зацеплена за крюк динамометра 12. Скоба динамометра цепляется за стойку 13 каретки 8. Положение каретки 8 можно регулировать маховиком 14.

ВНИМАНИЕ. Не допускается перенапряжение проволоки, иначе в проволоке появится пластическая деформация.

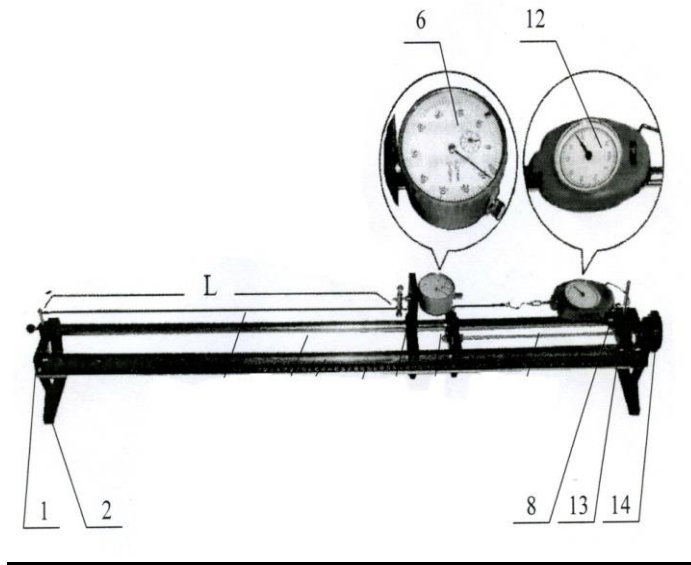


Рисунок 1.6 – Внешний вид экспериментальной установки

Методика определения модуля Юнга по растяжению проволоки

1. Вращая маховик 14, натянуть проволоку.
2. Измерить практическую длину проволоки L (рисунок 1.6) по шкале станины.
3. По шкале индикатора определить начальное значение линейного удлинения проволоки ℓ_1 . По шкале динамометра определить начальное значение силы натяжения проволоки F_1 .
4. Вращением маховика 14 увеличить силу натяжения проволоки.
5. Определить значение линейного удлинения проволоки ℓ_2 и значение силы натяжения F_2 проволоки. Измерения произвести 3 раза при различных натяжениях проволоки.
6. Определить линейное удлинение проволоки по формуле:

$$\Delta \ell = \ell_2 - \ell_1. \quad (1.20)$$

7. Определить силу натяжения проволоки по формуле:

$$F = F_2 - F_1 \quad (1.21)$$

8. Вычислить площадь сечения проволоки

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1.22)$$

где d – диаметр проволоки.

9. Вычислить модуль Юнга по формуле:

$$E = \frac{FL}{S\Delta\ell} \quad (1.23)$$

10. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Результаты измерений и вычислений

$L, \text{ м}$	$\ell_1, \text{ м}$	$\ell_2, \text{ м}$	$\Delta\ell, \text{ м}$	$F_1, \text{ Н}$	$F_2, \text{ Н}$	$F, \text{ Н}$	$E, \text{ Па}$	$E_{cp}, \text{ Па}$	$\Delta E, \text{ Па}$	$\delta E, \%$

11. Определить относительную погрешность по формуле:

$$\delta E = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \pi}{\pi} + 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta(\Delta\ell)}{\Delta\ell}.$$

Значения абсолютных погрешностей: $\Delta F = 0,005 \text{ Н}$, $\Delta L = 0,0005 \text{ м}$, $\Delta\ell = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $\Delta\pi = 0,0005$, $\Delta D = 10^{-5} \text{ м}$.

12. Зная относительную погрешность, вычислить абсолютную погрешность:

$$\Delta E = E_{cp} \cdot \delta E$$

13. По окончании работы проволоку оставить без нагрузки.

14. Записать окончательный результат в виде:

$$E = (E_{cp} \pm \Delta E) \text{ Па, при } \delta E = \dots \%$$

Контрольные вопросы

1. Что такое деформация?
2. Какая деформация тела называется упругой?
3. Что называется нормальным напряжением и в каких единицах оно измеряется в СИ?
4. Что такое относительное удлинение?

5. Сформулируйте и поясните закон Гука.
6. Объясните физический смысл модуля Юнга.
7. От чего зависит и в каких единицах измеряется модуль Юнга?
8. Какая деформация тела называется пластической?
9. Какие бывают виды деформации?
10. Дайте определение предела упругости.
11. Изложите порядок выполнения работы и запишите рабочие формулы.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТЕ 1.3

При подготовке к этой работе необходимо изучить теоретическое введение к работам 1.2а и 1.2б.

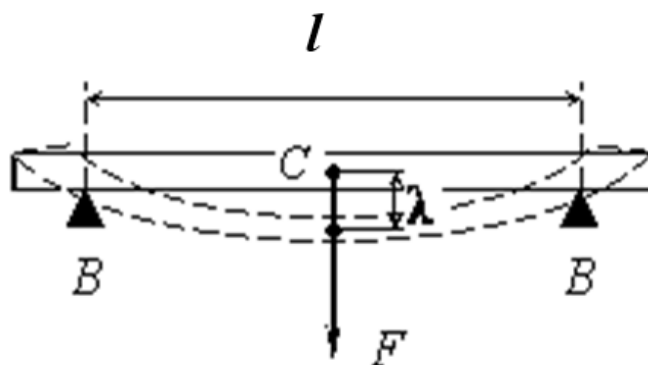


Рисунок 1.7 – Деформация стержня

В работе исследуется деформация изгиба стержня с прямоугольным поперечным сечением. Стержень имеет две точки опоры В (рис.1.7), сила прикладывается в середине расстояния между опорами, равного l . Под действием силы F стержень прогибается. Деформация изгиба стержня, лежащего на двух опорах, сводится к комбинации деформаций растяжения и сжатия. При изгибе стержня, его прогиб пропорционален приложенной силе F , если приложенная нагрузка не превышает предела пропорциональности. При этом нижняя сторона стержня испытывает деформацию растяжения, а верхняя – сжатия, а средняя часть практически не деформируется. Поэтому жесткость полого стержня почти такая же, как у сплошного стержня, а масса значительно меньше. Это свойство эксплуатируется в технике.

Деформация изгиба характеризуется стрелой прогиба. Стрела прогиба λ – это расстояние, на которое опускается точка С (рис.1.7) приложения силы F , действующей на стержень. Стрела прогиба зависит от приложенной силы F , расстояния между опорами, формы поперечного сечения стержня и модуля Юнга материала стержня и определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{F \cdot \ell^3}{4 \cdot E \cdot b \cdot d^3}, \quad (1.24)$$

где l – расстояние между опорами, b – ширина стержня, d – толщина стержня (нагрузка действует параллельно этой стороне сечения), E – модуль Юнга.

