ТПИ

Руководство к лабораторным работам по ФИЗИКЕ

I

ТАЛЛИН 1970

ARH

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра физики

РУКОВОДСТВО
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО ФИЗИКЕ

1

Таллин
1970

ARHIIVKOGU

Составители: Т.Руус
Ю.Удер
М.Яагус

Tartu Ülikooli Raamatukogu

Одобрено на заседании
кафедры 29 апреля 1970 г.

Отв.ред. М.Яагус

Сдано в печать 16 ноября 1970 г.
Бумага 60x84/16. Печ.л.9,75. Усл.печ.л.9,07
Тираж 2000. Зак.№564 Ротапринт ТПИ
Таллин, Коскла 2/9
Бесплатно

П р е д и с л о в и е

Основными руководствами в физических практикумах Таллинского политехнического института до сих пор были сборники "Лабораторные работы по физике" части I, II и III (авторы Г.А. Метс, И.Х. Мейтре, Х.Ю. Ору, К.Я. Шультс и Л.А. Юуль). Но последние издания сборников скоро будут распроданы. В них нет многих работ, включенных в программу практикума в последние годы, руководства работ не унифицированы по форме, в них есть и другие недостатки.

В силу этих обстоятельств возникла необходимость переработки имеющихся руководств и дополнения их. Для организации этой работы и для редактирования руководств создали на кафедре физики комиссию. В работе приняли участие практически все преподаватели кафедры. Фамилия преподавателя, составляющего или обрабатывающего руководство данной конкретной лабораторной работы, указана в оглавлении.

В настоящем сборнике представлены руководства для работ по механике и молекулярной физике.

Ответственный редактор

ВНУТРЕННИЙ ПОРЯДОК ПРАКТИКУМА ПО ФИЗИКЕ

I. Работа в практикуме проводится по расписанию. Конкретные работы студентам назначает руководитель практикума. Не позже, чем на предыдущем практикуме студент обязан выяснить свою следующую работу и подготовиться к ней. Невыполненная вовремя работа выполняется в конце семестра.

2. К работе допускаются студенты, подготовившие данную работу теоретически и предъявившие протокол работы.

3. Протокол лабораторной работы состоит из следующих частей:

I) титульный лист,

2) теоретические основы работы,

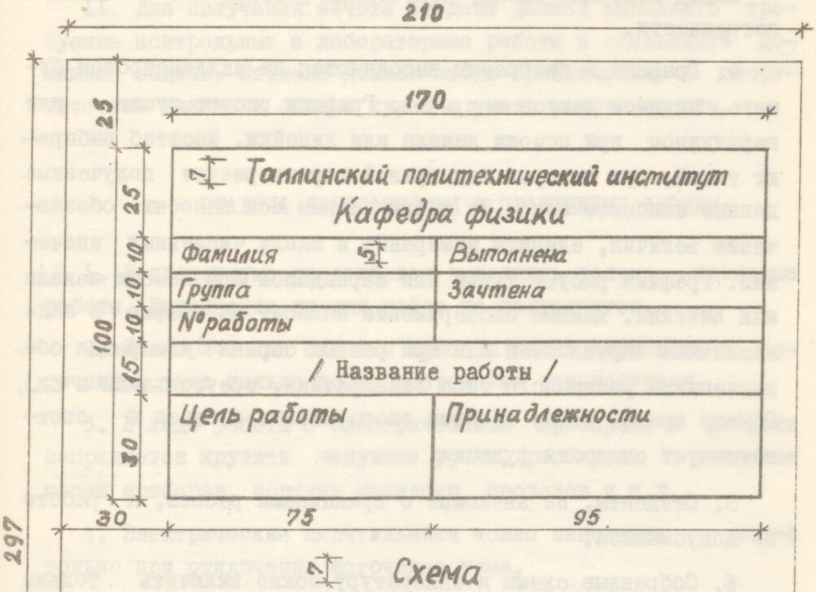
3) ход работы,

4) таблицы для данных опыта,

5) необходимые вычисления (в том числе вычисление ошибок)

6) вывод.

Титульный лист оформляется по образцу (рис. I). Протокол заполняют чернилами на формате II (297 x 2I0 мм). Схемы и чертежи должны быть корректные, с общеизвестными обозначениями. Данные опыта представляются в таблицах. Неправильные цифры надо зачеркивать так, чтобы при необходимости можно было их восстановить. Правильные цифры писать рядом.


210
170
25
25
10
10
10
10
15
30
100
297
30
75
95
Таллинский политехнический институт
Кафедра физики
Фамилия
Выполнена
Группа
Зачтена
№ работы
/ Название работы /
Цель работы
Принадлежности

Схема

Рис. I

Вывод содержит оценку полученных результатов и анализ погрешности.

4. Графики и диаграммы выполняются на миллиметровой бумаге, надписи даются в шрифте. Графики рисуют тушью или карандашом при помощи лекала или линейки. Масштаб выбирают такой, при котором ход кривой характеризует полученные данные наиболее ясно. На координатные оси наносят обозначение величин, единицы измерения и шкалу численных значений. Графики рисуют тушью или карандашом при помощи лекала или линейки. Данные эксперимента наносят на график в виде маленьких окружностей или при разных сериях измерения обозначениями различного типа (квадратики, треугольники и т.д.). Обычно кривая между точками эксперимента плавная и соответствует сущности функции.

5. Студенты, не знакомые с принципами работы, к работе не допускаются.

6. Собранные схемы и аппаратуру можно включить только после разрешения руководителя. До этого электрические схемы должны быть рассоединены с источником тока.

7. За порчу аппаратуры студент несет полную ответственность.

8. В ходе занятий студенты должны получить все необходимые данные и предъявить их руководителю на подпись и только после того разобрать схему. Данные без подписи не зачитываются.

9. После выполнения требований предыдущего пункта, студент приводит рабочее место в порядок.

IO. Работа считается выполненной, когда студент произведет все необходимые вычисления, составит графики, сформулирует выводы, защитит работы и ответит на теоретические вопросы руководителя. Работа защищается на следующем занятии. Разрешается иметь две незащищенные работы.

II. Для получения зачета студент должен выполнить требуемые контрольные и лабораторные работы и предъявить домашние задачи. Студент должен иметь практические и теоретические знания в объеме курса и уметь решать задачи.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ В ПРАКТИКУМЕ ФИЗИКИ

I. В практикуме разрешается выполнять только плановые работы. Выполнение других работ не допускается.

2. Электрические схемы и приборы можно соединять с источником тока только после разрешения руководителя.

3. В ходе работы с электрическими приборами и схемами запрещается крутить ненужные ручки, разбирать закрытые части приборов, портить изоляцию проводов и т.д.

4. Электрические кипятильники можно наполнять водой только при отключении источника тока.

5. С ртутью обращаться осторожно, чтобы не пролить; если капли ртути попадут на пол, тщательно их собрать.

6. При возникновении пожара надо выключить электрический ток и при надобности пользоваться только углеродными огнетушителями.

7. После окончания работы проверить, выключены ли все электрические приборы, закрыты ли краны газа и водопровода и привести рабочее место в порядок.

8. Ознакомившись с данными правилами, студент обязуется выполнять их и фиксирует это подписью на контрольном листе инструктажа студентов по технике безопасности.

РУКОВОДСТВО ПО ВЫЧИСЛЕНИЮ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

I. Измерение физических величин

Основная задача физического эксперимента - измерение той или иной физической величины.

Измерением какой-либо физической величины называется операция, при которой мы узнаем, во сколько раз измеряемая величина больше (или меньше) соответствующей величины, принятой за единицу измерения. Единицы измерения реализуют через соответствующие эталоны, и поэтому измерение представляет собой сравнение данной физической величины с эталоном. Так как при измерении эталон изнашивается или подвергается другим изменениям, то вместо него пользуются измерительными приборами, которые тем или иным способом сверены с эталонами.

Измерения бывают прямые и косвенные. В прямых измерениях физическая величина измеряется непосредственно. В косвенных измерениях непосредственно измеряют не ту величину, значение которой нужно узнать, а другие величины, с которыми искомая величина связана определенной математической зависимостью. Например, определение объема жидкости при помощи мензурки - прямое измерение, а определение объема тела при помощи его размеров - косвенное измерение.

Опыты показывают, что при повторном измерении одной и той же величины получаются разные результаты. Измерения не могут быть сделаны абсолютно точно. Всякое измерение дает лишь приближенный результат, т.е. результат, содержащий некоторую ошибку. Измерить абсолютно точно - это значит получить, например, при измерении длины линейки отсчет

$$25{,}72468500I7\ldots \text{ см},$$

где были-бы известны все цифры после запятой (бесконечно много десятичных мест). Ясно, что такое измерение неосуще-

ствимо ни практически (не имеем таких точных измерительных инструментов), ни принципиально – концы ни одной линейки (и не только линейки) не определены столь точно.

Абсолютно точный результат можно получить только при счете.

Измерение не имеет ценности, если неизвестна его погрешность. Таким образом, задачей измерения является не только определение самой величины, но и оценка допущенной погрешности.

2. Типы ошибок

Различают три типа ошибок: 1) грубые ошибки или промахи, 2) систематические ошибки, 3) случайные ошибки.

Грубые ошибки или промахи – это обычно неправильные отсчеты по прибору, неправильная запись отсчета и т.п. Для устранения промахов необходимо работать очень внимательно и аккуратно производить записи отсчетов. В большинстве случаев промахи хорошо заметны, так как соответствующие им отсчеты резко отличаются от других отсчетов.

Систематическими ошибками называются ошибки, зависящие от неисправности прибора, неправильных приемов измерений, неточного метода измерений, неопытности экспериментатора и т.п. Систематические ошибки появляются, например, если шкала измерительного прибора сдвинута, если стрелка согнута, при отсчете по шкале с неправильно определенной ценой деления; при электрических измерениях, если не учитывают сопротивления соединительных проводов; при измерении давления, если не учитывают зависимости отсчета барометра от температуры и т.д.

Различают три типа систематических ошибок: 1) Ошибки, сущность которых нам известна и величины которых могут быть определены с достаточной точностью. Такие ошибки называются поправками (например, поправки на температуру для метал-

лической линейки). 2) Ошибки известного происхождения, но неизвестной величины (например, погрешности измерительных приборов - истинная величина и знак погрешности, обусловленной неточностью прибора, обычно неизвестны. Поэтому, указывая погрешность прибора, имеют в виду ее предельное значение). 3) Ошибки, существование которых нам неизвестно. Они могут быть весьма большие (например, определение плотности материала по экземпляру, в котором имеются пустоты).

Характерной особенностью систематических ошибок является то, что они имеют определенный знак, т.е. они действуют на результат измерений в одном определенном направлении, увеличивая или уменьшая результат. При многократном повторении измерения они остаются постоянными по величине и знаку или меняются по определенному закону.

Систематические ошибки можно уменьшить или обнаружить, используя разные измерительные приборы или разные методы измерения. Таким образом, иногда можно превратить систематические ошибки в случайные. Например, при десятикратном измерении данной силы тока разными амперметрами, которые имеют одинаковый класс точности ошибки, результаты отдельных измерений не имеют одинаковой величины и одинакового знака.

Случайными ошибками называются ошибки, имеющие много различных причин, но таких, которые по отдельности не проявляются так отчетливо, чтобы можно было их подметить и учесть. При каждом измерении эти причины действуют по-разному, поэтому случайные погрешности при многократных измерениях одной и той же физической величины получаются различными как по величине, так и по знаку. Источником случайных ошибок при взвешивании может быть, например, колебание воздуха, воздействующее неодинаковым образом на чашки весов; пылинка, осевшая на одну из чашек; нагревание одной половины коромысла от приближения руки взвешивающего; разное трение в правом и левом подвесе чашек и множество других причин, которые практически невозможно учесть.

Устранить полностью причины случайных ошибок невозможно, поэтому случайные ошибки всегда присутствуют в измерениях. Их можно лишь уменьшать, применяя более совершенную аппаратуру, более точные методы измерений и улучшая условия измерений.

Случайные погрешности обусловлены причинами, которые нельзя точно предсказать. Следовательно, нельзя предсказать величину случайной ошибки в данном измерении. Появление той или иной случайной ошибки является так называемым случайным событием. Такие случайные события изучаются теорией вероятностей. Теория ошибок, основанная на теории вероятностей дает методы и примеры оценок и вычислений случайных ошибок.

3. Абсолютные и относительные ошибки

Разница между истинным значением измеряемой величины x и значением, полученным при измерении A, носит название абсолютной истинной ошибки α :

$$x - A = \alpha .$$

Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, то нельзя найти значение истинной ошибки α. Анализ отдельных измерений, известная погрешность измерительных приборов или критическая обработка результатов измерений дают возможность найти предельное значение абсолютной истинной ошибки. Предельное значение абсолютных истинных ошибок носит название абсолютной ошибки результата измерения. Абсолютную ошибку отсчета A обозначаем - ΔA. Это значит, что истинное значение x измеряемой величины лежит где-то в интервале

$$A - \Delta A \leqslant x \leqslant A + \Delta A.$$

Это записывается в таком виде:

$x = (A \pm \Delta A)$ вместе с единицей измерения.

Например:

$x = (2{,}74 \pm 0{,}07)$ см.

Данное определение абсолютной ошибки следует принимать с резервациями. Если величина случайной ошибки существенно меньше величины систематической ошибки (погрешности измерительного прибора и т.д.), т.е.если систематическая ошибка является определяющей, тогда для абсолютной истинной ошибки (указываемой, например, классом точности измерительного прибора) можно найти предельное значение, больше которого ошибка быть не может. Если случайные ошибки преобладают над систематическими или если их величины одинаковы, то невозможно найти точное предельное значение ошибки. Это вытекает из следующего.

Произведя измерение физической величины X n раз, получим n результатов измерений:

$$x_1, x_2, x_3, \ldots, x_i, \ldots, x_n .$$

Если систематические ошибки ничтожные, то величина

$$\Delta x_i = X - x_i$$

представляет собой случайную ошибку i -го измерения в ряду n одинаковых измерений. Появление той или иной ошибки случайное событие. Различные по величине случайные ошибки обладают различной вероятностью своего появления. В большинстве физических измерений случайные ошибки подчиняются так называемому закону нормального распределения или формуле Гаусса:

$$\varphi(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta x}{\sigma}\right)^2},$$

где $\varphi(\Delta x)$ - функция распределения случайных ошибок, характеризующая вероятность появления ошибки Δx ,

σ^2 - дисперсия измерения, характеризующая разброс значений данного ряда измерений.

На рисунке 2 видно, что чем меньше σ^2 , тем меньше вероятность появления большой по величине случайной ошибки Δx .

Чем меньше дисперсия, тем меньше разброс отдельных значений x_i , т.е. тем выше точность измерений. Чем больше дисперсия, тем больше результаты измерений отличаются друг от друга.

По закону нормального распределения следует, что если число измерений n маленькое (5-10), то среднее арифметическое ряда одинаковых измерений

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}, \qquad (I)$$

которое всегда считают окончательным результатом (наиболее вероятностное значение), не должно даже приблизительно совпасть с истинным значением измеряемой величины, которую показывает на оси абсцисс рисунка 2 точка 0.

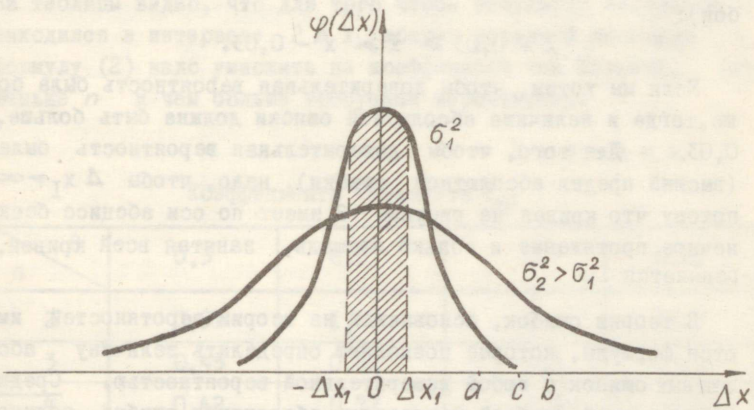


Рис. 2

Это имеет место, например, тогда, когда все n значений отсчетов находятся в интервале $[a, b]$ и среднее арифметическое $\bar{x}$ представляет собой какую-нибудь точку с в этом интервале - теория вероятностей не отрицает такую возможность. Вопрос только в том, какую вероятность имеет данная возможность.

Среднее арифметическое значение стремится к истинной величине тем больше, чем больше n .

Принципиально случайная ошибка может быть сколько угодно большой, и поэтому нет смысла говорить о предельном значении случайных ошибок в прямом смысле этого слова. И поэтому при случайных ошибках абсолютную ошибку указыва-

ют вместе с соответствующей вероятностью. Приведем численный пример:

$\bar{x}$ = (0,72 ± 0,03) мм, доверительная вероятность 0,5.

Это значит, что вероятность для того, чтобы арифметическое среднее $\bar{x}$ результатов измерений будет находиться в интервале

$$\Delta x_I = \pm 0{,}03 \text{ мм}$$

вокруг истинной величины x 0,5(см.рис.2; заштрихованная площадь равняется 0,5, общая площадь между кривой и абсциссой равняется I, т.е. вероятности появления всевозможных ошибок):

$$x + 0{,}03 \geqslant \bar{x} \geqslant x - 0{,}03.$$

Если мы хотим, чтобы доверительная вероятность была больше, тогда и величина абсолютной ошибки должна быть больше, чем 0,03. Для того, чтобы доверительная вероятность была I (высший предел абсолютной ошибки), надо, чтобы $\Delta x_I \to \infty$, потому что кривая на рисунке 2 имеет по оси абсцисс бесконечное протяжение и только площадь, занятая всей кривой, равняется I.

В теории ошибок, основанной на теории веротяностей имеются формулы, которые позволяют определить величину абсолютных ошибок с любой доверительной вероятностью. Средней квадратичной ошибкой называется абсолютная ошибка, полученная при измерении с большим числом n, доверительная вероятность которого 0,683. Средняя квадратическая ошибка вычисляется по формуле:

$$\Delta x_{kb} = \pm \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad . \qquad (2)$$

Это средняя квадратическая ошибка среднего арифметического $\bar{x}$ ряда измерений. Средняя квадратическая ошибка отдельного измерения x_i равняется

$$\Delta x'_{kb} = \sqrt{n}\ \Delta x_{kb},$$

и по этой величине определяют дисперсию измерений:

$$\sigma^2 = \lim_{n \to \infty} (\Delta x'_{kb})^2 .$$

Если число измерений n невелико (теоретически $n \to \infty$), тогда ошибка, вычисленная по формуле (2), имеет доверительную вероятность меньше 0,683. Чтобы при вычислении из малого числа измерений n по формуле (2) получить результат, который соответствует прежней доверительной вероятности, внессем в формулу (2) поправку $t_{n\beta}$. Эта поправка называется коэффициентом Стьюдента. Известны методы расчета коэффициента Стьюдента по числу измерений n и доверительным вероятностям β. Результаты этих расчетов приведены в табл. I. Из таблицы видно, что для того чтобы результат измерения $\bar{x}$ находился в интервале $2\Delta x_{kb}$ вокруг истинной величины x, формулу (2) надо умножить на коэффициент тем больший, чем меньше n и чем больше требуемая вероятность.

