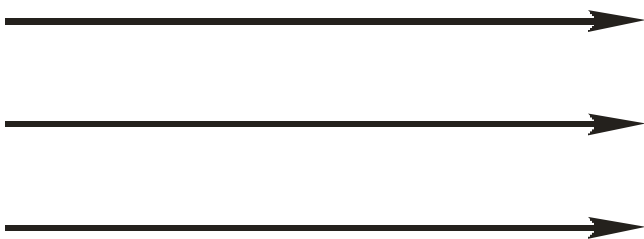




Методические рекомендации
к выполнению аудиторных
лабораторных работ
по курсу «Механика»



УДК 531/534(07)

ББК 22.2р30

М 545

Составители: Новикова Татьяна Алевтиновна к.п.н., доцент кафедры общей физики УдГУ;
Белослудцев Александр Вениаминович к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики
УдГУ.

Рецензент: Лебедев Владимир Геннадьевич к.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической физики
УдГУ

Методические рекомендации к выполнению аудиторных лабораторных работ по курсу
«Механика»: учебно-методическое пособие/ Новикова Т.А., Белослудцев А.В.; УдГУ. Ижевск,
2016. с. 73.

В пособие описаны лабораторные работы, которые входят в программу обучения студентов
Удмуртского государственного университета в рамках курса общей физики до дисциплине
«Механика».

УДК 531/534(07)

ББК 22.2р30

М 545

Новикова Т.А., Белослудцев А.В., 2016

Содержание

Введение	4
ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА	
1 Порядок работы в физической лаборатории.....	5
2 Этапы выполнения лабораторной работы.....	5
3 Оформление конспекта для допуска к лабораторной работе.....	6
4 Представление экспериментальных результатов на графиках.....	7
5 Запись результатов.....	9
6 Отчет о выполнении лабораторной работы.....	9
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	
Определение плотности твердого тела.....	10
Определение ускорения свободного падения методом обратного маятника.....	16
Изучение равноускоренного движения при помощи машины Атвуда.....	20
Определение скорости полёта пули методом крутильного баллистического маятника.....	24
Исследование закона сохранения количества движения.....	30
Измерение момента инерции твердого тела методом крутильных колебаний.....	36
Изучение движения маятника Максвелла.....	40
Изучение вращательного движения тела (маятник Обербека).....	45
Изучение трения качения (наклонный маятник).....	51
Определение модуля Юнга при изгибе.....	56
Гироскоп и гироскопические явления.....	61
ПРИЛОЖЕНИЕ	
Интерпретация результатов измерения.....	66
Обработка результатов прямых измерений.....	67
Обработка результатов косвенных измерений.....	68
Метод анализа размерности.....	70
Обработка результатов косвенных измерений физической величины полученной в невоспроизводимых условиях.....	71

ВВЕДЕНИЕ

В пособии описаны работы, представленные в физическом практикуме по разделу «Механика» естественнонаучных направлений Удмуртского Государственного университета. Цель практикума заключается в формировании компетентностей, являющихся составными частями общепрофессиональных компетентностей:

- *предметной* – связанной со способностью анализировать и действовать с позиций отдельных областей человеческой культуры, в частности с позиции научного метода познания;
- *социальной* – предполагающей наличие способности действовать в социуме с учетом других людей;
- *личностного самосовершенствования* – заключающейся в приобретении опыта целеполагания, самообразования и самоконтроля;
- *информационной* – предусматривающей владение способностью работать с разными источниками информации.

Предварительные сведения об организации работы в лаборатории, о порядке ведения лабораторного журнала излагаются в первой части пособия. Во второй части, являющейся центральной, представлен разработанный лабораторный практикум, включающий 11 работ. Следует обратить внимание на две особенности изложенного материала.

Во-первых, минимизирован *объем информации*: акцентировано внимание только на ключевые пункты. «Меньше – значит больше». Идея проста: чем меньше объем информации, тем мощнее ее воздействие на человека. Таким образом, в теоретической части работы не нужно показывать все – ее задача фокусировать внимание на самом главном. Самого главного, как вы понимаете, не может быть много.

Во-вторых, включена *дополнительная информация* для поддержания основной идеи, и ее более глубокой проработке. Такой дополнительной информацией выступают: примеры, сравнения, открытия, цитаты, исторические факты.

Никакие лабораторные занятия не прогуливайте!
(Можете считать это эпитафией)

ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА

1. Порядок работы в физической лаборатории

При постановке всех физических опытов студенты должны соблюдать правила техники безопасности. Неаккуратность, невнимательность, незнание правил техники безопасности могут повлечь несчастные случаи. Лица, не прошедшие инструктаж по соблюдению правил техники безопасности, к работе в лаборатории не допускаются.

В неистовстве всё знать,
Всё взвесить, всё измерить
Проходит человек по лесу естества.
Сквозь тернии кустов,
Всё дальше... Время верить,
Что он найдёт свои всемирные права.
Эмиль Верхарн

В начале семестра составляется и вывешивается на стенде лаборатории график выполнения работ на весь семестр для данной специальности. Студент должен заранее знать тему своей лабораторной работы и подготовиться к ней, используя методическое руководство и другую указанную в нем литературу. Перед выполнением каждой лабораторной работы необходимо пройти собеседование с преподавателем и получить разрешение (допуск) на ее выполнение. Допуск фиксируется в специальном журнале учета лабораторных занятий, который хранится в учебной лаборатории. После этого лаборант проверяет у студента знание экспериментальной установки и порядок выполнения работы. Приступить к выполнению лабораторных работ без разрешения преподавателя и лаборанта категорически запрещается. После выполнения эксперимента, обработки, анализа полученных результатов и ответа на контрольные вопросы преподаватель в журнале регистрирует факт выполнения лабораторной работы (зачет).

Лабораторные работы, которые студент не выполнил в течение семестра по уважительной причине, могут быть выполнены им на дополнительных занятиях, организованных в учебной лаборатории. Допуск к выполнению пропущенной лабораторной работы студент должен получить у преподавателя, ведущего занятия в данной учебной группе; при этом преподаватель делает соответствующую запись в журнале учета лабораторных занятий.

2. Этапы выполнения лабораторной работы

Выполнение каждой лабораторной работы, входящей в практикум, предусматривает следующие этапы:

- 1) *теоретическую подготовку;*
- 2) *допуск к выполнению работы;*
- 3) *проведение эксперимента, наблюдение и измерение;*
- 4) *обработку результатов измерений;*
- 5) *отчет о выполнении лабораторной работы;*
- 6) *защиту выполненной работы.*

Теоретическая подготовка сводится к изучению соответствующих физических явлений и законов по рекомендованным учебным пособиям для ответа на вопросы допуска и контрольные вопросы, изучению описания заданной лабораторной работы в целях ознакомления с методикой измерения и порядком выполнения работы. Подготовка проводится заранее, до выполнения лабораторной работы, так как аудиторные занятия предназначены только для получения допуска к работе, на проведение измерений и защиту лабораторной работы.

Допуск к выполнению работы состоит в проверке преподавателем теоретической подготовки студента к каждой работе (самостоятельному выводу рабочих формул, которые используются в работе), знания метода измерений и порядка выполнения работы. Чтобы эта беседа с преподавателем была полезной, при изучении описания работы нужно отметить неясные вопросы и обязательно выяснить их на допуске. Для допуска студент предоставляет персональный конспект данной лабораторной работы, требования к которому рассмотрены в пункте 3.

Наблюдения и измерения – главная часть эксперимента. Они требуют от студента знания методов измерений, должного внимания и аккуратности при снятии показаний и записи результатов измерений. Лаборант следит за выполнением эксперимента, визирует полученные данные и в лабораторном журнале отмечает факт выполнения эксперимента.

Обработка результатов измерений заключается в представлении результатов в наглядной форме и их математической обработке. Оценка погрешности и математическая обработка результатов рассмотрены в Приложении 1.

Отчет о выполнении лабораторной работы. Отчет о работе оформляется индивидуально каждым студентом в тетради согласно требованиям, изложенным в пункте 6.

Защита выполненной работы сводится к представлению преподавателю результатов эксперимента, представленных в отчете и доказательству того, что измерение выполнено правильно, согласно нормативам, предъявляемым к методам измерений.

СИСТЕМА СГС

Основные единицы этой системы — сантиметр, грамм, секунда. Единицы скорости, ускорения, силы, работы строятся так же, как и в СИ. Но, в отличие от системы СИ, электрические единицы здесь вводятся как производные. За единицу заряда принимается величина каждого из двух одинаковых точечных зарядов, которые в вакууме взаимодействуют с силой 1 дин, находясь друг от друга на расстоянии 1 см. Единица температуры (кельвин), единица светового потока (люмен) и единица количества вещества (моль) являются в системе СГС основными. Эта система почти не используется в технике, но применяется в физике и особенно удобна при описании электромагнитных явлений. (С. Хорозов)

3. Оформление конспекта для допуска к лабораторной работе

Для допуска к выполнению лабораторной работы каждый студент предварительно оформляет конспект. В конспекте необходимо указать:

- 1) *название работы;*
- 2) *цели и задачи работы;*
- 3) *схему или рисунок экспериментальной установки;*
- 4) *методику эксперимента.* В данном пункте конспекта должны быть отражены: во-первых, анализ физических основ метода и описание методики эксперимента, которые включают:
 - физическое явление, изучаемое в работе, связь между величинами, его описывающими;
 - объект исследования, его особенности;
 - физическое явление, положенное в основу метода измерений;
 - зависимость, которая может быть экспериментально проверена;
 - условия, позволяющие осуществить такую проверку.

Во-вторых, конспект должен содержать математическое описание эксперимента, а именно:

- систему уравнений, позволяющую определить искомую величину на основании опытных данных;
 - решение системы уравнений - рабочие формулы для измеряемой величины. Все величины, используемые в рабочих формулах должны быть пояснены.
- 5) *Таблицы результатов измерений.* До начала работы необходимо продумать вид таблиц для записи и обработки результатов и начертить их в конспекте, выполняя следующие требования:
- указать номер таблицы;
 - начать таблицу с графы для порядкового номера измерения;
 - указать в каждой графе сверху величину и единицу ее измерения;
 - вынести в заголовок общий десятичный множитель, если он присутствует во всех результатах измерений, помещаемых в данный столбец;
 - для величин, определяемых прямыми многократными измерениями, выделить в таблице графы для записи отклонений каждого результата от среднего значения, позволяющих сразу вычислить средне квадратичное отклонение.

4. Представление экспериментальных результатов на графиках

Результаты экспериментов можно представить не только в виде таблиц, но и в графической форме. При их построении необходимо соблюдать ряд правил.

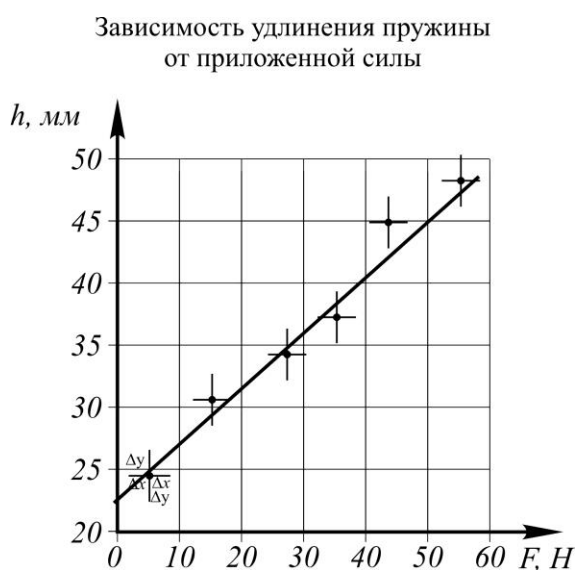


Рис. 1 Пример построения графика функции по экспериментальным точкам

1) Графики строят только на бумаге, имеющей координатную сетку. Это может быть обычная миллиметровая бумага с линейным масштабом по осям.

2) Требуется написать полное название графика.

3) На осях необходимо нанести масштабную сетку, указать единицы измерения и символы изображаемых величин.

4) При построении графика масштаб выбрать так, чтобы все экспериментальные точки вошли в график и располагались по всей площади листа. Иногда для этой цели бывает удобно сместить начало отсчета вдоль осей. Масштаб по осям X и Y может быть различен (рис. 1).

5) Точки, наносимые на графики, должны изображаться четко и ясно. Точки, полученные в разных условиях (при нагревании и при охлаждении, при увеличении и при уменьшении нагрузки и т.д.) полезно наносить разными цветами. Это поможет увидеть новые явления.

6) Абсолютную погрешность измеренных величин откладывают вдоль осей соответственно вправо – влево, вверх – вниз (рис. 1). (Масштаб выбрать таким образом, чтобы можно было отложить погрешность измерения.)

7) Нет смысла стремиться провести кривую через каждую экспериментальную точку – ведь кривая является только интерпретацией результатов измерений, известных из эксперимента с погрешностью. По сути, есть только экспериментальные точки, а кривая – произвольное, не обязательно верное, домысливание эксперимента. Представим, что все экспериментальные точки соединены и на графике получилась

ломаная линия. Она не имеет ничего общего с истинной физической зависимостью! Это следует из того, что форма полученной линии не будет воспроизводиться при повторных сериях измерений.

Если известно математическое описание наблюдаемой зависимости, то необходимо построить ожидаемую теоретическую кривую. Исследуемая теоретическая зависимость считается доказанной, если построенная кривая проходит как минимум через две третьих доверительных интервалов экспериментально полученных точек (рис. 1).

8. Обработка данных с помощью графика существенно облегчается, если искомая зависимость имеет прямолинейный характер. Провести прямую не представляет труда. А как провести, например, параболу или синусоиду? Для этого надо так выбрать масштаб по осям графика, чтобы ожидаемая теоретическая зависимость имела вид прямой линии. Так, например, если вы измеряете ускорение тела по расстоянию S , пройденному телом за время t , то связь этих величин дается формулой:

$$S = \frac{at^2}{2}.$$

Если по осям графика откладывать S и t , то экспериментальные точки расположатся вблизи параболы, провести которую очень трудно. Дело существенно облегчится, если по осям откладывать S и t^2 , или \sqrt{S} и t , или, наконец, их логарифмы $\ln S$ и $\ln t$. Во всех этих случаях экспериментальные точки расположатся около прямой линии, которую нетрудно провести. На рисунке 2 представлены графические отображения математической зависимости $y = Ax^\beta$ для различных значений β .

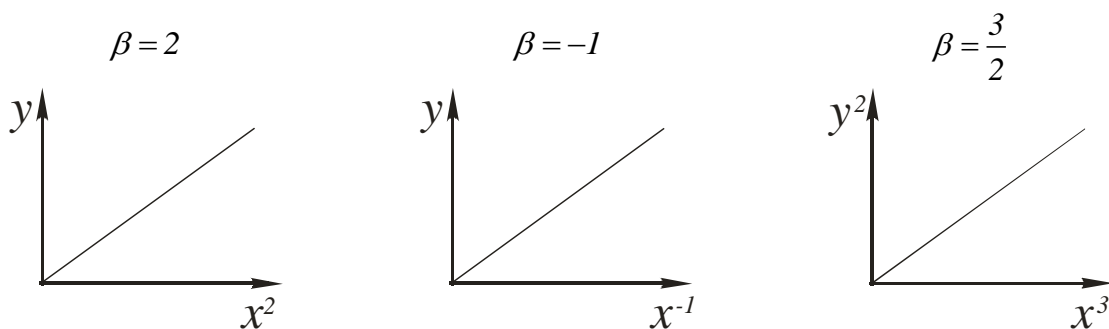


Рис. 2. Графические отображения математической зависимости $y = Ax^\beta$ для различных значений β

МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА СИ

Международная система единиц физических величин СИ (*фр.* System international, SI) принята 11-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1960 г.). В ней семь основных единиц. Три единицы — времени (секунда), длины (метр) и массы (килограмм) — определены выше. Четыре другие — это единицы силы тока (ампер), температуры (кельвин), количества вещества (моль) и силы света (кандела). Как при определении метра, так и при определении ампера численные коэффициенты введены для того, чтобы максимально приблизить применяемые в СИ единицы к широко используемым в практике, и это её сильная сторона. Предлагалось, в частности, изменить единицы времени, сделав в часе 100 мин, в минуте — 100 с и т. д.

Но даже представить трудно, что это такое — переделать все часы в мире! Платой за принятые удобства стали неприятности, возникающие, например, в теории электромагнетизма. Здесь приходится вводить электрическую и магнитную постоянные, которые иногда совершенно напрасно называют диэлектрической и магнитной проницаемостью вакуума. Электрическая индукция и напряжённость электрического поля, совпадающие в вакууме, в системе СИ имеют не только разные величины, но и разные размерности. Такая же ситуация с напряжённостью магнитного поля и магнитной индукцией (*С. Хорозов*).

5. Запись результатов

После вычисления средних значений и погрешностей полученные результаты необходимо представить в общепринятой форме. В лабораторном практикуме рекомендуется следующая схема обработки результатов.

1. Количество значащих цифр при записи результата измерений определяется относительной погрешностью ваших измерений.

Пример. Результат измерений какой-либо величины: $x = 28,674 \pm 0,706$.

Давайте оценим относительную погрешность нашего результата:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{cp}} 100\% = \frac{0,706}{28,674} 100\% = 0,025 \times 100\% = 2,5 \%$$

Полученный результат означает, что погрешность составляет сотые доли нашего результата. Тем самым, трех значащих цифр достаточно для записи среднего значения. При записи абсолютной погрешности измерений последней должна указываться цифра того десятичного разряда, который использован при указании среднего значения. Поэтому окончательный результат запишем так:

$$x = 28,7 \pm 0,7.$$

2. Среднее значение измеряемой величины должно быть записано в стандартном виде – от 1 до 10.

Пример. Результат измерений какой-либо величины: $x = 28,7 \pm 0,7$.

Следует записать: $x = (2,87 \pm 0,07) \cdot 10$.

3. Обязательно указать размерность измеренной величины.

Пример. $x = (2,87 \pm 0,07) \cdot 10$ см.

- Алло! Это приёмная комиссия физфака?
- Нет. Какой номер вы набираете?
- 123-45-67.
- Вас неправильно соединили. Это 123-45-68, и здесь дискотека.
- Подумать только! Ошибка в седьмом знаке, а какой эффект...

6. Отчет о выполнении лабораторной работы

Отчет завершает лабораторную работу. В отчете обобщаются результаты всех предыдущих этапов ее выполнения. Поэтому в нем обязательно должны быть указаны:

- 1) название работы;
- 2) цели и задачи работы;
- 3) схема или рисунок экспериментальной установки;
- 4) методика эксперимента;
- 5) заполненные таблицы результатов измерений;
- 6) математическая обработка результатов измерений;
- 7) анализ полученных результатов и выводы.

Первые пять пунктов отчета представляют собой сведения, которые должны быть изложены в конспекте. Поэтому конспект является началом отчета.

Математическая обработка результатов измерений. Используя схему, изложенную в Приложении 1, проводят вычисления результатов измерений и их погрешностей.

Анализ полученных результатов и выводы. Завершают отчет анализ результатов и выводы. В этом пункте полученные результаты сравнивают с табличными значениями, оценивают имеющиеся расхождения, дают объяснения экспериментально обнаруженным фактам и зарегистрированным зависимостям.

Лабораторные работы

1. Определение плотности твердого тела

Цель работы: приобретение практических навыков работы с измерительными приборами и овладение методикой обработки результатов прямых и косвенных измерений физических величин на примере определения плотности твердого тела.

Оборудование

Необходимое оборудование представлено на рисунке 1:

- 1 - весы;
- 2 - штангенциркуль;
- 3 - исследуемое тело.

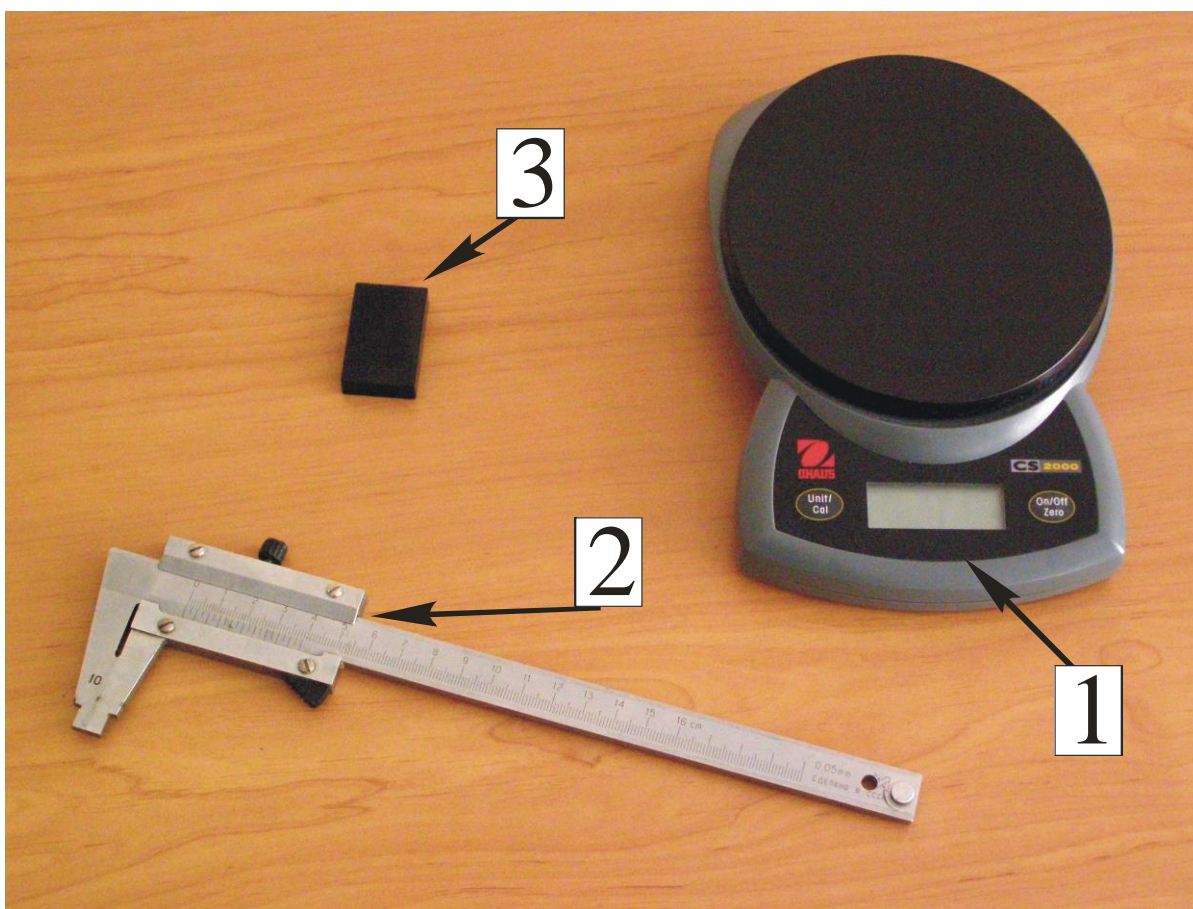


Рис. 1 Необходимое оборудование

1.1. Задание для работы

1. Определить плотность твердого тела.

1.2. Методика эксперимента

1.2.1. Краткие теоретические сведения

Распределение массы по объему тела можно характеризовать с помощью физической величины, называемой плотностью. Если тело однородно, то его плотность определяют по формуле

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где m и V – масса и объем тела. Определение плотности однородного тела сводится, таким образом, к измерению массы тела и его объема. В данной работе в качестве исследуемого тела выбран брусок (рис.2), объем которого равен $V = b h l$, где b – ширина бруска, h и l его высота и длина соответственно. Поэтому

$$\rho = \frac{m}{b h l}. \quad (1)$$

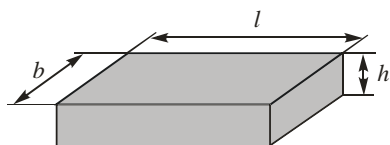
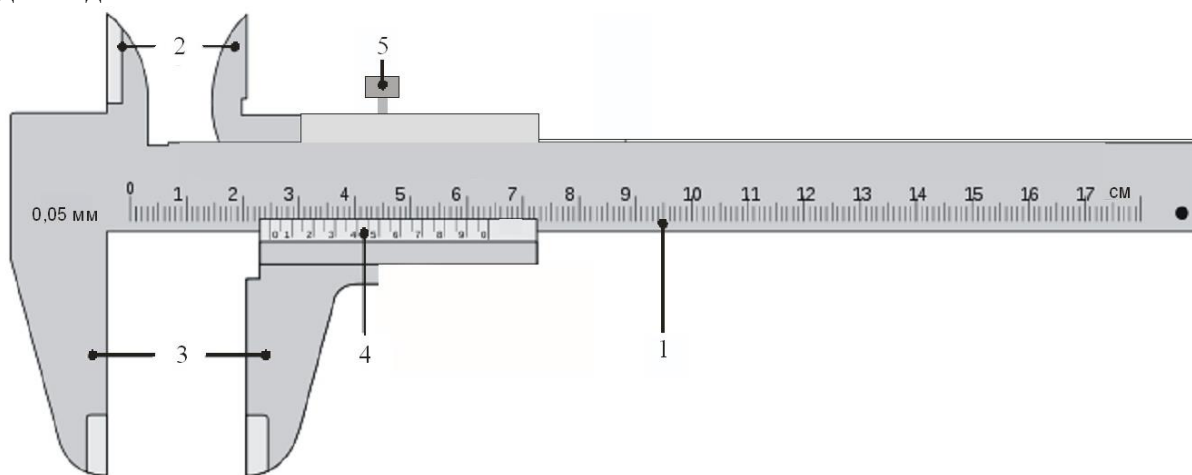


Рис. 2 Исследуемое тело

Масса тела определяется взвешиванием на весах. Для измерения длин можно использовать множество разнообразных приборов, обеспечивающих измерение с различной точностью. Самым популярным инструментом для высокоточных измерений наружных и внутренних размеров является штангенциркуль (рис.3).