Выразим из формулы (1.24) модуль Юнга через отношение стрелы прогиба к нагрузке (λ/F):

$$E = \frac{\ell^3}{4 \cdot (\lambda/F) \cdot b \cdot d^3} \quad (1.25)$$

Отношение (λ/F) в (1.25) не зависит от величины нагрузки. Поэтому на практике сначала находят среднее значение $(\lambda/F)_{\text{ср}}$ из пяти результатов измерений (λ/F), соответствующих пяти разным нагрузкам F . Затем по среднему значению $(\lambda/F)_{\text{ср}}$ определяют модуль Юнга:

$$E = \frac{\ell^3}{4 \cdot (\lambda/F)_{\text{ср}} \cdot b \cdot d^3} \quad (1.26)$$

РАБОТА 1.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ПО ПРОГИБУ СТЕРЖНЯ

Цель работы: изучение упругих деформаций, определение модуля Юнга металла методом изгиба стержня.

Описание установки

В экспериментальной установке, показанной на рисунке 1.8, прямой горизонтальный стержень 1 прямоугольного сечения лежит на двух опорах 2 и 3. Посередине стержня укреплен металлическая обойма 4, к которой подвешен груз 5, вызывающий прогиб стержня. Над обоймой 4 находится вертикально расположенный микрометр 6. Касаясь острием микрометра поверхности обоймы 4, по шкале микрометра снимают отсчет, соответствующий прогибу стержня при данной нагрузке. Момент касания определяется по вспышке электрической лампы 7.

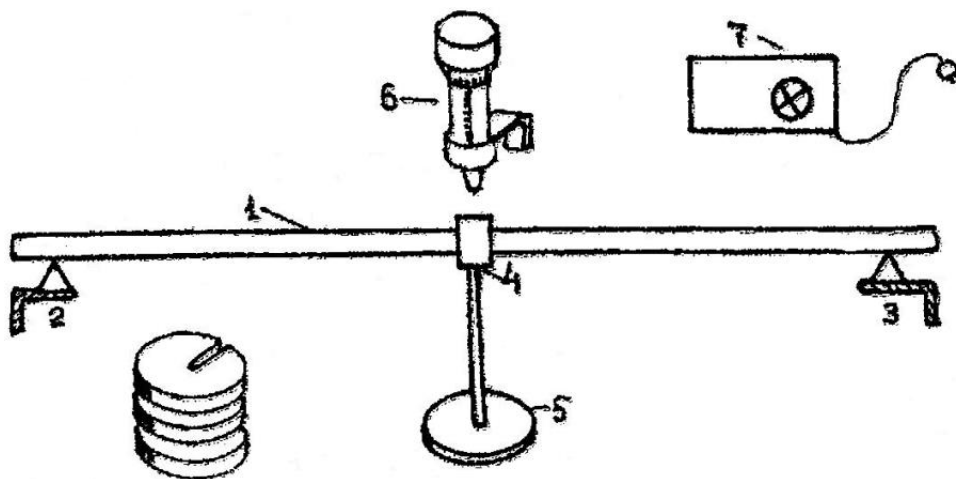


Рисунок 1.8 – Вид экспериментальной установки

ВНИМАНИЕ. При работе с установкой приходится иметь дело с грузами. Будьте внимательны и следите, чтобы грузы не упали на ноги, на руки и не причинили травмы.

Микрометр представляет собой точный прибор, требующий осторожного обращения. Не допускайте резких толчков и ударов этого прибора.

Методика определения модуля Юнга по прогибу стержня

1. Произвести отсчет по микрометру в отсутствие нагрузки n_0 (начальный отсчет).
2. Последовательно увеличивать нагрузку от 4,9 Н до 24,5 Н, прибавляя по 4,9 Н, произвести соответствующие отсчеты по микрометру n . Получив отсчет при предельной нагрузке (24,5 Н), уменьшать ее до нуля в обратном порядке (разгружать), вновь делая отсчеты по микрометру n .
3. Найти среднее арифметическое между показаниями микрометра при нагрузке и разгрузке стержня для каждого значения F .
4. Рассчитать длину прогиба стержня для каждого груза по формуле:

$$\lambda = n_{0\text{ ср}} - n_{\text{ср}} \quad (1.27)$$

5. Вычислить (λ/F) для каждого груза. Вычислить $(\lambda/F)_{\text{ср}}$ как среднее арифметическое (λ/F) .
6. Измерить штангенциркулем ширину b стержня и его высоту d . Длина стержня l указана на рабочем месте.
7. Рассчитать модуль Юнга по формуле (1.26).
8. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Результаты измерений и вычислений

$F, \text{ Н}$	Отсчеты, мм			$\lambda, \text{ м}$	$(\lambda/F), \text{ м/Н}$	$(\lambda/F)_{\text{ср}}, \text{ м/Н}$	$\Delta(\lambda/F), \text{ м/Н}$	$\Delta(\lambda/F)_{\text{ср}}, \text{ м/Н}$	$E, \text{ Па}$	$\delta E, \%$
	нагр.	разгр.	сред.							
0					—		—			
4,9										
9,8										
14,7										
19,6										
24,5										

9. Вычислить относительную погрешность измерений по формуле:

$$\delta E = \frac{(\Delta(\lambda/F))_{\text{ср}}}{(\lambda/F)_{\text{ср}}} + \frac{\Delta b}{b} + 3 \frac{\Delta d}{d} + 3 \frac{\Delta l}{l}$$

Значения абсолютных погрешностей: $\Delta b = \Delta d = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$; $\Delta l = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

10. Зная относительную погрешность, вычислить абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta E = E \cdot \delta E$$

11. Записать окончательный результат в виде:

$$E = (E \pm \Delta E) \text{ Па, при } \delta E = \%.$$

Контрольные вопросы

1. Что такое деформация?
2. Какая деформация тела называется упругой?
3. Что называется нормальным напряжением, и в каких единицах оно измеряется в СИ?
4. Что такое относительное удлинение?
5. Сформулируйте и поясните закон Гука.
6. Объясните физический смысл модуля Юнга.
7. От чего зависит и в каких единицах измеряется модуль Юнга?
8. Какая деформация тела называется пластической?
9. Какие бывают виды деформации?
10. Дайте определение предела упругости.
11. Что такое стрела прогиба и от чего она зависит?
12. Изложите порядок выполнения работы и запишите рабочие формулы.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТЕ 1.4

Импульсом материальной точки называется векторная величина, равная произведению массы материальной точки на ее скорость: $\vec{P} = m \cdot \vec{V}$.

Импульсом системы тел называется векторная сумма импульсов всех тел, входящих в систему: $\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{V}_i$.

Замкнутой системой тел называется такая система, на которую не действуют внешние силы или векторная сумма всех внешних сил, действующих на нее, равна нулю. В замкнутой системе тел выполняется закон сохранения импульса: импульс замкнутой системы тел является величиной постоянной

$$\vec{P} \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{V}_i = \text{const}, \text{ если } \sum \vec{F} = 0$$

Ударом называется кратковременное взаимодействие двух тел, в результате которого за бесконечно малый промежуток времени происходит конечное изменение импульса. Удар называется центральным, если скорости соударяющихся тел до удара направлены по линии, соединяющей центры тел.

При ударе взаимодействие длится очень короткий промежуток времени $\Delta t \rightarrow 0$ и возникают большие внутренние силы взаимодействия $F_{\text{внутр.}} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} \rightarrow \infty$, так что внешними силами можно пренебречь и систему

соударяющихся тел считать замкнутой. Следовательно, при ударе выполняется закон сохранения импульса.