Таблица I

Коэффициенты Стьюдента $t_{n\beta}$

n \ β	0,3	0,5	0,7	0,99
2	0,5I	I,00	2,0	63,7
3	0,45	0,82	I,3	9,9
4	0,42	0,77	I,3	5,8
5	0,4I	0,74	I,2	4,6
6	0,4I	0,73	I,2	4,0
7	0,40	0,72	I,I	3,7
8	0,40	0,7I	I,I	3,5
9	0,40	0,7I	I,I	3,4
I0	0,40	0,70	I,I	3,3

Иногда для оценки величины абсолютной ошибки измерения применяется средняя арифметическая ошибка

$$\Delta x_{cp} = \pm \frac{\sum_1^n |x - x_i|}{n} , \qquad (3)$$

Эту величину вычислить легче, чем среднюю квадратичную погрешность (2), но определить доверительную вероятность β практически невозможно, и поэтому результат, полученный таким образом, не имеет ценности. Формулой (3) можно пользоваться только при большом n ($n > 30$) для упрощения вычисления средней квадратичной ошибки:

$$\Delta x_{kb} = \frac{1{,}25}{\sqrt{n}} \Delta x_{cp} . \qquad (4)$$

Результату (4) соответствует тогда доверительная вероятность 0,683. Если хотят найти ошибку с большей доверительной вероятностью, тогда формулу (4) умножают на коэффициент Стьюдента (нужна таблица коэффициентов $t_{n\beta}$ где даны и большие значения n).

Еще для оценки величины абсолютной ошибки применяется вероятная ошибка, доверительная вероятность которой 0,5. Вероятную ошибку можно найти через среднюю квадратичную ошибку (при вычислении которой учтен коэффициент $t_{n\beta}$; β = = 0,683):

$$\Delta x_{b} = 0{,}683 \; \Delta x_{kb} .$$

Пользуясь таблицей I, предельное значение в некотором смысле для случайной ошибки найти все-таки можно. Это возможно в таких случаях, когда мы, например, считаем, что вероятность 0,99 практически равняется вероятности I. В этом смысле вычисленную по формуле (2) ошибку вместе с коэффициентом $t_{n\beta}$ (β = 0,99) можно считать предельным значением для отсчета $\bar{x}$. Результат имеет только в этом случае смысл, если полученная относительная ошибка не слишком большая, что может случиться, если серия измерений имеет большую дисперсию σ^2.

Точность измерения лучше характеризуется не абсолютной ошибкой, а так называемой относительной ошибкой. Допустим, что измерим длину стола и длину карандаша с одной и той же абсолютной ошибкой Δx = I см. Ясно, что, хотя абсолютные ошибки одинаковы, первое измерение точнее второго. Два или больше результата получены с одинаковой точностью, если их относительные ошибки равны.

Отношение абсолютной величины ошибки к измеряемой величине $\frac{\Delta x}{x}$ называют относительной ошибкой и обычно выражают в процентах

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \cdot \qquad (5)$$

4. Вычисление систематических ошибок прямых измерений

Рассмотрим случай, когда определяющей является систематическая ошибка - погрешность измерительных приборов. Считаем, что случайные ошибки ничтожные - при повторном измерении получим практически одинаковые результаты или результаты, которые колеблются в пределах погрешности измерительного прибора. В таком случае можно измерять только один раз. Ошибку для результата измерения получим учитывая класс точности измерительного прибора.

На электроизмерительных приборах обычно указан класс точности. Если на приборе указан класс точности I,0, то это означает, что показания прибора правильны с точностью до I,0 % от всей действующей шкалы прибора. Иначе говоря, вольтметр, шкала которого I50 в, дает ошибку в измерении напряжения не более 0,0I.I50 = I,5 ≈ 2 в. Если стрелка показывает I4I в, то x = (I4I ± 2) в.

Максимальные погрешности, даваемые измерительными линейками, микрометрами, штангенциркулями, мензурками, термометрами и некоторыми другими приборами, иногда даются на самом приборе, иногда указываются в прилагаемом к нему паспорте. Если паспорта нет и на приборе ошибка тоже не указана, а измерительный прибор технически в порядке (прибор проверен, при хранении и использовании соблюдались правила эксплуатации), то за предельное значение абсолютной ошибки принимают стандартную погрешность, которая равна половине наименьшего деления шкалы. Например, при помощи миллиметрической шкалы можно измерять с стандартной погрешностью ± 0,5 мм; если цена деления термометра $0{,}5^0$, то за стандартную погрешность следует принимать $0{,}25^0 \approx 0{,}3^0$.

Если результат измерения получается как разница двух отсчетов, которые соответствуют двум точкам на шкале, тогда определяют двухкратную величину ошибки (например, при измерении длины при помощи линейки).

Стандартная погрешность нониуса обычно равна его точности, т.е. разнице между ценой деления (или делениями) основной шкалы измерительного прибора и ценой деления нониуса.

В лабораторных работах часто даются ранее измеренные величины, погрешности которых не указываются. Тогда абсолютная погрешность берется равной половине единицы последнего места. Например сила света источника $I = 1{,}2$ св надо понимать $I = (1{,}2 \pm 0{,}05)$ св.

5. Определение систематической ошибки при косвенных измерениях

Часто физическая величина не определяется непосредственным измерением, а вычисляется после подстановки результатов прямых измерений в определенную формулу. Пусть имеется физическая величина x, являющаяся функцией независимых величин A, B, C, ..., значения которых находятся прямыми измерениями:

$$x = f(A, B, C, \ldots). \qquad (6)$$

Погрешность косвенного измерения зависит не только от величин погрешностей отдельных измерений ΔA, ΔB, ΔC ..., а также от произведенных математических операций (6).

Рассмотрим случай, когда величины ΔA, ΔB, ΔC, ... определяются максимальными погрешностями измерительных приборов. Тогда предельное значение ошибки Δx функции x следует определять по известным ошибкам независимых переменных. Математически это значит, что надо складывать все изменения функции x, которые обусловлены изменениями ΔA, ΔB, ΔC, ... аргументов A, B, C, ... Если относительная ошибка $\frac{\Delta A}{A}$ величины A небольшая (до нескольких про-

центов), тогда изменение функции x, которое обусловлено изменением ΔA величины A, можно найти при помощи частного производного:

$$\Delta x_A = \frac{\partial f}{\partial A} \cdot \Delta A . \qquad (7a)$$

Максимальное изменение функции, обусловленное изменениями всех аргументов, найдем как сумму

$$\Delta x = \left|\frac{\partial f}{\partial A}\right| \Delta A + \left|\frac{\partial f}{\partial B}\right| \Delta B + \left|\frac{\partial f}{\partial C}\right| \Delta C + \ldots \qquad (7)$$

Например, при складывании

$$x = A \pm B \pm C \pm \ldots \qquad (8)$$

используя формулу (7), получим

$$\Delta x = \Delta A + \Delta B + \Delta C + \ldots$$

Если формула (6) предусматривает только умножение, деление, возведение в степень и извлечение корня, тогда легче найти вначале относительную ошибку. Например, для функции

$$x = \frac{AB^2\sqrt[3]{C}}{DE^3\sqrt{F}} ,$$

вычисляя относительную ошибку по формуле (7), получим

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta A}{A} + 2\frac{\Delta B}{B} + \frac{1}{3}\frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta D}{D} + 3\frac{\Delta E}{E} + \frac{1}{2}\frac{\Delta F}{F} . \qquad (9)$$

Абсолютную ошибку найдем по формуле

$$\Delta x = x \cdot E_x .$$

Пример

Определение индуктивности катушки и коэффициента мощности переменного тока.

Результаты измерений даны в следующей таблице:

Символ измеряемой величины	Результат	Точность измерений
Эффективное напряжение U_e	220 в	Использовали вольтметр с пределом измерения 300 в и классом точности 1,0 $\Delta U_e = 3$ в
Эффективная сила тока I_e	2,52 а	Использовали амперметр с пределом измерения 3 а и классом точности 1,5 $\Delta I_e = 0{,}045$ а
Частота переменного тока f	50,5 гц	Частотомер позволяет измерять дискретные величины частоты, которые отличаются друг от друга на 0,5 гц $\Delta f = 0{,}25$ гц
Активное сопротивление катушки R	40,2 ом	Измерили омметром с пределом измерения 100 ом и классом точности 0,5 $\Delta R = 0{,}5$ ом

Индуктивность катушки вычисляется так (емкость $C \to \infty$):

$$L = \frac{1}{2\pi f \cdot I_e} \sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2} ;$$

$$L = \frac{1}{2 \cdot 3{,}142 \cdot 50{,}5 \cdot 2{,}52} \sqrt{(220)^2 - (2{,}52 \cdot 40{,}2)^2} = 0{,}2442 .$$

Хотя в формулу входит величина π, значение которой не измеряли, следует вычислять ошибку, обусловленную использованием приближенной величины. Эту ошибку не надо определять в том случае, если эту величину взяли на порядок точнее, чем значения измеряемых величин(что и сделано в данном примере). При нахождении нужной формулы для вычисления ошибки используем вывод из правила (7), согласно которому относительная ошибка произведения равна сумме относительных ошибок множителей, а относительная ошибка частного равна сумме относительных ошибок делимого и делителя.

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta I_e}{I_e} + \frac{\Delta\left(\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2}\right)}{\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2}} .$$

Необходимо еще найти ошибку для сомножителя, обозначенного корнем. Используя метод частных производных (7) для нахождения изменения функции, получим:

$$\Delta\left(\sqrt{U_e^2-(I_eR)^2}\right)=\frac{1}{2\sqrt{U_e^2-(I_eR)^2}}\left(2U_e\,\Delta U_e+2I_eR^2\Delta I_e+2I_e^2R\Delta R\right);$$

Подставляя полученную формулу в предыдущую, получим

$$\frac{\Delta L}{L}=\frac{\Delta f}{f}+\frac{\Delta I}{I}+\frac{U_e\cdot\Delta U_e+I_eR\left(R\Delta I_e+I_e\Delta R\right)}{U_e^2-(I_eR)^2},$$

$$\frac{\Delta L}{L}=\frac{0{,}25}{50{,}5}+\frac{0{,}045}{2{,}52}+\frac{220\cdot3+2{,}52\cdot40{,}2\left(40{,}2\cdot0{,}045+2{,}52\cdot0{,}5\right)}{220^2-(2{,}52\cdot40{,}2)^2}=$$

$$=0{,}0482=4{,}82\%\ ;$$

$$\Delta L=0{,}244\cdot0{,}0482=0{,}0117.$$

Ответ:

$L=(0{,}244\pm0{,}012)$ гн, с доверительной вероятностью I.

Коэффициент мощности переменного тока $\cos\varphi$ выражается через измеренные величины:

$$\cos\varphi=R\frac{I_e}{U_e}\ ;$$

$$\cos\varphi=40{,}2\cdot\frac{2{,}52}{220}=0{,}461\ ;$$

$$\frac{\Delta(\cos\varphi)}{\cos\varphi}=\frac{\Delta R}{\Delta R}+\frac{\Delta I_e}{I_e}+\frac{\Delta U_e}{U_e}\ ;$$

$$\frac{\Delta\cos\varphi}{\cos\varphi}=\frac{0{,}5}{40{,}2}+\frac{0{,}045}{2{,}52}+\frac{3}{220}=0{,}044=4{,}4\%\ ,$$

$$\Delta(\cos\varphi)=0{,}461\cdot0{,}044=0{,}0202\ .$$

Ответ:

$\cos\varphi=0{,}461\pm0{,}021$, с доверительной вероятностью I.

6. Определение случайной ошибки при прямом измерении

Рассмотрим случай, когда случайные ошибки намного превышают погрешность измерительных приборов. При повторном измерении получаются результаты, которые различаются больше, чем погрешность измерительного прибора.

Тогда измерение следует производить несколько (n) раз (в лабораторных работах по физике желательно брать 5-10 отсчетов) и вычислять абсолютную ошибку по формуле (2). учитывая поправку $t_{n\beta}$.

Пример.

Измерим толщину металлической пластинки d в семи разных местах при помощи штангенциркуля, точность нониуса которого 0,1 мм:

№	d (см)	$\lvert\bar{d}-d_i\rvert\cdot 10^2$	$(\bar{d}-d_i)^2\cdot 10^4$
1.	9,25	3	9
2.	9,30	2	4
3.	9,27	1	1
4.	9,31	3	9
5.	9,26	2	4
6.	9,29	1	1
7.	9,27	1	1

$$\bar{d} = 9{,}27 + \frac{-2+3+0+4-1+2+0}{7}\,10^{-2} = 9{,}28\ (\text{см}),$$

$$\Delta d_{kb} = \pm\sqrt{\frac{9+4+1+9+4+1+1}{7\cdot 6}\cdot 10^{-4}} = \pm\,0{,}0083(\text{см})$$

Из таблицы 1 найдем, что при доверительной вероятности 0,99 для $n = 7$ соответствующий коэффициент $t_{n\beta} = 3{,}7$. Следовательно, предельное значение абсолютной ошибки (в том смысле, как дано в пункте 3) будет

$$\Delta d = \pm\,3{,}7\ .\ 0{,}0083 = \pm\,0{,}03\ (\text{см}),$$

и $\bar{d} = (9{,}28 \pm 0{,}03)$ см, с доверительной вероятностью 0,99.

7. Определение случайной ошибки при косвенном измерении

Пусть величины A, B, C,... в формуле (6) измерены так, как указано в пункте 6. Подставляя в формулу (6) средние величины $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{C}$, ..., найдем результат x. Абсолютная ошибка данного результата вычисляется не по формуле (7),

которая дана в пункте 5. В этом случае изменения функции x Δx_A, Δx_B, ... обусловлены изменениями ΔA, ΔB, ... аргументов A, B, ... функции x, вычисляем все также по формуле (7а), но изменения значений функции, вызванные ошибками различных аргументов, следует суммировать не так, как в предписании (7). Предписание (7) дает максимальную ошибку, учитывая, что все изменения значений функции, вызванные ошибками аргумента, имеют одинаковый знак. Но случайная ошибка измерения является случайной не только по численному значению ошибки, но и по знаку. Основываясь на теории вероятностей, можно показать, что, если отсутствует корреляция между различными ошибками аргументов функции, то квадраты ошибок функции суммируются.

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\Delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\Delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\Delta C\right)^2 + \dots} \quad . \qquad (10)$$

Используя формулу (10), вместо формул (8) и (9) в примерах на стр. 17 следует писать выражения:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2 + (\Delta C)^2 + \dots} \quad ; \qquad (8')$$

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(3\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\frac{\Delta F}{F}\right)^2} . \qquad (9')$$

Следовательно, квадрат абсолютной погрешности суммы или разности равняется сумме квадратов абсолютных погрешностей слагаемых.

При умножении и делении складываются квадраты относительных погрешностей.

В случае, если величины ΔA, ΔB, ... вычислены как предельные значения ошибок в том смысле, как дано в пункте 3 (см. пример в конце пункта 6), то предельное значение ошибки при случайных ошибках можно найти по формуле (7). Доверительная вероятность в этом случае больше 0,99, но значение ее неизвестно.

Пример: Определение электродвижущей силы элемента методом компенсации.

В качестве эталонного источника тока берется нормальный элемент, э.д.с. которого равна E_n = 1,018 в.

Результаты измерений и вычислений даны в следующей таблице:

№	Нормальный элемент (E_n)			Измеряемый источник тока (E_m)		
	l_1 (cm)	$\lvert l_1 - \bar{l}_1 \rvert$ (cm)	$(l_1 - \bar{l}_1)^2 \cdot 10^2$ (cm²)	l_2 (cm)	$\lvert l_2 - \bar{l}_2 \rvert$ (cm)	$(l_2 - \bar{l}_2)^2 \cdot 10^2$ (cm²)
1.	42,4	0,16	2,56	68,1	0,1	1
2.	42,6	0,04	0,16	68,0	0,2	4
3.	42,5	0,06	0,36	68,6	0,6	36
4.	42,7	0,14	1,96	68,2	0,0	0
5.	42,6	0,04	0,16	68,1	0,1	1
Средн.	42,56			68,20		

По формуле (2) вычисляем

$$\Delta l_1 = \pm t_{n\beta} \sqrt{\frac{(2,56+0,16+0,36+1,96+0,16)\cdot 10^{-2}}{5\cdot 4}} = \pm 0,051 t_{n\beta},$$

$$\Delta l_2 = \pm t_{n\beta} \sqrt{\frac{(1+4+36+0+1)\cdot 10^{-2}}{5\cdot 4}} = \pm 0,15 t_{n\beta}.$$

Необходимо, чтобы доверительная вероятность искомой ошибки была 0,99. Тогда по таблице I при n = 5 получим

$$t_{n\beta} = 4,6.$$

Следовательно:

$$l_1 = (42,56 \pm 0,23) \text{ см},$$

$$l_2 = (68,20 \pm 0,67) \text{ см}.$$

Далее электродвижущую силу источника тока вычисляем по формуле:

$$E_m = E_n \cdot \frac{l_2}{l_1};$$

$$E_m = 1{,}018 \cdot \frac{68{,}20}{42{,}56} = 1{,}632 \text{ (в)}.$$

При вычислении ошибки учтем, что электродвижущая сила нормального элемента дана до ~ 10 раз точнее, чем полученные при измерении длины l_1 и l_2 (основываясь на правилах округления можем утверждать, что E_n дано с точностью $\pm$ 0,0005 в), и поэтому эту ошибку можно считать практически равной нулю. Используя правило (10) для вычисления ошибки, найдем

$$\Delta E_m = E_m \sqrt{\left(\frac{\Delta l_1}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l_2}{l_2}\right)^2},$$

$$\Delta E_m = 1{,}632 \cdot \sqrt{\left(\frac{0{,}23}{42{,}6}\right)^2 + \left(\frac{0{,}67}{68{,}2}\right)^2} = 0{,}0182.$$

Ответ даем в виде (см.пункт 9).

E_m = (1,632 $\pm$ 0,019) в, с доверительной вероятностью 0,99.

8. Вычисление ошибки результата, если необходимо учитывать и случайную, и систематическую ошибки

Если средняя квадратичная ошибка (см.пункт 3) сравнима с погрешностью измерительного прибора, то надо учитывать и то, и другое. В таком случае проще определить предельное значение случайной ошибки в том смысле, как дано в пункте 3 (см. пример в конце пункта 6) и прибавить погрешность измерительного прибора. Дальнейшие вычисления с полученными результатами (косвенное измерение) производятся по инструкции вычисления максимальной ошибки (см. пункт 5).

Может случиться, что вычисляя по инструкции данного пункта, предельное значение случайной ошибки (в том смысле, как дано в пункте 3) получим слишком большое (20 - 100%). В таком случае обстоятельства были оценены неправильно, и это

значит, что определяющей была случайная ошибка (см. пункт 6).

При лабораторных работах по физике может иметь место такой случай, когда при измерении одних величин в данном эксперименте доминирует случайная ошибка, а при измерении других величин - систематическая ошибка. Как тогда вычислить ошибку для косвенного измерения?

В таком случае найдем опять предельное значение случайных ошибок в том смысле, как дано в пункте 3 и вычислим максимальную ошибку для косвенно измеряемой величины по пункту 5. Если предельные значения случайных ошибок одного или нескольких величин получаются слишком большие, то для остальных величин ошибки следует практически приравнять нулю и ошибку косвенного измерения вычислять по пункту 7.