Штангенциркуль имеет измерительную штангу (отсюда и его название) с основной шкалой и нониус – вспомогательную шкалу для отсчета долей делений.



- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1. штанга с основной шкалой; | 4. вспомогательная шкала (нониус); |
| 2. губки для внутренних измерений; | 5. винт для зажима. |
| 3. губки для внешних измерений; | |

Рис. 3 Штангенциркуль

Одной из основных проблем, которые приходится решать при совершении измерений, является проблема учета систематических ошибок. Систематические ошибки бывают разных типов.

К одному из них относится *погрешность измерительного прибора*. Абсолютная погрешность прибора равна половине цены его деления.

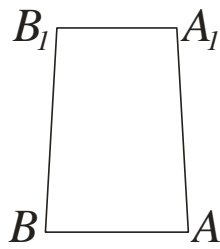


Рис. 4 Тело неправильной формы

К другому типу систематических ошибок принадлежат *ошибки, обусловленные свойствами измеряемого объекта*. Поясним это на примере измерения ширины бруска, который мы считаем параллелепипедом, но имеющим в действительности другую форму (рис. 4). Если измерять ширину AB , то мы получим большее значение, чем при измерении ширины A_1B_1 . Проведя ряд таких измерений, и взяв среднее из полученных значений, можно получить число, лучше характеризующее ширину бруска, но если измерять только один раз ширину и

считать брусок параллелепипедом, то вычисленная по этим измерениям плотность будет содержать систематическую ошибку, определяемую степенью несовпадения геометрической формы бруска параллелепипеду.

Таким образом, систематическая ошибка, связанная со свойствами измеряемого объекта, часто может быть переведена в случайную. В нашем примере для этого нужно измерить ширину бруска в разных его точках и взять среднее. Такой перевод систематических ошибок в случайные оказывается полезным, так как позволяет улучшить точность получаемых результатов.

В зависимости от типа систематических ошибок расчет абсолютной ошибки косвенно измеряемой величины производится по разным схемам (см. Приложение 1).

1.2.2. Порядок отсчета показаний штангенциркуля

	<p><i>Измеряемый предмет введите между губками, которые сдвиньте до соприкосновения с предметом. Затем закрепите подвижную губку зажимом и произведите отсчет.</i></p>
	<p><i>Считайте число целых миллиметров, для этого найдите на основной шкале штрих, ближайший слева к нулевому штриху нониуса, и запишите его числовое значение: 24 мм.</i></p>
	<p><i>Считайте число долей миллиметра, для этого на шкале нониуса найдите штрих, совпадающий с каким-нибудь штрихом основной шкалы, и умножьте его порядковый номер на цену деления (в нашем случае 0,05 мм) нониуса: $14 \cdot 0,05 \text{ мм} = 0,7 \text{ мм}$.</i></p>

Подсчитайте полную величину показания штангенциркуля, для этого сложите число целых миллиметров и долей миллиметра: $24 \text{ мм} + 0,7 \text{ мм} = 24,7 \text{ мм}$.

1.2.3. План проведения работы

I. Определить плотность твердого тела

1. С помощью весов определите массу m исследуемого тела – бруска.

$$m = (m_{cp} \pm \Delta m) \text{ кг}$$

2. Штангенциркулем однократно измерьте длину l и высоту h бруска.

$$l = (l_{cp} \pm \Delta l) \text{ м}$$

$$h = (h_{cp} \pm \Delta h) \text{ м}$$

3. Штангенциркулем в пяти местах бруска измерьте ширину b . Результаты измерений занесите в Таблицу 1.

Таблица 1

№	$b, \text{ м}$	$ b_{cp} - b_i , \text{ м}$

4. По формуле (1) вычислите плотность вещества, из которого изготовлен брусок. Оцените точность измерения.

1.3. Пример обработки результатов измерений

I. Определить плотность твердого тела

$$\rho = \frac{m}{b h l}, \quad \rho = f(m, b, h, l).$$

1. Обработка результатов прямых измерений.

$$m: \quad m = (3,65 \pm 0,005) \cdot 10^{-1} \text{ кг.}$$

$$l: \quad l = (6,24 \pm 0,005) \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

$$h: \quad h = (2,04 \pm 0,005) \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

$$b: \quad \text{а) ширина бруска}$$

Таблица 1

№	$b \cdot 10^{-2}, \text{ м}$	$ b_{cp} - b_i \cdot 10^{-2}, \text{ м}$
1	4,11	0,012
2	4,11	0,012
3	4,09	0,008
4	4,10	0,002
5	4,08	0,018

- б) Среднее значение:

$$b_{cp} = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5}{N} = \frac{(4,11 + 4,11 + 4,09 + 4,10 + 4,08) \cdot 10^{-2}}{5} = 4,098 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

- в) Средне квадратичное отклонение:

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{(b_1 - b_{cp})^2 + (b_2 - b_{cp})^2 + (b_3 - b_{cp})^2 + (b_4 - b_{cp})^2 + (b_5 - b_{cp})^2}{N(N-1)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(0,012 \cdot 10^{-2})^2 + (0,012 \cdot 10^{-2})^2 + (0,008 \cdot 10^{-2})^2 + (0,002 \cdot 10^{-2})^2 + (0,018 \cdot 10^{-2})^2}{5 \cdot 4}} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

- г) Ошибка измерений:

– случайная ошибка: $\Delta_{cl} = t_{\alpha, N} \cdot \sigma_b = 2,1 \cdot 6 \cdot 10^{-5} = 12,6 \cdot 10^{-5} \text{ м};$

– систематическая ошибка (ошибка прибора):

$$\Delta_{np} = \frac{\text{цена деления измерительного прибора}}{2} = \frac{0,01 \cdot 10^{-2}}{2} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

– абсолютная ошибка: $\Delta b = \sqrt{\Delta_{cl}^2 + \Delta_{np}^2} = \sqrt{(12,6 \cdot 10^{-5})^2 + (5 \cdot 10^{-5})^2} = 13,56 \cdot 10^{-5} \text{ м};$

– относительная ошибка: $\varepsilon = \frac{\Delta b}{b_{cp}} \cdot 100 \% = \frac{13,56 \cdot 10^{-5}}{4,098 \cdot 10^{-2}} \cdot 100 \% = 0,33\%;$

д) Результат измерений: $b = (b_{cp} \pm \Delta b) = (4,098 \pm 0,013) \cdot 10^{-2} \text{ м}.$

2. Среднее значение:

$$\rho_{cp} = \frac{m_{cp}}{b_{cp} h_{cp} l_{cp}} = \frac{3,65 \cdot 10^{-1} \text{ кг}}{4,098 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 2,04 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 6,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 6,98 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

3. Ошибка измерений:

– абсолютная ошибка:

$$\Delta \rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} \Delta h\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial l} \Delta l\right)^2};$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial m} \Delta m = \frac{1}{b h l} \Delta m = 0,0950 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial b} \Delta b = -\frac{m}{b^2 h l} \Delta b = -0,0848 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} \Delta h = -\frac{m}{b h^2 l} \Delta h = -0,170 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} \Delta l = -\frac{m}{b h l^2} \Delta l = -0,0558 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3.$$

$$\Delta \rho = \sqrt{(0,0950 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3)^2 + (-0,0848 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3)^2 + (-0,170 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3)^2 + (-0,0558 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3)^2} = 0,21 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3;$$

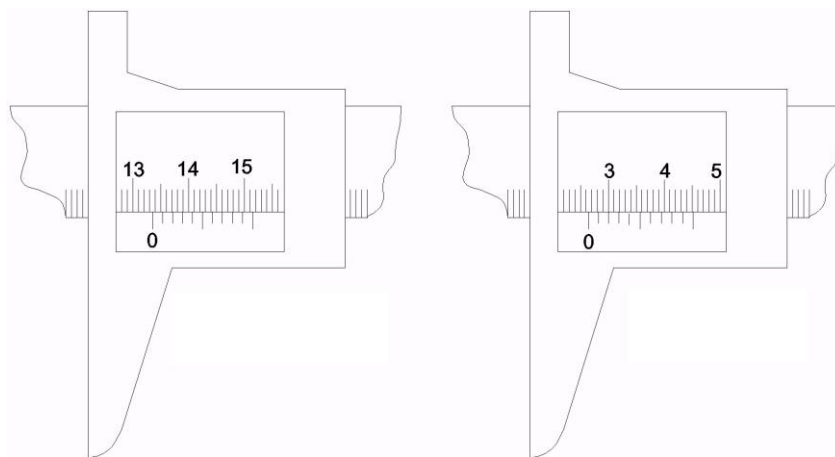
– относительная ошибка: $\varepsilon = \frac{\Delta \rho}{\rho_{cp}} \cdot 100 \% = \frac{0,21 \cdot 10^2}{6,98 \cdot 10^3} \cdot 100 \% = 0,3\%;$

4. Результат измерений: $\rho = (\rho_{cp} \pm \Delta \rho) = (6,98 \pm 0,02) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

P.S. В случае возникновения вопросов смотреть Приложение 1.

1.4. Контрольные вопросы

1. Какие приборы для измерения длин и расстояний вы знаете?
2. Что такое цена деления прибора?
3. Что такое точность нониуса?
4. Какими способами можно повысить точность измерений длин?
5. В чем основные различия прямого и косвенного измерений?
6. Снимите показания со шкалы штангенциркуля.



1.5. Список рекомендуемой литературы

1. Гольдин Л.Л. Лабораторные занятия по физике. М: Наука, 1983. 704 с. §§ 1-7.

ОЦЕНКИ

Некоторые важные величины так и не удаётся определить достаточно точно и сколько-нибудь надёжно рассчитать погрешности измерения. Подобные измерения обычно называют *оценками*. Типичными примерами являются оценки расстояний до наиболее удалённых галактик по красному смещению, оценки возраста Земли, полученные по изучению радиоактивности элементов земной коры. Иногда говорят об «оценке по порядку величины». Это значит, что приведённая величина отличается от истинного значения скорее всего не более чем в три–четыре раза. Приведём пример такой оценки, ответив на вопрос: сколько настройщиков роялей в Москве?

Население Москвы порядка 10 млн. человек (разница в полтора-два раза при оценке несущественна). При среднем размере семьи в 3 человека можно считать, что в городе приблизительно 3 млн. семей. Наверное, каждая 20-я семья имеет рояль или пианино. Каждое из 150 тыс. фортепиано требует настройки раз в год-полтора, то есть настройщиков в Москве вызывают 100 тыс. раз в год. Если читать, что настройщик работает 250–300 дней в году и тратит день на один вызов, то разумной оценкой представляется 300–400 представителей этой профессии.

Мастером оценок был, в частности, физик Энрико Ферми. На испытаниях первой атомной бомбы (США, 16 июля 1945 г.) сразу после взрыва он встал и начал разбрасывать мелко изорванную бумагу. Когда через несколько секунд пришёл фронт ударной волны, Ферми, прикинув, на какое расстояние отбросила волна клочки бумаги, сразу оценил мощность взрыва (расстояние до эпицентра ему, конечно, было известно, и соответствующие расчёты он сделал заранее). Анализ показаний многочисленных приборов, проведённый позднее, подтвердил оценку Ферми (*А. Селиверстов*).

2. Определение ускорения свободного падения методом обратного маятника

Цель работы: усвоение знаний по разделу «Гармонические колебания», приобретение практических навыков определения ускорения свободного падения.

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - блок;
- 2 - фотодатчик;
- 3 - стержень;
- 4 - втулки;
- 5 - неподвижный груз;
- 6 - подвижный груз.

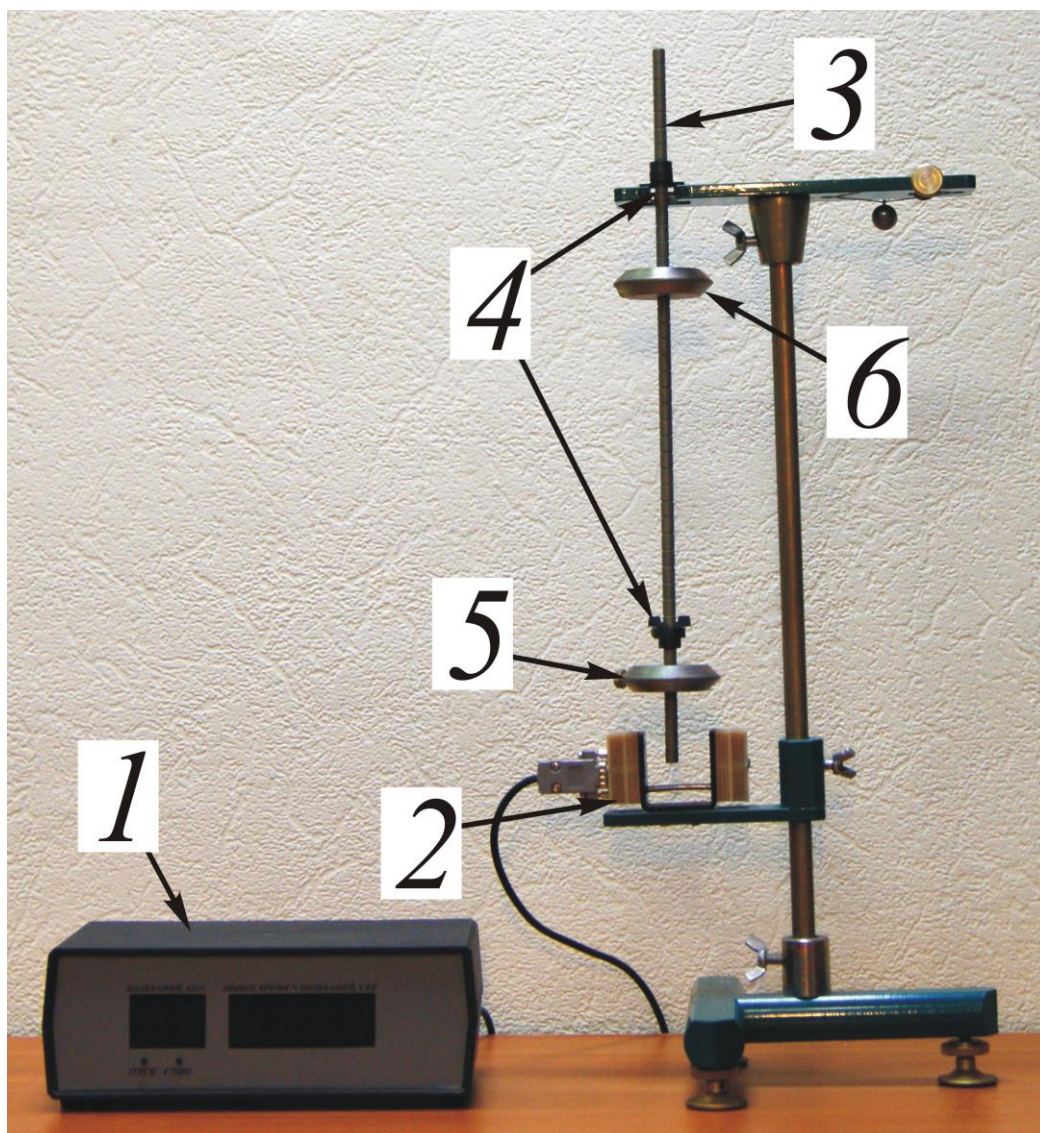


Рис. 1 Экспериментальная установка

2.1. Задание для работы

1. Собрать оборотный маятник.
2. Экспериментально определить ускорение свободного падения.

2.2. Методика эксперимента

2.2.1. Краткие теоретические сведения

Измерения ускорения свободного падения g выполняются с помощью косвенных методов. Один из них основан на использовании формулы для периода T колебаний математического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}}, \quad (1)$$

где l_0 - длина маятника. *Математический маятник* – это идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на нерастяжимой невесомой нити (рис. 2). Измерив длину l_0 и период колебаний T , можно вычислить g .

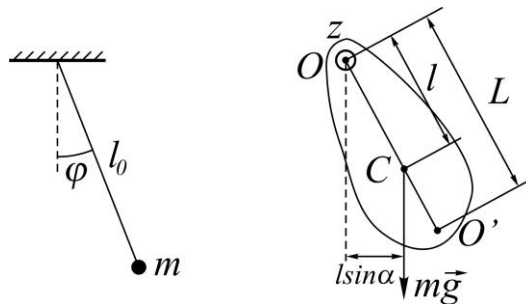


Рис. 2 Математический и физический маятники

Однако, практически математический маятник создать невозможно, и любой маятник является физическим. Физическим маятником называется твёрдое тело, которое может совершать колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку подвеса – OZ (рис. 2). Период колебаний физического маятника равен:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}. \quad (2)$$

Здесь I – момент инерции маятника относительно оси вращения, m – его масса, l – расстояние от центра масс до оси вращения. Сравнив эту формулу с формулой периода колебаний математического маятника (1), можно заметить, что физический маятник совершает колебания с тем же периодом, с которым колебался бы математический маятник длиной $L = \frac{I}{ml}$. Эта величина называется *приведенной длиной маятника*.

Массу маятника и период его колебаний можно измерить с очень большой точностью, но точно измерить момент инерции не удастся. Указанного недостатка лишен метод оборотного маятника (метод Бесселя), который позволяет исключить момент инерции из расчетной формулы для определения ускорения свободного падения g .

Метод оборотного маятника основан на том, что период колебаний физического маятника не изменяется при перемещении оси подвеса в центр качаний O' . Центром

качаний O' называется точка, лежащая на прямой соединяющей, точку подвеса с центром масс маятника, и отстоящая от оси подвеса на расстоянии приведенной длины L (рис. 2). В данной работе физический маятник представляет собой стержень с двумя подвижными грузами 1 и 2 и двумя опорными втулками A и B (рис. 3). Двигая подвижные грузы, можно менять момент инерции маятника относительно осей, проходящих через опорные втулки A и B . Маятник качается вокруг горизонтальных осей, проходящих через эти втулки.

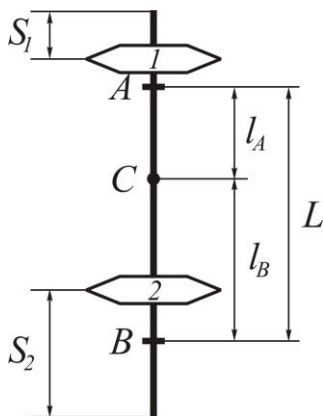


Рис.3 Обратный маятник

Периоды колебания маятника будем менять, меняя расстояние S_2 для подвижного груза, расположенного между опорными втулками (рис. 3). Допустим, что нам удалось найти такое положение груза, при котором периоды колебаний маятника T_A и T_B относительно осей, проходящих через втулки A и B совпадают, то есть

$$T_A = T_B, \quad \text{где} \quad \begin{aligned} T_A &= 2\pi \sqrt{\frac{I_A}{mgl_A}} \\ T_B &= 2\pi \sqrt{\frac{I_B}{mgl_B}} \end{aligned} \quad (3)$$

Условием этого является равенство приведенных длин, или равенство величин

$$L = \frac{I_A}{ml_A} = \frac{I_B}{ml_B}, \quad (4)$$

а расстояние между опорными втулками будет равно приведенной длине $L = l_A + l_B$. Подставляя (4) в (2), получим формулу для определения g :

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}. \quad (5)$$

2.2.2. План проведения работы

I. Собрать обратный маятник

1. Поместите втулки A и B на расстояниях 7 см от соответствующих концов стержня (рис. 3). Неподвижный груз 1 поместите на расстоянии $S_1 = 4 \text{ см}$. Подвижный груз 2 поместить на расстоянии $S_2 = 12 \text{ см}$.
2. Установите маятник на опорные призмы за втулку A . При этом маятник должен висеть вертикально.
3. Отклоните маятник от положения равновесия на угол $\varphi \approx 7^\circ$. Отпустите маятник и измерьте период колебаний T_A . Результаты измерений запишите в Таблицу 1.

4. Переверните маятник, повесив за втулку B , и определите период колебаний T_B . Результаты измерений запишите в Таблицу 1.

Таблица 1

$S_2, \text{ см}$	$T_A, \text{ с}$	$T_B, \text{ с}$

5. Передвигая подвижный груз на $\approx 1 \text{ см}$ к центру маятника, вновь определите периоды T_A и T_B .
6. Многократно повторяя пункт 5, добейтесь такого положения втулки B , при котором $T_A \approx T_B$.

II. Экспериментально определить ускорение свободного падения

1. Не меняйте положения втулок и грузов. Измерьте расстояние между двумя втулками L (приведенную длину физического маятника).

$$L = (L_{cp} \pm \Delta L) \text{ м}$$

2. Определите период колебаний T оборотного маятника по 5 раз на каждой втулке. Результаты измерений запишите в Таблицу 2.

Таблица 2

№	$T, \text{ с}$

3. Используя формулу (5), вычислите g и оцените точность измерений.

2.3. Контрольные вопросы

1. Дайте определения математического и физического маятников.
2. Дайте определения приведенной длины и центра качаний.
3. Дайте определения периода колебаний, частоты и амплитуды колебаний.

2.4. Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн.1. Механика. М.: Астрель: АСТ, 2001. § 53 - 54.
2. Общий курс физики : Учеб. пособие для вузов рек. МО РФ: В 3 т. Т.1. Механика / Д.В. Сивухин . - 4-е изд., стер. - М.: Физматлит; МФТИ, 2005. § 40-41.
3. Стрелков С.П. Механика: Учеб. пособие для ун-тов. М.: Наука, 1975. § 123- 124.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. § 141 - 142.

«Дорогая редакция!

Формулировку закона Ома необходимо уточнить следующим образом: «Если использовать тщательно отобранные и безупречно подготовленные исходные материалы, то при наличии некоторого навыка из них можно сконструировать электрическую цепь, для которой измерения отношения тока к напряжению, даже если они производятся в течение ограниченного времени, дают значения, которые после введения соответствующих поправок оказываются равными постоянной величине» Копенгаген. А. М. Б. Розен». Из книги «Физики шутят».

3. Изучение законов равноускоренного движения при помощи машины Атвуда

Цель работы: усвоение знаний по разделам «Кинематика материальной точки» и «Второй закон Ньютона», приобретение практических навыков определения скорости и ускорения материальной точки.

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - блок;
- 2 - визир;
- 3 - нижний кронштейн;
- 4 - грузы;
- 5 - платформа для грузов.