В зависимости от упругих свойств взаимодействующих тел соударения могут протекать весьма различно. Принято выделять два крайних случая: абсолютно упругий и абсолютно неупругий удары.

Абсолютно упругим называется удар, при котором после взаимодействия тела полностью восстанавливают свою форму. Таких ударов в природе не существует, так как всегда часть энергии затрачивается на необратимую деформацию тел. Однако для некоторых тел, например, стальных шаров, потерями механической энергии при столкновении можно пренебречь и считать удар абсолютно упругим. При абсолютно упругом ударе, кроме импульса, сохраняется и полная механическая энергия.

Полной механической энергией называется сумма кинетической и потенциальной энергий. Кинетическая энергия – это энергия движения, она вычисляется по формуле:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1.28)$$

Потенциальная энергия – это энергия взаимодействия. При разных типах взаимодействия формулы для вычисления потенциальной энергии разные. В поле тяжести Земли потенциальная энергия вычисляется по формуле:

$$E_n = m \cdot g \cdot h \quad (1.29)$$

В замкнутой механической системе, в которой действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется:

$$E_k + E_n = const \quad (1.30)$$

В случае центрального абсолютно упругого удара двух шаров с массами m_1, m_2 и скоростями \vec{V}_1, \vec{V}_2 до удара и \vec{U}_1, \vec{U}_2 после удара можно записать законы сохранения импульса и механической энергии

$$m_1 \cdot \vec{V}_1 + m_2 \cdot \vec{V}_2 = m_1 \cdot \vec{U}_1 + m_2 \cdot \vec{U}_2, \quad (1.31)$$

$$\frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) \cdot u^2}{2} \quad (1.32)$$

Для экспериментальной проверки закона сохранения импульса необходимо определить скорости шаров до удара и скорости шаров после их соударения. На установке правый шар с массой m_1 отводят от положения равновесия на угол α_0 (рис. 1.9) и отпускают. Используем закон сохранения энергии для определения скорости первого шара:

$$m_1 \cdot g \cdot h = \frac{m_1 \cdot v_1^2}{2} \quad (1.33)$$

Высоту h можно выразить через угол отклонения α_0 :

$$h = l - l \cdot \cos \alpha_0 = l \cdot (1 - \cos \alpha_0) = 2 \cdot l \cdot \sin^2 \left(\frac{\alpha_0}{2} \right)$$

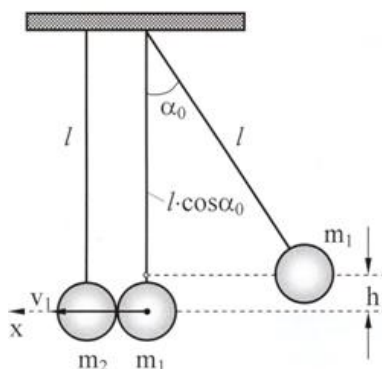


Рисунок 1.9 – Схема упругого удара шаров

Подставляя полученное выражение для h в уравнение (1.33), найдем скорость первого шара до удара:

$$v_1 = 2 \cdot \sqrt{g \cdot l} \sin \frac{\alpha_0}{2} \quad (1.34)$$

Левый шар массой m_2 висит неподвижно ($v_2 = 0$), его начальный импульс равен нулю. Закон сохранения импульса в проекции на ось X в этом случае будет иметь вид:

$$m_1 \cdot v_1 = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2. \quad (1.35)$$

Величину скорости шаров $\overline{U}_1, \overline{U}_2$ после удара найдем по углам отскока правого α_1 и левого α_2 шаров:

$$u_1 = 2 \cdot \sqrt{g \cdot l} \sin \frac{\alpha_1}{2} \quad u_2 = 2 \cdot \sqrt{g \cdot l} \cdot \sin \frac{\alpha_2}{2} \quad (1.36)$$

Подставив выражения для скоростей (1.34) и (1.36) в закон сохранения импульса (1.35), получим выражение:

$$m_1 \cdot \sin \frac{\alpha_0}{2} = m_1 \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} + m_2 \cdot \sin \frac{\alpha_2}{2} \quad (1.37)$$

Получим выражение для кинетической энергии первого шара E_{k1} до удара и кинетических энергий двух шаров E'_{k1} и E'_{k2} после удара, подставив в формулу (1.28) выражения (1.34) и (1.36)

$$\begin{aligned}
E_{k1} &= \frac{m_1 \left(2\sqrt{gl} \cdot \sin \frac{\alpha_0}{2} \right)^2}{2} = 2m_1 gl \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} \\
E'_{k1} &= \frac{m_1 \left(2\sqrt{gl} \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \right)^2}{2} = 2m_1 gl \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} \\
E'_{k2} &= \frac{m_2 \left(2\sqrt{gl} \cdot \sin \frac{\alpha_2}{2} \right)^2}{2} = 2m_2 gl \sin^2 \frac{\alpha_2}{2}
\end{aligned}
\tag{1.38}$$

РАБОТА 1.4 ИЗУЧЕНИЕ УПРУГОГО УДАРА ШАРОВ

Цель работы: экспериментальная проверка закона сохранения импульса при упругом ударе.

Описание установки

Внешний вид установки представлен на рисунке 1.10. Установка состоит из двух шаров 1 и 2 (рисунок 1.10), подвешенных на нерастяжимых нитях длиной l .

Электромагнит 3 предназначен для фиксации отклоненного положения правого шара. Отклонение шаров от положения равновесия отсчитывается по шкале 4. Электронный блок 5 включает и выключает магнит. В установке используются металлические шары из алюминия, латуни и стали.

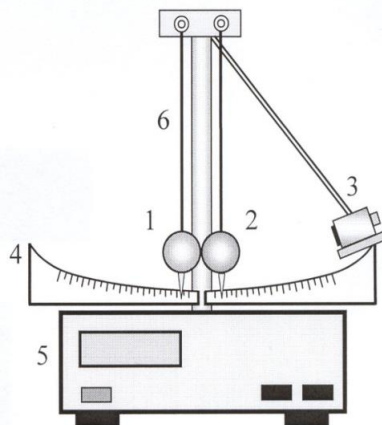


Рисунок 1.10 – Внешний вид установки для изучения удара шаров

Методика изучения упругого удара шаров

1. Вставить шары 1 и 2 в скобы подвеса.
2. Нажать кнопку «Сеть» секундомера. При этом должны включиться табло индикации и электромагнит.
3. Отвести правый шар на угол α_0 , равный примерно 14° , и зафиксировать его с помощью электромагнита.

4. Нажать кнопку «Старт». При этом произойдет удар шаров. При помощи шкалы 4 визуально определить углы отскока α_1 и α_2 .

5. Результаты измерений занести в таблицу 1.5.

Таблица 1.5 – Результаты измерений и вычислений

$l, \text{ м}$	α_0	α_1	α_2	$v_1, \text{ м/с}$	$U_1, \text{ м/с}$	$U_2, \text{ м/с}$	$E_{k1}, \text{ Дж}$	$E'_{k1}, \text{ Дж}$	$E'_{k2}, \text{ Дж}$	$E, \text{ Дж}$

6. Найти скорость первого шара до удара V_1 по формуле (1.34).