Чтобы выяснить, какие ошибки доминируют при данном измерении, следует перед измерением определить погрешность измерительного прибора и сделать несколько измерений, чтобы выяснить, превосходят случайные ошибки погрешность измерительного прибора или нет.

Далее, приступив к измерениям, те величины, в которых доминируют случайные ошибки, следует измерять несколько (5... 10) раз. Другие величины можно измерять один раз.

Обычно в руководствах лабораторных работ указано, какие измерения надо повторить, какие - нет.

9. Арифметические действия с приближенными данными. Способ изложения окончательного результата. Правила округления

Из вышеприведенного следует, что любой результат измерения приближенный. Поэтому ответ полноценный только тогда, когда известна погрешность. Величину ошибки тоже нельзя точно определить - это также приближенное число. Отсюда следует, что точность обработки числового материала должна быть согласована с точностью самих измерений.

Производя вычисления на основании результатов измерений, нет никакого смысла вычислять абсолютно точно, с большим числом десятичных мест.

а) Во всех арифметических операциях над результатами измерений нужно придерживаться следующего правила:

Результаты всех арифметических вычислений должны иметь на одно десятичное место больше, чем отсчеты измерений.

Например, найдем величину сопротивления из закона Ома:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6,45}{0,0273} = 236,3 \text{ (ом)}. \qquad (11)$$

Если каждая отдельная величина измерена с различной степенью точности, то при использовании данного правила в расчет необходимо принимать наименее точно измеренную величину. В этом случае результаты измерений с большим числом десятичных мест целесообразно округлять до числа десятичных мест, которое на одно больше, чем в результате с наименьшим числом десятичных мест. Например, если в предыдущем примере сила тока равняется 0,02 а, то

$$R = \frac{6,45}{0,02} = \frac{6,5}{0,02} = 320 \text{ (ом)} \qquad (12)$$

(см. правило в конце данного пункта).

Так как 0 не значащая цифра, а показывает порядок результата, то следует результат писать в таком виде:

$$R = 3,2 \cdot 10^2 \text{ ом}. \qquad (13)$$

б) При вычислении погрешности нужно придерживаться следующего правила, которое основывается на теории ошибок (если $n \leqslant 10$):

В погрешности, как правило, следует приводить одну значащую цифру, если она больше 3, и две значащие цифры, если первая из них меньше 4.

Например, если погрешности получились равными I,4; 0,39; 0,04I; 4,7, то их следует давать в таком виде: I,4; 0,39; 0,04; 5.

Следовательно, при всех арифметических действиях над погрешностями вычислять следует до точности двух десятичных мест (вычисление на логарифмической линейке).

Значащие цифры числа - это все его цифры I,2,3,...9 и нуль, если он стоит между двумя значащими цифрами или стоит в конце числа. Нули, стоящие впереди числа или поставленные вместо цифр, отброшенных при округлении, значащими цифрами не считаются. Если нули стоят в конце результата и являются незначащими (см. пример (I2)), то результат пишем в виде (I3).

в) Способ изложения окончательного результата

Если результат измерений и его погрешность найдены по предыдущим правилам, то ответ округляется до первой значащей правой цифры абсолютной ошибки. Например: (I5,I9$\pm$0,03)см, (I27 $\pm$ 2)$\cdot$I0^{2}м. Недопустимо писать (I5,I947$\pm$0,03)см, (I2715 $\pm$ 200)м, (I2700 $\pm$ 200)м. Если в примере (II) получили абсолютную ошибку 6, то пишем результат

$$(236 \pm 6)\ \text{ом};$$

если абсолютную ошибку получили 2,3, то

$$(236{,}3 \pm 2{,}3)\ \text{ом}$$ (см. правило б).

г) Правила округления

I. Округляя приближенное число, нужно отбрасывать последние цифры, если первая из отбрасываемых цифр меньше 5, и прибавлять единицу к предыдущей цифре, если первая из отбрасываемых цифр равна или больше 5. Исключением является тот случай, когда отбрасываемая цифра 5 получена при округлении. В таком случае предыдущая цифра остается неизменной.

Например 0,6345 округляется 0,635, 0,63 (а не 0,64).

2. Абсолютную или относительную ошибку округляют всегда так, чтобы ошибка увеличивалась. В противном случае предельное значение ошибки может оказаться меньше истинной ошибки. Например,

$$\Delta A = 0{,}024 \approx 0{,}03,$$

$$E_B = \frac{0{,}06}{12{,}9} \approx \frac{0{,}06}{12} = 0{,}5\%.$$

10. Графический способ представления результатов эксперимента

Пример А. Зависимость к.п.д. от температуры нагреваемой воды.

Результаты измерений при массе воды в кипятильнике m = = 2000 г даны в следующей таблице:

Время (мин)	Напряжение U(в)	Сила тока I(А)	Температура t(°С)	Кпд в % (средн. для каждой минуты) $\eta_{ср}$	Абсолютная ошибка $\Delta\eta_{ср}$	Относительная ошибка (%)
0	219	3,72	14	60	23	39
1	220	3,73	17,5	94	27	29
2	220	3,73	23	102	28	27
3	220	3,73	29	85	26	30
4	220	3,73	34	102	28	27
5	220	3,73	40	85	26	30
6	220	3,73	45	102	28	27
7	220	3,73	51	85	26	30
8	219	3,72	56	94	28	29
9	221	3,76	61,5	77	25	33
10	221	3,76	66	90	26	29
11	221	3,76	71,3	84	26	31
12	221	3,76	76,2	82	25	31
13	220	3,73	81	68	24	35
14	220	3,73	85	80	25	32
15	220	3,73	89,7	56	23	41
16	220	3,73	93			

В таблице в пятом столбце даны средние значения к.п.д., которые вычислены для каждой минуты опыта по формуле

$$\eta_{ср} = \frac{cm(t_2 - t_1)}{0{,}239 \cdot I \cdot U \cdot \tau}.$$

Так как вычисленные к.п.д. представляют собой средние к.п.д. для первой, второй, третьей и т.д. минуты, то при графическом представлении (см. рис. 3) этих результатов абсциссами этих точек взяты средние температуры соответствующих промежутков.

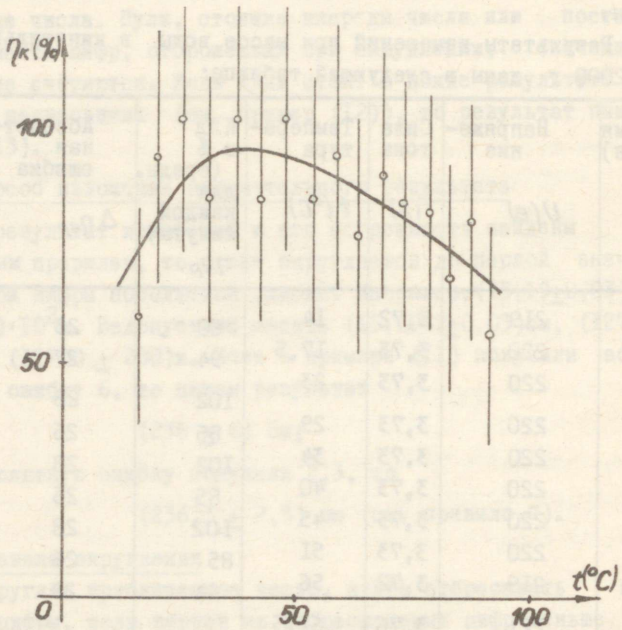


Рис.3

Хотя полученные точки располагаются на графике довольно беспорядочно, нельзя делать вывод, что к.п.д. зависит от температуры неплавно. Причина беспорядочного распределения точек выясняется при вычислении ошибок опыта и после нанесения их на график.

Время измерено секундомером, точность которого 0,2 сек. Но в данном опыте точностью измерения нельзя считать 0,2 сек, потому что моментальное измерение трех величин

I, U, t невозможно. Учитывая, что сила тока и напряжение в течение опыта мало изменились, можно считать точностью измерения времени $\pm$ 2,5 сек. Но τ = I мин, и это промежуток между двумя отсчетами. В начале и в конце этого промежутка ошибка измерения составляет $\pm$ 2,5 сек, следовательно, I мин измерена с точностью $\pm$ 5 сек.

Количество воды измерено мензуркой, деление которой соответствует 5 $см^3$ и объем 500 $см^3$. Для измерения 2000 г воды пользовались мензуркой 4 раза, и при каждом измерении возможная ошибка была 2,5 г, следовательно, при измерении количество воды за ошибку следует принять $\pm$ IO г.

При измерении температуры пользовались термометром с делением шкалы I^0C. Ошибка измерения была $0,5^0C$.

Удельная теплоемкость воды зависит от температуры. При изменении температуры от 0^0C до $I00^0C$ удельная теплоемкость может измениться максимально на 0,0I (разность между минимальным и максимальным значениями). Вычисляли по значениям: с = I,00 кал/г.град ; $\Delta c = \pm$ 0,005 кал/г.град; ΔU =I,5в; ΔI = 0,025 а; коэффициент Джоуля-Ленца k взяли с точностью $\Delta k = \pm$0,0005 (правила округления).

Ошибку для к.п.д. вычисляем по формуле (см. пункт 5):

$$\frac{\Delta \eta_{cp}}{\eta_{cp}} = \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta (t_2 - t_1)}{t_2 - t_1} + \frac{\Delta \tau}{\tau}.$$

Шесть первых слагаемых одинаковы для всех значений η_{cp}. Заменяя эти слагаемые соответствующими цифрами и учитывая, что $\Delta(t_2 - t_1) = 2\Delta t = 1^0C$, получим:

$$\frac{\Delta \eta_{cp}}{\eta_{cp}} = 0,11 + \frac{1}{t_2 - t_1} .$$

Результаты вычислений ошибок для к.п.д. даны в таблице в 6 и 7 столбцах и графически представлены на рисунке 3 прямыми, имеющими длину $2\Delta\eta_{cp}$ и проходящими параллельно оси ординат через соответствующие им значения к.п.д. Ясно, что нерегулярное изменение величины η_{cp} (а также, то, что некоторые величины больше I00%) обусловлено ошибками измерения, и поэтому нет смысла соединять между собой все точки. Между полученными точками примерно на равных расстояниях проводят

плавную кривую, которая дает зависимость к.п.д. от температуры (см. рис. 3).

Приведенный пример демонстрирует заодно недостаток метода вычисления ошибок, по которому ошибки всех величин складываются. Это видно по слишком большим величинам вычисленных ошибок. Вероятность того, что ошибки всех величин изменяют результат в одном направлении, очевидно, намного меньше единицы, и поэтому складывание всех ошибок представляется преувеличиванием.

Пример Б. Калибровка фотоэлемента

Сила света источника была $I = 2{,}15$ свечей. Измерили величину фототока и расстояние фотоэлемента до источника света. Результаты даны в следующей таблице:

Расстояние r (см)	Фототок J (мка)	Освещенность $E = \frac{I}{r^2}$ (лк)	Абсолютная ошибка $\Delta E = E\left(\frac{\Delta I}{I} + 2\frac{\Delta r}{r}\right)$	Относительная ошибка (%)
3,6	140	1660	470	28
3,8	130	1490	390	27
4,2	120	1220	290	24
4,5	110	1060	138	22
4,8	100	935	200	21
5,3	90	765	150	19
5,7	80	662	120	18
6,5	70	508	80	16
7,5	60	383	50	14
8,5	50	298	36	12
10	40	215	22	10
12	30	149	13	9
15,7	20	88	6	7
19,3	15	58	3	5
25,5	10	33	1	3
40,5	5	13	0,4	3

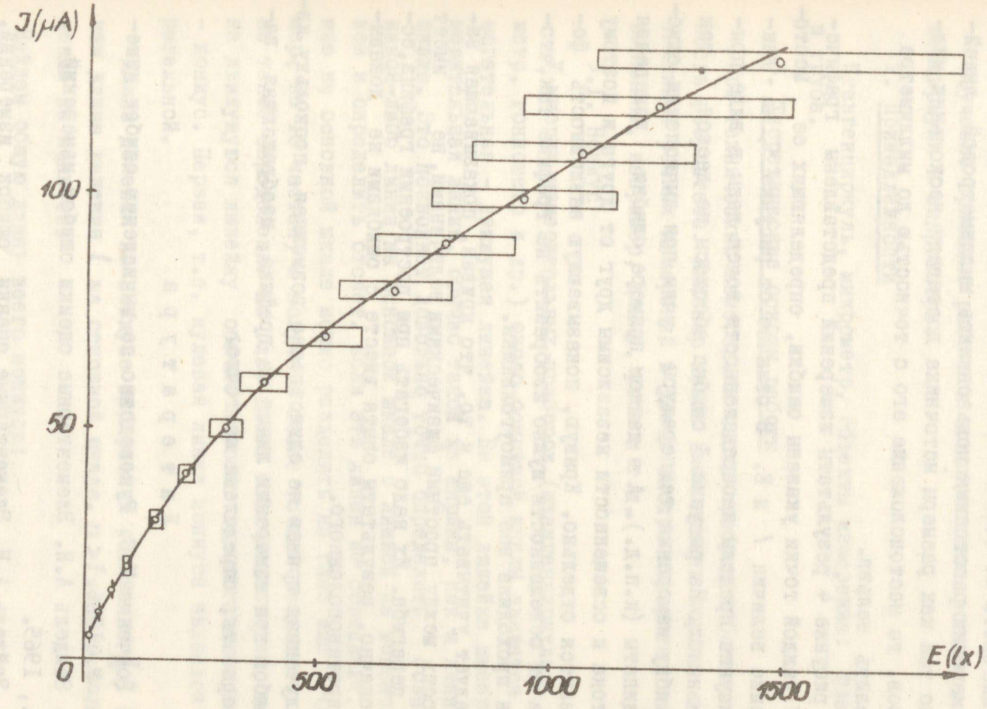


Рис. 4

Так как ошибка для силы света не дана, то основываясь на правилах округления, можно считать $\Delta I = \pm 0{,}005$ св.

Фотосток измерен с точностью $\Delta J = \pm 2$ мка и расстояние источника света от фотоэлемента с точностью $\Delta r = \pm 0{,}5$ см. При измерении расстояния пользовались миллиметровой линейкой, но так как размеры источника достигали нескольких миллиметров, то местоположение его с точностью до миллиметра определить нельзя.

На рисунке 4 результаты измерений представлены графически. У каждой точки указаны ошибки, определяющих ее местоположение величин I и E. В отличие от рисунка 3, на данном рисунке пределы неопределенности точек даны в виде прямоугольников. На рисунке 3 ошибка абсциссы не дается, так как ошибку измерения температуры учли при вычислении ошибки ординаты (к.п.д.). А в данном примере ошибки измерения силы тока и освещенности независимы друг от друга и поэтому указываются отдельно. Кривую, показывающую зависимость фототока от освещенности нужно изобразить на графике так, чтобы она проходила все прямоугольники.

Следует учитывать еще и то, что кривая, показывающая зависимость между простыми физическими величинами, не имеет точек перегиба. Их надо избегать при построении графика, если, конечно, результаты опыта вместе с ошибками не доказывают противоположного.

Полученная кривая не единственно возможная, поскольку из-за ошибок при измерении линия на графике, изображающая закономерность, определена не точно.

Литература

1. Ромченко И.С. Руководство по вычислению ошибок измерений. М., 1966.

2. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. М.-Л., 1965.

3. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л., 1968.

ОБЩИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

I. Задание

Изучение принципа работы и использование нониуса, штангенциркуля и микрометра.

2. Принадлежности

Штангенциркуль, микрометр, объекты измерения: пластинка и труба.

3. Теоретические основы работы

При технических измерениях часто требуется большая точность результата. Инженер наших дней должен хорошо владеть техникой разных измерений и уметь быстро измерять разные величины, например, длину, угол и т.д.

3.I. Нониус

У многих измерительных приборов (штангенциркуль, микрометр, гониометр и др.) около основной шкалы движется вспомогательная - движущая линейка. На этой линейке имеется измерительная линия, обычно такой же ширины, как и линия на шкале. Это позволяет довольно точно определить совпадение какой-либо линии на основной шкале с линией на вспомогательной и определить отсчет. Если эти линии не совпадают, деление на основной шкале можно разделить на глаз еще (например, на IO частей) и получить более точный результат. Однако такое определение на глаз имеет свои недостатки, поэтому на движущуюся линейку обычно наносят вспомогательную шкалу - нониус. Первая, т.е. нулевая линия нониуса является измерительной.

Длина деления на нониусе выбирается обычно на $\frac{1}{n} l$ короче, чем длина деления l на основной шкале. $n>1$ - число полных делений на нониусе,

Найдем общую длину всего нониуса:

$$\left(1-\frac{1}{n}\right)\cdot l \cdot n = l(n-1),$$

Таким образом, на всю длину нониуса соответствует длина $(n-1)$ делений измерительной шкалы.

Если нулевая линия нониуса совпадает с какой-то M линией на основной шкале (рис. 5), то первая линия нониуса не совпадает со следующей линией на шкале, а отстает на $\frac{1}{n}$ часть цены основной шкалы. Вторая линия соответственно отстает на $2 \cdot \frac{1}{n}$ часть и, т.д. пока последняя линия нониуса не совпадет с $M + n - 1$ делением шкалы. На рис. 5 показан такой случай, когда $n = 10$.

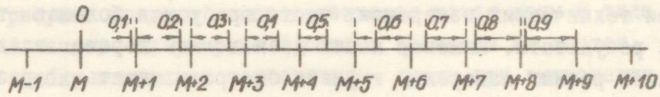


Рис. 5

Если теперь передвигать нониус дальше, то при совпадении первой линии на нониусе, измерительная линия (нулевое деление нониуса) успеет переместиться на $\frac{1}{n}$ часть длины основной шкалы. Соответственно, если совпадает вторая линия, то нониус перемещается на $2 \cdot \frac{1}{n}$ часть длины основной шкалы и т.д.

Из этого и следует понятие точность нониуса:

$$T = \frac{1}{n}$$

показывающее наименьшую длину перемещений нониуса при совпадении следующей линии нониуса со следующим делением шкалы.

Отсчет при помощи нониуса производят следующим образом

$$A = M + NT,$$

где A - отсчет измерения,

M - последнее значение на основной шкале, через которое перешла нулевая линия нониуса,

N - порядковый номер деления нониуса, которое совпадает с каким-либо делением основной шкалы,

T - точность нониуса.

Часто, когда расстояния между делениями на шкале маленькие, применяют, так называемые удлиненные нониусы, которые хотя и в 2, 3, 4 или 5 раз длиннее обычных, но тем не менее имеют также n делений. Изменяется только длина одного деления на нониусе, которая будет теперь соответственно $(2-\frac{1}{n})l$, $(3-\frac{1}{n})l$, $(4-\frac{1}{n})l$ или $(5-\frac{1}{n})l$. Совпадение делений при перемещении нониуса будет все также при перемещении на $\frac{1}{n}$ часть деления шкалы.

3.2. Штангенциркуль

Штангенциркуль применяют для измерения длины. К основной шкале прикреплен неподвижный щуп, другой щуп, снабженный нониусом, - подвижный. При помощи штангенциркуля часто измеряют внутренние диаметры или глубину ямок.

3.3. Микрометр

Микрометром можно получить точность до 0,01 мм. На металлической скобе прикреплены два щупа. Один из них передвигается микрометрическим винтом. Шаг винта обычно 1 или 0,5 мм. Винт закреплен вместе с барабаном, снабженным шкалой. Край барабана показывает на шкале корпуса число полных оборотов барабана (1 оборот соответствует 1 мм или 0,5 мм). Так как на шкале барабана 50 или 100 делений, то каждому делению шкалы барабана соответствует сдвиг щупа 0,01мм.