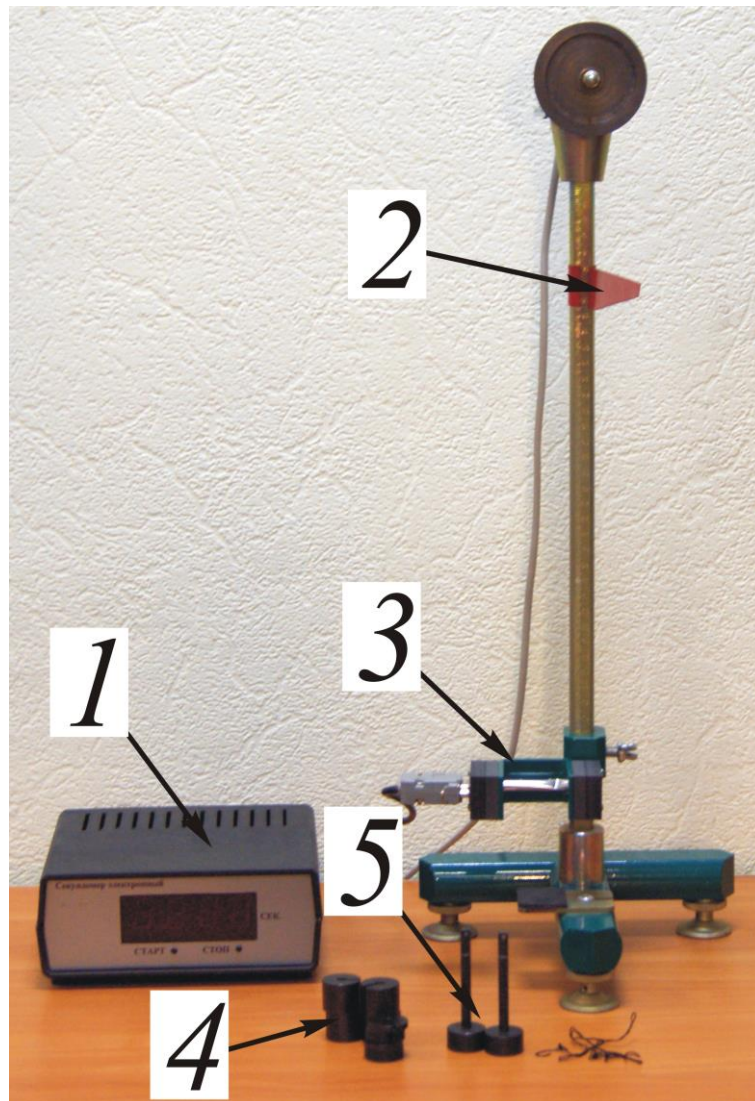


Рис. 1 Экспериментальная установка

3.1. Задание для работы

1. Проверить закон равноускоренного движения.
2. Определить ускорение свободного падения.

3.2. Методика эксперимента

3.2.1. Краткие теоретические сведения

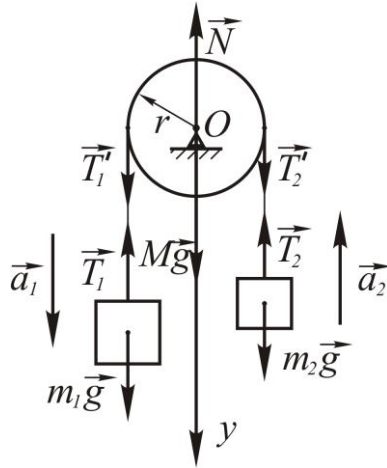


Рис 2 Движение грузов на машине Атвуда

Машина Атвуда (рис. 2) предназначена для исследования закона движения тел в поле земного тяготения. Она позволяет моделировать равноускоренное движение с заданным ускорением в диапазоне от $a = 0$ до $a = g$. Рассмотрим два груза массами m_1 и m_2 , связанных невесомой нерастяжимой нитью, перекинутой через блок массой M и моментом инерции I . Если $m_1 \neq m_2$ (например, $m_1 > m_2$), то система начинает движение. Выясним характер движения.

Запишем второй закон Ньютона для грузов и закон вращательного движения для блока:

$$\begin{cases} m_1 \vec{a}_1 = \vec{T}_1 + m_1 \vec{g} \\ m_2 \vec{a}_2 = \vec{T}_2 + m_2 \vec{g} \\ I \vec{\varepsilon} = \vec{M}_N + \vec{M}_{T_1} + \vec{M}_{T_2} + \vec{M}_{Mg} + \vec{M}_{mp} \end{cases}, \quad (1)$$

где \vec{T}_1, \vec{T}_2 – силы натяжения нити, действующие на грузы m_1 и m_2 ; \vec{a}_1, \vec{a}_2 – их ускорения; \vec{T}'_1, \vec{T}'_2 – силы натяжения нитей, действующие на блок; $\vec{M}_{mp}, \vec{M}_N, \vec{M}_{T_1}, \vec{M}_{T_2}$ и \vec{M}_{Mg} – моменты силы трения в оси блока, силы реакции опоры, сил натяжения и силы тяжести, действующие на блок; $\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение блока. Законы движения тел m_1 и m_2 в проекциях на ось OY примут вид

$$\begin{cases} m_1 a_1 = -T_1 + m_1 g \\ -m_2 a_2 = -T_2 + m_2 g \end{cases}, \quad (2)$$

а закон движения для блока относительно неподвижной оси вращения имеет вид

$$I \varepsilon = T'_1 r - T'_2 r - M_{mp}. \quad (3)$$

Из условия нерастяжимости нити следует, что

$$a_1 = a_2 = a. \quad (4)$$

Из условия невесомости нити следует, что

$$T'_1 = T_1 \text{ и } T'_2 = T_2. \quad (5)$$

Решим уравнения (2), (3), (4), (5) с учетом связи углового ускорения ε с линейным

ускорением a : $\varepsilon = \frac{a}{r}$. Тогда получим

$$a = \frac{g(m_1 - m_2) - \frac{M_{mp}}{r}}{m_1 + m_2 + \frac{I}{r^2}}. \quad (6)$$

В правой части этого выражения все величины постоянны. Следовательно, и ускорение a является постоянной величиной, а движение грузов прямолинейным равноускоренным. Запишем закон равноускоренного движения для грузов

$$S = \frac{at^2}{2}, \quad (7)$$

где S – путь, пройденный грузом за время t , a – ускорение с которым оно двигалось. Ускорение получится

$$a = \frac{2S}{t^2}. \quad (8)$$

Проверка закона равноускоренного движения сводится к проверке равенства двух ускорений, полученных при прохождении разных расстояний

$$a = \frac{2S_1}{t_1^2} = \frac{2S_2}{t_2^2},$$

или

$$\frac{S_1}{t_1^2} = \frac{S_2}{t_2^2}. \quad (9)$$

Из выражения (6) можно выразить ускорение свободного падения

$$g = \frac{a \left(m_1 + m_2 + \frac{I}{r^2} \right)}{m_1 - m_2 - \frac{M_{mp}}{rg}}.$$

Введем постоянные величины для данной установки: $m_0 = \frac{I}{r^2} = 28 \text{ г}$ и $m^* = \frac{M_{mp}}{rg} = 0.5 \text{ г}$.

Используя зависимость (7), получим конечное выражение для определения ускорения свободного падения:

$$g = \frac{2S}{t^2} \left(\frac{m_1 + m_2 + m_0}{m_1 - m_2 - m^*} \right). \quad (10)$$

На одной из своих лекций **Давид Гильберт** сказал: “Каждый человек имеет некоторый горизонт. Когда он сужается и становится бесконечно малым, он превращается в точку. Тогда человек говорит: “Это моя точка зрения”.

<http://physics03.narod.ru/index.htm>

3.2.2. План проведения работы

I. Проверить закон равноускоренного движения

1. На левую и правую платформу для грузов положите грузы и измерьте общую массу платформ и грузов m_1 и m_2 ($m_1 > m_2$). Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$m_1 = (m_{1cp} \pm \Delta m) \text{ кг}$$

$$m_2 = (m_{2cp} \pm \Delta m) \text{ кг}$$

2. Установите визир на расстояние S_1 от нижнего кронштейна. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$S_1 = (S_{1cp} \pm \Delta S) \text{ м}.$$

3. Измерьте время прохождения грузом массой m_1 расстояния S_1 . Опыт повторите 5 раз. Результаты измерения занесите в Таблицу 1.

Таблица 1

N_0	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$
-------	------------------	------------------

- Установите визир на расстояние S_2 от нижнего кронштейна. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$S_2 = (S_{2cp} \pm \Delta S) \text{ м.}$$

- Измерьте время прохождения грузом массой m_1 расстояния S_2 . Опыт повторите 5 раз. Результаты измерения занесите в Таблицу 1.
- Проверьте равенство (9) с учетом погрешности.

II. Определить ускорение свободного падения

- Используя результат упражнения 1 и формулу (10), вычислите ускорение свободного падения g и ошибку измерений:

$$g = (g_{cp} \pm \Delta g) \text{ м/с}^2.$$

3.3. Контрольные вопросы

- Дайте определения пути, перемещения, средней скорости и ускорения, мгновенной скорости и ускорения.
- Запишите уравнения равноускоренного движения.
- Постройте графики зависимости координаты, скорости, ускорения от времени в случае равномерного и равноускоренного движения.
- Сформулируйте законы Ньютона.

3.4. Список рекомендуемой литературы

- Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн.1. Механика. М.: Астрель: АСТ, 2001. § 3, 4, 7-11.
- Общий курс физики : Учеб. пособие для вузов рек. МО РФ: В 3 т. Т.1. Механика / Д.В. Сивухин . - 4-е изд., стер. - М.: Физматлит; МФТИ, 2005. § 4, 10-12.
- Стрелков С.П. Механика: Учеб. пособие для ун-тов. М.: Наука, 1975. § 8, 9, 16-21.
- Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. § 2, 3, 5-7.

ОТКРЫТИЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРА

По завершении Манхэттенского проекта (создание американской атомной бомбы) осталась «без работы» большая и быстродействующая по тем временам электронная вычислительная машина. Этим решили воспользоваться Энрико Ферми, Станислав Улам и сотрудник Ферми, физик Джон Паста. Они придумали математическую модель цепочки шариков, разделённых пружинками, которые создавали возвращающую силу, пропорциональную не первой степени отклонения от положения равновесия, как обычные пружинки, а квадрату отклонения. С помощью простаивавшего компьютера Ферми, Паста и Улам надеялись проследить за тем, как будет расплываться возмущение в такой цепочке. Предполагалось, что после достаточно большого числа циклов первоначальное возмущение равномерно распределится по всей цепочке. Но сколько ни «гоняли» компьютер, ничего похожего на равномерное распределение энергии по цепочке не наблюдалось. Это было необъяснимо!

Только через 12 лет парадокс Ферми — Пасты — Улама получил разрешение в работах Нормана Забуски, Мартина Крускала и Роберта Миуры. Оказалось, что в цепочке возникают особые волны — солитоны, которые не дают энергии равномерно распределяться по всей её длине. Солитоны — один из первых объектов нелинейной физики, которая начала бурно развиваться в конце XX в (Ю. Данилов).

4. Определение скорости полёта пули методом крутильного баллистического маятника.

Цель работы: усвоение знаний по разделам «Момент импульса системы тел. Работа и энергия», приобретение практических навыков измерения скорости полёта пули методом баллистического маятника.

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - блок;
- 2 - металлическая рамка с грузами и мишенью с подвижным грузом;
- 3 - электромагнит;
- 4 - фотодатчик;
- 5 - пули.

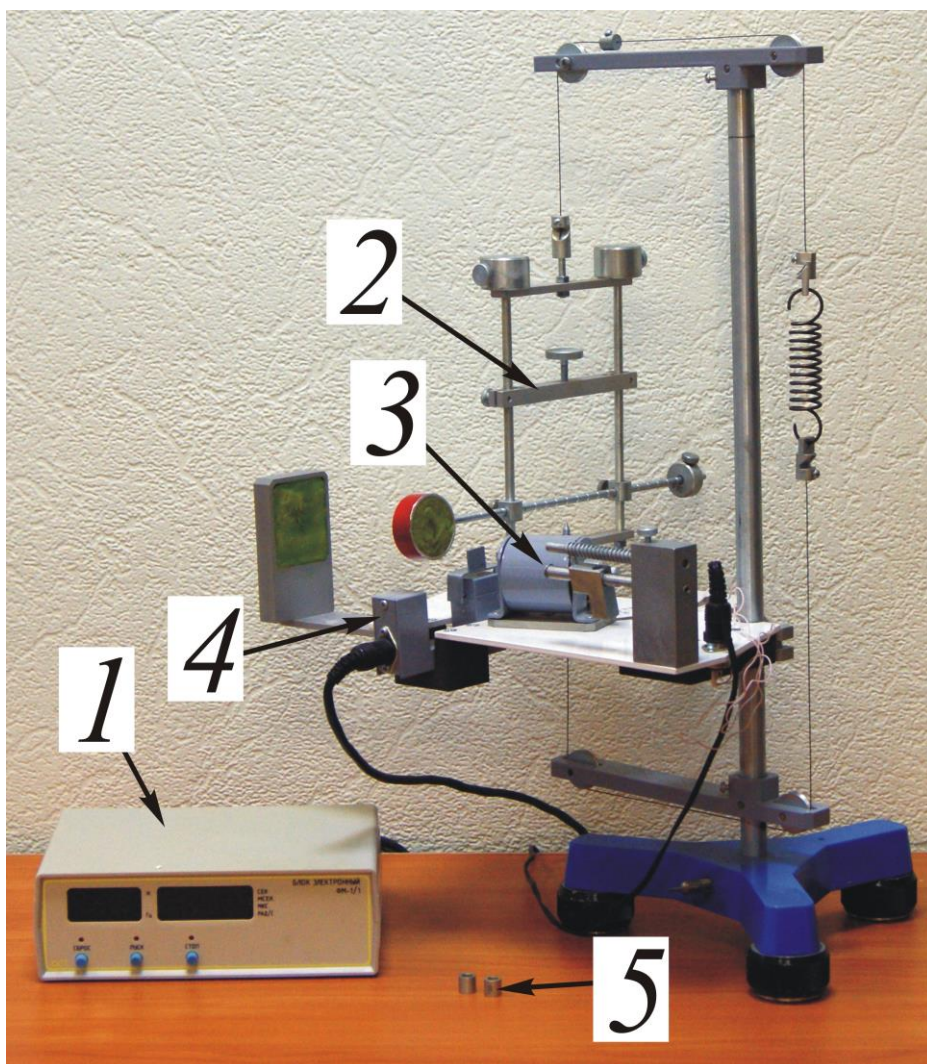


Рис. 1 Экспериментальная установка

4.1. Задание для работы

1. Определить постоянную мишени.
2. Определить скорость полета пули v .

4.2. Методика эксперимента

4.2.1. Краткие теоретические сведения

Скорость полёта пули обычно достигает значительной величины: у духового ружья она составляет $150 \div 200$ м/с, а у боевой винтовки ~ 1000 м/с. Проведём измерение скорости полёта пули на имеющейся установке методом баллистического маятника.

Баллистическим маятником называется колебательное устройство, масса которого значительно превышает массу соударяющегося с ним тела и обладающего большим по сравнению со временем взаимодействия $\Delta\tau$ периодом T собственных колебаний. После удара первоначально покоящийся маятник приобретает момент импульса и приходит в движение, причём его начальная скорость существенно меньше скорости летящего тела. В этом случае экспериментальное определение кинематических характеристик маятника упрощается.

Рассмотрим сначала явление удара (соударение), а затем движение маятника после удара (отклонение).

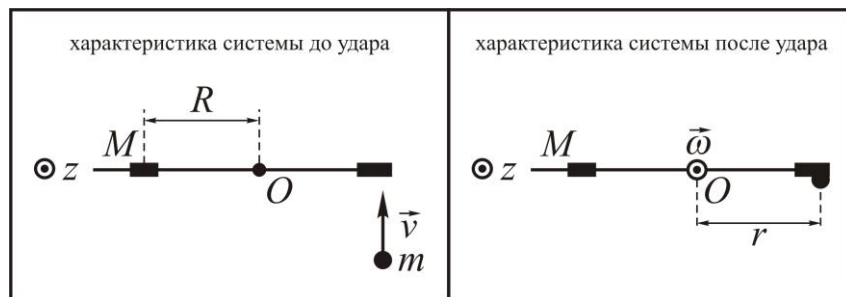


Рис. 2 Соударение

Запишем закон изменения импульса для системы « маятник–пуля»

$$\Delta \vec{L}_C = \sum \vec{M} \Delta \tau.$$

Здесь $\Delta \vec{L}_C$ – изменение момента импульса системы за время $\Delta \tau$, $\sum \vec{M}$ – сумма моментов внешних сил, действующих на систему. Так как время взаимодействия $\Delta \tau$ очень мало ($\Delta \tau \rightarrow 0$), а $\sum \vec{M}$ конечна, следовательно

$$\sum \vec{M} \Delta \tau \rightarrow 0,$$

поэтому

$$\Delta \vec{L}_C = 0,$$

или момент импульса системы при соударении сохраняется

$$\vec{L}_{C \text{ до удара}} = \vec{L}_{C \text{ после удара}}. \quad (1)$$

Моменты импульса каждого тела, входящего в систему до и после соударения, представлены в таблице:

	момент импульса тел до соударения	момент импульса тел после соударения
маятник	0	$I\vec{\omega}$
пуля	$[\vec{r} \times m\vec{v}]$	$I_n\vec{\omega}$

где I – момент инерции маятника, m – масса пули, $I_n = mr^2$ – момент инерции пули относительно оси вращения маятника, $\vec{\omega}$ – угловая скорость системы «маятник–пуля» сразу после удара.

Закон сохранения момента импульса (1) примет вид

$$[\vec{r} \times m\vec{v}] = (I + I_n)\vec{\omega}. \quad (2)$$

Относительно оси OZ получим

$$rmv = (I + I_n)\omega. \quad (3)$$



Рис. 3 Характеристика системы маятник-пуля до и после отклонения

По закону «приращения» механической энергии изменение механической энергии системы равно работе непотенциальных сил, действующих на систему

$$\Delta E = A_{\text{непотенциальных сил}}. \quad (4)$$

Если пренебречь работой непотенциальных сил трения при движении маятника, то полная механическая энергия системы остаётся постоянной

$$E_{C \text{ до отклонения}} = E_{C \text{ после отклонения}}. \quad (5)$$

Механическую энергию тел, входящих в систему до и после отклонения, запишем в таблицу

	энергия тела до отклонения	энергия тела после отклонения
маятник	$\frac{I\omega^2}{2}$	$\frac{k\varphi_m^2}{2}$
пуля	$\frac{I_n\omega^2}{2}$	0

где $\frac{I\omega^2}{2}$ и $\frac{I_n\omega^2}{2}$ – кинетическая энергия тела до отклонения маятника и пули соответственно, $\frac{k\varphi_m^2}{2}$ – потенциальная энергия упругой деформации стальной нити в момент максимального отклонения маятника от положения равновесия (k – модуль кручения упругой нити, φ_m – максимальный угол поворота маятника).

Закон сохранения механической энергии (5) для рассматриваемой системы примет вид

$$(I + I_n) \frac{\omega^2}{2} = \frac{k\varphi_m^2}{2}. \quad (6)$$

Из уравнений (3) и (6) выразим скорость полёта пули

$$v = \frac{\varphi_m}{mr} \sqrt{k(I + I_n)}. \quad (7)$$

Так как момент инерции пули $I_n = mr^2$ много меньше момента инерции I маятника, то выражение (7) можно переписать в следующем виде

$$v = \frac{\varphi_m}{mr} \sqrt{kI}. \quad (8)$$

Масса пули m выгравирована на ней, угол φ_m и расстояние r можно измерить, однако модуль кручения стальной нити k и момент инерции маятника I нам не известны.

Величину \sqrt{kI} найдём из следующего опыта. Период крутильных колебаний маятника равен:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k}}.$$

Для двух значений момента инерции маятника I_1 и I_2 соответствующие периоды колебания будут равны:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{k}} \quad \text{и} \quad T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{k}}$$

Так как момент инерции маятника зависит от положения груза M , то различные моменты инерции маятника I_1 и I_2 можно получить, располагая груз на расстояниях R_1 и R_2 от оси OZ .

Момент инерции маятника – величина аддитивная. Пусть I_{OM} – момент инерции груза M относительно оси, проходящей через его центр масс и параллельной оси вращения маятника. Тогда по теореме Гюйгенса–Штейнера момент инерции груза относительно оси OZ есть $I_{OM} + MR^2$. В этом случае для моментов инерции I_1 и I_2 получим

$$I_1 = I_0 + I_{OM} + MR_1^2 \quad \text{и} \quad I_2 = I_0 + I_{OM} + MR_2^2,$$

где I_0 – момент инерции маятника без грузов M .

Решим систему уравнений

$$\begin{cases} T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{k}} \\ T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{k}} \\ I_1 = I_0 + I_{OM} + MR_1^2 \\ I_2 = I_0 + I_{OM} + MR_2^2 \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 = \frac{T_1^2 k}{4\pi^2} \\ I_2 = \frac{T_2^2 k}{4\pi^2} \\ I_1 - I_2 = M(R_1^2 - R_2^2) \end{cases} \quad \begin{cases} (I_1 - I_2) = \frac{k}{4\pi^2} (T_1^2 - T_2^2) \\ (I_1 - I_2) = M(R_1^2 - R_2^2) \end{cases}$$

Получим

$$k = \frac{4\pi^2 M (R_1^2 - R_2^2)}{(T_1^2 - T_2^2)}, \quad I_2 = \frac{T_2^2}{(T_1^2 - T_2^2)} M (R_1^2 - R_2^2),$$

тогда

$$\sqrt{kI_2} = \frac{2\pi M T_2 (R_1^2 - R_2^2)}{(T_1^2 - T_2^2)}. \quad (9)$$

В этом выражении все величины являются непосредственно измеряемыми, следовательно, можно определить $\sqrt{kI_2}$, а по формуле (8) – скорость пули v .

«Чем дальше эксперимент от теории, тем ближе он к Нобелевской премии».

Ф. Жолио-Кюри

4.2.2. План проведения работы

I. Определить постоянную мишени

$$\sqrt{kI_2} = \frac{2\pi MT_2(R_1^2 - R_2^2)}{(T_1^2 - T_2^2)}$$

1. Установите подвижный груз на максимальное расстояние R_1 от оси вращения. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$R_1 = (R_{1cp} \pm \Delta R_1) \text{ м.}$$

2. Поместите электромагнит на угол 20° .
3. Мишень прикрепите к электромагниту. Нажмите кнопку «пуск». Измерьте время 10 колебаний t_1 (кнопку «стоп» нажмите после появления цифры 9 на шкале числа колебаний). Результат измерений занесите в Таблицу 1. Вычислите период

$$T_1 = \frac{t_1}{10} \text{ и запишите в Таблицу 1.}$$

Таблица 1

№	t_1, c	T_1, c	t_2, c	T_2, c

4. Нажмите кнопку «сброс». Проведите опыт 5 раз.
5. Установите подвижный груз на минимальное расстояние R_2 от оси вращения. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$R_2 = (R_{2cp} \pm \Delta R_1) \text{ м.}$$

6. Мишень прикрепите к электромагниту. Нажмите кнопку «пуск». Измерьте время 10 колебаний t_2 (кнопку «стоп» нажмите после появления цифры 9 на шкале числа колебаний). Результат измерений занесите в Таблицу 1. Вычислите период

$$T_2 = \frac{t_2}{10} \text{ и запишите в Таблицу 1.}$$

7. Нажмите кнопку «сброс». Проведите опыт 5 раз.
8. Вычислите $\sqrt{kI_2}$ и ошибку измерений:

$$\sqrt{kI_2} = \left(\sqrt{kI_2}_{cp} \pm \Delta \sqrt{kI_2} \right) \frac{кг \cdot м^2}{с}$$

II. Определить скорость полета пули v

$$v = \frac{\varphi_m}{mr} \sqrt{kI_2}$$

1. Положение подвижного груза не меняйте. Электромагнит отведите в крайнее положение.
2. Поместите пулю в спусковое устройство. Взведите его и произведите выстрел. По угловой шкале определите угол максимального отклонения φ_m . Результат измерений занесите в Таблицу 2.

№	φ_m , град	φ_m , рад	r , м

3. Остановите мишень. Измерьте расстояние r от оси вращения до положения центра масс пули и занесите его в Таблицу 2.
4. Повторите пункты 2-3 пять раз.
5. Вычислите скорость пули v и ошибку измерений:

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

4.3. Контрольные вопросы

1. Что называется моментом импульса тела и моментом силы?
2. Сформулируйте закон изменения момента импульса системы. В каком случае момент импульса системы сохраняется?
3. Запишите закон изменения механической энергии системы. В каком случае механическая энергия системы сохраняется?
4. Сформулируйте теорему Гюйгенса–Штейнера.

4.4. Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн.1. Механика. М.: Астрель: АСТ, 2001. § 24, 29.
2. Общий курс физики : Учеб. пособие для вузов рек. МО РФ: В 3 т. Т.1. Механика / Д.В. Сивухин . - 4-е изд., стер. - М.: Физматлит; МФТИ, 2005. § 25, 30, 33.
3. Стрелков С.П. Механика: Учеб. пособие для ун-тов. М.: Наука, 1975. § 33-35, 52-54.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. § 13, 17-19.

ВЕРШКИ И КОРЕШКИ

К сожалению, не существует надёжных критериев, позволяющих отличить сбой в аппаратуре или ошибку оператора от случайного значительного отклонения измеряемой величины. Показательна следующая история, рассказанная М. И. Подгорецким из Дубны.

Две группы физиков, занимавшихся исследованием частиц космических лучей с высокими энергиями, изучали, как изменится число регистрируемых частиц, если на пути лучей поместить толстый слой вещества. Члены одной группы считали, что из-за поглощения в веществе это количество уменьшится; другие же предполагали, что эффект размножения частиц при взаимодействии с веществом будет более существенным, чем поглощение, и, значит, число регистрируемых частиц увеличится. В результате измерений каждая группа получила итог, согласующийся с её собственным прогнозом!