7. Найти скорости обоих шаров U_1 и U_2 после столкновения по формулам (1.36).

8. Проверить выполнение закона сохранения импульса (1.37).

9. Вычислить по формулам (1.38) кинетические энергии шаров до удара и после ударов.

10. Определить потерю энергии W при частично упругом соударении:

$$W = E_{k1} - E'_{k1} - E'_{k2} \quad (1.39)$$

11. Относительную погрешность определения кинетических энергий рассчитать по формуле:

$$\delta E_k = \frac{\Delta m}{m_1} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta l}{l} + 2 \left| \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right| \cdot \Delta \alpha \quad (1.40)$$

12. Вычислить абсолютную погрешность:

$$\Delta E_k = E_k \cdot \delta E_k$$

13. Записать окончательный результат для трех значений кинетической энергии в виде:

$$E_k = (E_k)_{cp} \pm \Delta E_k, \text{ при } \delta E_k = \dots \%$$

Таблица 1.6 – Массы шаров

Шар	Масса, г
Стальной	106
Латунный	120
Латунный со вставкой	118
Алюминиевый	39,5
Алюминиевый со вставкой	43

Контрольные вопросы

1. Что называется импульсом?
2. Что называется замкнутой механической системой?

3. Дать определение кинетической энергии.
4. Дать определение потенциальной энергии.
5. Написать закон сохранения импульса.
6. Сформулировать закон сохранения механической энергии.
7. Что называется ударом?
8. Какой удар называется центральным?
9. Какой удар называется абсолютно упругим?
10. Как определить скорость шара по углу отскока?

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТАМ 1.5а И 1.5б

Вращательным движением абсолютно твердого тела называется движение, при котором все его материальные точки описывают окружности, центры которых лежат на одной прямой, называемой осью вращения.

Основное уравнение динамики для твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси, имеет вид:

$$\vec{M} = J \cdot \vec{\varepsilon}, \quad (1.41)$$

где M – момент силы, действующей на тело; ε – угловое ускорение;
 J – момент инерции тела относительно оси вращения.

Из формулы (1.10) следует, что угловое ускорение сообщаемое телу вращающим моментом зависит от момента инерции тела: чем больше момент инерции, тем меньше угловое ускорение, и наоборот. Мгновенное угловое ускорение равно первой производной по времени от угловой скорости:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

Линейное и угловое ускорения связаны соотношением: $a = \varepsilon \cdot R$,

где R – радиус окружности.

Момент инерции является основной физической величиной, характеризующей инертные свойства твердого тела при вращательном движении, подобно тому, как масса характеризует инертные свойства тела при поступательном движении. Момент инерции материальной точки относительно оси равен произведению массы m точки на квадрат расстояния r от точки до оси вращения:

$$J = m \cdot r^2 \quad (1.42)$$

Момент инерции измеряется в $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент инерции твердого тела равен сумме моментов инерции материальных точек, из которых состоит это тело:

$$J = \sum_{i=1}^n J_i = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2 \quad (1.43)$$

В отличие от массы, момент инерции данного тела может иметь бесконечное множество значений в соответствии с множеством осей вращения.

Если плотность тела во всем объеме постоянна, т.е. тело однородно, и если тело имеет правильную геометрическую форму, то вычисление моментов инерции относительно главных осей (проходящих через центр масс) можно осуществить при помощи интегрирования.

Приведем формулы для расчета момента инерции однородных тел геометрически правильной формы относительно оси симметрии.

1. Момент инерции тонкого стержня длиной l :

$$J_{cm} = \frac{1}{12} \cdot m \cdot l^2$$

2. Момент инерции диска:

$$J_{д} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2$$

3. Момент инерции шара:

$$J_{ш} = \frac{2}{5} \cdot m \cdot R^2$$

4. Момент инерции толстостенного кольца радиусами R_1 и R_2 :

$$J_{TK} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (R_1^2 + R_2^2)$$

5. Момент инерции тонкостенного кольца (обруча):

$$J_{об} = m \cdot R^2$$

Если известен момент инерции тела относительно главной оси, то можно определить момент инерции относительно любой другой оси, параллельной данной, по теореме Штейнера:

$$J = J_C + m a^2, \quad (1.44)$$

где J_C – момент инерции относительно оси OO , проходящей через центр масс C ; m – масса всего тела.

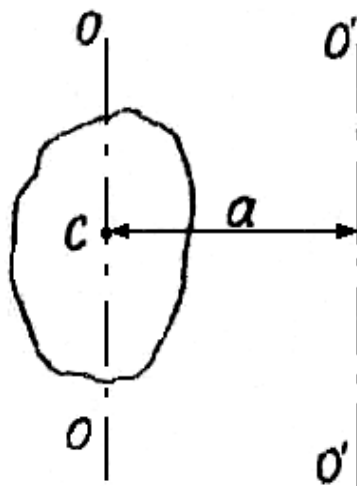


Рисунок 1.11 – Иллюстрация теоремы Штейнера

$O'O'$ – произвольная ось, относительно которой вычисляется момент инерции; a – расстояние между осями OO и $O'O'$.

Моментом силы относительно неподвижной оси называется произведение силы F на плечо ℓ :

$$M = F \cdot \ell \quad (1.45)$$

Плечом ℓ силы называется кратчайшее расстояние от оси до линии действия силы. Момент силы измеряется в Н·м.

Момент импульса относительно неподвижной оси вращения каждой точки тела равен:

$$L_i = m_i \cdot v_i \cdot r_i, \quad (1.46)$$

где r_i – радиус окружности, описываемой каждой точкой тела; v_i – ее линейная скорость

$$v_i = \omega \cdot r_i,$$

где ω – угловая скорость вращения тела.

Момент импульса твердого тела относительно оси есть сумма моментов импульса отдельных частиц:

$$L = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \omega = J \omega \quad (1.47)$$

Основное уравнение динамики вращательного движения с учетом (1.47) можно записать в виде:

$$M = \frac{dL}{dt} \quad (1.48)$$

Экспериментальный способ определения моментов инерции тел основан на наблюдении крутильных колебаний исследуемого тела.

Уравнение вращательного движения тела вокруг оси, проходящей через точку подвеса, имеет вид:

$$M = J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}, \quad (1.49)$$

где α – угол поворота тела вокруг вертикальной оси; M – момент упругой силы относительно той же оси, действующей со стороны закрученного на угол α торсиона; J – момент инерции тела.

При малых деформациях этот момент пропорционален деформации:

$$M = -k\alpha, \quad (1.50)$$

где k – коэффициент жесткости при кручении.

Уравнение (1.49) с учетом (1.50) примет вид:

$$-k\alpha = J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \quad (1.51)$$

или

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{k}{J} \alpha = 0 \quad (1.52)$$

В общем виде уравнение (1.52) можно записать:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \omega_0^2 \alpha = 0 \quad (1.53)$$

где $\omega_0^2 = \frac{k}{J}$ – собственная круговая частота гармонических колебаний.

Решением уравнения (1.53) является функция, описывающая незатухающие гармонические колебания:

$$\alpha = \alpha_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.54)$$

где α – угол поворота тела в момент времени t ; α_0 – амплитуда колебаний; $(\omega_0 t + \varphi_0)$ – фаза колебаний; φ_0 – начальная фаза.