При измерениях микрометром основные погрешности связаны с неправильным нажимом детали между щупами. Для устранения этих погрешностей барабан снабжен трещеткой. При измерений производить вращение барабана только через трещетку до характерного треска.

4. Ход работы

А. Измерения штангенциркулем

1. Определите точность нониуса.

2. Проверьте нулевой отсчет, выпишите нулевой отсчет и учтите его при измерениях.

3. Измерьте толщину пластинки.

4. Определите толщину пластинки в десяти разных местах и найдите арифметическое среднее.

5. Измерьте внешние и внутренние диаметры трубки (десять измерений в разных местах) и определите арифметическое среднее.

6. Взвесьте трубки на технических весах и определите плотность материала трубки.

В. Измерения микрометром

7. Определите шаг микрометрического винта и число делений на барабане.

8. Определите нулевой отсчет.

9. Измерьте толщину данной пластинки в пяти разных местах.

10. Определите среднюю толщину пластинки и найдите погрешность измерений.

5. Вопросы

1. Что называется измерением?

2. Как определяется единица длины в системе СИ?

3. Для чего служит нониус?

4. Как определяется точность нониуса?

5. Каково максимально допустимое значение абсолютной ошибки при измерении нониусом?

6. Какова точность нониуса, если 10 делениям нониуса соответствует 29 делений основной шкалы (а 1 мм)?

7. Как берутся показания при помощи нониуса?

8. Как найти максимально допустимое значение абсолютной ошибки объема параллелепипеда?

9. Что характеризует относительная ошибка измерения?

10. При помощи нониуса, точность которого 0,05 мм, получили значение длины 5,35 мм. Каково максимально допус-

тимое значение абсолютной ошибки и какова относительная ошибка измерения?

II. Как определить точность микрометра?

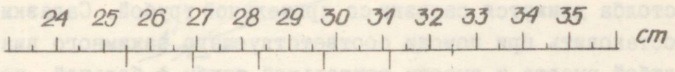
I2. Почему микрометр снабжен стабилизатором давления на измеряемое тело?

I3. Как происходит исправление нулевой точки микрометра?

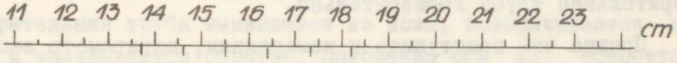
I4. Назовите единицы длины, меньшие миллиметра, и покажите соотношения между ними.

I5. Приведите формулу для вычисления относительной ошибки объема параллелепипеда.

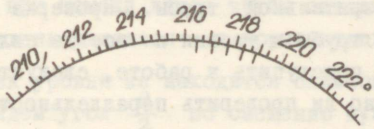
I6. Какова точность нониуса и какие цифры можно было бы написать под делениями нониуса?



I7. Каково показание?



I8. Каково показание?



Литература

Иверонова И.В. (ред.). Физический практикум. М., 1955, Стр. 33...36.

КАТЕТОМЕТР

I. Задание

Ознакомление с устройством и установкой катетометра и определение плотности жидкости в сообщающемся сосуде.

2. Принадлежности

Катетометр, сообщающийся сосуд (U-образная трубка) с двумя разными жидкостями.

3. Устройство и установка катетометра

3.I. Устройство катетометра

Катетометром измеряют высоту на расстоянии. Катетометр представляет собой вертикальный столб, стоящий на трех опорных винтах. Столб вращается вокруг вертикальной оси. Вдоль столба движутся салазки со зрительной трубой. Салазки можно остановить при помощи соответствующего зажимного винта на любой высоте, и высоту зрительной трубы с большой точностью позволяет регулировать микрометрический винт. Для получения отсчета на столбе имеется вертикальная шкала и на салазках - нониус. Зрительная труба снабжена чувствительным уровнем при помощи которого столб устанавливается вертикально и зрительная труба горизонтально.

Прежде чем приступить к измерениям, катетометр необходимо установить, так, чтобы столб был точно в вертикальном положении, а ось зрительной трубы направлена горизонтально.

Горизонтальность оптической оси зрительной трубы определяет уровень, ось которого всегда должна быть параллельна оптической оси зрительной трубы. Проверка параллельности осей зрительной трубы и уровня не всегда является необходимой. Прежде чем приступить к работе, следует спросить у руководителя, нужно ли проверить параллельность зрительной трубы и уровня.

3.2. Установка оси уровня параллельно оси зрительной трубы

Используя винт, изменяющий положение зрительной трубы, перемещаем пузырек уровня в центр шкалы. Возникает положение, которое изображено на рисунке 6, где положение оси зрительной трубы обозначено через AA' и положение оси уровня через BB. Угол между ними обозначен α.

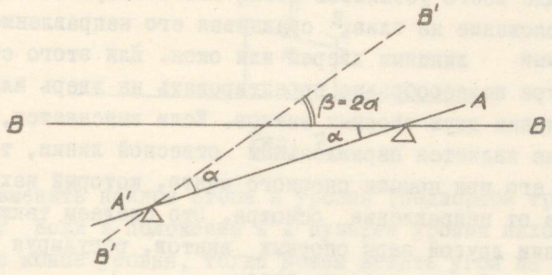


Рис. 6

Зрительная труба вынимается из ложа, поворачивается на 180^0 и вкладывается обратно. Положение оси AA' останется прежним, а ось уровня перейдет в положение B'B'. Угол β между прежним и новым положением оси уровня равен 2α. Если уровень поворачивается винтом, отклоняющим его на $\frac{\beta}{2}=\alpha$, то ось уровня становится параллельной оси зрительной трубы. Если повернем при помощи винта трубы остальную часть угла, то труба и уровень являются в горизонтальном положении.

Когда пузырек уровня не находится слишком близко к концу уровня, то найдем угол $\frac{\beta}{2}$ по смещению пузырька. Но если пузырек придавлен к концу уровня, то повернем при помощи винта трубы пузырек в середину шкалы уровня. При этом считаем обороты. Повернув винт в обратном направлении на по-

ловину оборотов, можем быть уверенными, что мы уменьшили уклон с достаточной точностью наполовину. Повернем винт, отклоняющий уровень, чтобы пузырек снова находился в центре. Так как деление угла производится на глаз, следует повторять данный прием несколько раз, пока при повороте трубы на 180^0 смещения пузырька не будет.

3.3. Установка столба катетометра в вертикальное и зрительной трубы в горизонтальное положение

Прежде всего установим столб катетометра в вертикальное положение на глаз, сравнивая его направление с отвесными линиями дверей или окон. Для этого столб катетометра целесообразно проектировать на дверь или окно в направлении двух опорных винтов. Если выясняется, что столб не является параллельным отвесной линии, то регулируем его при помощи опорного винта, который находится в стороне от направления осмотра. Это сделаем также в направлении другой пары опорных винтов, регулируя соответственно побочные опорные винты.

Дальнейшая регулировка проводится уровнем. Поворачиваем уровень параллельно двум опорным винтам S и S_1 и регулируем его горизонтальным винтом, наклоняющим трубу. Соответствующее положение изображено на рисунке 7, где NN' является положением столба катетометра и АА - положением зрительной трубы. Угол между столбом катетометра и вертикальным направлением NN в плоскости рисунка (т.е. вертикальной плоскости, которая проходит через два опорных винта) обозначен α. Горизонтальная труба составляет со столбом угол $\beta = 90^0 - \alpha$.

Повернем зрительную трубу вместе со столбом вокруг оси столба на 180^0. Угол β останется тогда левее столба. Новое положение трубы изображено прямой А'А' на рисунке 7. Угол между первоначальным и новым положением уровня 2α Отсюда вытекает способ установки столба вертикально. Если мы с опорного винта повернем столб на угол $\frac{2\alpha}{2} = \alpha$, то

столб примет вертикальное положение. Если мы изменим положение уровня относительно столба на такой же угол, то уровень окажется в горизонтальном положении.

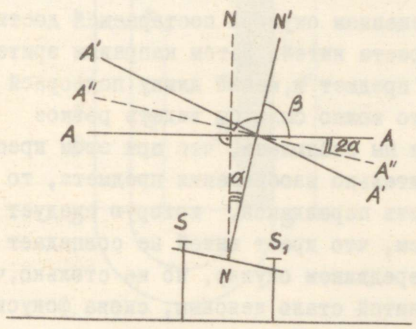


Рис. 7

Как изменить наклон стоба и уровня (подзорной трубы) на угол α ? Если в положении A'A' пузырек уровня находится не совсем на конце уровня, тогда можем делить угол на глаз, наблюдая смещение пузырька уровня относительно шкалы. Но если пузырек совсем придавлен к концу уровня, то повернем один опорный винт, пока уровень достигнет горизонтального положения. При этом считаем число оборотов n опорного винта. Далее повернем этот винт на $\frac{n}{2}$ оборотов в обратном направлении. Этим мы совершили опорным винтом уклон α.

Остальной уклон мы делаем при помощи винта подзорной трубы. Поскольку мы делим на глаз наполовину, сравнительно большой угол, то надо повернуть подзорную трубу вокруг оси столба еще несколько раз, до положения, при котором при повороте на 180^0 пузырек уровня больше не сдвинется с места.

Теперь повернем подзорную трубу перпендикулярно к двум опорным винтам, по которым мы поставили трубу горизонтально и сдвинем пузырек уровня в середину, используя третий опорный винт. Теперь уровень должен быть горизонтальным во всех направлениях. Если в каком-нибудь направлении пузырек

еще не находится в середине, то следует повторить все приемы установки прибора.

3.4. Фокусировка зрительной трубы

Сначала смещением окуляра постараемся достичь резкого изображения креста нитей. Затем направим зрительную трубу на измеряемый предмет и, меняя длину подзорной трубы, фокусируем так, что можно было бы видеть резкое изображение предмета. Если мы наблюдаем, что при этом крест нитей смещается относительно изображения предмета, то имеет место т.н. погрешность параллакса, которую следует устранить. Это обусловлено тем, что крест нитей не совпадает с изображением. Немного передвинем окуляр, но не столько, чтобы изображение креста нитей стало неясным, снова фокусируем на предмет и проверим существует ли наличие параллакса. Повторяем это действие, пока при движении глаза за подзорной трубой крест нитей относительно изображения предмета больше не смещается.

4. Определение плотности жидкости в сообщающихся сосудах

В сообщающихся сосудах (в U -образной трубке) свободная поверхность жидкости находится на одном и том же горизонтальном уровне. Но если налить в один сосуд одну жидкость и в другой сосуд другую жидкость и если жидкости не являются смешивающимися, то в общем случае свободные поверхности жидкостей уже не будут на одном уровне (рис. 8). В случае равновесия можем через высоты столбов жидкостей вычислить отношение плотностей жидкостей, поскольку на уровень прикосновения aa оба столба оказывают равное давление.

Пусть h_1 - высота столба одной жидкости (плотностью ρ_1) над уровнем соприкосновения aa и h_2 - высота столба другой жидкости (плотностью ρ_2). Ниже уровня aa трубка заполнена одной и той же жидкостью, которая находится поэтому в равновесии. Поэтому в случае общего равновесия между жидкостями давления указанных столбиков жидкостей

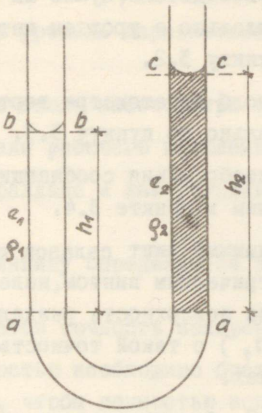


Рис. 8

над уровнем aa должны быть равными:

$$\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2 .$$

Отсюда

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{h_1}{h_2} . \qquad (I)$$

Зная плотность одной жидкости и измерив высоты столбов жидкостей, можем вычислить плотность другой жидкости.

5. Ход работы

I. Найдите опорные винты катетометра, винты наклона подзорной трубы и уровня, зажимный винт (винт закрепления) и микрометрический винт салазок.

2. Выясните, как можно фокусировать изображение креста нитей и подзорную трубу на предметы, находящиеся на разных расстояниях.

3. Определите точность нониуса.

4. Спросите у руководителя, нужно ли установить ось зрительной трубы параллельно с уровнем катетометра. Если да, то действуйте по пункту 3.2.

5. Установите столб катетометра вертикально и зрительную трубу горизонтально по пункту 3.3.

6. Фокусируйте изображения сообщающихся сосудов и креста нитей по указаниям в пункте 3.4.

7. Закрепите зажимный винт салазок и отрегулировав высоту трубы микрометрическим винтом, наведите горизонтальную нить креста точно на поверхность раздела жидкостей aa. Произведите отсчет (n_1) с такой точностью, которую позволяет нониус на салазках.

8. Как в пункте 7, берите отсчеты на уровнях bb (n_2) и cc (n_3).

9. Повторите все измерения 5 раз, переведя крест нитей после каждого измерения на новый уровень.

10. Внесите результаты измерения в таблицу, в которой $\bar{h}$ обозначает арифметическое среднее измеряемой величины и h_i - её отдельные значения

№	n_1	n_2	n_3	$h_{1i} = n_2 - n_1$	$(\bar{h}_1 - h_{1i})^2$	$h_{2i} = n_3 - n_1$	$(\bar{h}_2 - h_{2i})^2$
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							

Средняя:

11. Из формулы (1) определяйте плотность неизвестной жидкости (известной жидкостью является вода) и случайную погрешность результата, обусловленную рассеянием значений величин h_1 и h_2.

6. Вопросы

I. Как настроить уровень параллельно оптической оси зрительной трубы?

2. Как поставить столб катетометра вертикально?

3. Каковы признаки рабочего положения катетометра?

4. Что такое параллакс и как устранить его у подзорной трубы?

5. По какому принципу определяется плотность в данной работе?

6. Как определяется точность нониуса?

7. С какой точностью необходимо брать значение плотности известной жидкости, чтобы полностью использовать точность нониуса?

8. Как можно вычислить давление столба жидкости?

9. Как влияет диаметр трубы на результаты измерения при использовании U- образной трубки?

I0. Зависит ли результат измерения от давления воздуха?

II. Как соотносятся единицы плотности в системах СИ и СГС?

I2. Выразите удельный вес 35 Г/см^3 в системе СИ.

I3. От чего зависит точность плотности, найденной в этой работе?

I4. Напишите формулы для вычисления относительной и абсолютной ошибки измерения плотности в данном случае.

Литература

Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики, т. I. М., I96I, § I47, I48, стр. 243, 246.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЕСЫ

Аналитические весы применяются для определения массы и силы тяжести тел.

Пусть даны два тела массой m_1 и m_2. Тогда на них действуют силы тяжести, соответственно равные $P_1 = m_1 g$ и $P_2 = m_2 g$. Поскольку практически ускорения свободного падения обоих тел одинаковы, то

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1}{m_2} .$$

Отсюда видно, что в одном и том же месте силы тяжести тел относятся так-же как и их массы. Следовательно, соотношения тяжести тел можно определить при помощи соотношения их масс и наоборот. На основании этого и определяют массы тела путем взвешивания.

Поскольку взвешивание является одним из видов измерения (измерением называется сравнение какой-то физической величины с величиной того же типа) и поскольку на гирях помечены их массы, то при взвешивании происходит измерение массы.

Принципиально при взвешивании можно сравнить также тяжести тел, если на гири перенести их значения. Но так как тяжесть тела зависит от его местонахождения на земной поверхности, то подобные гири не могли бы быть везде применимы.

Соответствующие тяжести тела можем высчитать найдя произведение тяжести тела на ускорение свободного падения. При этом нужно принять во внимание, что величина ускорения свободного падения зависит от места, где происходит взвешивание. Так, например, величина ускорения свободного падения в Таллине 981,840 см/сек^2, а в Москве 981,557 см/сек^2. Нормальным ускорением свободного падения считается, на основании соответствующей договоренности, ускорение свободного падения на 45 градусе широты над уровнем моря, и его значение:

$g_0 = 980{,}665$ см/сек^2.

Для точного определения массы тела часто пользуются равноплечными рычажными весами. Как уже видно из наименования, основную часть весов составляет плечевой рычаг.

Рычаг (коромысло) опирается опорной призмой на подставку из твердого вещества. На концах плеч коромысла висят также опирающиеся на призму чашки весов.

Поскольку точка опоры рычага весов выбирается выше центра тяжести, то рычаг находится в устойчивом равновесии. При выводе его из этого положения затухающие колебания приводят его в исходное положение.

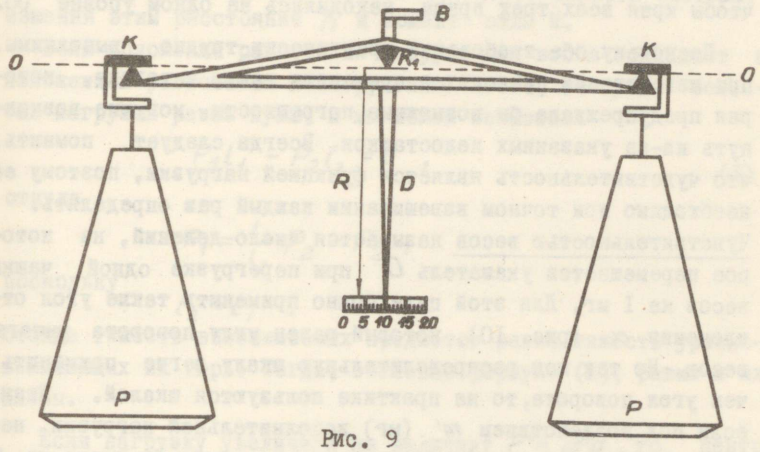


Рис. 9

Рычаг аналитических весов (рис. 9), укрепленный на опорную призму K_1, изготовленную из агата или закаленной стали, обычно опирается острым краем на подставку из такого же прочного материала. На край этой призмы падает вся тяжесть подвижной части конструкции весов. Край призмы не должен быть очень острым, так как на узкой опорной поверхности могут возникнуть перегрузки, которые превысят прочность материала призмы и подставки. Поэтому край призмы фактически представляет собой поверхность цилиндра с радиусом 1-3 мкм,

катящегося при колебании рычага весов вдоль подставки. При этом подставка и края призмы деформируются.

Из-за передвижения края призмы при колебаниях рычага весов точка опоры перемещается по одну или другую сторону, т.е. положение равновесия изменяется. Из за этого изменяется также соотношение плеч коромысла и уменьшается точность взвешивания.

На призмы К, расположенные на концах рычага весов, опираются пластинки подвесного механизма чашек весов Р. Длина плеча рычага равна расстоянию между краями средней и крайней призмы. На равноплечных весах эти расстояния должны быть эквивалентны с большой точностью. Также необходимо, чтобы края всех трех призм находились на одном уровне ОО.