Последующий анализ выявил причину странной ситуации. Частицы с большой энергией прилетают довольно редко. Если участники группы, ожидавшей уменьшения числа частиц, сталкивались с тем, что детекторы начинали срабатывать часто, они подозревали, что искрят контакты. Члены другой группы действовали совершенно иначе: сомнения в качестве контактов возникали у них при долгом отсутствии срабатываний детекторов. Поскольку измерения за подозрительный период времени и те, и другие отбрасывали, то в одном случае не учитывались большие значения случайной величины, а в другом маленькие. Естественно, средние значения числа частиц, зарегистрированных этими группами, оказались различными (С. Хорзов).

5. Исследование закона сохранения количества движения.

Цель работы: усвоение знаний по разделу «Удар абсолютно упругих и неупругих тел», приобретение практических навыков в определении импульса тела и силы соударения тел.

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - блок;
- 2 - крепление для шаров;
- 3 - электромагнит;
- 4 - набор шаров.

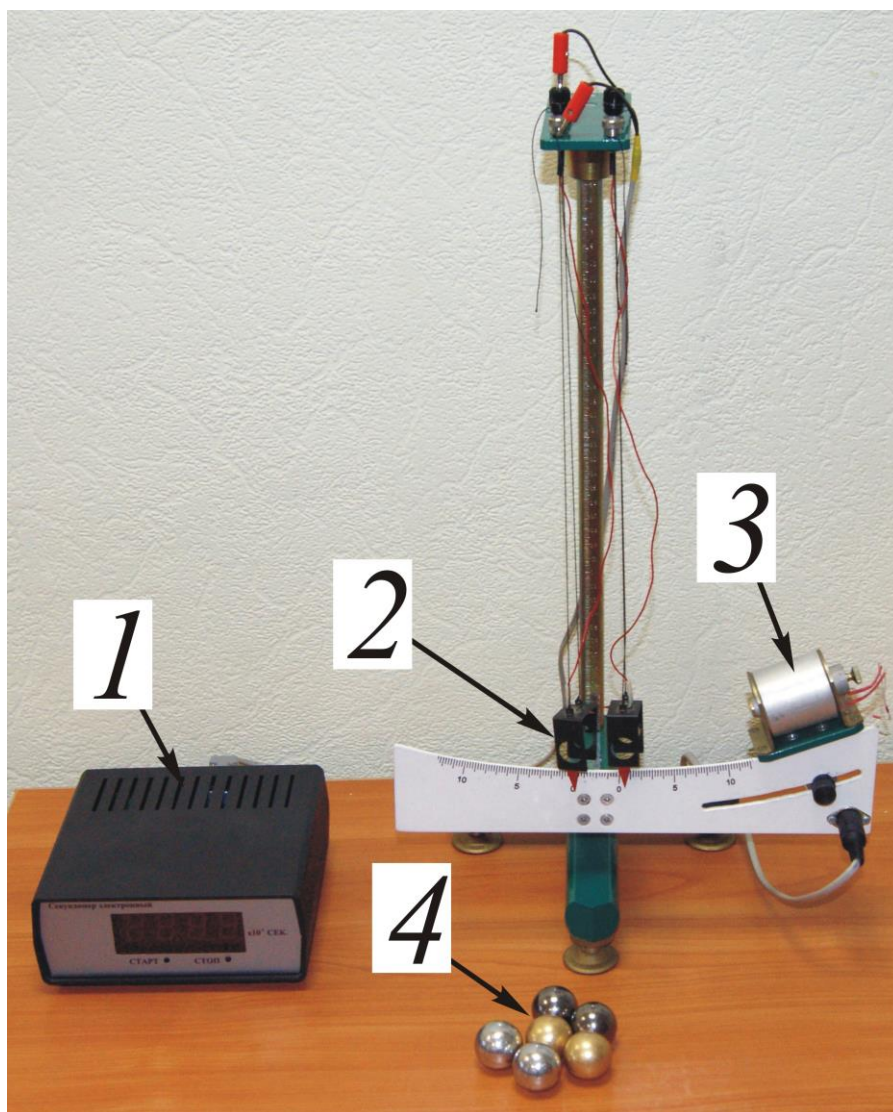


Рис. 1 Экспериментальная установка

5.1. Задание для работы

1. Проверка закона сохранения количества движения при упругом ударе.
2. Определение силы соударения упругих шаров.

5.2. Методика эксперимента

5.2.1. Краткие теоретические сведения

Удар (или соударение) – это встреча тел, при которой взаимодействие длится короткое время ($\Delta t \rightarrow 0$).

Проанализируем превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно при соударении шаров. Шары при ударе деформируются, и кинетическая энергия начинает переходить в потенциальную энергию упругих деформаций. Затем потенциальная энергия упругих деформаций переходит в кинетическую энергию и шары вновь движутся. В зависимости от того какая часть энергии упругой деформации переходит в кинетическую энергию движения шаров, соударения подразделяют на упругие и неупругие:

– в результате *абсолютно упругого удара* потенциальная энергия упругой деформации *полностью* переходит в кинетическую энергию движения шаров (выполняется закон сохранения механической энергии);

– в результате *абсолютно неупругого удара* потенциальная энергия упругой деформации *частично* переходит в кинетическую энергию движения шаров (не выполняется закон сохранения механической энергии).

Рассмотрим пример упругого соударения шаров. Ограничимся случаем центрального удара (скорости тел направлены вдоль прямой, проходящей через их центры масс). Отведем правый шар на некоторый угол α и отпустим его без начальной скорости (рис.2). Отклоненный шар будет двигаться вниз. Столкновение со вторым шаром произойдет в тот момент, когда нить первого шара установится в вертикальном положении. После упругого удара шары, двигаясь по окружностям, отклонятся на некоторые углы β и γ .

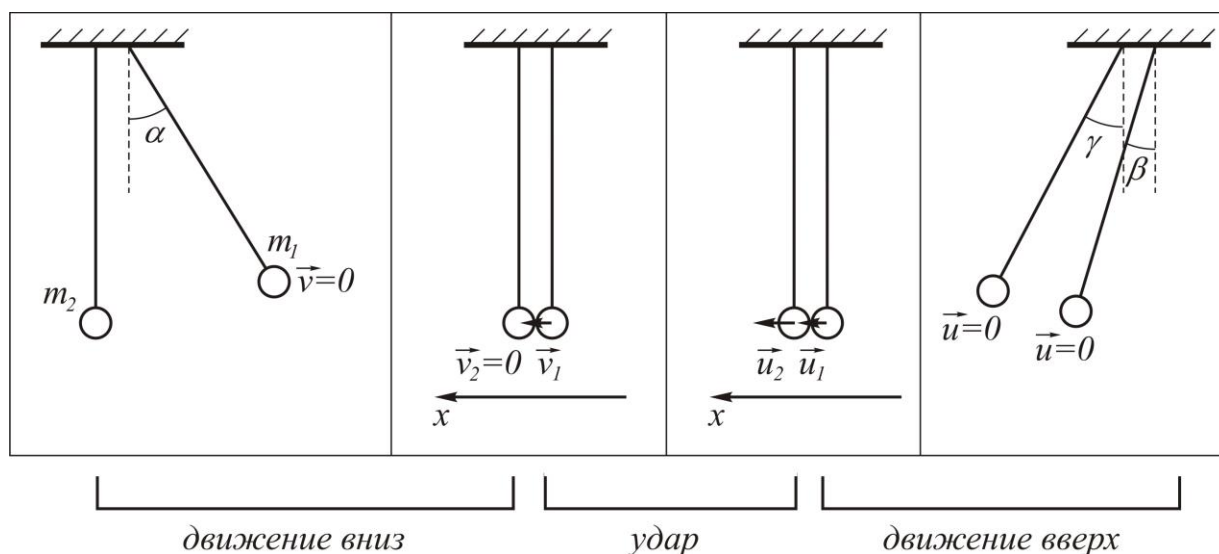


Рис.2 Процесс соударения шаров

Для выбранной системы двух шаров рассмотрим каждый из описанных процессов отдельно.

Движение вниз

По закону «приращения» механической энергии изменение механической энергии системы равно работе непотенциальных сил, действующих на систему

$$\Delta E = A_{\text{непотенциальных сил}}$$

В качестве непотенциальных сил выступает сила натяжения нити, работа которой при движении правого шара вниз равна нулю

$$A_T = \int \vec{T} d\vec{S} = \int T dS \cos 90^\circ = 0,$$

поэтому механическая энергия сохраняется

$$E_1 = E_2,$$

а именно:

$$m_1 gh = \frac{m_1 v_1^2}{2}, \quad (1)$$

где m_1 – масса первого (правого) шара, g – ускорение свободного падения, h – высота шара в отведенном положении относительно нижней точки траектории. v_1 – скорость первого шара в нижней точке перед соударением со вторым.

Из рис.3 видно, что

$$\cos \alpha = \frac{l-h}{l} \quad \text{или} \quad h = l(1 - \cos \alpha), \quad (2)$$

где l – расстояние от точки подвеса до центра тяжести шара, α – угол начального отклонения нити. Воспользуемся формулой половинного аргумента

$$1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

Подставляя (3), (2) в (1), найдем выражение для скорости через угол начального отклонения:

$$v_1 = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (4)$$

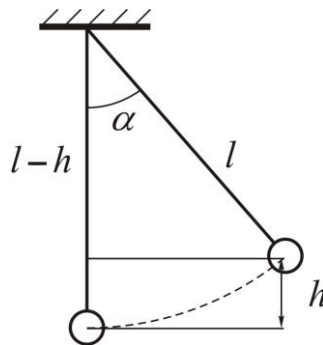


Рис.3 Определение угла из известных величин

Соударение

Запишем закон изменения импульса для системы

$$\frac{\Delta \vec{p}_c}{\Delta t} = \sum \vec{F},$$

где $\Delta \vec{p}_c$ – изменение импульса системы за время Δt , $\sum \vec{F}$ – сумма внешних сил, действующих на систему.

Если удар происходит достаточно быстро ($\Delta t \rightarrow 0$), так что нити во время удара не успевают отклониться на заметный угол, то в направлении горизонтальной оси x не возникает внешних сил и выполняется закон сохранения импульса:

$$\left(\vec{p}_{\text{до удара}} \right)_x = \left(\vec{p}_{\text{после удара}} \right)_x.$$

Закон сохранения импульса для абсолютно упругого удара в проекции на ось x , учитывая, что до удара второй шар покоился и $v_2 = 0$, будет иметь следующий вид:

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2,$$

где u_1 и u_2 – скорости шаров после удара.

Движение вверх

После удара шары получают скорости u_1 и u_2 и отклоняют нити на максимальные углы β и γ . Для скоростей шаров u_1 и u_2 получаем аналогичные (4) соотношения:

$$u_1 = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\beta}{2}, \quad u_2 = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\gamma}{2}.$$

Проверка закона сохранения импульса сводится к проверке равенства

$$m_1 \sin \frac{\alpha}{2} = m_1 \sin \frac{\beta}{2} + m_2 \sin \frac{\gamma}{2}. \quad (5)$$

Если известна длительность удара Δt , то, из второго закона Ньютона, по изменению импульса одного из шаров (например, левого) можно определить среднюю силу взаимодействия между шарами:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m_2 u_2 - m_2 v_2}{\Delta t},$$

при $v_2 = 0$ имеем

$$F = \frac{2m_2 \sqrt{gl} \sin \frac{\gamma}{2}}{\Delta t}. \quad (6)$$

«Многие указывали, что процесс превращения гипотезы в научное открытие очень хорошо иллюстрируется на примере открытия Америки Колумбом, Колумб был одержим идеей, что Земля круглая и что можно достичь Восточной Индии, плывя на Запад. Обратите внимание на следующее:

- а) идея никоим образом не была оригинальной, но он получил новую информацию;
- б) он встретился с огромными трудностями как в поиске лиц, которые могли бы его субсидировать, так и непосредственно в процессе проведения эксперимента;
- в) он не нашёл нового пути в Индию, но зато нашёл новую часть света;
- г) несмотря на все доказательства противного, он всё же верил, что открыл дорогу на Восток;
- д) при жизни он не дождался ни особого почёта, ни существенного вознаграждения;
- е) с тех пор были найдены неопровержимые доказательства, что Колумб был не первым европейцем, достигшим Америки» (Из книги «Физики шутят»).

5.2.2. План проведения работы

I. Проверка закона сохранения количества движения при упругом ударе.

1. Определите массы шаров. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$m_1 = (m_{1cp} \pm \Delta m) \text{ кг}$$

$$m_2 = (m_{2cp} \pm \Delta m) \text{ кг}$$

2. Закрепите шары.
3. Отклоните правый шар на угол α и закрепите его при помощи электромагнита. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$\alpha = (\alpha_{cp} \pm \Delta\alpha)^\circ$$

$$\alpha = (\alpha_{cp} \pm \Delta\alpha) \text{ рад}$$

4. Нажмите кнопку «пуск». Измерьте углы максимального отклонения правого шара β и левого – γ . Результаты измерений занесите в Таблицу 1. Проведите это 5 раз.

Таблица 1

№	$\beta, ^\circ$	$\beta, \text{рад}$	$\gamma, ^\circ$	$\gamma, \text{рад}$	$\Delta t, \text{с}$

5. По формуле (5) вычислите правую и левую часть, оцените погрешность измерения. Проверьте полученное равенство.

II. Определение силы соударения упругих шаров.

1. Используя данные Таблицы 1, вычислите среднюю силу взаимодействия между шарами (6), оцените погрешность измерения.

5.3. Контрольные вопросы

1. Дайте определения полностью неупругого и абсолютно упругого ударов.
2. Сформулируйте закон изменения импульса и закон изменения механической энергии.
3. Объясните большую величину силы соударения шаров при сравнительно малой их массе и скорости.

5.4. Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн.1. Механика. М.: Астрель: АСТ, 2001. § 27, 28.
2. Общий курс физики : Учеб. пособие для вузов рек. МО РФ: В 3 т. Т.1. Механика / Д.В. Сивухин . - 4-е изд., стер. - М.: Физматлит; МФТИ, 2005. § 26-28.
3. Стрелков С.П. Механика: Учеб. пособие для ун-тов. М.: Наука, 1975. § 33-35.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. § 11-15.

ИСКУССТВО ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент наряду с теорией — один из двух столпов физической науки. Это не просто созерцание происходящих вокруг явлений, а наблюдение за процессом, протекающим в определённых, заданных экспериментатором условиях; по определению Фрэнсиса Бэкона, это «вопрос природе». Эксперимент, как говорил российский физик-теоретик академик Аркадий Бейнусович Мигдал, «испытывает предсказания теории на прочность. Когда теория, наконец не выдержит, строится новая, с учётом старых фактов и тех, что появились при проверке».

Существуют как великие теории, так и великие эксперименты. Они не только остаются в лабораторных отчётах и научных журналах, но и изменяют, прямо или косвенно, нашу повседневную жизнь. За них получают премии. О них рассказывают истории и складывают легенды.

Пожалуй, первый великий эксперимент был проведён Архимедом из Сиракуз. История с короной царя Гиерона не только сделала его «отцом криминалистики», но и

показала, как исследователь в ходе поисков ответа на один вопрос может найти решение совсем иной проблемы. Однако важнее другое: Архимед был, наверное, первым учёным, опиравшимся и на теорию, и на эксперимент. Его закон плавания тел — результат наблюдений и эксперимента, закон рычага — итог размышлений и догадок. Из механики Архимеда в большей мере, чем из умозрительных рассуждений Аристотеля, выросла физическая наука.

Каждое открытие появляется на свет по-своему: в результате поиска или по прихоти случая. Предсказанные открытия можно буквально пересчитать по пальцам, зато в этом ряду есть такое яркое событие, как создание лазера: в 1953 г. научились использовать эффект, предсказанный Альбертом Эйнштейном ещё в 1916 г. Также в результате целенаправленного поиска немец Йоханнес Георг Беднорц и швейцарец Карл Александер Мюллер обнаружили высокотемпературную сверхпроводимость.

Гораздо больше в физике открытий случайных, возникающих как будто «на пустом месте». Но великий французский биолог Луи Пастёр однажды сказал, что случай помогает только подготовленному уму. Яркий тому пример — открытие другого француза, Антуана Анри Беккереля. Исследуя люминесценцию различных веществ, учёный предполагал, что она не только вызывается рентгеновскими лучами, но и может порождать их. Проведённые на основе ошибочной идеи эксперименты тем не менее закончились в 1896 г. открытием радиоактивности.

Иногда новое не замечают, проходят мимо него. Ведь учёный может просто не увидеть того, что не укладывается в привычную ему картину мира. Немецкий физик Кунце в 1933 г. наблюдал в камере Вильсона частицу в 200 раз тяжелее электрона. Это был мю-мезон. Однако, поскольку такие частицы не были известны, он счёл своё наблюдение ошибкой опыта. Повторно мезон открыли в 1938 г. американцы Карл Дэвид Андерсон и С. Неддермейер.

Обстоятельность может не только помочь в открытии нового, но и помешать. Английский физик Даниэль Колладон в 1825 г., за шесть лет до открытия явления электромагнитной индукции Майклом Фарадеем, проводил очень похожие эксперименты. Так же как и Фарадей, он подключал к чувствительному гальванометру катушку, в которую вдвигал магнит, — в этот момент по катушке протекал электрический ток. Но предосторожностей иногда бывает слишком много: чтобы уменьшить влияние магнита на гальванометр, Колладон располагал приборы в разных комнатах. Пока он не спеша доходил от магнита к измерительному прибору, стрелка успокаивалась. Не ожидая столь кратковременного эффекта, учёный не смог сделать открытия, которое удалось Фарадею, — тому помогал ассистент.

Некоторые исследователи находились на пороге открытия, но им не хватило маленького шага. Первый высокотемпературный сверхпроводник был получен за несколько лет до открытия Беднорца и Мюллера. В 1979 г. российский учёный И. С. Шاپлыгин с соавторами из Института общей и неорганической химии АН СССР исследовал проводимость соединений лантана, меди, кальция, стронция и бария, в том числе и таких, которые соответствовали сверхпроводящему веществу. Однако проводимость в области низких температур просто не догадались измерить.

Экспериментатор ищет ответы там, где другие не видят вопроса. Открытие Исааком Ньютоном составного характера белого света произошло потому, что исследователь поставил вопросы, до которых ранее никто не додумался. Эксперимент — действительно искусство задать вопрос природе, сделав это остроумно и изящно.

Однако мало получить ответ, его необходимо ещё и понять. Ведь результат может оказаться парадоксальным, не укладывающимся в сложившуюся систему научных представлений, и тогда исследователю нужны смелость, чтобы признать его, и твёрдая уверенность в правильности результата. Такие эксперименты изменяют наши понятия о мире и облик цивилизации (*А. Селиверстов*).

6. Измерение момента инерции твердого тела методом крутильных колебаний.

Цель работы: ознакомиться с элементами теории крутильных колебаний твёрдого тела и методом измерения моментов инерции твёрдых тел с помощью крутильного маятника.

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - блок;
- 2 - металлическая рамка с грузами;
- 3 - электромагнит;
- 4 - фотодатчик;
- 5 - куб;
- 6 - исследуемые тела.

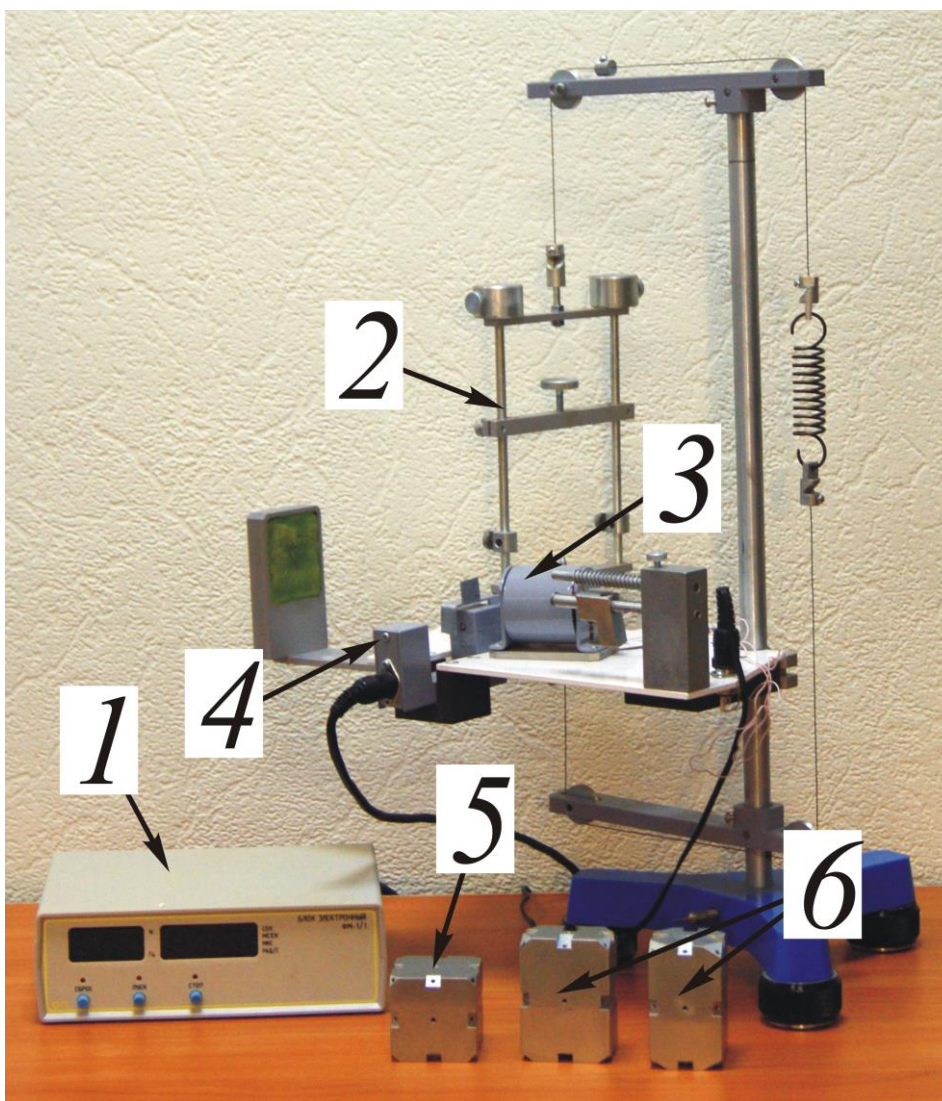


Рис. 1 Экспериментальная установка

6.1. Задание для работы

1. Определить момент инерции тела (по указанию преподавателя).

6.2. Методика эксперимента

6.2.1. Краткие теоретические сведения

Одним из удобных методов измерения момента инерции твёрдого тела является метод крутильных колебаний. Исследуемое тело, насаженное на вертикальный вал, совершает крутильные колебания.

Пусть исследуемое тело A (рис.2) зажато в рамке B , прикреплённой к двум натянутым стальным нитям B и Γ .

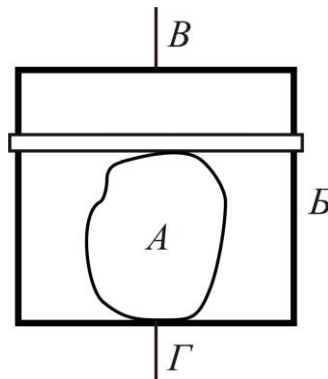


Рис.2 Исследуемое тело в рамке

Если закрутить рамку вокруг направления нити на некоторый угол φ от положенного равновесия, то возникает момент упругих сил, стремящихся вернуть рамку в положение равновесия. В результате этого система начнёт совершать крутильные колебания.

Период крутильных колебаний T связан с моментом инерции I системы относительно оси колебаний

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_{\text{сис}}}{k}}, \quad (1)$$

где k – коэффициент упругости нитей. В нашем случае для тела A , закреплённого в рамке B , формула (1) примет вид

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I + I_p}{k}}, \quad (2)$$

где I – момент инерции закреплённого в рамке тела, I_p – момент инерции рамки. Откуда

$$I = \frac{k}{4\pi^2} T^2 - I_p. \quad (3)$$

Период колебания системы T может быть измерен непосредственно. Для определения момента инерции рамки I_p запишем формулу (2) для случая, когда тело в рамке отсутствует

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{I_p}{k}}$$

или

$$I_p = \frac{k}{4\pi^2} T_p^2, \quad (4)$$

где T_p – период колебаний свободной рамки.