Период колебаний тела определяется как:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{k}} \quad (1.55)$$

Цель работы: определение момента инерции кольца методом крутильных колебаний.

Описание установки

В состав экспериментальной установки, изображенной на рисунке 1.12, входят диск с кольцом, подвешенные к концу упругой проволоки, верхний конец которой жёстко закреплён. В первой части работы измеряется период крутильных колебаний одного диска (без кольца). При повороте диска на небольшой угол, в проволоке возникает вращающий момент, стремящийся вернуть систему проволока–диск в первоначальное состояние. При этом проволока и диск начнут совершать крутильные колебания, период которых будет определяться по формуле (1.55), где J – момент инерции диска относительно вертикальной оси, проходящей через его центр масс, k – коэффициент жесткости при кручении, зависящий от упругих свойств материала и геометрических параметров проволоки.

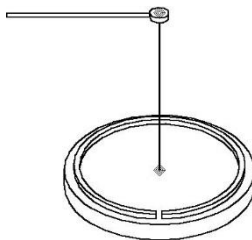


Рисунок 1.12 – Внешний вид лабораторной установки

Если на диск положить толстое кольцо с моментом инерции J_k , то период колебаний системы относительно той же оси вращения будет равен:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J + J_k}{k}}, \quad (1.56)$$

где J_k – момент инерции кольца.

Возведя равенства (1.55) и (1.56) в квадрат и поделив первое на второе, получим рабочую формулу для определения момента

инерции кольца:

$$J_{k.эсп.} = J \cdot \left[\left(\frac{T_1}{T} \right)^2 - 1 \right] \quad (1.57)$$

Момент инерции диска J определяется по формуле:

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot R^2, \quad (1.58)$$

где m – масса диска = 3,55 кг; R – радиус диска = 0,141.

Методика определения момента инерции кольца

1. Повернуть диск на небольшой угол ($8^\circ - 10^\circ$), стараясь не нарушить горизонтального и вертикального положения диска, и отпустить его. Диск

начнёт совершать крутильные колебания. Пропустить 3 – 5 колебаний и, когда диск будет находиться в одном из крайних положений, включить секундомер, отсчитать заданное преподавателем количество полных колебаний диска (n), выключить секундомер и записать время колебаний (t).

2. Повторить эксперимент не менее трёх раз.

3. Вычислить период колебаний диска по формуле:

$$T = \frac{t}{n} \quad (1.59)$$

4. Снять с кронштейна кольцо и установить его на диск так, чтобы оси кольца и диска совпали. Произвести измерение (t_1) времени для заданного преподавателем (n_1) количества колебаний. По формуле (1.59) вычислить период колебаний T_1 диска с кольцом.

5. Экспериментальные данные занести в таблицу 1.7

Таблица 1.7 – Результаты измерений и вычислений

№	n	t,с	T_i ,с	ΔT	n_1	t_1 ,с	T_{1i} ,с	ΔT_1
1								
2								
3								
Средние значения	—				—	—		

$$\Delta T = |T_{\text{ср}} - T_i|$$

6. По формулам (1.58) и (1.57) определить моменты инерции диска и кольца соответственно. Значения массы и радиуса диска указаны на установке.

7. Определить теоретическое значение момента инерции кольца по формуле:

$$J_{\text{к.теор}} = \frac{1}{2} m_{\text{к}} (R_1^2 + R_2^2), \quad (1.60)$$

где $m_{\text{к}}$ – масса кольца = 4,55 кг; R_1 и R_2 – внешний и внутренний радиусы кольца, принимаем $R_1 = 0,11$ м и $R_2 = 0,135$ м

8. Зная теоретическое и экспериментальные значения моментов инерции кольца, определить относительную погрешность по формуле:

$$\delta J_{\text{к}} = \frac{J_{\text{к.эксп.}} - J_{\text{к.теор}}}{J_{\text{к.теор}}} \cdot 100\% \quad (1.61)$$

9. Вычислить относительную погрешность экспериментального значения по формуле:

$$\delta J_{кэ} = \frac{2 \cdot \Delta T_{cp}}{T_{cp}} + \frac{2 \cdot (T_{1cp} \cdot \Delta T_{1cp} + T_{cp} \cdot \Delta T_{cp})}{T_{1cp}^2 - T_{cp}^2} + \frac{\Delta m}{m_0} + \frac{2 \cdot \Delta R}{R_0} \quad (1.62)$$

где $\Delta m = 0,005$; $\Delta R = 0,0005$

10. Сравнить результаты погрешностей, полученные по формулам (1.61) и (1.62).

11. Вычислить абсолютную погрешность по формуле:

$$\Delta J_k = J_{k\text{ ср}} \cdot \delta J_{k\text{ эксп.}}$$

12. Записать окончательный результат в виде:

$$J_{k\text{ эксп.}} = (J_{k\text{ эксп. ср}} \pm \Delta J_k) \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \text{ при } \delta J_k = \dots \%$$

Контрольные вопросы

1. Что называется моментом инерции материальной точки?
2. Что называется моментом инерции твердого тела?
3. В каких единицах измеряется момент инерции?
4. От чего зависит момент инерции тела?
5. Напишите выражения момента инерции некоторых однородных тел правильной геометрической формы относительно оси симметрии (шара, диска, кольца, стержня и т.д.).
6. Сформулировать основное уравнение динамики для твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси.
7. Что называется периодом колебаний?
8. Как период колебаний связан с частотой колебаний?
9. В чем заключается сходство и в чем состоит существенное различие между массой тела и его моментом инерции?
10. Зависит ли момент инерции от геометрической формы тела?
11. Что называется моментом силы (вращающим моментом), в каких единицах он измеряется?
12. Что называется плечом силы?

РАБОТА 1.56 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: определение методом крутильных колебаний моментов инерции твердых тел.

Теоретическое введение

Моменты инерции однородного прямоугольного параллелепипеда относительно главных осей инерции, проходящих через центры противоположных граней:

$$J_{O_1 O_1} = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2)$$

$$J_{o_2o_2} = \frac{1}{12} m(b^2 + c^2) \quad (1.63)$$

$$J_{o_3o_3} = \frac{1}{12} m(a^2 + c^2)$$

где a, b, c – длины ребер параллелепипеда.

Экспериментальный способ определения моментов инерции тел основан на наблюдении крутильных колебаний исследуемого тела.

Уравнение вращательного движения тела вокруг оси, проходящей через точку подвеса, имеет вид:

$$M = J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2}, \quad (1.64)$$

где α – угол поворота тела вокруг вертикальной оси; M – момент упругой силы относительно той же оси, действующей со стороны закрученного на угол α торсиона; J – момент инерции тела.

При малых деформациях этот момент пропорционален деформации:

$$M = -k \cdot \alpha, \quad (1.65)$$

где k – коэффициент жесткости при кручении.

Уравнение (1.64) с учетом (1.65) примет вид:

$$-k \cdot \alpha = J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} \quad (1.66)$$

или

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{k}{J} \cdot \alpha = 0 \quad (1.67)$$

В общем виде уравнение (1.67) можно записать:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega_0^2 \cdot \alpha = 0, \quad (1.68)$$

где $\omega_0^2 = \frac{k}{J}$ – собственная круговая частота гармонических колебаний.