Поскольку оба требования практически трудно выполнимы, при взвешивании приходится применять такую методику, которая предупреждала бы возможные погрешности, могущие возникнуть из-за указанных недостатков. Всегда следует помнить, что чувствительность является функцией нагрузки, поэтому ее необходимо при точном взвешивании каждый раз определять. Чувствительностью весов называется число делений, на которое перемещается указатель D при перегрузке одной чашки весов на I мг. Для этой цели можно применить также угол отклонения α (рис. IO), который равен углу поворота рычага весов. Но так как распределительную шкалу легче применить, чем угол поворота, то на практике пользуются шкалой. Итак, если под воздействием m' (мг) дополнительной нагрузки, находящейся в равновесии, стрелка переместится по шкале на s делений, то чувствительность весов

$$\tau = \frac{s}{m'} \left[\frac{\text{дел}}{\text{мг}}\right] \quad . \qquad (2)$$

Чувствительность определена параметрами конструкции весов. При отклонении рычага весов на угол α возникает уравновешивающий момент силы $M = mgh \cdot \sin\alpha$, где m - масса всей подвижной системы (рычаг весов, чашки, нагрузки), h - расстояние центра тяжести А от оси вращения, α - угол поворота (см. рис. IO). Таким образом, момент силы М, возвращающий

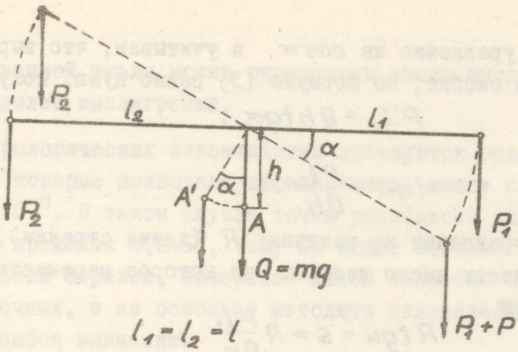


Рис. IO $l_1 = l_2 = l$

рычаг в равновесие, пропорционален расстоянию h . Вращением гайки В (рис. 9) можно переместить центр тяжести системы, изменяя этим расстояние h и момент силы М.

Если положение равновесия загруженных весов совпадает с положением равновесия незагруженных весов, то сумма моментов нагрузок равна нулю, и мы можем написать:

$$P_1 l_1 - P_2 l_2 = 0 \ , \qquad (3)$$

откуда

$$P_1 = \frac{l_2}{l_1} P_2 = P_2 \ ,$$

поскольку

$$l_2 = l_1 \ .$$

Отсюда тяжесть взвешиваемых предметов равна тяжести уравновешивающих их гирь. Тогда, согласно формуле (I), равны и их массы.

Если нагрузку увеличить на величину $P' = m'g$, то центр тяжести рычага весов А поднимется немного выше в левую точку А', и рычаг весов повернется по сравнению с первоначальным положением, на угол α (см. рис. IO). Для нового положения равновесия можем написать сумму действующих моментов, которая вследствие равновесия равна нулю.

$$(P_1 + P')l_1 \cos\alpha - P_2 l_2 \cos\alpha - Qh\sin\alpha = 0 \ ,$$

где Q – тяжесть подвесной системы.

Отсюда

$$(P_1 l_1 - P_2 l_2)\cos\alpha + P' l_1 \cos\alpha - Qh\sin\alpha = 0 \ .$$

Tartu Ülikooli Raamatukogu

Разделив уравнение на $\cos\alpha$ и учитывая, что выражение, стоящее в скобке, по формуле (3) равно нулю, получим:

$$P'l_1 = Qh\,tg\alpha .$$

Отсюда

$$tg\alpha = \frac{P'l_1}{Qh} .$$

Умножив уравнение на величину R (длина стрелки), получим в левой части число делений, на которое переместилась стрелка. Значит

$$R\,tg\alpha = s = R\frac{P'l_1}{Qh} ,$$

и чувствительность

$$\tau = \frac{s}{m'} = R\frac{l}{mh} . \qquad (4)$$

Из этого видно, что чувствительность тем больше, чем длиннее плечи рычага весов. При наличии длинных плеч изменение длин плеч, возникшее из-за передвижения края призмы при отклонении рычага весов, не оказывает особо сильного влияния на результаты взвешивания. С другой стороны, при увеличении длины рычага, если хотят сохранить прежней жесткость рычага, увеличивается быстрее масса рычага, чем его длина. Это понижает чувствительность весов. При этом увеличится период колебания, что влечет за собой новые ошибки измерения.

Длина плеч точных весов, которые изготовляются в настоящее время, не превышает 10 - 12 см и ими можно взвешивать с погрешностью до 0,1 мг, т.е. с погрешностью 10^{-7}. В данном случае отношение длин плеч рычага весов должно оставаться постоянным с той же точностью. Если радиус края опорной призмы 3 мкм, то изменение соотношения плеч на 10^{-6} соответствует углу наклона $1{,}5^{\circ}$. Таким образом, положения равновесия при точном взвешивании должны оставаться в пределах этого угла. При длине стрелки в 20 см этому углу соответствует отклонение в 5 мм на шкале. Это позволяет конструировать весы как с воздушным, так и с электромагнитным глушителем, которые следует загружать разновесками только с точностью 10 мг. Если таким образом нагруженные весы опустить на призмы, то они останутся в равновесии и по увеличенно

спроектированной шкалы можно определить число миллиграммов и десятых долей миллиграмма.

При метрологических взвешиваниях пользуются особо точными весами, которые позволяют зафиксировать массу с погрешностью до 10^{-8}. В таком случае точки равновесия должны оставаться в пределах $0{,}045^{0}$, чему на шкале соответствует 0,15 мм. Таким образом, измерение массы является одним из наиболее точных, и на освоение методики взвешивания следует обращать особое внимание.

Прежде, чем приступить к практическому взвешиванию, необходимо ознакомиться со следующими требованиями и правилами:

1. Взвешивание следует начинать лишь убедившись, что колонка весов установлена вертикально. Это проверяется по отвесу или по уровню и при необходимости регулируется с помощью опорных винтов. При этом нельзя опираться на стол, где стоят весы.

2. Чтобы не зря тупить острые края опорных призм, при помощи арретира весы немного приподнимают и опускают обратно вниз только тогда, когда это необходимо для взвешивания. Арретирование производят при помощи винта, расположенного в середине подставки весов. Нагруженные весы (после работы) должны быть всегда арретированными.

3. Освобождать и арретировать коромысло следует всегда медленно и плавно. Если весы качаются, то арретируют очень осторожно, в то время как стрелка проходит через положение равновесия, иначе коромысло получает толчки.

4. Весы должны быть чистыми. Поэтому следует остерегаться прикосновения к ним руками и класть на чашку весов грязные, мокрые или горячие предметы.

5. Дверцы шкафа, где находятся весы, должны быть всегда закрыты. Их можно открывать только тогда, когда необходимо положить тело или разновески на чашечки. В противном случае взвешиванию может помешать ветер (качание чашек весов).

6. Пока весы не арретированы, нельзя класть на чашки или снимать с них грузы (нельзя даже прикасаться к чашкам); нельзя производить перестановку рейтера на коромысле весов.

7. Грузы следует накладывать на чашки так, чтобы общий центр тяжести грузов приходился по возможности посередине чашки.

8. Не следует освобождать коромысло совсем, пока чашки еще мало уравновешены, его освобождают лишь настолько, чтобы по отклоняющейся стрелке можно было судить, которая из чашек легче, после этого сразу же арретируют коромысло и прибавляют или убавляют разновески. (Даже при малой разнице между весами взвешиваемого тела и разновесок коромысло начинает маятникообразно качаться).

9. С весами нужно обращаться очень осторожно, оберегая их от резких движений и сотрясений. Если чашки весов слишком сильно раскачиваются, весы следует сразу же арретировать

10. Взвешиваемое тело помещают на левую, разновески - на правую чашку.

11. Нельзя брать разновески руками, для этого служит пинцет, мелкие разновески плоской формы (доли грамма) берут пинцетом за загнутые уголки.

12. Определяемая нагрузка не должна превышать заданных границ. Для аналитических весов обычно она составляет 200 г.

13. Снимая разновески с весов, их следует класть непременно в ящик, каждую на предназначенное ей место.

14. За нулевую точку шкалы желательно брать крайнюю левую точку. Это позволит избегать отрицательных чисел при определении нулевой точки весов.

15. При определении показаний следует остерегаться параллактической ошибки, т.е. нужно смотреть прямо и по возможности при одном и том же положении головы. Для этого нужно сесть прямо перед весами и при взвешивании не изменять положения тела и головы. Отсчеты смотреть одним и тем же глазом.

I6. Амплитуда колебаний не должна быть слишком большая (не более 5 делений). Если колебания слишком большие, весы следует арретировать и снова освободить как можно осторожнее, тогда колебания будут меньшей амплитуды.

I7. Первые 3-4 колебания после освобождения весов не считать.

Литература

Иверонова В.И. (ред). Физический практикум. М., I955, стр. 53 - 63.

МАССА ЛЕГКОГО ТЕЛА

I. Задание

Ознакомление со строением аналитических весов, с их исправностью и обращением с ними. Определение нулевой точки и чувствительности весов. Взвешивание "легкого тела".

2. Принадлежности

Аналитические весы, легкое тело.

3. Теоретические основы работы

Познакомьтесь со строением аналитических весов, их теорией и правилами обращения, которые изложены в настоящем руководстве на стр. 48 и сл.

Если ненагруженные весы находятся в положении равновесия, то центр тяжести подвижной системы находится прямо под точкой опоры. В этом случае положение указателя на шкале весов есть точка равновесия ненагруженных весов и называется нулевой точкой. Итак, нулевая точка N_0 есть точка равновесия ненагруженных весов.

Вследствие трения, указатель не устанавливается точно на нулевой точке и для затухания колебаний потребовалось бы

много времени. Поэтому точнее и быстрее нулевая точка определяется наблюдением амплитуд качаний. Для этого весы освобождают от арретира так, чтобы они начали колебаться с очень небольшой амплидутой (3–5 делений). Делается нечетное число отсчетов по шкале следующих друг за другом амплитуд. Находится средний отсчет правых амплитуд, средний отсчет левых амплитуд, и среднее этих отсчетов дает отсчет нулевой точки.

Объясняем, почему надо пользоваться такой методикой. Если бы мы взяли за нулевую точку среднее арифметическое первых двух амплитуд – $N_{01} = \frac{1}{2}(a_1 + a_2)$, тогда она сместилась бы от действительного расположения влево, т.к. $a_1 > a_2$. Взяв за нулевую точку $N_{02} = \frac{1}{2}(a_2 + a_3)$, получим смещение вправо, потому что $a_2 > a_3$. Значение, наиболее близкое к действительной нулевой точке, получим, если возьмем среднее арифметическое обоих значений, т.е.

$$\frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}(a_1 + a_2) + \frac{1}{2}(a_2 + a_3)\right] = \frac{1}{4}(a_1 + 2a_2 + a_3). \qquad (I)$$

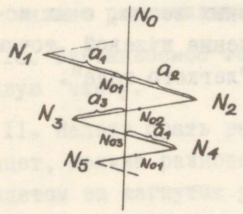


Рис. II

Такое же значение получим, взяв среднее арифметическое левых амплитуд a_1 и a_3, а затем среднее арифметическое полученного среднего и правых амплитуд a_2, т.е.

$$\frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}(a_1 + a_3) + a_2\right] = \frac{1}{4}(a_1 + 2a_2 + a_3). \qquad (2)$$

Действительно, полученные результаты (I) и (2) одинаковы и в будущем мы будем использовать второй, более простой способ.

Для получения более точных результатов берут обычно 2 или больше полных колебаний. Так, при двух полных колебаниях получается 5 различных амплитуд, т.е. 5 точек поворота указателя $(N_1; N_2; N_3; N_4; N_5)$.

Таким образом,

$$N_0 = \frac{1}{2}\left[\frac{N_1 + N_2 + N_3}{3} + \frac{N_4 + N_5}{2}\right]. \qquad (3)$$

Для определения чувствительности весов необходимо одно плечо рычага перегрузить несколькими мг, найти разницу точки равновесия перегруженных весов ст нулевой точки и свести эту разницу к одному миллиграмму.

Меньшая разновеска в комплекте обычно равна I0 мг, её нельзя применять для определения чувствительности весов, потому что отклонение указателя в таком случае выйдет за пределы шкалы. Поэтому в практике пользуются т.н. рейтером, который изготовлен из куска проволоки массой в I0 мг и имеет вид крючка (вилки) (рис. I2).

Рычаг весов или стержень, прикрепленной к рычагу, разделен на I0 равных частей, разграниченные для рейтера углублениями или штрихами. Установка рейтера на соответствующее деление производится при помощи особого движущегося крючка.

Установка рейтера на I0-ое деление, которое находится над опорой чашечки, соответствует полному перегружению рычага весов, равному I0 мг. Установка рейтера на середину длины плеча рычага (5 деление) вызывает уменьшение момента поворота в 2 раза, что соответствует нагрузке 5 мг и т.д.

Рис. I2

Итак, при помощи рейтера мы можем изменять нагрузку весов от 0 до I0 мг. Так мы можем, как изложено выше, определить точку равновесия перегруженных весов N_p.

Чувствительность весов определяется из формулы:

$$\tau = \frac{N_o - N_p}{m} \left[\frac{\text{дел}}{\text{мг}}\right]. \qquad (4)$$

Обратное значение чувствительности весов $\frac{1}{\tau}$ называют коэффициентом приведения, который показывает под действием какой добавочной нагрузки точка равновесия смещается на одно деление. Единица измерения его $\frac{\text{мг}}{\text{дел}}$.

Если рейтер установлен на левой половине рычага, тогда точка равновесия N_p сдвигается вправо и $N_p > N_o$. В этом случае чувствительность определяют по разности отклонений $N_p - N_o$, потому что отрицательное значение чувствительности не имеет смысла.

Зная чувствительность весов, мы можем легко определить массу легкого тела (с массой несколько миллиграммов). Для этого определяем точку равновесия перегруженных весов легким телом $N_к$ аналогично перегружению рейтером.

Если при перегружении весов на I мг точка равновесия переместится на τ_0 делений, а при данном теле на $N_0 - N_к$ делений, то масса данного тела будет равна стольким мг, сколько раз τ содержится в $N_0 - N_к$:

$$x = \frac{N_0 - N_к}{\tau} \quad . \qquad (5)$$

4. Ход работы

I. Ознакомьтесь с правилами взвешивания и с правилами обращения с весами (см. стр. 48 и сл.).

2. Освобождая весы от арретира, приведите весы в колебание с небольшими амплитудами. После двух колебаний начните определение точек поворота. Измерения повторите три раза и занесите результаты в таблицу:

I Нулевая точка ненагруженных весов N_0					
Лев.	Прав.	Лев.	Прав.	Лев.	Прав.
Пример					
8,9	II,2				
9,0	II,I				
9,I					
ср. 9,0	ср. II,I5				
$N_0' = \frac{9.0 + 11.15}{2} = 10,1$		$N_0'' =$		N_0'''	

Среднее: $N_0 = \frac{N_0' + N_0'' + N_0'''}{3} = \ldots$

Так, найденная средняя есть нулевая точка, которая должна находиться посредине шкалы, т.е. в пределах одного деле-

ния от центра шкалы (10) влево или вправо (9,0–11,0). Если она находится от 10 деления далее, чем на одно деление, то следует обратиться к руководителю.

3. Перегрузите весы при помощи рейтера несколькими мг и найдите точку равновесия весов при 3 различных перегрузках.

II Точка равновесия весов перегруженным рейтером N_p		
$m_1 = \ldots$	$m_2 = \ldots$	$m_3 = \ldots$
Лев. Прав.	Лев. Прав.	Лев. Прав.
$N_p' = \ldots$	$N_p'' = \ldots$	$N_p''' = \ldots$
$\tau' = \frac{N_0 - N_p}{m_1}$	$\tau'' = \ldots$	$\tau''' = \ldots$

Среднее: $\tau = \frac{\tau' + \tau'' + \tau'''}{3} = \ldots$

Коэффициент приведения $\frac{1}{\tau} = \ldots$

4. Спросите у преподавателя легкое тело. Положите его на чашку весов и определите точку равновесия 3 раза.

III Точка равновесия при нагружении весов легким телом N_k		
Лев. Прав.	Лев. Прав.	Лев. Прав.
$N_k' = \ldots$	$N_k'' = \ldots$	$N_k''' = \ldots$

Среднее: $N_k = \frac{N_k' + N_k'' + N_k'''}{3} = \ldots$

5. Определите массу легкого тела пользуясь уравнением (5).

6. Для контроля определите еще раз нулевую точку ненагруженных весов. Если различие нулевых точек будет больше одного деления, то надо обратиться к руководителю.

IУ Контроль нулевой точки N_0	
Лев.	Прав.
Ср.	Ср. .....
N_0 =....	

5. Вопросы

I. Что называется весом тела?

2. Можно ли при помощи рычажных весов определить вес или массу тела?

3. Зависит ли результат взвешивания от местоположения весов?

4. Почему весы должны находиться точно горизонтально?

5. Что называют нулевой точкой весов?

6. Как происходит определение нулевой точки?

7. Почему нулевая точка не должна находиться в стороне от вертикали, проходящей через точку опоры весов?

8. Что называют точкой равновесия весов и как ее определить?

9. Почему для определения нулевой точки и точки равновесия необходимо использовать полное число колебаний?

10. Почему амплитуда колебания не должна быть очень большой?

11. Что такое чувствительность весов и как ее определить?

12. Выразите чувствительность 0,5 дел/мг в единицах дел/г

13. Зависит ли чувствительность весов от нагрузки?

14. Что понимают под точностью весов?

15. Почему после взвешивания нужно проверять нулевую точку?

16. Определите единицы ньютона и дина.

17. Для чего в весах применяется рейтер?

18. С какой точностью вы можете взвесить на данных весах?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики I. М., 1966. § 46-47.

2. Яворский Б.М. и др. Курс физики I. М., 1965. § 6.

ВЕС ТЕЛА

1. Задание

Приобретение навыков в обращении с разновесками. Определение веса тела в воздухе и вычисление веса того же тела в вакууме.

2. Принадлежности

Аналитические весы, разновески и взвешиваемое тело.

3. Теоретические основы работы

Прежде чем приступить к взвешиванию, необходимо о разновесках и их использовании знать следующее.

Для того, чтобы при взвешивании можно было быстро выбрать необходимое число разновесов для любого тела, разновески объединяются в отдельные комплекты. При составлении комплектов используют разновески, расположенные в таком порядке:

50 г	20 г	20 г	10 г
1 г	2 г	2 г	5 г
500 мг	200 мг	200 мг	100 мг
10 мг	20 мг	20 мг	50 мг

В таком же порядке должны разновески быть расположены в коробке. Выбор разновесок для уравновешивания взвешиваемого тела должен следовать с разновесок с более крупными массами к разновескам с менее крупными массами. Например, для подбора разновесок с общей массой 175 г наибольшей подходящей разновеской будет 100 г, следующей – 50 г, тогда – 20 г и т.д. Таким образом, 175 г = 100 г + 50 г + 20 г + 5 г.

Чтобы ускорить подбор подходящих разновесок, полезно установить вес данного тела при помощи простых весов с точностью хотя бы до 1 г. Пусть он будет 85 г. Тогда на левую чашку арретированных весов помещают взвешиваемое тело, а на правую – столько разновесок, чтобы их суммарная масса равнялась результату предварительного взвешивания (85 г).

Осторожное частичное освобождение арретира сразу покажет, много или мало было взято разновесок. Если левая чашечка опустилась вниз, а дополнительная нагрузка в 1 г на правой чашке снова заставила ее подняться, то это значит, что ход взвешивания правильный. Дальше нужно приступить к определению десятых долей грамма.