Для определения коэффициента упругости k воспользуемся эталонным методом. В качестве эталона возьмём тело, момент инерции которого может быть рассчитан теоретически. В данной работе эталонным телом будет являться кубик массой m_k , со сторонами a (рис.3), момент инерции которого можно рассчитать по формуле:

$$I_k = \frac{m_k a^2}{6}. \quad (5)$$

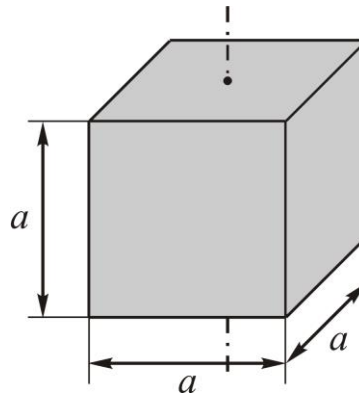


Рис. 3 Эталонное тело

Запишем формулу (2) для периода колебаний с эталонным телом

$$T_k = 2\pi \sqrt{\frac{I_k + I_p}{k}},$$

где T_k – период колебаний системы с эталонным телом. Откуда

$$k = \frac{4\pi^2}{T_k^2} (I_k + I_p), \quad (6)$$

Подставив (4) в (3) и (6), получим систему

$$\begin{cases} I = \frac{k}{4\pi^2} (T^2 - T_p^2) \\ k = \frac{4\pi^2}{T_k^2} (I_k + \frac{k}{4\pi^2} T_p^2) \end{cases}, \quad (7)$$

решив которую, получим момент инерции закреплённого в рамке тела I

$$I = I_k \frac{T^2 - T_p^2}{T_k^2 - T_p^2}. \quad (8)$$

Зная выражение для определения момента инерции эталонного тела (кубика) (5), получим окончательную формулу для вычисления момента инерции исследуемого тела, закреплённого в рамке

$$I = \frac{m_k a^2}{6} \frac{T^2 - T_p^2}{T_k^2 - T_p^2}. \quad (9)$$

Период колебаний T определяется через число колебаний N и время этих колебаний t :

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

Целесообразно при всех измерениях T, T_p, T_{II} брать одно и тоже значение N (например $N=10$). Тогда формула (9) сводится к формуле:

$$I = \frac{m_k a^2}{6} \frac{t^2 - t_p^2}{t_k^2 - t_p^2}. \quad (10)$$

6.2.2. План проведения работы

I. *Определить момент инерции тела (по указанию преподавателя).*

1. Измерьте массу m_k куба и его сторону a (штангенциркулем). Результаты измерений запишите с учётом погрешности прибора

$$m_k = (m_{kcp} \pm \Delta m) \text{ кг},$$

$$a = (a_{cp} \pm \Delta a) \text{ м}.$$

2. Для измерения времени десяти колебаний свободной рамки t_p поверните её на угол $\varphi \approx 10^\circ$. Нажатием на кнопку «Сброс» обнулите прибор. Отпустите рамку, нажав кнопку «Пуск». Через 9 колебаний нажмите на кнопку «стоп». Результаты измерений занесите в Таблицу 1. Опыт повторите 5 раз.

Таблица 1

№	t_p, c	t_k, c	t, c

3. Закрепив в рамку кубик, измерьте время 10 колебаний t_k . Результаты измерений занесите в Таблицу 1.
4. Закрепив в рамку исследуемое тело, измерьте время 10 колебаний t . Результаты измерений занесите в Таблицу 1.
5. По формуле (10) вычислите момент инерции исследуемого тела I и оцените точность измерений.

6.3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение момента инерции твердого тела относительно неподвижной оси.
2. Запишите период крутильных колебаний физического маятника.
3. Запишите момент инерции тел различной формы.
4. Запишите уравнение динамики крутильных колебаний.

6.4. Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн.1. Механика. М.: Астрель: АСТ, 2001. § 38, 39, 41.
2. Стрелков С.П. Механика: Учеб. пособие для ун-тов. М.: Наука, 1975. § 52, 55, 59.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. § 15, 17.

«...Одной из главных причин потока научной литературы является то, что, когда исследователь достигает стадии, на которой он перестаёт видеть за деревьями лес, он слишком охотно склоняется к разрешению этой трудности путём перехода к изучению отдельных листьев».

«Ланцет», декабрь 1960 г.

7. Изучение движения маятника Максвелла.

Цель работы: познакомиться с методом экспериментального определения момента инерции твёрдого тела относительно оси симметрии на примере маятника Максвелла.

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - блок;
- 2 - верхний кронштейн с электромагнитом;
- 3 - визир;
- 4 - диск с осью подвешенной на двух нитях;
- 5 - нижний кронштейн с фотодатчиком;
- 6 - съёмные кольца.

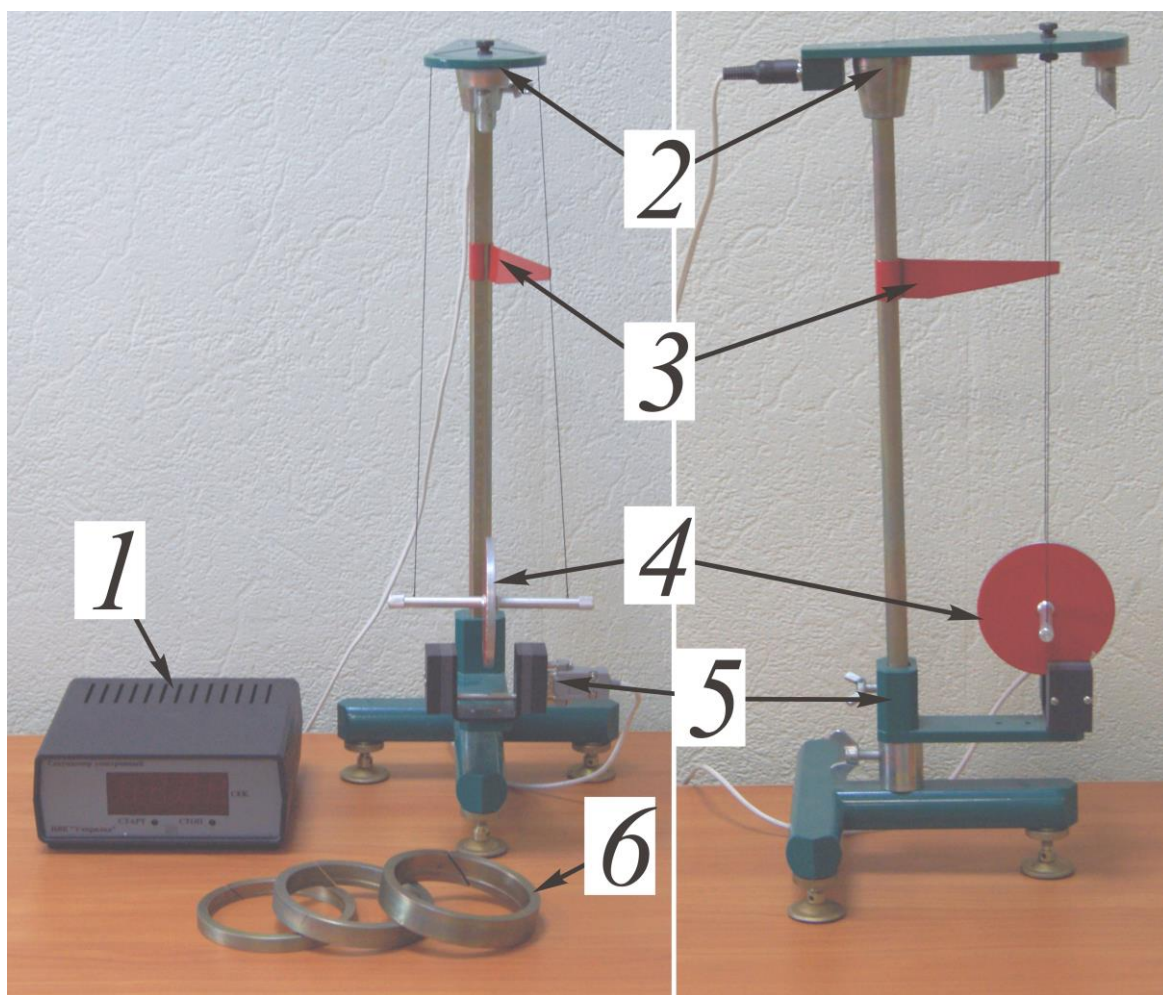


Рис. 1 Экспериментальная установка

7.1. Задание для работы

1. Экспериментально определить значения моментов инерций различных колец.
2. Аналитически определить значения моментов инерций различных колец.

7.2. Методика эксперимента

7.2.1. Краткие теоретические сведения

Наиболее удобным способом описания движения маятника является такой, при котором движение маятника рассматривается как сложение его поступательного движения и вращения относительно центра масс маятника.

Для описания плоского движения достаточно записать два уравнения:

– уравнение движения центра масс

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

– уравнение вращательного движения вокруг оси, проходящей через центр

$$\sum \vec{M} = I\vec{\varepsilon},$$

Здесь $\sum \vec{F}$ и $\sum \vec{M}$ – результирующая сила и момент сил соответственно, m – масса маятника, I – момент инерции маятника, \vec{a} и $\vec{\varepsilon}$ – линейное и угловое ускорение маятника.

Указав силы, действующие на маятник (рис.2), запишем уравнения плоского движения.

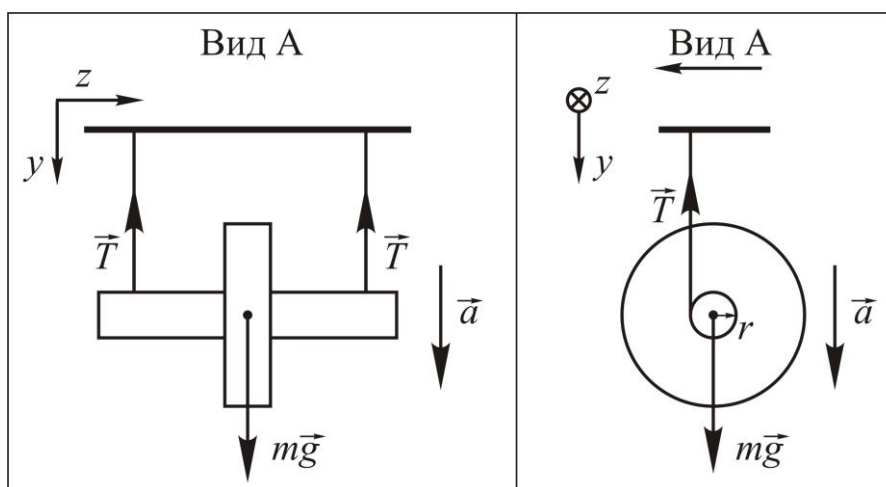


Рис.2 Движение маятника

$$\begin{cases} m\vec{g} + \vec{T} + \vec{T} = m\vec{a} \\ \vec{M}_{mg} + \vec{M}_T + \vec{M}_T = I\vec{\varepsilon} \end{cases} \quad (1)$$

Для решения системы (1) перейдем от векторной формы записи к скалярной. Тогда

$$\begin{cases} mg - 2T = ma \\ 0 + Tr + Tr = I\varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

Ускорение a поступательного движения маятника связано с угловым ускорением ε условием

$$a = \varepsilon r, \quad (3)$$

где r – радиус оси. С учётом (3) система (2) преобразуется

$$\begin{cases} mg - 2T = ma \\ 2Tr = I \frac{a}{r} \end{cases} .$$

Откуда

$$a = \frac{mg}{m + \frac{I}{r^2}} . \quad (4)$$

Все параметры, входящие в правую часть выражения (4), являются постоянными величинами, следовательно, поступательное движение – равноускоренным ($a = const$).

Из закона равноускоренного движения

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

где h – путь, пройденный центром масс из состояния покоя за время t .

Подставляя (5) в (4), выразим момент инерции маятника Максвелла

$$I = mr^2 \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right) \text{ или } I = \frac{md^2}{4} \left(\frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (6)$$

Здесь $d = 2r$ – диаметр оси.

Масса маятника определяется как сумма массы диска с осью m_0 и массы кольца m_k , которое может быть надето на диск маятника

$$m = m_0 + m_k . \quad (7)$$

Момент инерции маятника определяется суммой моментов инерции диска с осью I_0 и кольца I_k , если оно надето на диск, поэтому

$$I = I_0 + I_k \quad (8)$$

Для исключения I_0 из уравнения (8) проведем эксперимент с различными кольцами. Запишем моменты инерций систем с кольцами для трех случаев

$$\begin{cases} I_1 = I_0 + I_{k_1} \\ I_2 = I_0 + I_{k_2} \\ I_3 = I_0 + I_{k_3} \end{cases} \quad (9)$$

Размеры исследуемых колец одинаковы, следовательно

$$\frac{I_{k_1}}{I_{k_2}} = \frac{m_{k_1}}{m_{k_2}} ; \text{ и } \frac{I_{k_1}}{I_{k_3}} = \frac{m_{k_1}}{m_{k_3}} ; \quad (10)$$

Решая (6),(9) и (10), находим моменты инерций колец $I_{k_1}, I_{k_2}, I_{k_3}$

$$\begin{aligned} I_{k_1} &= \frac{m_{k_1} d^2}{4} \left[\frac{g \left[(m_0 + m_{k_1}) t_1^2 - (m_0 + m_{k_2}) t_2^2 \right]}{2h(m_{k_1} - m_{k_2})} - 1 \right]; \\ I_{k_2} &= \frac{m_{k_2} d^2}{4} \left[\frac{g \left[(m_0 + m_{k_1}) t_1^2 - (m_0 + m_{k_2}) t_2^2 \right]}{2h(m_{k_1} - m_{k_2})} - 1 \right]; \\ I_{k_3} &= \frac{m_{k_3} d^2}{4} \left[\frac{g \left[(m_0 + m_{k_1}) t_1^2 - (m_0 + m_{k_3}) t_3^2 \right]}{2h(m_{k_1} - m_{k_3})} - 1 \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

Как-то раз английского астронома **Артура Эддингтона** спросили:

— Сэр, правду ли говорят, что вы один из трех человек в мире, которые понимают теорию относительности Эйнштейна?

Наступило неловкое молчание — ученый явно затруднялся с ответом. Тогда спрашивающий поспешил исправить положение:

— Может быть, сэр, я что-то не так сказал? Мне, видимо, сэр, следовало бы догадаться, что вы, сэр, при всей вашей скромности, сочтете мой вопрос несколько бестактным. В таком случае, сэр, позвольте...

— Ничего... ничего...— благодушно прервал его Эддингтон.— Просто я задумался, пытаюсь вспомнить, кто же этот третий.

<http://physics03.narod.ru/index.htm>

7.2.2. План проведения работы

I. Экспериментально определить значения моментов инерций различных колец

1. Измерьте штангенциркулем диаметр оси. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$d = (d_{cp} \pm \Delta d) \text{ м.}$$

2. Определите массу диска с осью m_0 . Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$m_0 = (m_{0cp} \pm \Delta m_0) \text{ кг.}$$

3. Масса кольца m_{κ} выбита на поверхности кольца. Запишите массу кольца:

$$m_{\kappa_i} = (m_{\kappa_i, cp} \pm \Delta m_{\kappa_i}) \text{ кг.}$$

4. Закрепите кольцо на диск маятника.
5. Накручивая веревку на ось, поднимите маятник до крайнего верхнего положения. Измерьте расстояние от нижнего края кольца до фотодатчика. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$h = (h_{cp} \pm \Delta h) \text{ м.}$$

6. Измерьте время t_1 движения диска с осью и кольцом от визира до нижнего кронштейна с фотодатчиком. Результаты измерения занесите в Таблицу 1. Проведите это 5 раз.

Таблица 1

N_0	t_1, c	t_2, c	t_3, c

7. Повторите пункты 3, 4, 6 с другими кольцами (количество колец - 2 или 3 - определяет преподаватель) и запишите соответствующие времена движений в Таблицу 1.
8. По формулам (11) вычислите моменты инерций колец $I_{\kappa_1}, I_{\kappa_2}, (I_{\kappa_3})$, оцените погрешность измерений.

II. Аналитически определить значения моментов инерций различных колец Момент инерции кольца

$$I_{\kappa_i} = \frac{m_{\kappa_i}}{8} (d_1^2 + d_2^2),$$

где d_1 и d_2 – внутренний и внешний диаметры кольца.

1. Измерьте штангенциркулем внутренний и внешний диаметры кольца. Результаты запишите с учётом погрешности прибора:

$$d_1 = (d_{1cp} \pm \Delta d_1) \text{ м}$$

$$d_2 = (d_{2cp} \pm \Delta d_2) \text{ м}$$

2. Вычислите моменты инерций колец I_{κ_i} и ошибки измерений:

$$I_{\kappa_i} = (I_{\kappa_i, cp} \pm \Delta I_{\kappa_i}) \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

3. Сравните экспериментально и аналитически полученные значения моментов инерций колец.

7.3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение момента инерции твердого тела относительно неподвижной оси.
2. Запишите период крутильных колебаний физического маятника.
3. Запишите момент инерции тел различной формы.
4. Сформулируйте теорему Штейнера.
5. Запишите уравнение динамики крутильных колебаний.

7.4. Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн.1. Механика. М.: Астрель: АСТ, 2001. § 38, 39, 41.
2. Стрелков С.П. Механика: Учеб. пособие для ун-тов. М.: Наука, 1975. § 52, 55, 59.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. § 15, 17.

Как известно, явление сверхтекучести жидкого гелия было в предвоенные годы экспериментально исследовано П.Л.Капицей и теоретически объяснено Л.Д.Ландау. Менее известно, что в конце 40-х гг. идею Ландау о том, что при температуре, меньшей 2,17 К, жидкий гелий состоит из двух компонент, нормальной и сверхтекучей, с помощью ряда изящных опытов подтвердил Э.Л.Андроникашвили, впоследствии академик АН Грузинской ССР, родной брат литературоведа И.Л.Андроникова. В конце 50-х гг., посещая знаменитую Лейденскую лабораторию, основанную еще в начале века Г.Камерлинг-Оннесом, где и начались исследования свойств жидкого гелия, Андроникашвили познакомился с лауреатом Нобелевской премии по физике **Р.Фейнманом** и однажды спросил его:

«– Скажите, Фейнман, когда вы начали заниматься гелием?

– Ха! – ответил тот. – С того дня, как прочитал вашу работу «Два вида движения в гелии-II».

– Бросьте шутить!

– Я не шучу. Мне сказали, что какой-то Андроникашвили написал работу о том, что гелий-II может стоять и двигаться одновременно. «Чепуха, – подумал я. – Это какой-то сумасшедший». Потом я услышал об этой работе второй раз. Дай, думаю, посмотрю, кого благодарит этот Андроникашвили. Оказывается, благодарит Капицу и Ландау. Тогда я решил, что в одном институте не может быть сразу трех сумасшедших и постарался понять, в чем тут дело. А потом заинтересовался этой проблемой и стал работать сам»

<http://physics03.narod.ru/index.htm>

8. Изучение вращательного движения тела (маятник Обербека).

Цель работы: проверка основного закона вращательного движения тела:

$$M_z = I_z \varepsilon .$$

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - блок
- 2 - верхний кронштейн с блоком;
- 3 - средний кронштейн с двухступенчатым шкивом;
- 4 - визир;
- 5 - нижний кронштейн с фотодатчиком;
- 6 - крестовина с четырьмя подвижными грузами;
- 7 - грузы;
- 8 - платформа для грузов;
- 9 - нерастяжимая веревка.

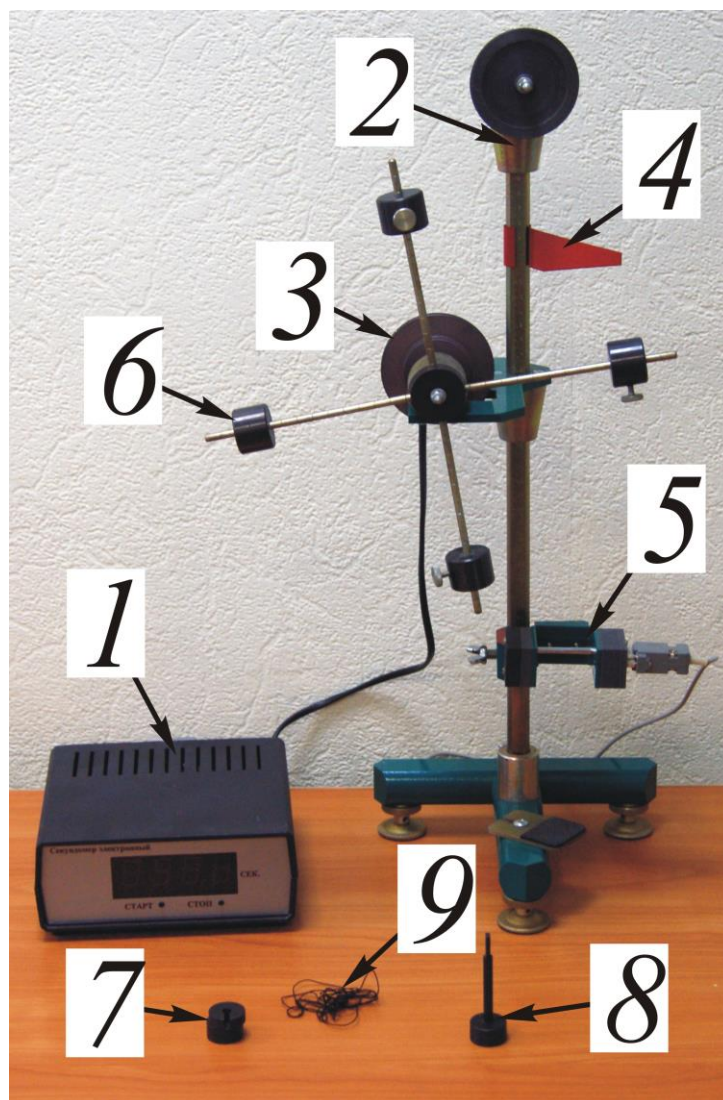


Рис. 1 Экспериментальная установка

8.1. Задание для работы

1. Исследовать зависимость $\varepsilon = f(M)$, при $I = const$.
2. Исследовать зависимость $\varepsilon = f(I)$, при $M = const$.

8.2. Методика эксперимента

8.2.1. Краткие теоретические сведения

Одним из простых видов движения твёрдого тела является его вращение относительно неподвижной оси. Изучению законов вращательного движения и посвящена настоящая лабораторная работа.

Напомним, что вращение твёрдого тела вокруг неподвижной оси описывается уравнением динамики вращательного движения

$$\sum \vec{M} = I\vec{\varepsilon}. \quad (1)$$

Здесь $\sum \vec{M}$ – сумма моментов внешних сил, I – момент инерции тела относительно оси вращения, $\vec{\varepsilon}$ – угловое ускорение.

Экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.2, известна как маятник Обербека.

Маятник состоит из четырёх спиц, укрепленных на втулке под прямым углом друг к другу. На той же втулке имеется шкив радиусом r . Вся эта система может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси O . Момент инерции системы можно менять, передвигая грузы m_0 вдоль оси спиц.

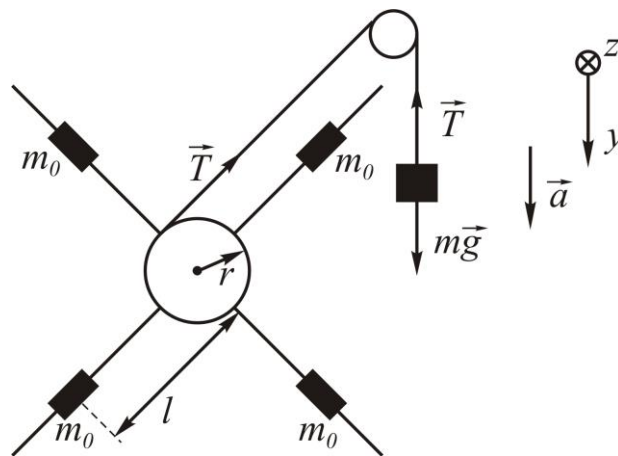


Рис.2 Маятник Обербека

Рассмотрим уравнение вращательного движения маятника (1).

На маятник действуют:

- сила тяжести $M\vec{g}$ (M – масса маятника);
- сила реакции опоры \vec{N} ;
- момент силы трения в оси вращения $\vec{M}_{тр}$;
- сила натяжения нити \vec{T} .

С учётом этого закон (1) примет вид:

$$\vec{M}_{Mg} + \vec{M}_N + \vec{M}_{тр} + \vec{M}_T = I\vec{\varepsilon}.$$

Спроецировав это уравнение на ось OZ , получим

$$Tr - M_{тр} = I\varepsilon. \quad (2)$$

Для определения силы натяжения нити, рассмотрим поступательное движение груза m . Согласно второму закону Ньютона имеем:

$$\vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a}.$$

В проекциях на ось OY :

$$-T + mg = ma, \quad (3)$$

где ускорение a поступательного движения груза связано с угловым ускорением ε маятника кинематическим условием

$$a = \varepsilon r, \quad (4)$$

выражающим разматывание нити со шкива без проскальзывания.