Решением уравнения (1.68) является функция, описывающая незатухающие гармонические колебания:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.69)$$

где α – угол поворота тела в момент времени t ; α_0 – амплитуда колебаний; $(\omega_0 t + \varphi_0)$ – фаза колебаний; φ_0 – начальная фаза.

Период колебаний тела определяется как

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{J}{k}} \quad (1.70)$$

Описание установки

Установка изображена на рис. 1.13 и 1.14 и включает в себя: основание 1, вертикальную стойку 2, верхний 3 и нижний 4 кронштейны, средний кронштейн 5, набор исследуемых образцов. Основание 1 снабжено тремя регулируемыми опорами 6 и винтом–барашком 7 для фиксации стойки. Верхний и нижний кронштейны предназначены для крепления узлов подвески и натяжения торсиона 8 (стальной проволоки), с которым связана металлическая рамка 9 с грузами 10, предназначенная для установки исследуемых образцов 13. На среднем кронштейне 5, на котором нанесена шкала отсчета углов закручивания торсиона, расположен электромагнит 15, предназначенный для удерживания рамки в исходном положении и ее освобождения (при этом возникают крутильные колебания рамки вокруг вертикальной оси), фотодатчик 16, предназначенный для определения периода колебаний металлической рамки с исследуемыми образцами и без них.

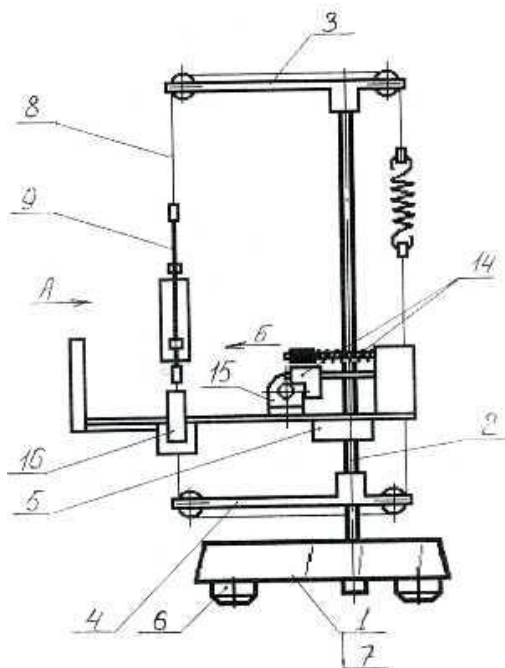


Рисунок 1.13 – Внешний вид установки

Теоретическое значение периода колебаний рамки с грузами массами M , надеваемыми сверху (рисунок 1.13), определяется по формуле:

$$T_1 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J + J_M}{k}}, \quad (1.71)$$

где J_M – моменты инерции грузов, которые могут быть вычислены по теореме Штейнера

$$J_M = 2 \cdot (J_{M_0} + M \cdot \ell^2), \quad (1.72)$$

где $\ell = 0,0525$ м – расстояние от оси вращения рамки до оси грузов; J_{M_0} – момент инерции каждого груза относительно оси вращения, проходящей через центр масс: $J_{M_0} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$.

$$J_M = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} M \cdot r^2 + M \cdot \ell^2 \right) = M \cdot (r^2 + 2 \cdot \ell^2) \quad (1.73)$$

$r = 0,015$ м – радиус каждого груза.

Возведя в квадрат обе части уравнений (1.70) и (1.71) и поделив одно уравнение на другое, получим выражение для определения момента инерции рамки без грузов:

$$\begin{aligned} \frac{T^2}{T_1^2} &= \frac{J}{J + J_M}; \\ J &= J_M \cdot \frac{T^2}{T^2 - T_1^2} = M \cdot (r^2 + 2\ell^2) \cdot \frac{T^2}{T^2 - T_1^2} \end{aligned} \quad (1.74)$$

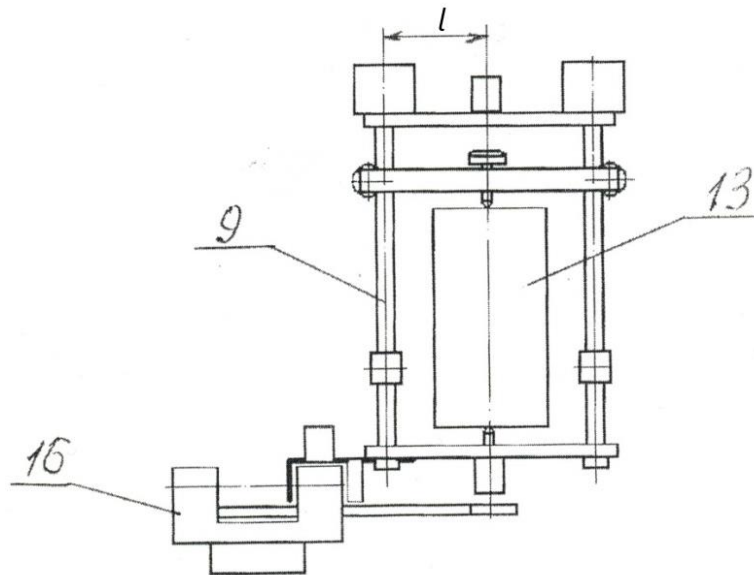


Рисунок 1.14 – Рамка с грузами и образцом

Теоретическое значение периода колебаний T_2 рамки с образцом и без грузов массами M :

$$T_2 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{J + J_0}{k}} \quad (1.75)$$

$$J_0 = \frac{1}{12} \cdot \rho \cdot a \cdot b \cdot c \cdot (b^2 + c^2), \quad (1.76)$$

где a, b, c – размеры исследуемого образца; $\rho = 8400$ кг/м³ – плотность латуни.

Возведя в квадрат уравнения (1.70) и (1.72) и поделив их почленно, получим выражение для определения момента инерции образца:

$$\frac{T^2}{T_2^2} = \frac{J}{J + J_0}$$

$$J_0 = J \cdot \left[\left(\frac{T_2}{T} \right)^2 - 1 \right] \quad (1.77)$$

Методика определения моментов инерции твердых тел

1. Отклонить рамку на угол 30° и зафиксировать с помощью электромагнита 15, нажав кнопку «Сеть» блока.

2. Нажать кнопку «Пуск» блока. По показаниям таймера блока определить значение времени n колебаний рамки. Нажать кнопку «Стоп». Определить среднее значение периода колебаний рамки по формуле:

$$T = \frac{t}{n} \quad (1.78)$$

где t – время колебаний, n – число колебаний.

ВНИМАНИЕ. Для предотвращения перегрева катушки электромагнита – время непрерывной работы электромагнита – не более 15 секунд, перерыв – 5 секунд.

3. Опыт произвести 3 раза и результаты опыта занести в таблицу 1.8.

4. Установить два груза 10 на планку (рисунок 1.14). Определить период колебаний T_1 рамки с грузами по формуле (1.78). Результат занести в таблицу 1.9.

5. Вычислить момент инерции J рамки без грузов по формуле (1.74).