Это делается всегда опытным путем, начиная с больших разновесок. Если, например, при помещении на чашку весов 500 мг и осторожном освобождении арретира правая чашка опускается вниз, то, значит, 500 мг много. Взяв следующую меньшую по величине разновеску в 200 мг, видим, что правая чашка больше не опускается. Значит, 200 мг мало. Теперь доба-

вим еще 200 мг. Если правая чашка опускается, значит, 200 + 200, т.е. 400 мг много. Если при добавлении 100 мг, когда в сумме будет 300 мг, чашка не опускается, значит, число десятых долей грамма равняется 3, и мы можем приступить к определению сотых долей грамма (десятков миллиграммов). Это делается также, как и при определении десятых долей. Пусть число сотых будет 4. Тогда мы получим значение веса тела 85,34 Г. С точностью до 0,01 Г. Если мы хотим найти и третий знак после запятой, то используем рейтер, поместив его так, чтобы точка равновесия (смотри стр. 57) N_1 была расположена по возможности ближе к нулевой точке N_0 (см. стр. 55). Такое положение рейтера дает нам приблизительное представление о тысячных долях. Для их точного определения нужно использовать такой же прием, как при взвешивании легкого тела. Определим точку равновесия N_1 и увеличим (уменьшим) нагрузку правой чашки на несколько миллиграммов, передвигая рейтер так, чтобы новая точка равновесия N_2 сместилась на другую сторону от нулевой точки ненагруженных весов N_0.

Пусть точке равновесия N_1 соответствует нагрузка m_1 = = 85,346 г и точка равновесия N_1 = 11,6. Во втором случае: m_2 = 85,349 г и N_2 = 8,2. Увеличение нагрузки на $m_2 - m_1$ = = 3 мг сместило точку равновесия налево на $N_1 - N_2$ = 3,4деления. Эти данные позволяют установить чувствительнось нагруженных весов:

$$\tau = \frac{N_1 - N_2}{m_2 - m_1} = 1,13 \left(\frac{\text{дел}}{\text{мг}}\right). \qquad (I)$$

Этот результат позволяет нам лишь при помощи вычислений найти массу взвешиваемого тела с точностью до 0,1 мг. Для этого надо знать точку равновесия ненагруженных весов - нулевую точку N_0 . Пусть она будет 9,8. Значит, для приведения весов в равновесие необходимо к нагрузке m_1 добавить

$$\frac{N_1 - N_0}{\tau} = \frac{1,8}{1,13} \approx 1,6 \quad \text{(мг)}$$

или уменьшить нагрузку m_2 на

$$\frac{N_0 - N_2}{\tau} = \frac{1,6}{1,13} \approx 1,4. \quad \text{(мг)}$$

Следовательно,

$$m = 85{,}3476 \text{ г.}$$

Для того, чтобы определить вес тела, нужно знать ускорение свободного падения g в точке взвешивания:

$$P = mg.$$

Результат, полученный таким образом, есть так называемый вес тела в воздухе. Взвешивание, как и вся наша деятельность, проходит в заполненной воздухом комнате. Значит, на взвешиваемое тело и на разновески действует выталкивающая сила воздуха (закон Архимеда), которую надо учитывать при определении веса тела в вакууме.

Для определения веса тела в вакууме не нужно проводить взвешивания в пустоте (в вакууме), а достаточно определить вес тела в воздухе и выталкивающую силу.

Пусть вес взвешиваемого тела в вакууме P_0, вес в воздухе P, объем тела V_0 и плотность D. Объем разновесок, уравновешивающих тело, V и плотность их ρ_1. Тогда выталкивающие силы, действующие на тело и разновески, будут соответственно

$$V_0 \rho_2 g = \frac{P_0}{g \cdot D} \cdot \rho_2 g \quad \text{и} \quad V \rho_2 g = \frac{P}{g \rho_1} \rho_2 g,$$

где ρ_2 - плотность воздуха.

Учитывая эти силы, можно условие равновесия весов записать так:

$$P_0 - \frac{P_0}{D} \rho_2 = P - \frac{P}{\rho_1} \rho_2,$$

откуда найдем выражение для определения веса тела в вакууме:

$$P_0 = P \frac{1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}}{1 - \frac{\rho_2}{D}} \qquad (2)$$

Из выражения (2) видно, что вес тела в вакууме больше его веса в воздухе тогда, когда $D < \rho_1$, и меньше, когда $D > \rho_1$. У пробки $D = 0{,}24$ г/см^3, у разновесок $\rho_1 = 8{,}4$ г/см^3.

Плотность воздуха при комнатной температуре и нормальном давлении ρ_2 можно взять равной $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ г/см^3. При более точном взвешивании (точность 10^{-5} и больше) значения плотности следует заменить в 10 – 1000 раз более точными, т.е. необходимо учитывать давление воздуха, температуру, влажность, наличие CO_2 и т.д.

4. Ход работы

1. Ознакомьтесь со строением весов и правилами обращения с ними (см. стр. 48).

2. Расположите разновески в нормальном порядке в наборе.

3. Взвесьте тело на технических весах с точностью до 1 г.

4. Определите нулевую точку (см. стр. 58) три раза и занесите данные в таблицу:

Лев. Прав.	Лев. Прав.	Лев. Прав.

$\bar{N}_0 = \ldots$

5. Поместите тело и разновески на соответствующие чашки арретированных весов. Разновесок положите столько, чтобы их масса равнялась массе тела, полученной на технических весах.

6. Определите (как указано в теоретической части) правую точку равновесия весов N_1 три раза и запишите данные в таблицу:

Разновески: $m_1' = \ldots$; рейтер $m_1'' = \ldots$;

$$m_1 = m_1' + m_1'' = \ldots$$

Лев.	Прав.	Лев.	Прав.	Лев.	Прав.

$$\bar{N}_1 = \ldots$$

7. Определите левую точку равновесия весов N_2.

Разновески: $m_2' = \ldots$; рейтер $m_2'' = \ldots$;

$$m_2 = m_2' + m_2'' = \ldots$$

Лев.	Прав.	Лев.	Прав.	Лев.	Прав,

$$\bar{N}_2 = \ldots$$

8. Проверьте нулевую точку

Лев.	Прав.

$N_o = \ldots$

9. Вычислите чувствительность весов τ по формуле (I) и вес тела в воздухе по формуле

$$P=(m_1+\frac{N_1-N_0}{\tau})g=(m_2-\frac{N_0-N_2}{\tau})g.$$

IO. Найдите вес тела в вакууме по формуле (2).

5. Вопросы

I. Что такое вес тела?

2. Что такое масса тела?

3. Что такое сила тяжести?

4. Сформулируйте закон Архимеда.

5. При каких условиях вес тела в вакууме равен весу разновесок в вакууме?

6. Когда равные по весу тела равны между собой и по массам?

7. Почему на практике (в магазинах, аптеках) не определяют веса тела в вакууме?

8. Как зависит вес тела в воздухе от давления воздуха?

9. Сколько весит воздух, занимающий объем человека (75 кг) ?

IO. Какова масса тела в месте, где его вес IO кГ, а g = = 9,9 м/сек^2.

II. Какие разновески нужно выбрать для тела массой I47,860 г?

Литература

I. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики I. М., I958. § I7, 22, 30.

2. Савельев И.В. Курс общей физики, т.I. М., I966. §I8, 47, 48.

ПЛОТНОСТЬ ТВЕРДОГО ТЕЛА

1. Задание

Найти плотность твердого тела при помощи гидростатического взвешивания.

2. Принадлежности

Аналитические весы, твердое тело, разновески, "мост", стакан с водой.

3. Теоретические основы работы

Для определения плотности тела надо знать массу тела m и объем V. Массу тела можно найти путем взвешивания на аналитических весах с точностью 10^{-7}, но объем найти с этой точностью очень трудно, особенно когда тело имеет неправильную форму. Поэтому для точного определения плотности используют такой метод, в котором объем тела находят не прямым путем, а косвенным. Объем тела можно найти применив закон Архимеда: "на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, которая равна весу жидкости, вытесненной телом." Взвешиваем тело сначала в воздухе (m_1), а затем в воде (m_2). Напишем уравнение для условий взвешивания в воздухе:

$$mg - \rho_1 g V = m_1 g - \rho_1 g \frac{m_1}{\rho_3}, \qquad (1)$$

где m – масса тела,

ρ_1 – плотность воздуха,

ρ_3 – плотность разновесок,

$\frac{m_1}{\rho_3}$ – объем разновесок, помещенных на весы.

Если тело находится в воде плотностью ρ_2, то условием равновесия является

$$mg - \rho_2 g V = m_2 g - \rho_1 g \frac{m_2}{\rho_3}. \qquad (2)$$

Из формул (I) и (2) можно найти формулу для нахождения объема

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_2 - \rho_1}\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_3}\right). \qquad (3)$$

Плотность тела находим по следующей формуле:

$$D = \frac{m}{V}\ , \qquad (4)$$

а массу по формуле (см. стр. 64):

$$m = m_1 \frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_3}}{1 - \frac{\rho_1}{\rho}} \ . \qquad (5)$$

Подставив значения из формул (3) и (5) в формулу (4) и решив ее относительно плотности D, получим:

$$D = \frac{m_1}{m_1 - m_2}(\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 \ . \qquad (6)$$

4. Ход работы

I. Определите нулевую точку весов (см. стр. 58).

2. Взвесьте тело в воздухе (m_1) так, как описано в работе "Вес тела" (стр. 6I).

3. Возьмите два куска проволоки из одного и того же материала, одного диаметра и длины, приблизительно равной I0 см. Один кусок проволоки положите на правую чашу весов, а другой с взвешиваемым телом подвесьте на крючок левой чаши, как показано на рис. I3.

4. Через чашку весов перекиньте "мост" и на него поставьте стакан, наполненный дистиллированной водой.

5. Опустите взвешиваемое тело осторожно в воду так, чтобы оно не касалось стенок и было полностью в воде. Если к телу прилипнут пузырьки воздуха, их надо обязательно устранить путем движения тела в воде или при помощи палочки.

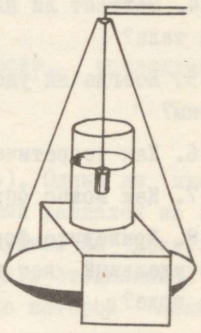


Рис. I3

6. Найдите при помощи взвешивания массу разновесок (m_2), которые уравновешивают помещенное в воду тело. Делаем это так, как и при взвешивании в воздухе, причем определять нулевую точку до взвешивания не нужно.

7. Определите температуру воды t .

8. Проверьте нулевую точку.

9. Вычислите плотность тела при помощи формулы (6), используя для нахождения плотности воды следующую таблицу:

Температура (^oC)	Плотность ($г/см^3$)	Температура (^oC)	Плотность ($г/см^3$)
10	0,9997	18	0,9986
11	0,9996	19	0,9984
12	0,9995	20	0,9982
13	0,9994	21	0,9980
14	0,9992	22	0,9978
15	0,9991	23	0,9976
16	0,9990	24	0,9973
17	0,9988	25	0,9971

5. Вопросы

1. Что называется плотностью вещества?

2. Что называется весом вещества?

3. Как связаны между собой плотность и удельный вес?

4. Зависят ли плотность и удельный вес от местонахождения тела?

5. Всегда ли удельный вес и плотность вещества численно равны?

6. Как теоретически можно определить плотность вещества?

7. Как можно определить объем тела путем взвешивания?

8. Приведите формулу вычисления плотности вещества через удельный вес воздуха и воды и вес вещества в воздухе и в воде?

9. Единицы измерения плотности и удельного веса в системе СИ, СГС и технической системе.

10. Определите какая из единиц удельного веса больше: $н/м^3$ или $кГ/дм^3$.

11. Выразите в системе СИ и СГС плотность и удельный вес воды, воздуха, железа, серебра.

12. Приведите формулу для нахождения удельного веса и плотности вещества.

13. Как зависит плотность от температуры?

14. Сформулируйте закон Архимеда.

15. Достаточна ли точность логарифмической линейки при подсчете результата данной работы?

Литература

1. Ландсберг Г.С. (ред). Элементарный учебник физики,т.I. М., 1961. § 55, 155...158.

ВЕСЫ МОРА

1. Задание

Ознакомление с устройством и использованием весов Мора. Определение удельного веса жидкости.

2. Принадлежности

Весы Мора с рейтерами, сосуд для жидкости, исследуемая жидкость, вода.

3. Теоретические основы работы

Весы Мора - рычажные весы (см. рис. 14). Одним из плеч весов является однородный стержень, который разделен на 10 равных частей. На каждой доле имеется зарубка. На десятом делении этого плеча висит металлический (или стеклянный) грузик. На другом плече имеется резьба, по которой можно перемещать уравновешивающий груз. Острие, закрепленное на плече весов, позволяет точнее уравновесить весы.

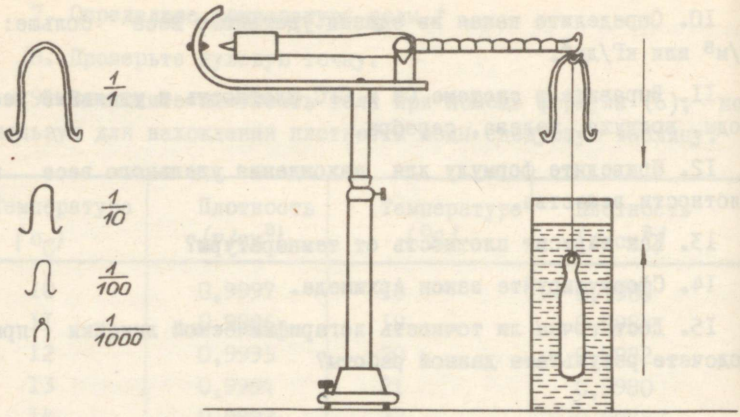


Рис. 14

Весы следует поставить на стол таким образом, чтобы винт регулировки, находящийся в подставке, был в плоскости колебаний рычага весов. При помощи этого винта можно привести штатив весов в вертикальное положение. Тогда острие рычага должно находиться против острия штатива. Так поступают каждый раз перед началом работы. Используя постоянный груз и винт регулировки, уравновешивают весы в воздухе.

Поставим под весы сосуд с чистой водой (см. рис.14) так, чтобы металлический груз был полностью под водой. Тогда весы выйдут из положения равновесия и рычаг повернется. Момент силы, обусловливающий поворот, вызван архимедовой выталкивающей силой, которая действует на погруженный в воду груз. Этот момент силы (M_I) можно в данном случае вычислить по формуле

$$M_1 = e_1 \cdot V_1 \cdot l,$$

где e_1 - удельный вес воды,

V_1 - объем металлического груза,

l - длина плеча (10 делений).

Для того, чтобы весы снова привести в равновесие, нужно создать момент силы, равный по величине моменту обусловленному выталкивающей силой, но противоположно направленный.

Для этого в данном случае используются рейтеры: 2 больших одинакового веса, вес каждого из которых примерно равняется весу воды, вытесненной грузом, вес среднего рейтера в 10раз меньше веса большого, а вес меньшего, в свою очередь в 10 раз меньше веса среднего рейтера. Если при оценке момента силы, вызванного рейтерами, взять за основу момент

$$M = Pl,$$

вызванной большим рейтером на десятом делении рычага (P-вес большого рейтера, l - длина плеча), то можно все другие моменты, вызванные рейтерами, выразить в долях M:

$$k\,M.$$

Тогда, например, большой рейтер вызвал бы на седьмом делении момент силы, равный 0,7 M.

Рейтер, вес которого в 10 раз меньше, вызвал бы на том же делении момент силы, равный 0,07 M. Если использовать сразу несколько рейтеров, то момент силы, создаваемый всеми рейтерами, равен сумме моментов сил, вызванных каждым рейтером в отдельности.

Если момент силы, вызванной выталкивающей силой, уравновешен рейтерами, то справедливо равенство

$$k_1 M = e_1 V_1 l \ , \qquad (1)$$

где k_1 показывает, какую часть момента силы M, взятого за основу, надо взять, чтобы уравновесить момент силы, вызванный выталкивающей силой воды.

Теперь заменим сосуд с водой сосудом с исследуемой жидкостью. Момент выталкивающей силы изменится и будет равным

$$M_2 = e_2 V_1 l \ .$$

Уравновесив его рейтерами, мы получим новый уравновешивающий момент $k_2 M$ и будет справедливо равенство

$$k_2 M = e_2 V_1 l \ . \qquad (2)$$

Разделив равенство (2) на равенство (1), получим:

$$\frac{K_2 M}{K_1 M} = \frac{e_2 V_1 l}{e_1 V_1 l} ,$$

откуда

$$e_2 = e_1 \frac{K_2}{K_1} . \qquad (3)$$

Зная удельный вес воды и измерив величины K_1 и K_2, можно из уравнения (3) вычислить удельный вес искомой жидкости. При более точных измерениях необходимо учитывать и температуру, т.к. от нее зависит удельный вес жидкости.

4. Ход работы

I. Соберите весы как показано на рисунке.

2. Повесьте металлический груз на крючок и уравновесьте весы в воздухе.

3. Поставьте сосуд с водой под весы так, чтобы груз был полностью под водой. Пузырьки воздуха, оставшиеся на грузе, удалите помешиванием груза в воде.

4. Уравновесьте рейтерами момент выталкивающей силы и запишите в таблицу значение K_1.

5. Уберите сосуд с водой и высушите груз. Проверьте, не нарушилось ли равновесие весов в воздухе.

6. Поместите под весы сосуд с исследуемой жидкостью и повторите все те же измерения, что и с водой. Весы следует уравновешивать 4-5 раз. При вычислении берите среднее. Найдите ошибку. Результаты запишите в таблицу.

I. Измерение в воде:

№	Положение большого рейтера на плече	Положение среднего рейтера на плече	Положение маленького рейтера на плече	Коэфф K_1
I.				
2.				

продолжение таблицы

3.				
4.				
5.				

Среднее $к_I$ = ...

2. Измерения с жидкостью

№	Положение большого рейтера на плече	Положение среднего рейтера на плече	Положение маленького рейтера на плече	Коэффициент $к_2$
I.				
2.				
3.				
4.				
5.				

Среднее $к_2$ = ...

5. Вопросы

I. Понятия удельного веса и плотности.

2. Связь между удельным весом и плотностью.

3. Зависимость удельного веса от температуры.

4. Понятие момента силы.

5. Условия равновесия твердых тел.

6. Давление в жидкостях и газах.

7. Закон Паскаля.

8. Закон Архимеда.

9. Условия плавания тел.

I0. Как проверить, что отношение весов рейтеров (I:I0:
:I00) правильно?

Литература

I. Путилов К.А. Физика I. М.,I963. § 2I,35,48,II3.

МАШИНА АТВУДА

I. Задание

Проверка законов пройденного пути и скорости при равноускоренном движении и второго закона Ньютона.

2. Принадлежности

Машина Атвуда (со сплошной и кольцевой платформами, основными грузами и набором добавочных грузов, электромагнитом), секундомер.

3. Теоретические основы работы

Машина состоит из прикрепленного вертикально к стене металлического стержня А (рис. I5), на который нанесена шкала, разделенная на сантиметры. На верхнем конце стержня имеется легкий алюминиевый блок В, вращающийся с малым трением.