Мы получим систему уравнений

$$\begin{cases} Tr - M_{mp} = I\varepsilon \\ -T + mg = ma, \\ a = \varepsilon r \end{cases} \quad (5)$$

оттуда выразим угловое ускорение:

$$\varepsilon = \frac{mgr - M_{mp}}{I + mr^2} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{mgr - M_{mp}}{I(1 + \frac{mr^2}{I})} \quad (6)$$

Проанализируем полученную зависимость. В формулу(6) входят:

- момент трения M_{mp} ;
- вращающий момент mgr ;
- момент инерции маятника I ;
- величина mr^2 .

M_{mp} : это неизвестная величина и поэтому мы ею не можем пренебречь по сравнению с mgr .

I : момент инерции маятника, согласно теореме Гюйгенса-Штейнера и свойству аддитивности момента инерции, может быть записан в виде:

$$I = I' + 4m_0l^2,$$

здесь I' - момент инерции маятника относительно оси OZ , при условии, что центр масс каждого груза m_0 находится на оси вращения, l - расстояние от оси до центра грузов m_0 .

mr^2 : В условиях опыта $\frac{mr^2}{I} < 0,01$. Пренебрегая этой величиной в знаменателе (6), получаем формулу:

$$\varepsilon = \frac{mgr - M_{mp}}{I' + 4m_0l^2} \quad (7)$$

ε : Мы уже указывали на связь углового ускорения маятника и поступательного движения груза m

$$\varepsilon = \frac{a}{r}.$$

Из закона равноускоренного движения

$$a = \frac{2h}{t^2},$$

где h - путь, пройденный грузом m из состояния покоя за время t . Определив h , t и r , найдём ε . С учетом зависимости углового ускорения выражение (7) примет вид

$$\frac{2h}{rt^2} = \frac{mgr - M_{mp}}{I' + 4m_0l^2},$$

или

$$t^2 = \frac{2h}{r} \frac{I' + 4m_0l^2}{mgr - M_{mp}}. \quad (8)$$

Проверка основного закона вращательного движения тела сводится к проверке равенства (8).

Экспериментально исследуем две зависимости:

а) $t^2 = f(l^2)$, при $m = const$, а именно зависимость квадрата времени t^2 от расстояния l от оси вращения до грузов m_0 , при условии, что масса грузов m остается постоянной:

$$t^2 = \frac{8hm_0}{r(mgr - M_{mp})} \left(l^2 + \frac{I'}{4m_0} \right), \quad (9)$$

Если для левой части выбрать переменные t^2 , а для правой l^2 , то получится линейная зависимость, которую можно отобразить на графике (рис.3)

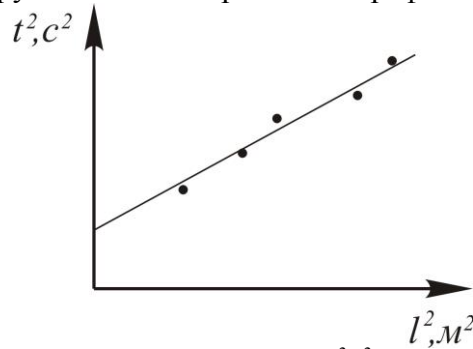


Рис. 3 Зависимость $t^2(l^2)$

б) $\frac{1}{t^2} = f(m)$, при $l = const$, а именно зависимость $\frac{1}{t^2}$ от масса грузов m , при условии, что расстояние l от оси вращения до грузов m_0 остается постоянной:

$$\frac{1}{t^2} = \frac{r^2 g}{2h(I' + 4m_0l^2)} \left(m - \frac{M_{mp}}{rg} \right), \quad (10)$$

Выберем для левой части переменные $\frac{1}{t^2}$, а для правой m . Получится линейная зависимость, которую можно отобразить на графике (рис.4)

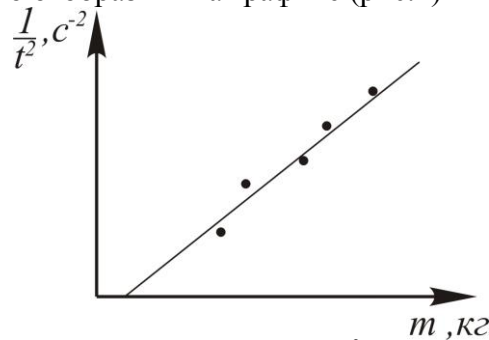


Рис.4 Зависимость $1/t^2(m)$

Проверка закона вращательного движения тела сводится к проверке на линейность выражений (9) и (10).

8.2.2. План проведения работы

I. Исследовать зависимость $t^2 = f(l^2)$, при $m = const$.

1. На платформу для грузов положите груз и измерьте общую массу платформы и груза m . Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$m = (m_{cp} \pm \Delta m) \text{ кг.}$$

2. Помещая подвижные грузы в положения, указанные в Таблице 1 (столбец l), измерьте время движения груза t . Результаты измерения занесите в Таблицу 1.

Таблица 1

№	$l, \text{ см}$	$l^2, \text{ м}^2$	$t, \text{ с}$	$t^2, \text{ с}^2$
1	6			
2	9			
3	12			
4	15			

3. По данным таблицы постройте график, выбрав оси, как на рис.3.

II. Исследовать зависимость $\frac{1}{t^2} = f(m)$, при $l = const$.

1. Поместите подвижные грузы на расстояние l от оси вращения. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$l = (l_{cp} \pm \Delta l) \text{ см.}$$

2. Помещая грузы на платформу для грузов, получите массу m , указанную в Таблице 2, измерьте время движения груза t . Результаты измерения занесите в Таблицу 2.

Таблица 2

№	$m, \text{ г}$	$t, \text{ с}$	$\frac{1}{t^2}, \text{ с}^{-2}$
1	50		
2	90		
3	130		
4	170		
5	210		

3. По данным таблицы постройте график, выбрав оси, как на рис.4.

8.3. Контрольные вопросы

1. Что мы называем абсолютно твёрдым телом?
2. Какое уравнение описывает вращение твёрдого тела относительно неподвижной оси?
3. Сформулируйте теорему Гюйгенса-Штейнера.
4. Какие измерения в проведённых Вами экспериментах вносили наибольшую погрешность? Что необходимо сделать для уменьшения этой погрешности?

8.4. Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн.1. Механика. М.: Астрель: АСТ, 2001. § 38, 39, 41.
2. Общий курс физики : Учеб. пособие для вузов рек. МО РФ: В 3 т. Т.1. Механика / Д.В. Сивухин . - 4-е изд., стер. - М.: Физматлит; МФТИ, 2005. § 33, 35.
3. Стрелков С.П. Механика: Учеб. пособие для ун-тов. М.: Наука, 1975. § 52, 55, 59.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. § 16 - 17.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Важной характеристикой атомных ядер и элементарных частиц является время жизни. Объекты микромира не знают своей истории. Ядро урана – 238, образовавшееся несколько миллиардов лет назад и дожившее до наших времён, имеет точно такие же шансы распасться в течение от ближайших дней, как и ядро, только вчера синтезированное в лаборатории. В отличие биологических объектов «старая» элементарная частица не имеет принципиальных отличий от «юной».

Отсюда следует простой закон, описывающий распад ядер и элементарных частиц:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где N_0 – число частиц или ядер в момент времени $t = 0$, N — число выживших к моменту времени t , а τ — среднее время жизни данного ядра или элементарной частицы. За время τ количество нестабильных объектов уменьшается в e раз ($e = 2,718$).

Когда речь идёт о распаде атомных ядер, то вместо времени жизни τ обычно используют понятие периода полураспада $T_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau \approx 0,693\tau$. За время, равное периоду полураспада, число радиоактивных ядер уменьшается в два раза.

Если период полураспада какого-нибудь ядра составляет несколько часов, дней или месяцев, определить период полураспада в принципе нетрудно. Но, когда время жизни изотопа исчисляется миллионами и миллиардами лет, этот способ измерения непригоден, и период полураспада долгоживущих изотопов определяют, подсчитывая число распадов в единицу времени образца, содержащего известное количество ядер N . Количество ядер в образце можно найти, зная его вес, атомную массу и число Авогадро. Из закона радиоактивного распада следует, что число распадов в единицу времени равно

$$\frac{\ln 2}{T_{1/2}} N.$$

Таким способом были измерены периоды полураспада многих долгоживущих изотопов. Чувствительность метода настолько высока, что удалось измерить даже период полураспада германия – 76, оказавшийся равным $1,5 \cdot 10^{21}$ лет.

При измерении больших времён изотоп с известным периодом полураспада сам может использоваться как часы (причём такие часы в состоянии выдерживать колоссальные температуры, давления и ускорения, практически не меняя «скорости хода»). Так, урановый хронометр даёт ценнейшую информацию об истории Вселенной. Доля урана – 235 в природном уране всего 0,72 %, а более 99 % составляет уран – 238. Их периоды полураспада соответственно равны $7 \cdot 10^8$ и $4,47 \cdot 10^8$ лет. Во времена, когда шёл процесс образования тяжёлых элементов, концентрации обоих изотопов были примерно одинаковыми. Решив простое уравнение, обнаружим, что это время отделено от нашего промежутком около 5 млрд лет.

Красивый способ применяется при измерении малых времён жизни элементарных частиц. Если нестабильная частица прожила время t и двигалась со скоростью v , много меньшей скорости света, то она пролетит до распада расстояние, равное vt . Измеряя скорость частиц и расстояние, которое каждая из них пролетела до точки распада, и усредняя эти величины, можно найти среднее время жизни частиц данного вида. В 1985 г. физикам, работавшим на ускорителе заряженных частиц в Женеве, удалось по длине пробега установить время жизни π^0 (пи-нуль) мезона, оказавшееся равным $0,9 \cdot 10^{-16}$ с. Средняя скорость мезонов, с которыми имели дело экспериментаторы, составляла 0,9999998 от скорости света в вакууме. Время в системе отсчёта, связанной с такими пи-мезонами, текло за счёт релятивистского эффекта примерно в 1800 раз медленнее, чем в лабораторной системе. Если бы не эффект замедления времени в движущейся системе отсчёта, исследуемые частицы за время жизни пролетали бы расстояние около $3 \cdot 10^{-5}$ мм (С. Хорозов).

9. Изучение трения качения (наклонный маятник).

Цель работы: экспериментальное изучение силы трения качения и определение коэффициента трения качения с помощью наклонного маятника.

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - наклонный маятник;
- 2 - нить с крепежом для шариков;
- 3 - шарики;
- 4 - пластины из различных материалов;
- 5 - винт наклона плоскости маятника;
- 6 - шкала угла наклона маятника.

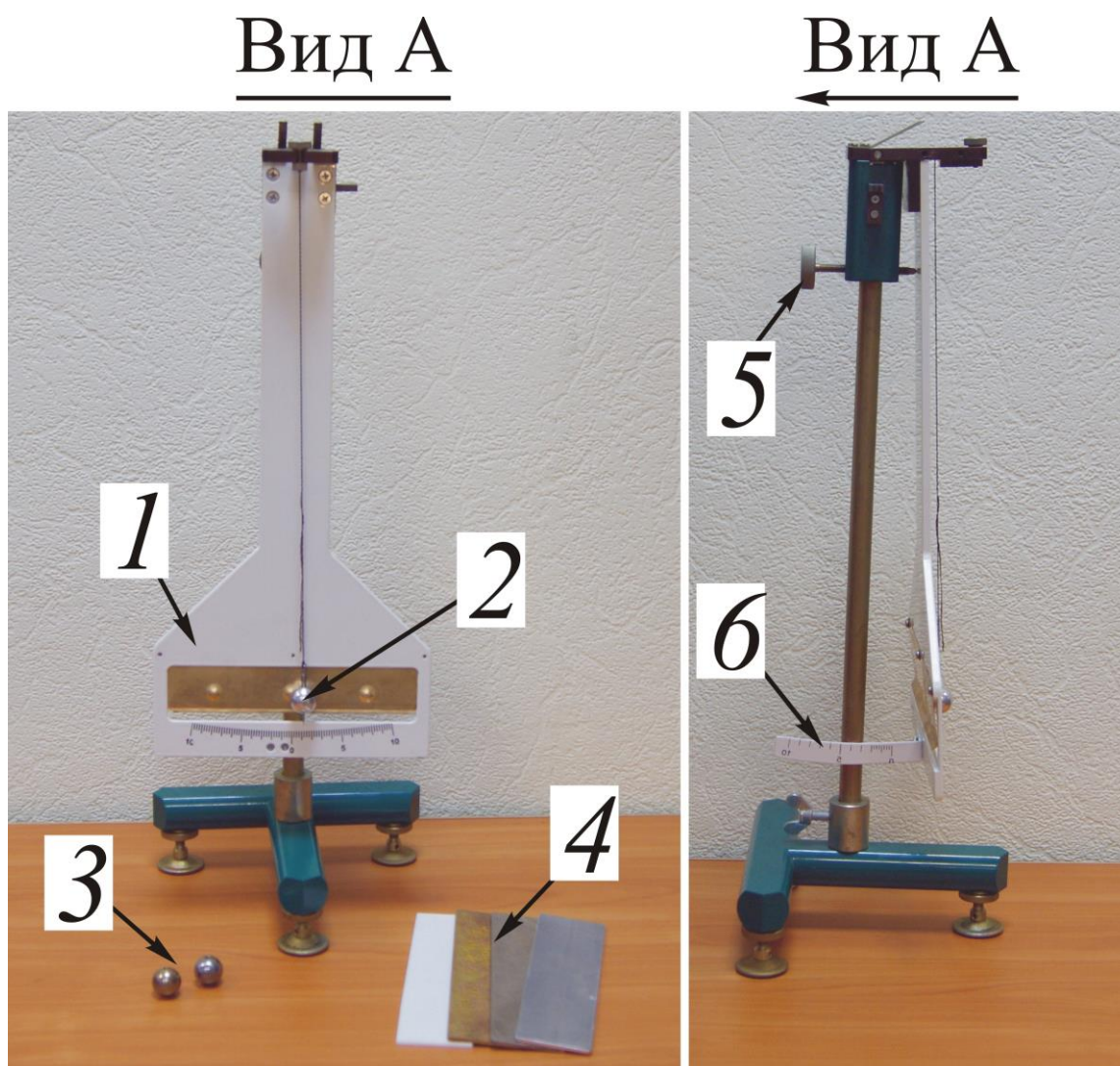


Рис. 1 Экспериментальная установка

9.1. Задание для работы

1. Определить коэффициент трения качения.

9.2. Методика эксперимента

9.2.1. Краткие теоретические сведения

На любое движущееся тело действует сила трения. Природа этих сил может быть различной, но в результате их действий всегда происходит превращение части механической энергии во внутреннюю энергию взаимодействующих тел. В зависимости от характера относительного движения соприкасающихся тел различают два типа вида трения: трение скольжения и трение качения.

В данной работе изучается трение качения. Природа возникновения трения качения состоит в возникновении неупругой деформации при качении по плоской поверхности цилиндра или шара. Для простоты рассмотрения будем полагать, что шар не деформируется. А деформируется плоская поверхность качения (рис.2). Природа силы трения качения связана с совершением работы по деформации материала поверхности (перед катящимся телом формируется «валик», который возникает из-за сжатия материала основания под нагрузкой перед катящимся телом).

Сила, отвечающая за взаимодействие катящегося тела с плоской поверхностью, это сила реакции поверхности, которую можно разложить на две силы: \vec{N} – нормальная реакция опоры, \vec{F}_{mp} – сила трения качения

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{F}_{mp}.$$

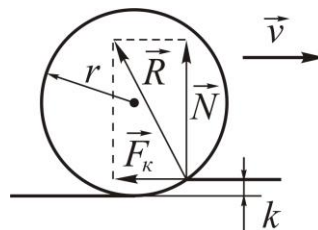


Рис.2 Перекатывание шарика

Вычисление силы трения качения очень сложно, но в первом приближении для силы трения качения справедлив закон Кулона

$$F_{mp} = k \frac{N}{r}, \quad (1)$$

где: k – коэффициент трения качения, r – радиус шара (цилиндр).

Рассмотрим движение шарика на наклонной плоскости, совершающего n колебаний (рис.3). Начальное положение характеризуется углом отклонения α_0 , высотой подъема Z_0 , конечным углом α_n и высотой Z_n . Запишем закон изменения механической энергии

$$\Delta E = A, \quad (2)$$

где ΔE – изменение механической энергии шарика и A – работа непотенциальных сил. В нашем случае их три: \vec{N} , \vec{T} и \vec{F}_{mp} , соответственно и три работы в правой части закона (2)

$$A = A_N + A_T + A_{mp}$$

$$A_N = \int \vec{N} d\vec{S} = \int N dS \cos 90^\circ = 0;$$

$$A_T = \int \vec{T} d\vec{S} = \int T dS \cos 90^\circ = 0;$$

$A_{mp} = \int \vec{F}_{mp} d\vec{S} = \int F_{mp} dS \cos 180^\circ = -F_{mp} \Delta S$, где ΔS – путь, пройденный за n колебаний. Согласно рис. 3 средний путь $\langle S \rangle$, проходимый шариком за одно колебание

$$\langle S \rangle = \frac{4S_0 + 4S_n}{2} = 2(S_0 + S_n).$$

Тогда за n колебаний будет пройден путь

$$\Delta S = \langle S \rangle n = 2n(S_0 + S_n).$$

Используя связь угла α с длиной дуги S

$$S = l\alpha,$$

где l – радиус окружности, по которой движется шарик (длина нити), получим

$$\Delta S = 2l(\alpha_0 + \alpha_n)n. \quad (3)$$

Подставим выражение силы трения качения (1) и пройденного пути (3) в формулу работы силы трения

$$A_{mp} = -F_{mp} \Delta S = -k \frac{N}{r} 2l(\alpha_0 + \alpha_n)n,$$

где $N = mg \cos \beta$ (рис.3). В итоге правая часть закона (2) примет вид

$$A_{mp} = -k \frac{mg \cos \beta}{r} 2l(\alpha_0 + \alpha_n)n. \quad (4)$$

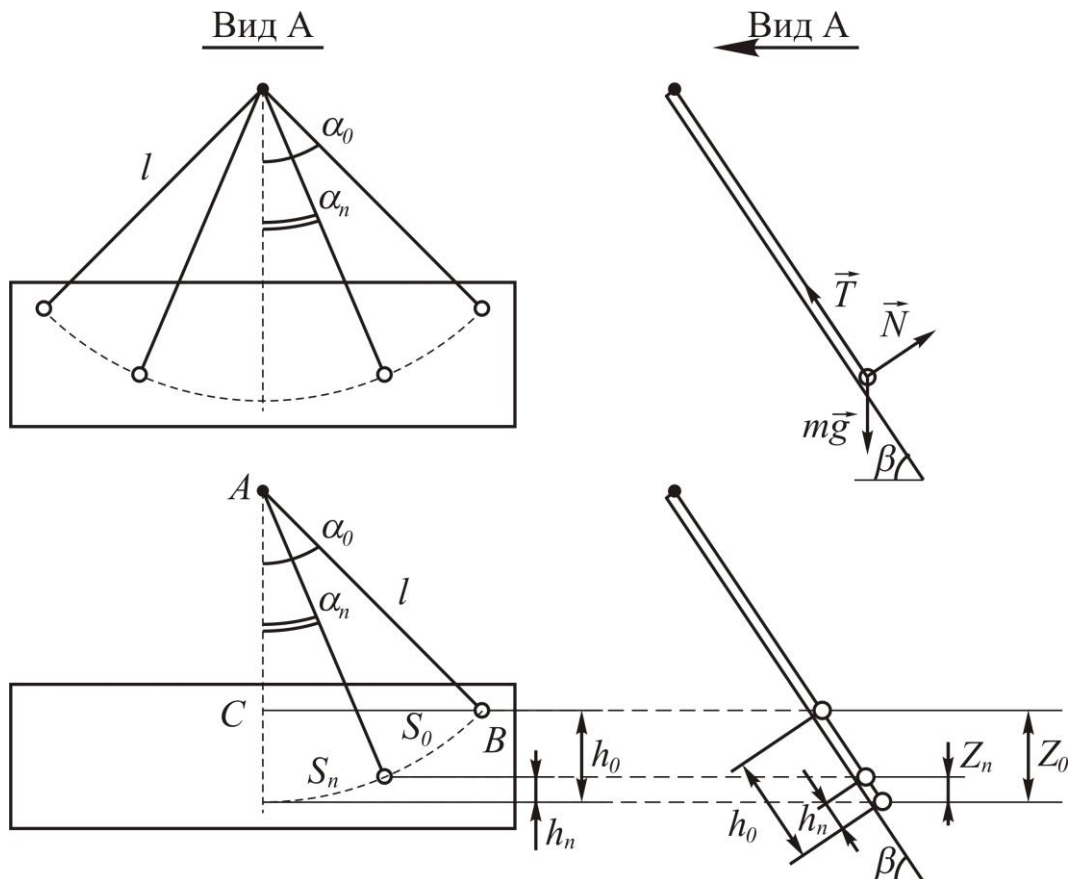


Рис.3 Движение шарика по наклонной плоскости

Левую часть закона (2) можно вычислить с помощью рис. 3:

$$\Delta E = mgZ_n - mgZ_0 = mg(Z_n - Z_0). \quad (5)$$

По рис.3 можно найти связь высоты Z_0 с h_0

$$Z_0 = h_0 \sin \beta,$$

где h_0 найдем, используя треугольник ABC

$$h_0 = l(1 - \cos \alpha_0).$$

Тогда высота Z_0 равна

$$Z_0 = l \sin \beta (1 - \cos \alpha_0). \quad (6)$$

Аналогично сделаем и для высоты Z_n

$$Z_n = l \sin \beta (1 - \cos \alpha_n). \quad (7)$$

Подставив в (5) (6) и (7), получим выражение для левой части закона (2)

$$\Delta E = mgl \sin \beta (\cos \alpha_0 - \cos \alpha_n). \quad (8)$$

Приравняв (7) и (4), получим выражение

$$mg l \sin \beta (\cos \alpha_0 - \cos \alpha_n) = -k \frac{mg \cos \beta}{r} 2l (\alpha_0 + \alpha_n) n.$$

Откуда найдем коэффициент трения качения:

$$k = \frac{r \operatorname{tg} \beta (\cos \alpha_n - \cos \alpha_0)}{2(\alpha_0 + \alpha_n) n}. \quad (9)$$

В данной работе углы α_0 , α_n малы, а значит, можно сделать замену

$$\cos \alpha \approx 1 - \frac{\alpha^2}{2}.$$

Тогда получим:

$$k = \frac{r \operatorname{tg} \beta (\alpha_0 - \alpha_n)}{4n}. \quad (10)$$

Учитывая тот факт, что в работе непосредственно измеряется угол наклона плоскости маятника γ , выразим β через γ : $\beta = 90 - \gamma$, следовательно, $\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} (90 - \gamma) = \operatorname{ctg} \gamma$

Окончательно получим:

$$k = \frac{r \operatorname{ctg} \gamma (\alpha_0 - \alpha_n)}{4n}. \quad (11)$$

Однажды вечером **Резерфорд** зашел в лабораторию. Хотя время было позднее, в лаборатории склонился над приборами один из его многочисленных учеников.

— Что вы делаете так поздно? — спросил Резерфорд.

— Работаю, — последовал ответ.

— А что вы делаете днем?

— Работаю, разумеется, — отвечал ученик.

— И рано утром тоже работаете?

— Да, профессор, и утром работаю, — подтвердил ученик, рассчитывая на похвалу из уст знаменитого ученого.

Резерфорд помрачнел и раздраженно спросил:

— Послушайте, а когда же вы думаете?

<http://physics03.narod.ru/index.htm>

9.2.2. План проведения работы

I. Определить коэффициент трения качения.

1. Измерьте радиус шарика. Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$r = (r_{cp} \pm \Delta r) \text{ м.}$$

2. Закрепите наклонный маятник на угол γ . Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$\gamma = (\gamma_{cp} \pm \Delta\gamma)^\circ.$$

3. Отклоните шарик на угол $\alpha_0 = 10^\circ$. Отпустите шарик. Определите угол α_n максимального отклонения шарика от положения равновесия после 10 колебаний. Результаты измерения занесите в Таблицу 1. Опыт повторите 5 раз.

Таблица 1

N_0	$\alpha_n, град$	$\alpha_n, рад$

4. Вычислите коэффициент трения качения k и ошибку измерений:

$$k = (k_{cp} \pm \Delta k) м.$$

9.3. Контрольные вопросы

1. Что такое трение качения?
2. Чему равна работа силы трения при колебании маятника?
3. Изобразите силы, действующие на шарик при его движении.