6. Снять грузы М с рамки. Установить образец в рамке согласно рисунку 1.14. Определить период колебаний T_2 рамки с образцом по формуле (1.78). Опыт произвести 3 раза и результаты занести в таблицу.

7. Вычислить момент инерции J_0 образца по формуле (1.77).

8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.8.

Таблица 1.8 – Результаты измерений и вычислений

№	t, с	T, с	t ₁ , с	T ₁ , с	t ₂ , с	T ₂ , с	J, кг·м ²	J ₀ , кг·м ²	δJ _{0cp} , %	ΔJ _{0cp} , кг·м ²
1										
2										
3										
Средние значения										

9. Определить теоретическое значение момента инерции исследуемого образца по формуле (1.76).

10. Зная теоретическое и экспериментальные значения моментов инерции исследуемого образца, определить относительную погрешность по формуле:

$$\delta J_0 = \frac{J_{0_{\text{эксп.ср}}} - J_{0_{\text{теор}}}}{J_{0_{\text{теор}}}} \cdot 100\%$$

11. Записать окончательный результат в виде:

$$J_0 = (J_{0_{\text{ср}}} \pm \Delta J_{0_{\text{ср}}}), \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \text{ при } \delta J_0 = \dots \%$$

Контрольные вопросы

1. Сформулировать цель работы и дать описание схемы установки.
2. Сформулировать основное уравнение динамики для твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси.
3. Как определяется момент инерции материальной точки?
4. Что называется моментом инерции тела?
5. Что называется периодом колебаний?
6. Как период колебаний связан с частотой колебаний?

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ К РАБОТЕ 1.6

При рассмотрении вращения твердого тела с динамической точки зрения наряду с понятием о силах вводится понятие о моментах сил и наряду с понятием о массе – понятие о моменте инерции.

Пусть материальная точка массой m под действием внешней силы \vec{F} движется криволинейно относительно неподвижной точки O . На материальную точку действует момент силы и точка обладает моментом импульса. Положение движущейся материальной точки определяется радиус-вектором \vec{r} , проведенным к ней из точки O (рисунок 1.15). Моментом силы \vec{F} относительно неподвижной точки O называется векторная величина \vec{M} , равная векторному произведению радиус-вектора \vec{r} на вектор силы \vec{F}

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}] \quad (1.79)$$

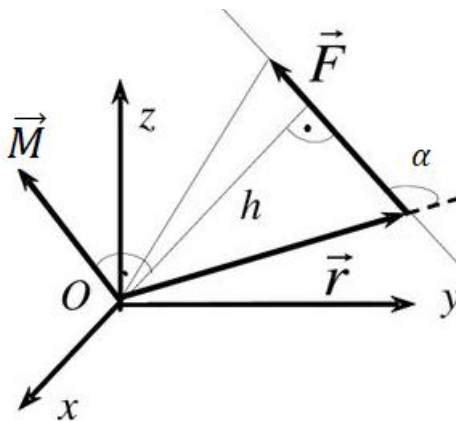


Рисунок 1.15 – Момент силы \vec{F}

Вектор \vec{M} направлен перпендикулярно плоскости векторов \vec{r} и \vec{F} и его направление соответствует правилу правого винта. Модуль момента сил равен:

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha = F \cdot h, \quad (1.80)$$

где α – угол между векторами \vec{r} и \vec{F} , $h = r \cdot \sin \alpha$ – плечо силы, равное кратчайшему расстоянию от точки O до линии действия (вдоль которой действует сила) силы \vec{F} .

Моментом импульса \vec{L} относительно точки O называется векторная величина, равная векторному произведению радиуса вектора \vec{r} на вектор импульса $\vec{p} = m \cdot \vec{V}$, то есть векторов \vec{r} и \vec{p} (рисунок 1.16).

$$\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}] = [\vec{r} \times m \cdot \vec{V}] \quad (1.81)$$

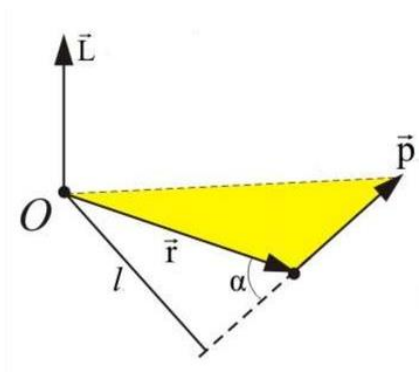


Рисунок 1.16 – Момент импульса

Вектор \vec{L} направлен перпендикулярно плоскости. Модуль момента импульса равен:

$$L = m \cdot V \cdot r \cdot \sin \beta, \quad (1.82)$$

где α – угол между направлением векторов \vec{r} и \vec{p} .

Из уравнения $\vec{M} = J \cdot \vec{\varepsilon}$ следует, что при $J = \text{const}$ угловое ускорение тела прямо пропорционально моменту внешних сил относительно оси вращения, т.е.

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{M_1}{M_2} \quad (1.83)$$

При $M = \text{const}$ угловое ускорение обратно пропорционально моменту инерции тела, т.е.

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{J_2}{J_1} \quad (1.84)$$

Целью настоящей работы является проверка соотношений (1.83) и (1.84), а, следовательно, и основного уравнения динамики вращательного движения (1.41), следствиями которого они являются.

РАБОТА 1.6 ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы: экспериментальная проверка основного закона динамики вращательного движения с помощью маятника Обербека.

Методика проверки основного уравнения динамики вращательного движения

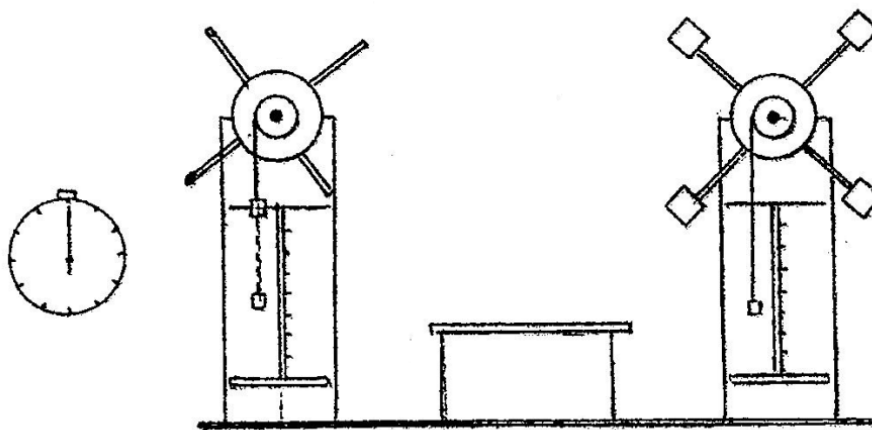


Рисунок 1.17 – Крестовина (маятник Обербека)

Крестовина представляет собой насаженную на одну ось со шкивом массивную ступицу (рисунок 1.17), в которую вставлены четыре взаимно перпендикулярных стержня (спицы). На шкив наматывается нить, к концу которой привязаны грузы массой m_1 и m_2 . Если дать грузу падать, то крестовина придет во вращательное движение.