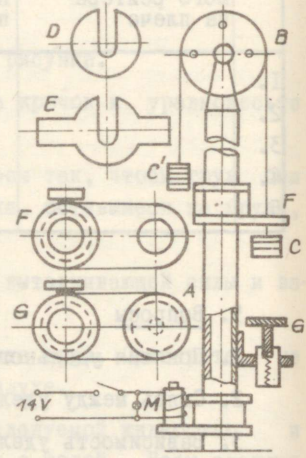


Рис. I5

Через блок перекинута тонкая нить с грузами С и С' одинаковой массы m. Груз С' имеет внутри железную пластинку и поэтому может удерживаться электромагнитом M. Масса грузов С и С' может быть увеличена добавочными небольшими грузами (перегрузами) D и Е. На стержне А имеются две платформы: G - сплошная и F - кольцевая, обе платформы могут быть закреплены при помощи зажимных винтов в любом месте стержня. Если на груз С положить один из этих перегрузов с массой m_1, то вся система начнет двигаться равноускоренно. Величину ускорения можно установить, исходя из следующих соображений. На каждый груз будут действовать две

силы – сила тяжести и натяжение нити, под действием которых грузы и начнут двигаться (пренебрегаем силами трения и считаем нить невесомой). Если предположить, что нить нерастяжима, то ускорения правого и левого грузов будут равны по величине и обратны по знаку. Если предположить, кроме того, что блок невесом, то натяжения нити будут одинаковы и справа, и слева. На основании второго закона Ньютона можно написать для грузов С и С':

$$\left.\begin{aligned} (m+m_1)a &= (m+m_1)g - T \\ ma &= T - mg \end{aligned}\right\}, \qquad (I)$$

где a – ускорение системы,

T – натяжение нити,

g – ускорение силы тяжести.

Решение этих уравнений дает величину натяжения нити и величину ускорения:

$$a = g\frac{m_1}{2m+m_1}, \qquad (2)$$

$$T = gm\frac{2m+2m_1}{2m+m_1} = gm\left(\frac{1+\frac{m_1}{m}}{1+\frac{m_1}{2m}}\right). \qquad (3)$$

Более точное определение ускорения движения системы требует учета момента инерции блока. В этом случае следует учесть различие натяжения нити по обе стороны блока. Написанные ранее уравнения (I) должны быть дополнены еще уравнением моментов, определяющим закон вращательного движения блока. Если по-прежнему будем считать нить невесомой и нерастяжимой, получим следующую систему уравнений вместо (I):

$$\left.\begin{aligned} (m_1+m)a_1 &= (m+m_1)g - T_2 \\ ma_1 &= T_1 - mg \\ I\varepsilon = \alpha m_0 r^2\varepsilon &= (T_2 - T_1)r \end{aligned}\right\}, \qquad (4)$$

Здесь $I = \alpha m_0 r^2$ – момент инерции блока,

m_0 – масса блока,

r – радиус блока,

ε – угловое ускорение блока,

α – коэффициент, зависящий от распределения массы блока.

Если скольжение нити по блоку исключено, то угловое и линейное ускорения связаны уравнением $a_1 = \varepsilon r$. Решение приведенной выше системы уравнений (4) дает ускорение

$$a_1 = g \frac{m_1}{2m + m_1 + \alpha m_0} \quad . \tag{5}$$

Ясно, что $a_1 < a$. Сила трения еще уменьшает величину ускорения.

Как видно из приведенных выше формул, система будет двигаться с ускорением, которое в первом приближении определяет m_1, причем $a < g$. Если груз m_1 во время движения снять, то дальнейшее движение системы будет происходить с постоянной скоростью (если трение не учитывать), равной скорости в момент снятия перегрузка. Кольцевая платформа на стержне А предусмотрена для снятия перегрузка формы Е.

На машине Атвуда можно проверить законы равноускоренного движения и второй закон Ньютона, что и является целью работы. Эта проверка носит, однако, приближенный характер из-за наличия трения.

Проверка второго закона Ньютона принципиально происходит так.

Если перекладывать добавочные грузы с одной стороны на другую, то масса всей системы не изменится, но результирующая внешняя сила, приложенная к системе, будет меняться, и с ней будет меняться ускорение движения системы. Для двух различных случаев по второму закону Ньютона будем иметь

$$F_1 = Ma_1 \quad ; \quad F_2 = Ma_2 \quad . \tag{6}$$

Ускорения a_1 и a_2 можно вычислить из формул пути:

$$S_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2} \quad , \quad \text{откуда} \quad a_1 = \frac{2S_1}{t_1^2}$$

и

$$S_2 = \frac{a_2 t_2^2}{2} \quad , \quad \text{откуда} \quad a_2 = \frac{2S_2}{t_2^2} \tag{7}$$

Если сравнить отношения ускорений a_1 и a_2, полученных по формулам (6) и (7), то увидим, что

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{s_1 t_2^2}{s_2 t_1^2} .$$

Если пройденные пути s_1 и s_2 равны, то

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{t_2^2}{t_1^2} . \qquad (8)$$

Проверка этого выражения является и проверкой второго закона Ньютона.

4. Ход работы

Во время работы следует помнить, что электромагнит можно включить в сеть только кратковременно, непосредственно во время работы для фиксирования груза C'. В противном случае сердечник катушки намагнитится и грузы не будут двигаться после размыкания тока в цепи электромагнита.

4.I. Проверка формулы пути равноускоренного движения $S = \frac{at^2}{2}$

I. Установите груз C' у электромагнита. Установите сплошную платформу G на указанном преподавателем расстоянии s от нижнего основания груза C.

2. На груз C положите определенное число добавочных грузов D и закрепите их.

3. Замкните ток в цепи электромагнита и установите систему в начальном положении так, чтобы электромагнит держал груз C' внизу.

4. Разомкните ток в цепи электромагнита и одновременно пустите в ход секундомер. Секундомер останавливайте в момент удара груза о площадку G, его показание дает время движения t. Измерения выполните, по крайней мере, для трех расстояний S, измеряя каждый раз время не менее трех раз.

Результаты измерений запишите в следующую таблицу:

Опыт №	Пройденный путь S	Время t	Среднее $\bar{t}$
I,		I. ..... 2. ..... 3.	
2.		I. ..... 2. ..... 3.	
3.		I. ..... 2. ..... 3.	

m_1 = ...

При постоянной добавочной нагрузке m_1 ускорения не зависят от пути S и времени t [см. формулу (2)]. Следовательно, в пределах ошибок опыта должно соблюдаться равенство:

$$a = \frac{2S_1}{\bar{t}_1^2} = \frac{2S_2}{\bar{t}_2^2} = \ldots = \frac{2S_n}{\bar{t}_n^2} .$$

Проверьте это выражение.

4.2. Проверка формулы скорости равноускоренного движения $V = at$.

I. Установите систему в начальное положение, чтобы груз C' находился внизу у электромагнита.

2. Установите кольцевую платформу F на некотором расстоянии s от верхнего основания груза C, от нее на расстояние s' - платформу G. Расстояние укажет преподаватель.

3. На груз C поместите известное количество перегрузок E, их не закрепляйте.

4. Замкните ток в цепи электромагнита и фиксируйте груз C'.

5. Разомкните ток в цепи электромагнита и измерьте время равноускоренного движения t. Измерьте также время равномерного движения t' между платформами F и G.

Измерения повторите по крайней мере 3 раза.

6. Измените расстояния s и s' и повторите измерения.

Результаты измерений запишите в следующую таблицу:

Опыт №	s	t	$\bar{t}$	s'	t'	$\bar{t}'$	v
I.		I. 2. 3.			I. 2. 3.		
2.		I. 2. 3.			I. 2. 3.		
3.		I. 2. 3.			I. 2. 3.		

$m_1 = \ldots\ldots\ldots$

Скорость системы в момент снятия перегрузов вычислить по формуле

$$v = \frac{s' - h}{t},$$

где h – высота груза С.

При увеличении расстояния между висящим грузом и кольцевой платформой растет и скорость равномерного движения. Так как при одной и той же массе m_1 ускорение остается постоянным, то в пределах ошибок опыта должно соблюдаться равенство

$$a = \frac{v_1}{t_1} = \frac{v_2}{t_2} = \ldots = \frac{v_n}{t_n}.$$

Проверьте это выражение.

4.3. Проверка второго закона Ньютона.

I. Для проверки формулы (8) поставьте на оба груза С и С' добавочные грузы так, чтобы $m_{1C} > m_{1C'}$.

2. Измерения выполняйте так же, как при проверке формулы пройденного пути в пункте 4.I.

3. Переместите часть перегрузок с груза С' на груз С, оставляя массу всей системы постоянной.

4. Выполните новые измерения, выбирая те же самые значения пути.

Данные запишите в следующую таблицу:

Опыт №	Добавочные массы и сила	Пройденный путь s_1	t_1	$\bar{t}_1$
I.	m_{1C} =		I. ..... 2. ..... 3.	
2.	$m_{1C'}$ =		I. ..... 2. ..... 3.	
3.	F_1 =		I. ..... 2. ..... 3.	
		s_2	t_2	$\bar{t}_2$
4.	m_{2C} =		I. ..... 2. ..... 3.	
5.	$m_{2C'}$ =		I. ..... 2. ..... 3.	
6.	F_2 =		I. ..... 2. ..... 3.	

M = ...

Из полученных данных вычислите 3 отношения $\frac{\bar{t}_2^2}{\bar{t}_1^2}$ которые все в пределах ошибок опыта должны равняться отношению $\frac{F_1}{F_2}$. Проверьте это.

5. Вопросы

I. Что называется ускорением?

2. Единицы ускорения.

3. Какое движение называется равнопеременным?

4. Дайте формулу и график скорости равноускоренного движения.

5. Дайте формулу и график пути равноускоренного движения.

6. Второй закон Ньютона.

7. Показать, что пути, проходимые в одно и то же время телами, пропорциональны действующим силам, если массы тел равны, и обратно пропорциональны массам, если равны действующие на них силы.

8. Масса и единицы измерения.

9. Сила и единицы измерения.

IO. Что называется моментом инерции?

II. Связь между угловым ускорением и линейным ускорением.

I2. Основной закон динамики вращательного движения.

I3. Решите систему (4) до конца, найдите натяжение нити T_1 и T_2.

Литература

I. Путилов К.А. Курс физики I. М., 1962. § I2, стр. 54.

2. Савельев И.В. Курс общей физики I. М., 1968. Гл. I, § 7,8, стр. 25 - 27; гл. П, § I2 - I6, стр. 39 - 50.

3. Зисман Г.А. и Тодес О.М. Курс общей физики I. М., 1964. Гл. I § 2, стр. I8; гл. П § 3, стр. 25.

4. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Милковская Л.Б., Сергеев Г.П. Курс физики I. М., 1965. § I. 3, I.4, стр. I8 - 23; § 2.3, стр. 35 - 38.

5. Будрин Г.Д., Калашников Н.В., Стоцкий Л.Р. Международная система единиц. М., 1964. § 7,I4,I5,24.

6. Аристов Е.М. Физические величины и единицы их измерения. Л., 1963. Стр. 24.

ТРИФИЛЯРНЫЙ МАЯТНИК

I. Задание

Определение момента инерции разных образцов и проверка теоремы Штейнера методом крутильных колебаний.

2. Принадлежности

Трифилярный маятник, секундомер, штангенциркуль, образцы для измерения.

3. Теоретические основы работы

Трифилярный маятник построен так: круглая платформа подвешена на трех симметрично расположенных нитях, укрепленных у краев этой платформы (рис. I6). Наверху эти нити также симметрично прикреплены к диску несколько меньшего диаметра, чем диаметр платформы. Платформа может совершать крутильные колебания вокруг вертикальной оси, перпендикулярной к ее плоскости и проходящей через ее середину; центр тяжести платформы при этом перемещается по оси вращения. Период колебаний определяется величиной момента инерции платформы: он будет другим, если платформу нагрузить каким-либо телом, этим и пользуются в настоящей работе.

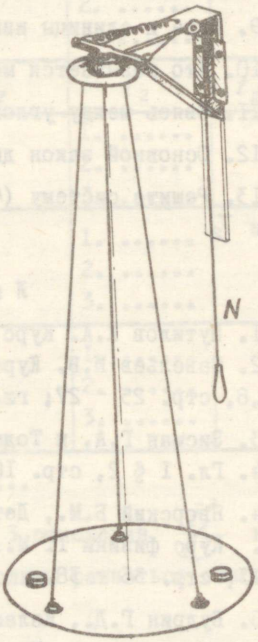


Рис. I6

Если платформа массы m, вращаясь в одном направлении, поднялась на высоту h, то приращение потенциальной энергии будет выражаться формулой

$$E_1 = mgh,$$

где g – ускорение силы тяжести.

Вращаясь в другом направлении, платформа придет в положение равновесия и будет обладать кинетической энергией

$$E_2 = \frac{1}{2} I \omega_0^2 ,$$

где I – момент инерции платформы,
ω_0 – угловая скорость платформы в момент достижения равновесия.

Пренебрегая работой сил трения, на основании закона сохранения механической энергии имеем

$$\frac{1}{2} I \omega_0^2 = mgh . \qquad (I)$$

Считая, что платформа совершает гармонические колебания, можем написать зависимость угла поворота платформы от времени в виде

$$\beta = \alpha \sin \frac{2\pi}{T} t ,$$

где β – угол поворота платформы,
α – амплитуда поворота,
T – период полного колебания,
t – время.

Угловая скорость ω , являющаяся первой производной β по времени, выражается так:

$$\omega = \frac{d\beta}{dt} = \frac{2\pi\alpha}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t .$$

В момент прохождения маятника через положение равновесия (t =0, I/2 T, T, 3/2 T и т.д.)абсолютное значение этой величины будет:

$$\omega_0 = \frac{2\pi\alpha}{T} . \qquad (2)$$

На основании выражений (I) и (2) имеем

$$mgh = \frac{1}{2} I \left(\frac{2\pi\alpha}{T}\right)^2 . \qquad (3)$$

Из рис. I7 следует, что

$$h = OO_1 = BC - BC_1 = \frac{(BC)^2 - (BC_1)^2}{BC + BC_1} .$$

Если l – длина нитей подвеса,
R – радиус платформы,
r – радиус верхнего диска,

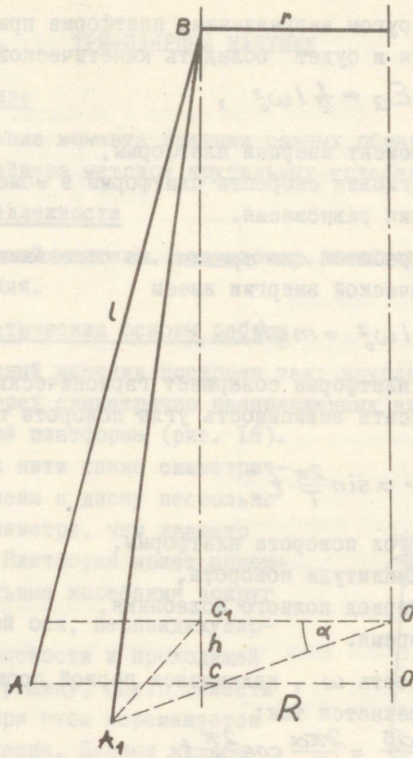


Рис. I7

то

$$(BC)^2 = (AB)^2 - (AC)^2 = l^2 - (R-r)^2,$$

$$(BC_1)^2 = (BA_1)^2 - (A_1C_1)^2 = l^2 - (R^2 + r^2 - 2Rr\cos\alpha),$$

так получаем

$$h = \frac{2Rr(1-\cos\alpha)}{BC + BC_1} = \frac{4Rr\sin^2\frac{\alpha}{2}}{BC + BC_1}.$$

При малых углах отклонения α значение синуса этого угла можно заменить просто значением α, а величину знаменателя взять равной $2l$.

Учитывая это, имеем

$$h = \frac{Rr\alpha^2}{2l}.$$

Тогда на основании (3)

$$mg\frac{Rr\alpha^2}{2l} = \frac{1}{2}I\left(\frac{2\pi\alpha}{T}\right)^2,$$

откуда

$$I = \frac{mgRr}{4\pi^2 l}T^2. \qquad (4)$$

По формуле (4) может быть определен момент инерции самой платформы и тела, положенного на нее, так как все величины в правой части формулы могут быть непосредственно измерены.

Вращательный импульс, необходимый для начала крутильных колебаний, сообщается платформе путем поворота верхнего диска вокруг его оси при помощи натяжения шнура, приводящего в движение рычажок, связанный с диском. Этим достигается почти полное отсутствие других некрутильных колебаний, наличие которых затрудняет измерения.

4. Ход работы

4.I. Определение момента инерции

I. Измерьте длину нити подвеса l. В формулу (4) входят постоянные величины m_0 = 972,5 г; r = 2,9 см и R = = I3,5 см.

2. Определите период колебаний пустой платформы T_0 (для этого сообщите платформе вращательный импульс и при помощи секундомера измерьте время 50 - I00 полных колебаний). Амплитуда колебаний не должна превышать 5-6°.

3. Нагрузите платформу исследуемым телом, масса которого заранее определена (нанесена на образце) и вновь определите период колебаний T всей системы. Опыты проведите с несколькими образцами 2-3 раза.

4. Найденные величины занесите в таблицу. Затем, пользуясь формулой (4), вычислите момент инерции всей системы, принимая ее массу m равной сумме масс тела и платформы.

Величина момента инерции тела I_x будет определяться как разность $I_x = I - I_c$, где I_0 момент инерции пустой платформы.

Определение момента инерции платформы	Число колеб.	Время				T_0		I_0	
		t_1	t_2	t_3	$t_{ср.}$				
Определение момента инерции тела	№ образца	Число колеб.					T	m	I	I_x
Проверка теоремы Штейнера										

Расстояние образца от оси вращения a = ...

Момент инерции образца по формуле (5)

$I_{теор.}$ = ...

4.2. Проверка теоремы Штейнера

5. Возьмите два совершенно одинаковых по массам и форме тела. Положите одну из них в середину (в центр) платформы и определите момент инерции его.

6. Затем расположите оба тела симметрично на платформе. Измерьте расстояние центра массы тела от центра платформы a и определите их момент инерции при таком расположении.

7. Опыты повторите 2-3 раза. Найденные величины занесите в таблицу. Чтобы проверить теорему Штейнера, сравните найденные значения момента инерции с вычисленными по формуле (5), согласно которой момент инерции I относительно произвольной оси вращения равен сумме момента инерции I_0 относительно параллельной оси, проходящей через центр тяжести тела, и произведения массы тела на квадрат расстояния центра тяжести от оси вращения a:

$$I = I_0 + ma^2. \qquad (5)$$

8. Вычислите относительную погрешность

$$\frac{I_{теор.} - I_x}{I_{теор.}},$$

5. Вопросы

1. Что называется моментом инерции материальной точки и любого тела?

2. Чему равен момент инерции шара относительно оси, совпадающей с его диаметром?

3. Чему равен момент инерции шара массой m и радиусом r, подвешенного на нити длиной l ("физический маятник") относительно точки опоры? Почему?

4. Основное уравнение динамики вращательного движения.

5. Момент инерции относительно оси, совпадающей с геометрической осью диска.

6. От чего зависит момент инерции?

7. Как выражается кинетическая энергия вращающегося тела?

8. Как вывести формулы для момента инерции любого тела?

9. На чем основан вывод формулы для вычисления момента инерции в данной работе?

IO. Что такое гармоническое колебание? Уравнение гармонического колебания.

Литература

I. Путилов К.А. Курс физики I. М., 1964. § 36, 37, 56.

2. Фриш С.Э.,Тиморева А.В. Курс общей физики I. М.,1958. § 32, 33, 35.