9.4. Список рекомендуемой литературы

- 1 Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн.1. Механика. М.: Астрель: АСТ, 2001. § 19
- 2 Общий курс физики : Учеб. пособие для вузов рек. МО РФ: В 3 т. Т.1. Механика / Д.В. Сивухин . - 4-е изд., стер. - М.: Физматлит; МФТИ, 2005. § 17
- 3 Стрелков С.П. Механика: Учеб. пособие для ун-тов. М.: Наука, 1975. § 38-42
- 4 Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. § 8

Отражательный телескоп **Исаака Ньютона** (1643—1727), позволивший избавиться от свойственной телескопам-рефракторам хроматической аберрации, произвел в Англии настоящий фурор. Сам король Карл II внимательнейшим образом изучил прибор и, вдоволь налюбовавшись через него на звезды и планеты, передал новинку в Лондонское королевское общество, которое в январе 1672 года поспешило избрать своим сочленом кембриджского провинциала.

Много лет спустя Кондуитт — родственник ученого — как-то раз поинтересовался у него:

— Скажите, кто же этот искусный мастер, изготовивший зеркало для вашего телескопа?

— Я, зеркало сделал я сам,— простодушно ответил Ньютон.

— Но где же вы достали станки и инструменты?

— И их я сделал сам,— пояснил Ньютон.— Если бы я ждал, пока кто-то чего-то мне сделает, я вообще никогда не сделал бы ничего.

<http://physics03.narod.ru/index.htm>

10. Определение модуля Юнга при изгибе.

Цель работы: усвоение знаний по разделу «Деформация твердого тела», приобретение практических навыков определения модуля Юнга материала.

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - упругая балка;
- 2 - индикатор малых перемещений с ценой деления $0,01$ мм;
- 3 - подвес для грузов;
- 4 - грузы;
- 5 - рулетка;
- 6 - штангенциркуль.

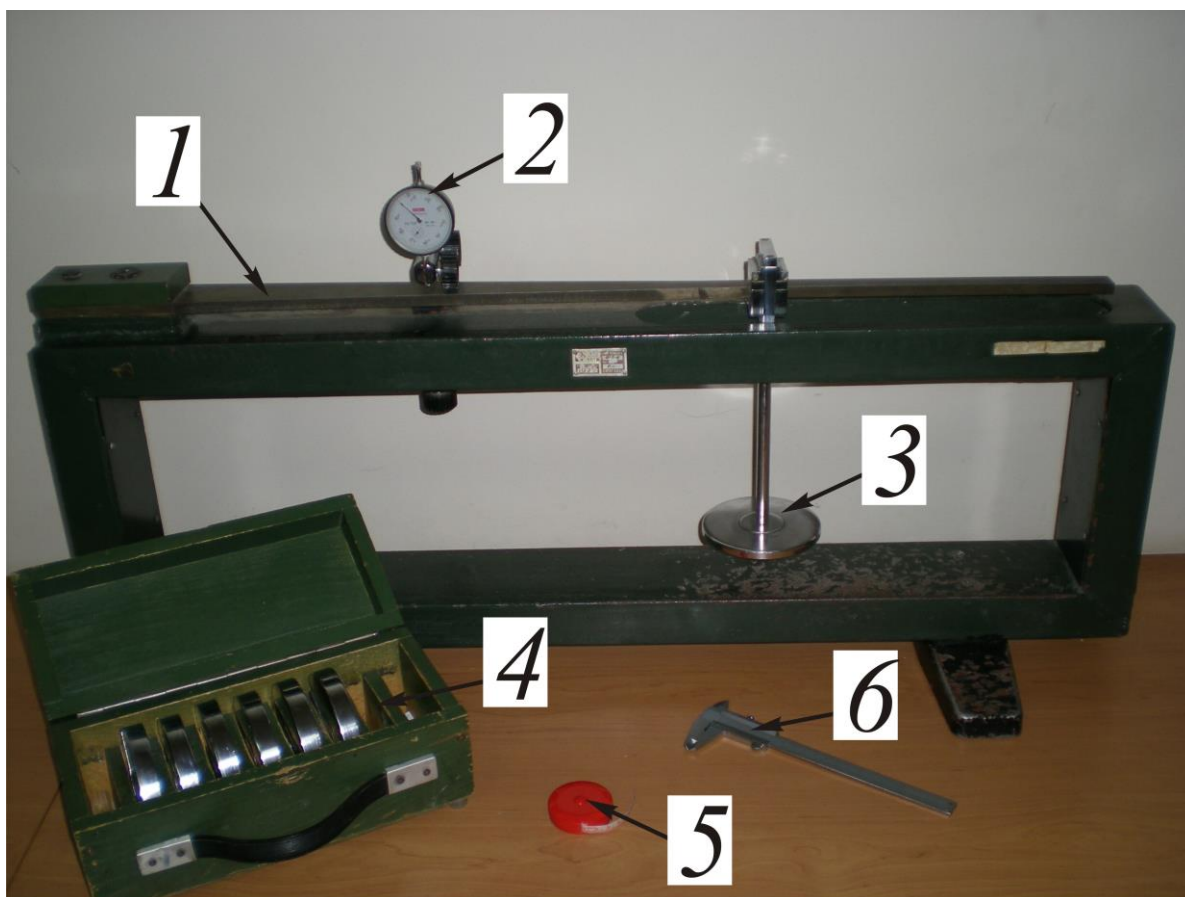


Рис. 1 Экспериментальная установка

10.1. Задание для работы

1. Определить модуль упругости материала.
2. Построить график зависимости стрелы прогиба от величины нагрузки.

10.2. Методика эксперимента

10.2.1. Краткие теоретические сведения

Все реальные тела под действием приложенных к ним сил изменяют свою форму или объем. Такие изменения называют деформациями. Деформации называются упругими, если они исчезают после прекращения действия приложенных сил, и пластическими, если они остаются после снятия нагрузки. В настоящей работе ограничимся изучением только упругих деформаций.

Упругие свойства тела характеризуются экспериментально вводимыми постоянными, к числу которых относится модуль Юнга. Возьмем однородный стержень длиной l , площадью поперечного сечения S и приложим к его концам растягивающие силы F , направленные вдоль оси симметрии (рис. 2). В результате стержень растягивается на величину Δl , то есть удлиняется. Для характеристики деформации тела важно как абсолютное удлинение Δl , так и относительное удлинение $\frac{\Delta l}{l}$, то есть во сколько раз увеличилась единица длины тела.

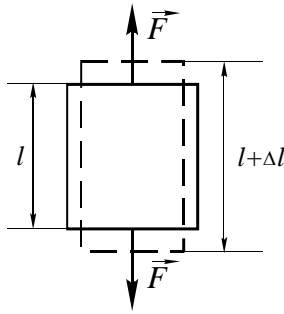


Рис. 2 Деформация тела

Если взять стержни разного поперечного сечения S , то при действии одной и той же растягивающей силы относительное удлинение $\frac{\Delta l}{l}$ будет тем меньше, чем толще стержень, то есть чем больше S . Отсюда

следует, что относительное удлинение пропорционально величине $\frac{F}{S}$:

$$\frac{\Delta l}{l} \propto \frac{F}{S}$$

или

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где α – коэффициент пропорциональности. Величину, обратную α , называют модулем упругости или модулем Юнга:

$$E = \frac{l}{\alpha}.$$

Отношение силы, действующей на площадь поперечного сечения, к площади этого сечения есть напряжение $\sigma = \frac{F}{S}$. Тогда (1) примет вид

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{l}{E} \sigma. \quad (2)$$

Из выражения (2) можно уяснить физический смысл модуля Юнга. Модуль Юнга численно равен напряжению, при котором длина растягиваемого образца увеличивается вдвое. Это определение условно, поскольку только немногие материалы способны выдерживать без разрушения такие нагрузки. Для подавляющего большинства материалов зависимость (2) справедлива только при малых деформациях $\Delta l \ll l$.

Модуль Юнга может быть определен при деформации прогиба. Если упругую балку закрепить с одного конца, а свободный конец нагрузить, то балка будет прогибаться. Мерой прогиба является стрела прогиба λ , изображенная на рис.3. Величина стрелы прогиба зависит от точки приложения веса P и величины нагрузки, от формы и размеров балки и, самое главное, от модуля Юнга. Это дает возможность через измерения λ вычислить модуль Юнга E .

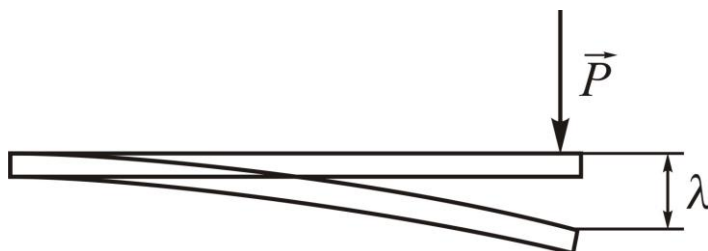


Рис. 3 Возникновение стрелы прогиба λ под действием веса P .

В данной работе, для определения модуля Юнга E используется специальный прибор, состоящий из массивной прямоугольной рамки, на которой исследуемая балка жестко закреплена с одного конца (рис.3б). Балка при виде сверху (рис.3а) имеет прямоугольную форму от риски B до свободного конца балки, а от риски B до линии опоры – трапецевидную форму. Точка приложения деформирующего груза должна находиться на прямоугольной части балки между рисками B и D . Величина груза измеряется дисковыми гирями, которые нанизываются на подвес Π . Стрела прогиба должна измеряться на трапецевидной части балки. Это осуществляется с помощью индикатора малых перемещений $И$.

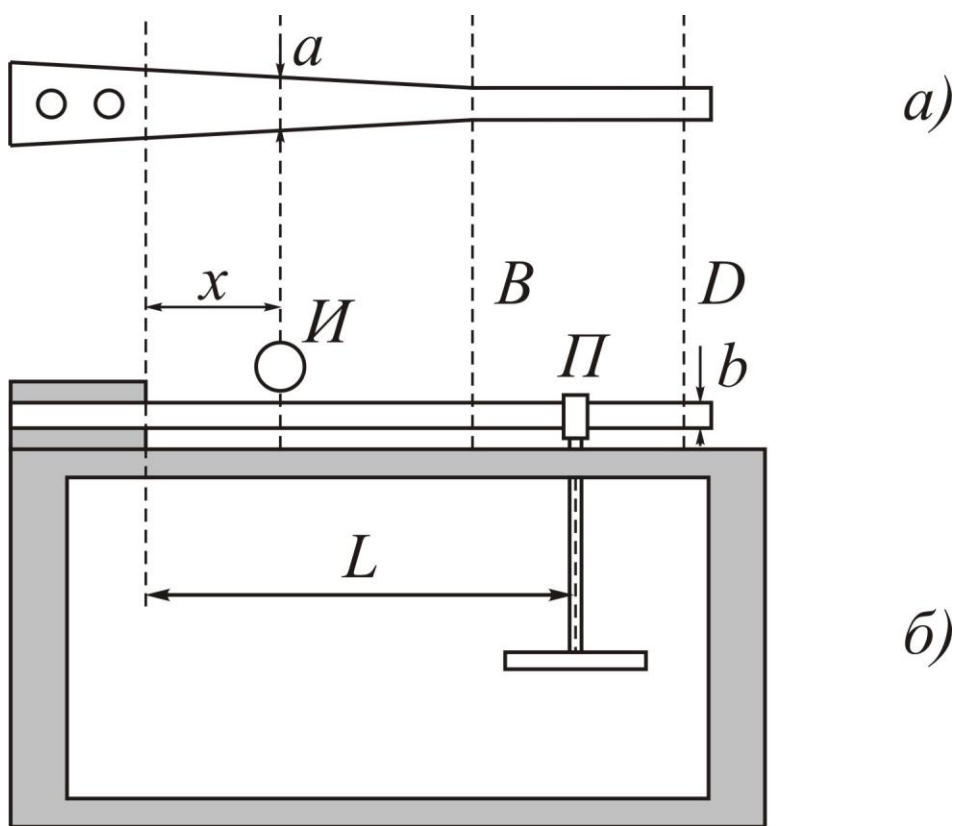


Рис. 3 Схема экспериментальной установки, а) вид сверху, б) вид прямо.

Обозначения на рисунке 3:

I - индикатор малых перемещений,

Π - подвес для грузов,

B и D - риски на балке,

x - расстояние от линии опоры закрепленного конца балки до точки касания индикаторной головки,

L - расстояние от линии опоры закрепленного конца балки до центра подвеса для грузов.

a - ширина балки в точке касания индикаторной головки.

b - толщина балки.

При выполнении упомянутых условий, касающихся размещения на балке точки опоры груза и индикаторной головки, стрела прогиба может быть вычислена из теоретических соображений. Опуская промежуточные расчеты, приведем окончательный результат:

$$\lambda = \frac{2Px^2(3L-x)}{Eab^3}, \quad (3)$$

где $P = mg$ – вес груза в Ньютонах.

Формула (3) дает возможность определить модуль Юнга:

$$E = \frac{2mgx^2(3L-x)}{\lambda ab^3}. \quad (4)$$

В 1802 году французский ученый **Жозе Луи Гей-Люссак** проводил в Париже научные опыты. Ему были нужны стеклянные трубки, которые тогда вырабатывались стеклодувами только в Германии. Когда ученый их выписал, французские таможенники наложили такую высокую пошлину, что он не мог выкупить посылку.

Об этом узнал Александр Гумбольдт и решил помочь Гей-Люссаку. Он посоветовал отправителям запаять концы трубок и наклеить на них этикетки: “Осторожно! Немецкий воздух!”

Воздух? Таможенного тарифа на воздух не существовало, и на этот раз трубки дошли до французского ученого без всяких пошлин.

<http://physics03.narod.ru/index.htm>

10.2.2. План проведения работы

I. Определить модуль упругости материала.

1. Установите подвес для грузов на балку между рисками B и D . Измерьте расстояния L и x .

$$L = (L_{cp} \pm \Delta L) м$$

$$x = (x_{cp} \pm \Delta x) м$$

2. Измерьте штангенциркулем ширину балки a и толщину балки b .

$$a = (a_{cp} \pm \Delta a) м$$

$$b = (b_{cp} \pm \Delta b) м$$

3. Установите на ‘0’ большую стрелку индикатора перемещений. Установка осуществляется поворотом оправы индикатора по часовой стрелке или против часовой стрелки.

4. Нагрузите на подвес II груз 1 кг и по индикатору перемещений определить стрелу прогиба. Цена деления большой шкалы 0.01 мм.
5. Добавляя 5-6 раз грузы по 1 кг, снимите показания индикатора и показания перенесите в Таблицу 1.

Таблица 1.

$N\ddot{o}$	$m, кг$	$\lambda, м$	$E, Па$	$E_i - E_{cp}, Па$

6. Прodelайте аналогичные измерения при снятии грузов.
 7. Используйте данные измерений, вычислите модуль Юнга по формуле (4).
 8. Измените положение подвеса для грузов и повторите пункты 1-7. Данные измерений занести в Таблицу 1.
 9. Вычислите абсолютную и относительную погрешность и запишите окончательный результат.
- II. Построить график зависимости стрелы прогиба от величины нагрузки.*
1. Постройте график зависимости стрелы прогиба от величины нагрузки для двух серий эксперимента (при различных L).

10.3. Контрольные вопросы

1. Деформация. Виды деформаций.
2. Закон Гука. Когда он справедлив?
3. Экспериментальная зависимость $\sigma(\epsilon)$.
4. Что такое пределы прочности, упругости, текучести?
5. Физический смысл модуля Юнга.

10.4. Список рекомендуемой литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 5 кн. Кн.1. Механика. М.: Астрель: АСТ, 2001. § 75, 80.
2. Стрелков С.П. Механика: Учеб. пособие для ун-тов. М.: Наука, 1975. § 87.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. § 21.

Троллейбусы, ходившие по Мюнхену в те годы, когда там работал крупный физик-теоретик **Арнольд Зоммерфельд** (1868 — 1954), охлаждались летом двумя маленькими вентиляторами без моторов, вставленными в два отверстия в потолке. На ходу под напором набегающего воздуха вентиляторы начинали вращаться. Один студент заметил, что, хотя направление вращения каждого вентилятора было совершенно случайным, он мог вращаться как по часовой стрелке, так и против нее, но два вентилятора в одном троллейбусе почти всегда вращались в противоположных направлениях. С вопросом "Почему это так?" студент обратился к Зоммерфельду.

— Это легко объяснить, — сказал теоретик. — Воздух сначала попадает на передний вентилятор и придает ему случайное направление вращения. Когда троллейбус движется, завихрения воздуха, созданные первым вентилятором, распространяются вдоль потолка назад, доходят до второго вентилятора и заставляют его вращаться в том же направлении.

— Но, профессор, — запротестовал студент, — дело как раз в том, что вентиляторы почти всегда вращаются в разных направлениях!

— Ага, — сказал Зоммерфельд, — прекрасно. Но это еще легче объяснить!

11. Гироскоп и гироскопические явления.

Цель работы: усвоение знаний по разделу «Движение гироскопа», приобретение практических навыков определения момента инерции твердых тел.

Оборудование

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1. Основными элементами установки являются:

- 1 - блок;
- 2 - гироскоп;
- 3 - подвижный груз;
- 4 - шкала угла прецессии.

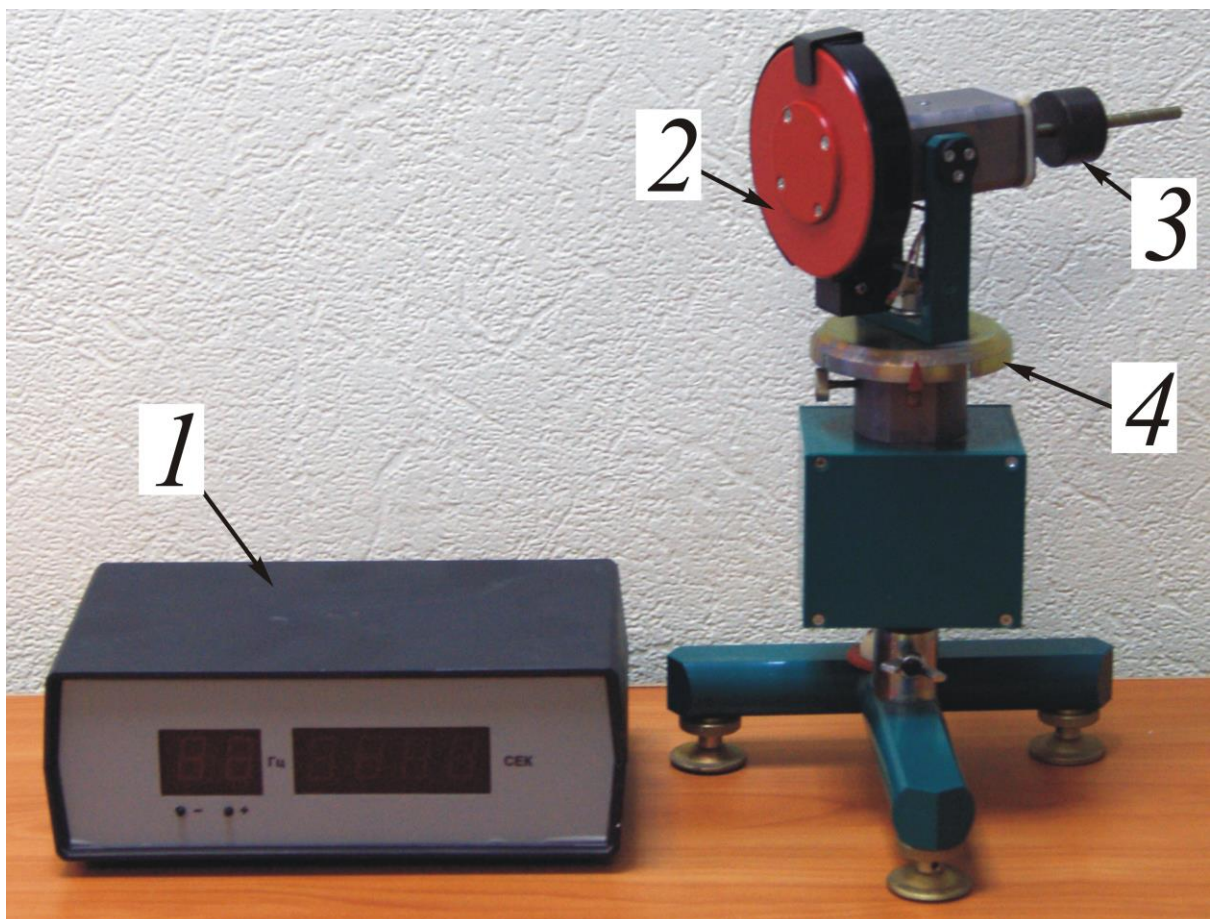


Рис.1 Экспериментальная установка

11.1. Задание для работы

1. Определить момент инерции гироскопа.

11.2. Методика эксперимента

11.2.1. Краткие теоретические сведения

Гироскопом называется тело, вращающееся вокруг своей оси симметрии с высокой угловой скоростью. Распространенным методом определения момента инерции гироскопа является метод, основанный на свободном движении гироскопа с закрепленным центром масс.

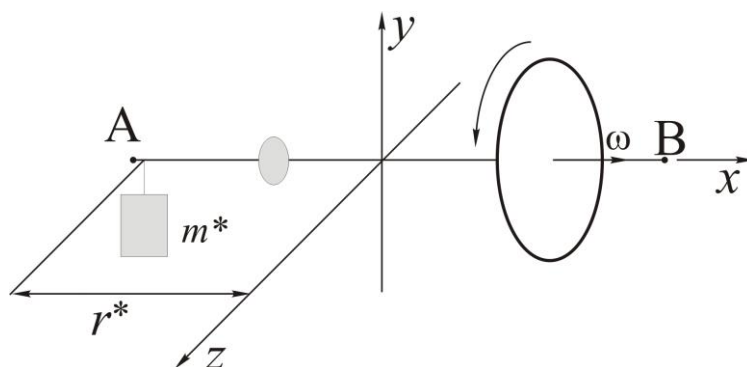


Рис. 2 Схема движения гироскопа

Основное свойство свободного гироскопа с закрепленным центром масс, которое объясняет его поведение под действием сил, состоит в том, что вектор момента импульса \vec{L} совпадает с вектором угловой скорости $\vec{\omega}$, направленным вдоль оси OX, вокруг которой происходит вращение (рис. 2), причем

$$\vec{L} = I \vec{\omega}. \quad (1)$$

Поэтому о движении оси гироскопа можно судить по изменению направления вектора \vec{L} , описываемого уравнением моментов:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}.$$

Зная результирующий момент сил \vec{M} , всегда можно определить направление движения оси по соотношению $d\vec{L} = \vec{M}dt$.

Нарушим равновесие гироскопа с помощью дополнительного груза массой m^* . Добавление груза на расстоянии r^* от точки опоры приводит к появлению нескомпенсированного вращательного момента \vec{M} , равного $\vec{M} = [\vec{r}^* m^* \vec{g}]$ и действующего в плоскости XZ (рис. 2). Уравнение моментов примет вид

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = [\vec{r}^* \times m^* \vec{g}]$$

или в проекции на ось OZ

$$\frac{dL}{dt} = r^* m^* g. \quad (2)$$

Если бы гироскоп не находился в быстром вращении, то под действием дополнительной силы $m^* \vec{g}$ его ось симметрии, которая совпадает с АВ, должна была бы отклониться от горизонтального положения. Но наличие вращения полностью

изменяет результат действия силы. Поскольку вектор изменения момента импульса $d\vec{L}$ сонаправлен с моментом силы \vec{M} , то конец оси гироскопа начинает двигаться в горизонтальной плоскости, повернувшись за время dt на угол $d\alpha$ (рис. 3).