ОПЫТ №1 (Крестовина без грузов, масса падающего груза m_1)

1. Измерить штангенциркулем диаметр шкива d .
2. Намотать на шкив нить и подвесить груз массой m_1 .
3. Предоставить грузу свободно падать, включить секундомер в момент начала движения груза и выключить его в момент соприкосновения груза со столиком. Повторить опыт 3 раза и записать в таблицу три значения времени падения груза: t_1, t_2, t_3 .
4. Зная среднее время и путь, пройденный падающим грузом, подсчитать ускорение падающего груза a_1 по формуле:

$$a_{cp} = \frac{2 \cdot h}{t_{cp}^2}, \quad h = 1,6 \text{ м.} \quad (1.85)$$

5. Подсчитать угловое ускорение ε_I и величину вращающего момента M_I по формулам:

$$\varepsilon_{cp} = \frac{2 \cdot a_{cp}}{d} \quad \text{и} \quad M = \frac{m \cdot (g - a) \cdot d}{2} \quad (1.86)$$

6. Определить момент инерции крестовины:

$$J_1 = \frac{M_1}{\varepsilon_1} \quad (1.87)$$

7. Результаты записать в таблицу 1.9.

Таблица 1.9 – Результаты измерений и вычислений

Масса груза, кг	№, изм.	t, сек.	t _{cp} , сек.	Δt, сек.	Δt _{cp} , сек.	a _{cp} , м/с ²	ε _{cp} , с ⁻²	M, Н·м	J, кг·м ²
Опыт 1. (крестовина без грузов)									
m ₁ =	1.								
	2.								
	3.								
Опыт 2. (крестовина с грузами)									
m ₁ =	1.								
	2.								
	3.								
Опыт 3. (крестовина с грузами)									
m ₂ =	1.								
	2.								
	3.								

ОПЫТ №2 (крестовина с грузами, масса падающего груза m₁)

1. Изменить момент инерции крестовины. Для этого на спицы крестовины укрепляются грузы. Масса каждого груза m₀. (Переходим к другой крестовине).

2. Оставляя неизменным падающий груз, проделать опыт в прежнем порядке, определить среднее время падения груза t_{2cp}, вычислить a_{cp}, ε_{cp}, M₂ и J₂.

3. Проверить соотношение $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{J_2}{J_1}$, справедливое при равных моментах (M₁=M₂).

ОПЫТ №3 (крестовина с грузами, масса падающего груза m_2)

1. Уточнить момент силы, подвешивая новый груз m_2 .

2. Проведя опыты в прежнем порядке, вычислить a_3 , ε_3 , M_3 и J_3 .

3. Проверить соотношение $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} = \frac{M_2}{M_3}$, справедливое при

неизменяющемся моменте инерции крестовины ($J_2=J_3$).

4. Вычислить собственный момент инерции грузов, надетых на крестовину:

$$J_{cp} = \frac{J_2 + J_3}{2} - J_1, \quad (1.88)$$

где $\frac{J_2 + J_3}{2}$ – среднее значение момента инерции крестовины вместе с грузами; J_1 – момент инерции крестовины без грузов.

5. Сравнить результат, полученный в пункте 4, с результатом, вычисленным по теоретической формуле:

$$J_{cp} = 4 \cdot m_0 \cdot R^2, \quad (1.89)$$

где $m_0 = 0,83 \text{ кг}$ – масса каждого груза, надетого на спицу крестовины;

$R = 0,27 \text{ м}$ – расстояние от центра тяжести груза до оси вращения.

6. Вычислить относительную погрешность для измерений, проведенных в третьем опыте, по формуле:

$$\delta J_3 = \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{2\Delta t_{cp}}{t_{cp}} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta g}{g-a} + \frac{\Delta a}{g-a}, \quad (1.90)$$

где $\Delta d = 0,0005 \text{ м}$, $\Delta h = 0,005 \text{ м}$, $\Delta m = 0,0005 \text{ кг}$, $\Delta g = 0,005 \text{ м/с}^2$,

$$\Delta a = a \cdot \left(\frac{\Delta h}{h} + \frac{2\Delta t_{cp}}{t_{cp}} \right).$$

7. Абсолютную погрешность вычислить по формуле:

$$\Delta J_3 = J_3 \cdot \delta J_3$$

8. Записать окончательный результат для третьего опыта в виде:

$$J = (J_3 \pm \Delta J_3) \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad \text{при } \delta J_3 = \dots\%.$$

Контрольные вопросы

1. Что называется моментом инерции материальной точки?

2. Что называется моментом инерции тела?
3. В каких единицах измеряется момент инерции тела?
4. В чем заключается сходство и в чем состоит существенное различие между массой тела и его моментом инерции?
5. Напишите формулы, с помощью которых можно вычислить момент инерции однородных тел правильной геометрической формы относительно оси симметрии (шара, диска, тонкостенного кольца, стержня и толстостенного кольца)
6. Что называется моментом силы?
7. Что называется плечом силы?
8. Сформулируйте и выведите основной закон динамики вращательного движения?
9. Выведите рабочую формулу для определения момента силы в данной работе.
10. Каким соотношением связаны между собой линейные и угловые ускорения? В каких единицах они измеряются?
11. Как можно измерить момент инерции крестовины, не изменяя массы грузов?
12. Какие физические величины должны быть одинаковыми в первом и во втором опытах?
13. Какие физические величины должны быть одинаковыми во втором и третьем опытах?
14. На основании какой закономерности вычисляется ускорение падающего груза в данной работе?
15. Какие соотношения необходимо проверить в данной работе?
16. По какой теоретической формуле нужно вычислить момент инерции грузов, надетых на крестовину?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обучающихся инженерных специальностей физика является системообразующей дисциплиной предметных знаний. Она служит основой всей современной техники и большинства новых технологий.

В процессе изучения дисциплины обучающиеся должны развить в себе способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и математического (компьютерного) моделирования, теоретического и экспериментального исследования. В результате освоения дисциплины обучающиеся смогут: выявлять и классифицировать физические процессы, протекающие на объекте профессиональной деятельности; определять характеристики физического процесса (явления), характерного для объектов профессиональной деятельности, на основе теоретического (экспериментального) исследования; представлять базовые для профессиональной сферы физические процессы и явления в виде математических уравнений; выбирать базовые физические законы для решения задач профессиональной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стер. – М.: Академия, 2008; 2007. – 558 с. – (Высшее профессиональное образование). – ISBN 978-5-7695-5782-8. – ISBN 5-7695-3662-4: 425-04.
- 2) Грабовский, Р. И. Курс физики : учебник для вузов / Р. И. Грабовский. – 6-е изд. – СПб. : Лань, 2002. – 607 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – ISBN 5-8114-0466-2 : 90-00.
- 3) Сборник задач по физике : учеб. пособие для вузов / под ред. Р. И. Грабовского. – СПб. : Лань, 2002. – 119с. – (Учебники для вузов. Специальная литература). – ISBN 5-8114-0462-X : 20-00.
- 4) Балонишников, А. М. Пособие по физике для подготовки к интернет-тестированию : учеб. пособие / А. М. Балонишников, Л. П. Глазова, Р. О. Старобогатов ; С.-Петербур. гос. аграр. ун-т, Каф. физики. – Санкт-Петербург, 2011. – 115 с. – Библиогр.: с. 114. – 198-29.