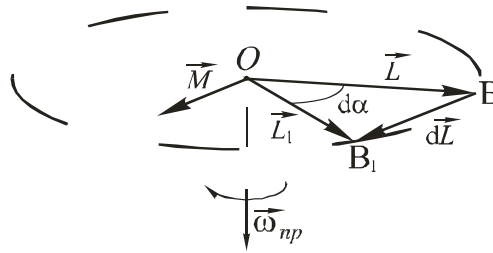


Рис. 3 Прецессия горизонтальной оси гироскопа

Момент импульса гироскопа, получив приращение $d\vec{L}$ за время dt , в следующий момент времени $t + dt$ будет равен

$$\vec{L}_1 = \vec{L} + d\vec{L}.$$

В результате ось гироскопа будет вращаться с некоторой угловой скоростью ω_{np} . Такое движение называется прецессией. Если при этом сила, вызывающая прецессию, сохраняет свое значение, то движение оси происходит с постоянной угловой скоростью ω_{np} :

$$\omega_{np} = \frac{d\alpha}{dt}.$$

Из треугольника OBV_1 (рис. 3) $L d\alpha = dL$, поэтому

$$\omega_{np} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt}.$$

С учетом (1) и (2) получим

$$\omega_{np} = \frac{r^* m^* g}{I \omega}.$$

Зная связь между угловой скоростью вращения гироскопа вокруг своей оси ω и частотой вращения вокруг этой оси ν ($\omega = 2\pi\nu$), а также связь между угловой скоростью прецессии ω_{np} и временем t при повороте на угол $\frac{\pi}{2}$ ($\omega_{np} = \frac{\pi}{2t}$), имеем

$$I = \frac{r^* m^* g t}{\pi^2 \nu}. \quad (3)$$

На столе у **Нернста** стояла пробирка с органическим соединением дифенилметаном, температура плавления которого 26°C . Если в 11 утра препарат таял, Нернст вздыхал:

— Против природы не попрешь! И уводил студентов заниматься греблей и плаванием.

<http://physics03.narod.ru/index.htm>

11.2.2. План проведения работы

I. *Определить момент инерции гироскопа измерением частоты вращения и времени прецессии.*

1. Измерьте массу груза m^* . Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$m^* = (m_{cp}^* \pm \Delta m^*) \text{ кг}.$$

2. Перемещая груз m^* , добейтесь, чтобы гироскоп стал уравновешенным. Включите гироскоп. Раскрутите до частоты выбранной преподавателем (60-120 Гц). Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$\nu = (\nu_{cp} \pm \Delta \nu) \text{ Гц}.$$

3. Выведите гироскоп из равновесия, переместив груз. Измерьте расстояние на которое перемещен груз относительно положения равновесия, r^* . Результат запишите с учетом погрешности прибора:

$$r^* = (r_{cp}^* \pm \Delta r^*) \text{ м}.$$

4. Отпустите гироскоп и измерьте время прецессии на угол $\frac{\pi}{2}$. Результаты измерения занесите в Таблицу 1. Прodelать это 5 раз.

Таблица 1

№	t, c

5. По формуле (3) вычислите момент инерции гироскопа, оцените погрешность измерения.

11.3. Контрольные вопросы

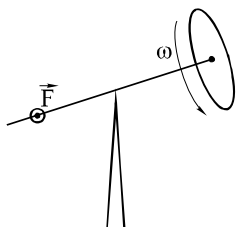


Рис. 4 Гироскоп

1. Что называется гироскопом? Каковы его основные свойства?
2. От чего зависит скорость прецессии гироскопа?
3. Проанализируйте возможные причины ошибок эксперимента.
4. Укажите направление движения оси гироскопа (рис. 4).

11.4. Список рекомендуемой литературы

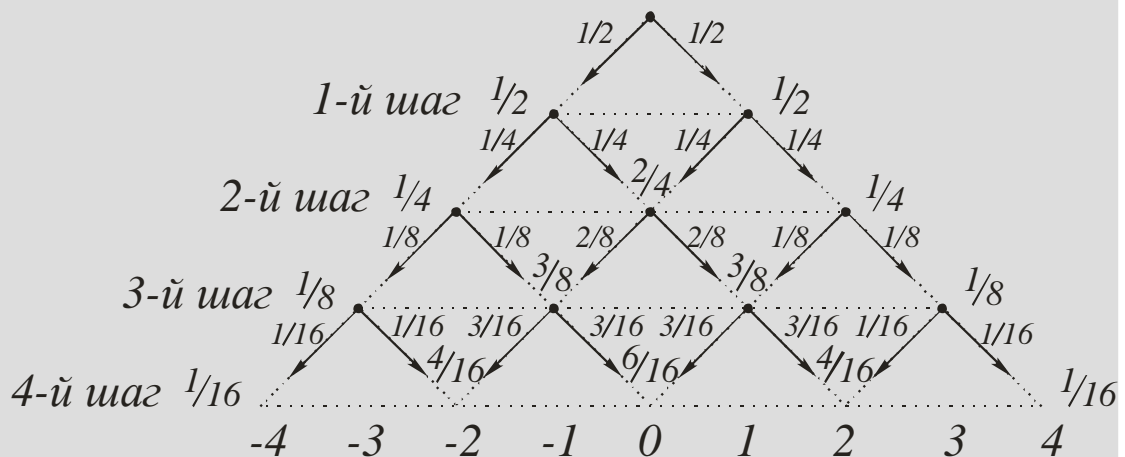
1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие для ВУЗов: В 5кн. Кн.1. Механика / И.В. Савельев. - М.: Астрель: АСТ, 2001. § 44.
2. Общий курс физики : учеб. пособие для вузов рек. МО РФ: в 3 т. Т.1. Механика / Д.В. Сивухин . - 4-е изд., стер. - М.: Физматлит; МФТИ, 2005. §§ 49-52.
3. Стрелков С.П. Механика: Учеб.пособие для ун-тов / С.П. Стрелков . - 3-е изд., перераб. - М.: Наука, 1975. §§ 65-67.
4. Трофимова Т.И. Курс физики М.: Высшая школа, 1990. § 20.
5. Хайкин С.Э. Физические основы механики: Учебное пособие. М.: Наука, 1971. §§ 99-104.



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАУССА

Проведём простой мысленный эксперимент. Совершим виртуальную прогулку в воображаемый парк, разбитый в форме квадрата со входами по углам. Парк пересечён дорожками, образующими правильную квадратную сетку, параллельную его краям.

Пройдёмся по нему, взяв за правило удаляться от точки входа. Это значит, что на каждом перекрёстке можно выбрать только два пути: вправо вниз или влево вниз (при условии, что вход был в верхнем углу). Если не задумываясь поворачивать направо или налево, то путешествие станет случайным, то есть нельзя будет точно предсказать где окажется гуляющий, пройдя несколько квадратов. Однако вероятность «попадания» на тот или иной перекрёсток можно рассчитать!



В самом деле, пройдя один квадрат от входа, мы с равной вероятностью окажемся или в точке A_0 , или в точке: A_1 . И там, и там возможно свернуть на направо, так и налево; поэтому после прохода двух квадратов шансы оказаться в точках B_0 и B_2 одинаковы а вероятность прийти в B_1 в два раза выше. Вспомнив, что сумма всех этих вероятностей равна единице, получим! В самом деле, пройдя один квадрат; от входа, мы с равной вероятностью окажемся или в точке A_0 , или в точке: A_1 . И там, и там возможно свернуть на направо, так и налево; поэтому после прохода двух квадратов шансы оказаться в точках B_0 и B_2 одинаковы а вероятность прийти в B_1 в два раза выше. Вспомнив, что сумма всех этих вероятностей равна единице, получим!

$$p(B_0)=p(B_2)=1/4, p(B_1)=1/2.$$

где $M = 0$ – математическое ожидание, $\sigma = \frac{\sqrt{2}}{N}$ – стандартное отклонение. Это *нормальное распределение* или *распределение Гаусса*. Оно проявляется всякий раз, когда значение величины подвержено действию многих случайных, не зависящих друг от друга факторов (представляет собой их сумму), а ведь как раз такая ситуация возникает в процессе измерения. Именно это свойство нормального распределения делает его столь универсальным и важным в практических исследованиях.

Вот лишь некоторые примеры ситуаций, приводящих к нормальному распределению. Если для большой группы людей составить распределение по росту или весу, то окажется, что оно близко к нормальному, поскольку рост и вес каждого человека определяются большим количеством случайных параметров. При взвешивании предмета на очень точных весах источниками случайных отклонений результата могут быть пылинки, садящиеся на чашки весов и взлетающие с них, потоки воздуха, вибрация стола и многое другое. К нормальному распределению приводят и измерения числа космических частиц, пролетающих через данную площадку, и количество распадов радиоактивных ядер в образце за достаточно большое время.



На графике $p(x)$ для нормального распределения математическое ожидание — это та точка, где функция максимальна (кстати, относительно неё распределение симметрично). Стандартное отклонение нормального распределения тоже можно найти по графику: это такое расстояние от точки максимума, где значение функции падает в \sqrt{e} раз (примерно 0,6 от максимального).

В интервал от $M-\delta$ до $M+\delta$ попадает около 68 % всех исходов, то есть результатов измерений. Если этот интервал увеличить вдвое, в него попадёт приблизительно 95 % исходов, а если утроить — почти 99 % (С. Хорозов).

Приложение

Математическая обработка результатов измерений

Никакое измерение не может быть выполнено абсолютно точно, поэтому результатом измерения всегда является доверительный интервал, в который попадает истинное значение измеряемой величины $x_{ист}$. В качестве наилучшего значения, близкого к истинному, для измеренной величины принимают среднее арифметическое x_{cp} из всех полученных результатов. Ширина интервала определяется абсолютной погрешностью измерения Δx . Таким образом

$$x_{ист} \in (x_{cp} \pm \Delta x).$$

Доверительный интервал измеряемой величины x представлен на рисунке 1.

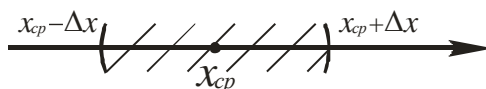


Рис. 1. Представление результатов измерений

Наряду с абсолютной погрешностью Δx , используется относительная погрешность ε , равная отношению абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{ист}} 100\%.$$

Качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, называется точностью измерений. Очевидно, что чем меньше погрешности, тем выше точность измерений.

Опишем без доказательств основные правила определения среднего значения x_{cp} и абсолютной погрешности Δx измеренной величины в том объеме, который необходим для обработки результатов измерений, полученных в лаборатории.

Вычисление доверительного интервала имеет свои особенности в зависимости от способа измерения. Все измерения делятся на прямые и косвенные. *Прямыми* называют такие измерения, при которых измеряемая величина определяется каким-либо прибором. Известно, что непосредственно могут быть измерены лишь немногие физические величины, такие, как длина, масса тела, промежутки времени, температура и др. Остальные величины мы определяем с помощью вычислений, пользуясь функциональными связями между физическими величинами, найденными прямыми измерениями. Таким образом, если физическая величина определяется на основании формулы, то такое измерение называется *косвенным*.

При использовании измерительных приборов их необходимо разделять на приборы, содержащие схемы пересчета непосредственно измеряемых величин в другие (спидометр, омметр и т.д.) и не содержащих подобные схемы. Будьте внимательны. Первые приборы выдают косвенно измеряемые величины.

Обработка результатов прямых измерений

При обработке результатов прямых измерений физической величины x возможна реализация одного из двух способов вычисления доверительного интервала.

Первый способ. Однократные измерения.

Если в процессе эксперимента на результат измерений не оказывают существенного влияния случайные процессы, то среднее значение величины x_{cp} будет равно измеренному, а абсолютная погрешность – половине цены деления прибора. Абсолютная погрешность цифровых приборов определяют:

- а) по паспорту к прибору;
- б) по разряду последней значащей цифры.

Второй способ. Многократные измерения.

Учет случайных процессов предполагает следующую схему расчета доверительного интервала

1. Провести серию измерений изучаемой величины x : $x_1, x_2, x_3 \dots x_N$.

2. Найти среднее значение величины x :
$$x_{cp} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

3. Определить среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{(x_1 - x_{cp})^2 + (x_2 - x_{cp})^2 + (x_3 - x_{cp})^2 + \dots + (x_N - x_{cp})^2}{N(N-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{cp})^2}{N(N-1)}}.$$

4. Найти ошибки измерений:

– случайную: $\sigma_{сл} = t_{N\alpha} \sigma_x$,

где $t_{N\alpha}$ - коэффициент Стьюдента, численное значение которого для различных N и α приведено в Таблице 1;

- систематическую: $\sigma_{\text{сис}} = \frac{\text{цена деления измерительного прибора}}{2}$;
- абсолютную: $\Delta x = \sqrt{\sigma_{\text{сл}}^2 + \sigma_{\text{сис}}^2}$;
- относительную: $\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{\text{cp}}} 100\%$.

5. Записать результат эксперимента: $x = (x_{\text{cp}} \pm \Delta x)$.

Таблица 1

Значения коэффициент Стьюдента

Число измерений ($N - 1$)	Коэффициент надежности (α)		
	0,8	0,9	0,95
2	1,9	6,3	12,7
3	1,6	2,9	4,3
4	1,5	2,4	3,2
5	1,5	2,1	2,8
6	1,4	2,0	2,6
7	1,4	1,9	2,4
8	1,4	1,9	2,4
9	1,4	1,9	2,3
10	1,4	1,8	2,3

Обработка результатов косвенных измерений

В большинстве случаев имеют дело с косвенными измерениями. Пусть x, y, z – непосредственно измеряемые величины, а $W = f(x, y, z)$ – их функция, то есть величина, измеряемая косвенно. Рассмотрим два способа вычисления доверительного интервала величины W .

Первый способ. Если косвенные измерения проводятся в невоспроизводимых условиях, то значения W_i вычисляются для каждого отдельного измерения, а затем обрабатываются как прямые измерения.

Второй способ позволяет вычислить погрешность косвенного измерения как функцию погрешностей прямых измерений. Следует иметь в виду, что величина ошибки косвенно измеренной величины и порядок ее вычисления, зависят от того однократными или многократными измерениями получены непосредственно измеряемые величины. Далее остановимся подробнее на обоих вариантах.

Все или некоторые непосредственно измеряемые величины получены путем многократных измерений

1. Для каждой непосредственно измеренной величины определить доверительный интервал:

$$x = (x_{\text{cp}} \pm \Delta x)$$

$$y = (y_{\text{cp}} \pm \Delta y)$$

$$z = (z_{\text{cp}} \pm \Delta z)$$

2. Найти среднее значение величины W : $W_{\text{cp}} = f(x_{\text{cp}}, y_{\text{cp}}, z_{\text{cp}})$.

3. Найти ошибку измерений:

– абсолютную:
$$\Delta W = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \Delta z\right)^2},$$

– относительную:
$$\varepsilon = \frac{\Delta W}{W_{cp}} 100\%.$$

4. Записать результат эксперимента: $W = (W_{cp} \pm \Delta W).$

Все непосредственно измеряемые величины получены путем однократных измерений

1. Для каждой непосредственно измеренной величины определить доверительный интервал:

$$x = (x_{cp} \pm \Delta x)$$

$$y = (y_{cp} \pm \Delta y).$$

$$z = (z_{cp} \pm \Delta z)$$

2. Найти среднее значение величины W : $W_{cp} = f(x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}).$

3. Найти ошибку измерений:

– абсолютную: ΔW ;

– относительную:
$$\varepsilon = \frac{\Delta W}{W_{cp}} 100\%.$$

Абсолютная и относительная ошибки определяются по виду математического выражения, дающего измеряемую физическую величину. В Таблице 2 приведены некоторые из них.

Таблица 2

Формулы определения абсолютной и относительной погрешностей

№	Математическое выражение	Погрешность	
		абсолютная (ΔW)	Относительная (ε)·100%
1	$A + B + C$	$(\Delta A + \Delta B + \Delta C)$	$\frac{(\Delta A + \Delta B + \Delta C)}{A + B + C}$
2	$A - B$	$(\Delta A + \Delta B)$	$\frac{(\Delta A + \Delta B)}{A - B}$
3	$A \cdot B$	$(A\Delta B + B\Delta A)$	$\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}\right)$
4	$A \cdot B \cdot C$	$(AC\Delta B + BC\Delta A + AB\Delta C)$	$\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}\right)$
5	$\frac{A}{B}$	$\left(\frac{A\Delta B + B\Delta A}{B^2}\right)$	$\left(\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}\right)$
6	A^n	$n A^{n-1} \Delta A$	$n \frac{\Delta A}{A}$
7	$\sin A$	$\cos A \Delta A$	$\operatorname{ctg} A \Delta A$
8	$\cos A$	$\sin A \Delta A$	$\operatorname{tg} A \Delta A$

5. Записать результат эксперимента: $W = (W_{cp} \pm \Delta W).$

ЗАКОН ВЕРОЯТНОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Интересно проследить, как изменяется в ходе прогулки по парку ширина области, в которой (с большей вероятностью) находится гуляющий. Ширина этой области (расстояние до диагональной дорожки) пропорциональна среднеквадратичному отклонению, то есть квадратному корню из числа пройденных «кварталов». Так что если запустить в парк толпу гуляющих с одинаковой скоростью людей, то размер этой толпы будет расти пропорционально корню из времени прогулки. Аналогично растёт, например, диаметр капли чернил в воде: ведь движение молекулы чернил – это случайное блуждание между молекулами воды (*А. Селиверстов*).

Приложение 2

Метод анализа размерностей

Метод анализа размерностей применяется, во-первых, для быстрой проверки правильности получаемых при решении задач формул и, во-вторых, для установления вида ранее неизвестных зависимостей между различными величинами.

Проиллюстрируем его применение на примере определения математического выражения модуля центростремительного ускорения. Предположим, что в результате исследования равномерного движения по окружности для модуля центростремительного ускорения было получено выражение

$$a = v^3 R.$$

Верно ли оно? Чтобы установить это, проверим формулу на условие равенства размерностей обеих её частей.

$$[a] = m c^{-2}$$
$$[v^3 R] = \left(\frac{m}{c}\right)^3 (m) = (m)^4 (c)^{-1}.$$

Эти размерности не совпадают, значит, формула $a = v^3 R$ неверна.

Попытаемся теперь установить правильную зависимость центростремительного ускорения от скорости движения и радиуса окружности, по которой движется тело. Для этого представим ускорение в виде

$$a = v^\alpha R^\beta, \quad (1)$$

где α и β — неизвестные показатели степени, которые требуется определить. Значения $\alpha = 3$, $\beta = 1$, как мы видели выше, являются неверными. Чему же равны их истинные значения? Для ответа на этот вопрос приравняем размерности обеих частей равенства (1)

$$m c^{-2} = (m/c)^\alpha (m)^\beta$$

или

$$m c^{-2} = m^{\alpha+\beta} c^{-\alpha}.$$

Приравнявая далее показатели степени у метров (m) и секунд (c) слева и справа, получаем систему уравнений

$$1 = \alpha + \beta; \quad -2 = -\alpha.$$

Решая её, находим: $\alpha = 2$, $\beta = -1$. Подстановка полученных значений в формулу (1) даёт

$$a = v^2/R. \quad (2)$$

Это и есть правильная формула. Заметим, правда, что мы определили зависимость a от v и R лишь с точностью до постоянного безразмерного коэффициента. Ведь если домножить правую часть равенства (2) на какое-либо безразмерное число k , то равенство размерностей обеих его частей по-прежнему сохранится. Следовательно, в действительности нами установлено, что $a = kv^2/R$, где значение k методом анализа размерностей определить невозможно.

О научном стиле **Ферми** дает понятие анекдот, а может быть из американского, периода его жизни. Аспирант не может решить задачу. Сначала он несет ее к Роберту Оппенгеймеру. Тот ему два часа читает блестящую лекцию, из которой аспирант ничего не понимает, но уходит в восторге, что есть гении, способные решать задачи, недоступные простым смертным. Затем он идет к Ферми и выходит через пять минут, страшно недовольный собой, что не сумел такую элементарную проблему решить самостоятельно.

<http://physics03.narod.ru/index.htm>

Приложение 3

Обработка результатов косвенных измерений физической величины полученной в невоспроизводимых условиях

Задание: определить коэффициент упругости пружины

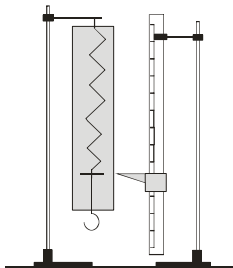


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

1. Собрать установку, как показано на рисунке 2. Держась за динамометр, растянуть пружину на $l = 1$ см. Измерить силу. Результат измерения занести в Таблицу 4.
2. Повторить пункт 1, растянув пружину на 2, 3, 4 и 5 см.
3. По формуле $k = \frac{F}{l}$ вычислить угловой коэффициент упругости пружины. Оценить точность измерения.

4. Построить график зависимости силы F от удлинения пружины

Таблица 4

$l \cdot 10^{-2}, \text{ м}$	1	2	3	4	5
$F, \text{ Н}$					
$k, \text{ Н/м}$					

Выполнение задания

1. Провести серию измерений. Результаты измерений представить в Таблице 5.

Таблица 5

$l \cdot 10^{-2}, \text{ м}$	1	2	3	4	5
$F, \text{ Н}$	0,30	0,65	0,90	1,25	1,55
$k, \text{ Н/м}$	30	32,5	30	31	31

2. Среднее значение: $k_{cp} = 31 \text{ Н/м}$.
3. Среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (k_i - k_{cp})^2}{N(N-1)}} = \sqrt{\frac{(30-31)^2 + (32,5-31)^2 + (30-31)^2 + (31-31)^2 + (31-31)^2}{5(5-1)}} =$$

$$= 3 \frac{H}{m}.$$

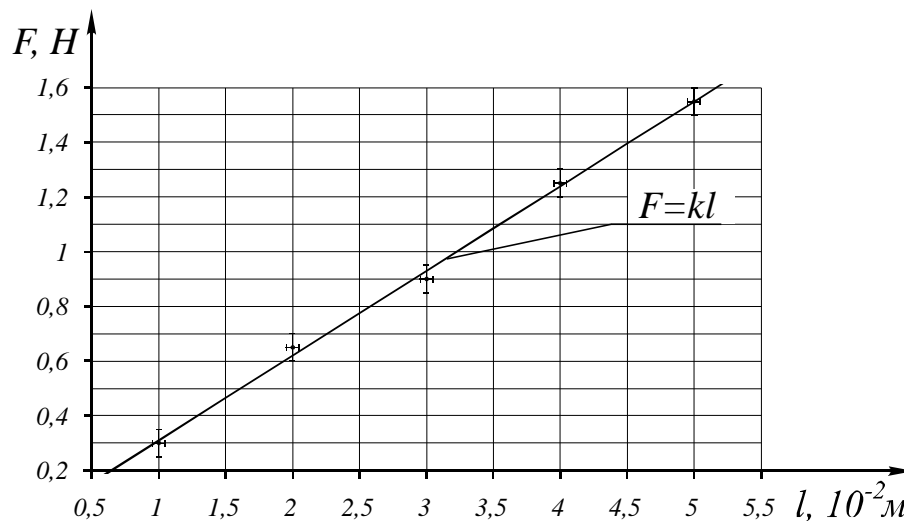
4. Ошибка измерений:

– абсолютная: $\Delta k = t_{N\alpha} \sigma_k = 6,1 \text{ Н/м};$

– относительная: $\varepsilon = \frac{\Delta k}{k_{cp}} 100\% = 19\%;$

– Результат измерений: $k = (3,1 \pm 0,6) \cdot 10 \text{ Н/м}.$

График зависимости силы F от удлинения пружины l



В предвоенные годы на одном из кораблей Балтийского флота случилась поломка, причины которой породили жаркие споры в конструкторском бюро. Одни утверждали, что допущен просчет в конструкции, другие — те, кто отвечал за проект, — доказывали, что все дело в вибрациях и в резонансе. Наконец, решили пригласить для консультации известного кораблестроителя, профессора Ленинградского политехнического института Б. Г. Харитоновича.

Приехав в КБ, Харитонович развернул чертежи и углубился в их изучение. И тут раздался вкрадчивый голос создателя сломавшейся конструкции.

— Профессор, а не думаете ли вы, что тут действуют *стоячие вибрации, возникающие вследствие спонтанного резонанса?*

Харитонович пристально посмотрел на конструктора и сердито сказал:

— Хочу дать вам на будущее практический совет. Если у вас в машине случилась поломка, вначале постарайтесь найти свою ошибку с помощью обычного здравого смысла. Если это не удастся, попробуйте рассчитать конструкцию, пользуясь только арифметикой и конторскими счетами. Если и это не поможет, принимайтесь за алгебраические и тригонометрические формулы. И только уж когда совсем ничего понять не сможете, тогда — лишь тогда! — беритесь за дифференциальные уравнения и ряды Фурье.

Произнеся эту филиппику, Харитонович помолчал, а потом рассмеялся и добавил, покачивая головой:

— А насчет стоячих вибраций вы здорово придумали. Наукообразно, солидно, никому не понятно, а главное — никто, кроме них, не виноват...

Новикова Татьяна Алевтиновна
Белослудцев Александр Вениаминович

Учебно-методическое пособие

Методические рекомендации
к выполнению аудиторных
лабораторных работ
по курсу «Механика»

Напечатано в авторской редакции
с оригинал-макета заказчика

Подписано в печать .Формат 70×100 $\frac{1}{16}$
Печать офсетная. Усл.печ.л. 6,61 Уч.-изд.лю 6,2
Тираж 100 экз. Заказ №
Типография ГОУВО «Удмуртского госуниверситета»
426034, Ижевск, Университетская 1, корп. 2