3. Савельев И.В. Курс общей физики I. М., 1966. § 38,62.

4. Стрелков С.П. Механика, § 59.

КРУТИЛЬНЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

I. Задание

Определение скорости пули при помощи крутильного баллистического маятника.

2. Принадлежности

Установка, секундомер, сантиметровая линейка.

3. Теоретические основы работы

Крутильный баллистический маятник (рис.I8) состоит из горизонтального стержня 5, прикрепленного муфтой 4 к вертикальному стержню 2. На горизонтальном стержне находится два цилиндрических груза 6, перемещением которых можно менять момент инерции маятника. На одном конце горизонтального стержня закреплена чашечка II, наполненная пластическим материалом, а на другом конце - противовес 7.

Маятник прикреплен к кронштейну при помощи проволоки I. На нижний конец маятника при помощи проволоки 9 подвешен массивный груз IO, вращением которого вертикальная плос-

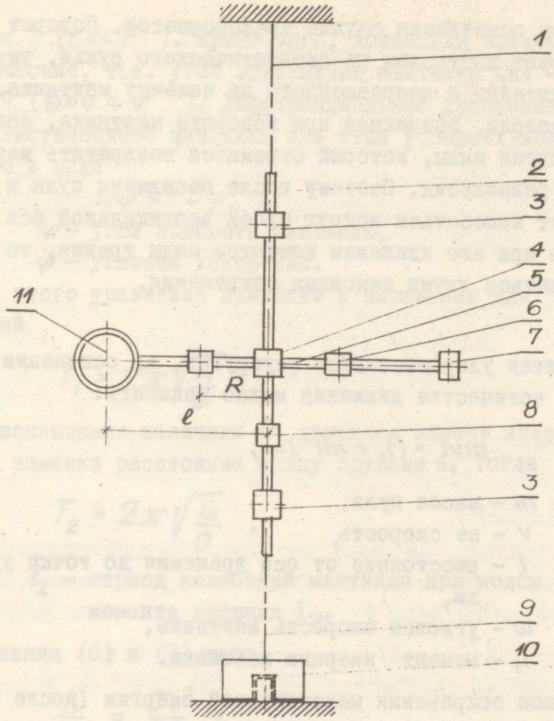


Рис. I8

кость маятника может быть установлена в нужном положении.

Для увеличения стабильности колеблющегося маятника на вертикальном стержне укреплены грузы 3.

Для измерения угла поворота маятника на его вертикальном стержне укреплено зеркальце 8, положение которого можно менять. Луч света от осветителя, отражаясь от зеркальца, образует на шкале "зайчик". При повороте маятника "зайчик" скользит по шкале. Величина максимального угла поворота φ_0 определяется с учетом закона отражения луча:

$$\varphi_0 = \frac{1}{2}\frac{a}{s}, \qquad (I)$$

где s – расстояние от зеркальца до "зайчика" на шкале,
a – максимальное смещение "зайчика" на шкале.

Питанием осветителя служит трансформатор. Поворот маятника вызывают выстрелом из пневматического ружья, укрепленного на кронштейне и направленного на чашечку маятника. Деформация проволоки, возникшая при повороте маятника, создает момент упругой силы, который стремится возвратить маятник в положение равновесия. Поэтому после попадания пули в маятник он начинает колебаться вокруг своей вертикальной оси. Если пренебречь при его движении моментом силы трения, то можно воспользоваться двумя законами сохранения.

I. Считая удар абсолютно неупругим, на основании закона моментов количества движения можно написать:

$$mvl = (I_1 + ml^2)\omega, \qquad (2)$$

где m – масса пули,
v – ее скорость,
l – расстояние от оси вращения до точки удара пули,
ω – угловая скорость маятника,
I_1 – момент инерции маятника.

2. Закон сохранения механической энергии (после удара) дает

$$\frac{1}{2}(I_1 + ml^2)\omega^2 = \frac{1}{2}D\varphi_0^2, \qquad (3)$$

где D – постоянная момента упругой силы.

Из этих уравнений получаем

$$v^2 = \frac{D\varphi_0^2}{m^2l^2}(I_1 + ml^2). \qquad (4)$$

Так как момент инерции пули ml^2 во много раз меньше момента инерции маятника I_1, то уравнение (4) может быть написано в виде

$$v^2 = \frac{D\varphi_0^2 I_1}{m^2l^2}. \qquad (5)$$

Для данного маятника можно воспользоваться теорией крутильного баллистического маятника, если время воздействия пули на маятник τ во много раз меньше периода колебаний

маятника T ($\tau \ll T$). Кроме того, колебания должны быть гармонические, т.е. угол отклонения маятника мал – не более 5–6° ($\sin\varphi \approx \varphi$). Дифференциальное уравнение движения баллистического маятника при этих условиях может быть написано в виде

$$I_1\ddot{\varphi} = -D\varphi,$$

где φ – угол поворота маятника,

$\ddot{\varphi}$ – угловое ускорение.

Решение этого уравнения приводит к выражению для периода колебаний

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I_1}{D}} . \qquad (6)$$

Для исключения величины D изменяем момент инерции маятника, изменяя расстояние между грузами 6. Тогда

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I_2}{D}} , \qquad (7)$$

где T_2 – период колебаний маятника при новом значении момента инерции I_2.

Уравнения (6) и (7) дают

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{T_1^2}{T_2^2} . \qquad (8)$$

Обозначаем

$$I_1 - I_2 = \Delta I . \qquad (9)$$

Из уравнения (8) и (9) получаем

$$I_1 = \frac{T_1^2}{T_1^2 - T_2^2}\Delta I . \qquad (10)$$

Уравнения (5), (6) и (10) дают

$$V = \frac{2\pi\varphi_0}{ml}\,\frac{T_1^2}{T_1^2 - T_2^2}\,\Delta I . \qquad (11)$$

Величину ΔI можно определить, пользуясь теоремой Штейнера. Из этой теоремы следует, что

$$I_1 = I_0 + 2MR_1^2 \qquad (12)$$

и

$$I_2 = I_0 + 2MR_2^2, \qquad (I3)$$

где I_0 – момент инерции маятника, когда центры тяжести грузов совпадают с осью вращения маятника, I_1 – момент инерции, когда оба груза находятся на расстоянии R_1 от оси вращения, I_2 – момент инерции, когда оба груза находятся на расстоянии R_2, M – масса одного груза.

Из уравнений (I2) и (I3) получаем

$$I_1 - I_2 = \Delta I = 2M(R_1^2 - R_2^2). \qquad (I4)$$

Уравнения (II) и (I4) окончательно дают

$$v = \frac{4\pi\varphi_0 M}{ml} \frac{T_1}{T_1^2 - T_2^2} (R_1^2 - R_2^2). \qquad (I5)$$

4. Ход работы

I. Из величин, входящих в окончательную формулу (I5) известна масса грузов 6. Масса одного груза M = ... ± I г. Определите массу пули m с точностью до I мг.

2. Раздвиньте грузы вдоль стержня возможно дальше друг от друга. Измерьте расстояние между осью маятника и серединами грузов R_1.

3. Отрегулируйте осветительную систему так, чтобы "зайчик" на шкале был четким и стоял на нулевой точке шкалы (нулевой точкой можно взять начало шкалы). Измерьте расстояние s между зеркальцем и "зайчиком".

4. Установите конец ствола пневматического ружья на расстоянии 30 – 40 см от чашечки и зарядите ружье. Для зарядки освободите предохранитель и поверните ствол вниз и назад. При этом сжимается сильная пружина за поршнем, плотно перемещающимся в цилиндре. Опустите пулю сзади в ствол. Поверните ствол в горизонтальное положение и закройте предохранитель.

5. Выстрел произведите, убедившись, что ружье направлено на чашечку и горизонтальный стержень маятника перпендикулярен оси ствола ружья. Отсчитайте наибольшее смещение "зайчика" a на шкале при первом колебании. Для определения пе-

риода колебаний T_I измерьте продолжительность IO полных колебаний.

6. Измерьте расстояние от оси вращения маятника до точки удара пули l .

7. Уменьшите момент инерции маятника (придвинув грузы ближе к муфте), измерьте R_2 - расстояние между осью вращения маятника и серединой грузов.

8. Удалите пулю из чашечки и произведите второй выстрел новой пулей. Для определения периода колебаний T_2 измерьте снова продолжительность IO колебаний (измерять отклонение "зайчика" по шкале не следует).

9. По формуле (I5) определите скорость пули (при этом массой пули m является масса первой пули). Определите погрешность результата.

IO. Для грубой оценки времени соударения τ измерьте глубину проникновения пули в пластический материал d и вычислите τ по формуле

$$\tau = \frac{d}{\bar{v}} ,$$

где $\frac{v}{2} = \bar{v}$ - средняя скорость движения пули в пластическом материале.

Сравнением τ и T_1 убедитесь, что маятник является баллистическим.

Измеряемая или вычисляемая величина		Результат	Погрешность
I		2	3
Масса груза	M		
Масса пули	m		
Расстояние от оси вращения до середины грузов в первом положении	R_1		
Расстояние от зеркальца до "зайчика"	s		
Максимальное смещение "зайчика"	a		
Максимальный угол поворота	φ_0		
Продолжительность IO колебаний в первом положении	t_1		

I		2	3
Период колебаний в первом положении	T_1		
Расстояние от оси вращения до точки удара пули	l		
Расстояние от оси вращения до середины грузов во втором положении	R_2		
Продолжительность I0 колебаний во втором положении	t_2		
Период колебаний во втором положении	T_2		
Скорость пули	v		
Глубина проникновения пули	d		
Время соударения	τ		

5. Вопросы

I. Определите момент количества движения.

2. Сформулируйте закон сохранения момента количества движения.

3. Приведите формулы кинетической энергии при поступательном и вращательном движениях.

4. Изложите закон сохранения механической энергии.

5. Какой удар является абсолютно неупругим?

6. Определите угловую скорость.

7. Как определяется момент инерции материальной точки?

8. Как определяется момент инерции произвольного тела?

9. Как выражается период колебания математического маятника?

I0. Сформулируйте теорему Штейнера.

II. Что такое крутильный маятник?

I2. Почему источник света и шкала удалены на значительное расстояние от зеркальца?

I3. Почему во втором положении определяют только период колебаний (измерять отклонение "зайчика" не следует)?

I4. Как вычисляется максимальный угол поворота маятника?

I5. Почему не надо учитывать момент инерции горизонтального стержня?

I6. Как исключается из выражения для периода колебаний постоянная упругой силы?

I7. Как меняется результат, если удар не является абсолютно неупругим?

Литература

I. Стрелков С.П. Механика. М., I965. Гл. У, § 87; гл.УП, § 53; гл. ХIУ, § I24.

2. Савельев И.В. Курс общей физики I. М., I968. § 27,30, 38, 4I, 42.

3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики I. М., I967. § 6, 8, II.

ОСНОВНОЙ ЗАКОН ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

I. Задание

Проверка основного закона вращательного движения.

2. Принадлежности

Маховик, набор грузов, секундомер, штангенциркуль, линейка.

3. Теоретические основы работы

Связь между моментом силы M, моментом инерции I и угловым ускорением ε дается основным законом вращательного движения

$$\varepsilon = \frac{M}{I} . \qquad (I)$$

Из основного закона вращательного движения следует, что при постоянном моменте инерции угловые ускорения пропорциональны действующим на тело моментам сил:

$$\varepsilon \sim M . \qquad (2)$$

Проверка соотношения (2) и является целью настоящей работы.

В работе используется прибор, называемый "маховиком" (рис. I9).

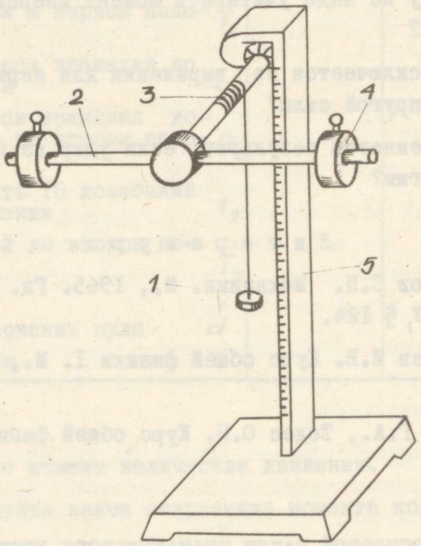


Рис. I9

Маховик состоит из шкива 3, вращающегося на шарикоподшипниках, стержня 2 с двумя муфтами 4 одинаковой массы. Муфты можно перемещать и закреплять посредством винтов на любом расстоянии от оси вращения, меняя таким образом момент инерции системы. Нить одним концом крепится на шкиве, а на другом ее конце укреплена подставка I, на которую кладутся грузы. Нить наматывается на шкив его вращением. Если маховик предоставить самому себе, то он вращается под действием вращающегося момента, создаваемого подставкой с грузами.

Для определения момента силы необходимо знать силу F и ее плечо ℓ. Если диаметр нити намного меньше диаметра шкива, то можем принять плечо равным радиусу шкива r. Сила F, создающая вращающий момент, равняется

$$F = mg - ma - f \,, \qquad (3)$$

где m – масса подставки и грузов,

g – ускорение свободного падения,

a – ускорение, с которым опускается основание,

f – сила трения.

Итак, получим для момента силы следующее выражение:

$$M = m(g-a)r - fr. \qquad (4)$$

Ускорение основания a определяется по высоте h и времени падения t :

$$a = \frac{2h}{t^2}. \qquad (5)$$

Сила трения f определяется следующим образом.

Груз массой m, поднятый на высоту h, обладает потенциальной энергией mgh. При падении груза его потенциальная энергия уменьшается, превращаясь в кинетическую энергию поступательного движения $\frac{mv^2}{2}$ груза, кинетическую энергию вращательного движения $\frac{I\omega^2}{2}$ маховика и в работу по преодолению трения fh. При достижении грузом наиболее низкого положения согласно закону сохранения энергии имеем:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + fh. \qquad (6)$$

В наиболее низком положении груз не останавливается, а снова поднимается на некоторую высоту $h_1 < h$. В этом положении он будет обладать потенциальной энергией mgh_1.

Убыль потенциальной энергии при поднятии на высоту h_1 равна работе по преодолению сопротивления на пути $h+h_1$, т.е.

$$mgh - mgh_1 = f(h+h_1).$$

Отсюда сила трения

$$f = mg\frac{h-h_1}{h+h_1}. \qquad (7)$$

Подставляя выражения (5) и (7) в формулу (4), после преобразований получим:

$$M = mD\left(\frac{gh_1}{h+h_1} - \frac{h}{t^2}\right), \qquad (8)$$

где D – диаметр шкива.

Для определения углового ускорения учитываем, что линейная скорость точек на поверхности шкива равна скорости поступательного движения груза. Итак,

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{4h}{Dt^2} . \qquad (9)$$

Для проверки соотношения (2) необходимо найти значения M и ε при разных грузах m . При этом нельзя менять расстояния между муфтами 4, т.е. при всех значениях M и ε должно быть $I = const$.

Для анализа полученных данных построим график зависимости $\varepsilon = f(M)$, по которому и можно судить о справедливости соотношения (2). По наклону графика вычисляем момент инерции системы:

$$I = ctg\alpha = \frac{M}{\varepsilon} , \qquad (10)$$

где α - угол наклона кривой к оси М.

4. Ход работы

I. Измерьте штангенциркулем диаметр шкива D в пяти местах.

2. Установите, против какого деления n_0 находится основание подставки в наинизшем положении.

3. Намотайте нить на шкив и установите, против какого деления шкалы n_1 находится теперь основание подставки.

4. Опустите маховик с одновременным пуском в ход секундомера. В момент, когда груз достигнет самого низкого положения выключите секундомер. Продолжая наблюдать за поднятием груза, установите наивысшее деление шкалы n_2 ,на которое поднимается основание подставки.

5. Измерения проведите с пятью разными грузами. Каждый опыт повторите пять раз.

Высота падения груза h определяется по формуле

$$h = n_1 - n_0 ,$$

а высота поднятия по формуле

$$h_1 = n_2 - n_0 .$$

Для записи данных используйте следующую форму:

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	$D_{ср}$

m = ... n_0 = ...

№	Отчет по шкале		Высота		Время падения t
	n_1	n_2	h	h_1	
I. 2. 3. 4. 5.					
Среднее					

6. Вычислите по формулам (8) и (9) моменты сил M и соответствующие угловые ускорения ε, используя средние данные опыта. По полученным результатам постройте на миллиметровой бумаге график $\varepsilon = f(M)$ и вычислите момент инерции системы.

5. Вопросы

I. Что называется моментом силы?

2. Как определяется направление момента силы?

3. Какие силы называются эквивалентными?

4. Какие силы образуют пару сил?

5. Дайте определение момента инерции для материальной точки и тела.

6. Как зависит момент инерции от положения оси вращения?

7. Сформулируйте основной закон вращательного движения.

8. Какая аналогия существует в формулах поступательного и вращательного движения?

9. Какие оси называются свободными?

Литература

I. Путилов К.А. Курс физики I. М., 1962. §35, 36, 37.

2. Савельев И.В. Курс общей физики, т.I М., 1966. § 36, 37.

МОДУЛЬ ЮНГА (УПРУГОСТИ)

I. Задание

Ознакомление с законом Гука и определение модуля Юнга по растяжению проволоки.

2. Принадлежности

Исследуемая проволока, прибор для определения удлинения проволоки, микрометр, масштабная линейка.

3. Теоретические основы работы

Изменение формы или объема твердого тела под действием внешних сил называется деформацией. Если при устранении действия внешних сил тело принимает первоначальные размеры и форму, то деформация называется упругой. Упругие деформации бывают: растяжение, сжатие, сдвиг и т.д.

Величину деформации характеризуют отношением изменения размера тела Δx к первоначальному размеру x:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x}.$$

Число ε показывает, во сколько раз увеличились или уменьшились размеры тела, и называется относительной деформацией.

При упругих деформациях действует закон Гука, который утверждает, что относительная деформация пропорциональна действующему напряжению.

Для растяжения по закону Гука можно написать:

$$\frac{\Delta l}{l} = k \cdot \frac{F}{S} , \qquad (I)$$

где Δl – абсолютное удлинение,

l – первоначальная длина тела,

F – растягивающая сила,

S – площадь поперечного сечения тела,

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала и называемый коэффициентом упругости.

Обычно в технике пользуются не коэффициентом упругости, а величиной, обратной ему, – модулем упругости, или модулем Юнга.

$$E = \frac{1}{k} .$$

Модуль упругости численно равен напряжению, удлиняющему тело вдвое ($\varepsilon = 1$).

Для вычисления модуля упругости по растяжению перепишем формулу (I) в виде

$$E = \frac{F \cdot l}{S \cdot \Delta l} . \qquad (2)$$

В работе используется прибор, изображенный на рисунке 20. Исследуемым телом является проволока, закрепленная на кронштейне К. На нижнем конце проволоки имеется основание А, куда ставится начальный груз для выпрямления проволоки. Для растяжения проволоки к этому грузу добавляются гири.

Для измерения удлинения используется два уровня, которые одними концами опираются на зажимы, имеющиеся на проволоке, а другими – на острия микрометрического винта. Используя два уровня, мы исключаем влияние возможного смещения кронштейна на результат измерений.

В работе определяется только удлинение проволоки между уровнями. Для этого регулируем оба уровня вращением микро-

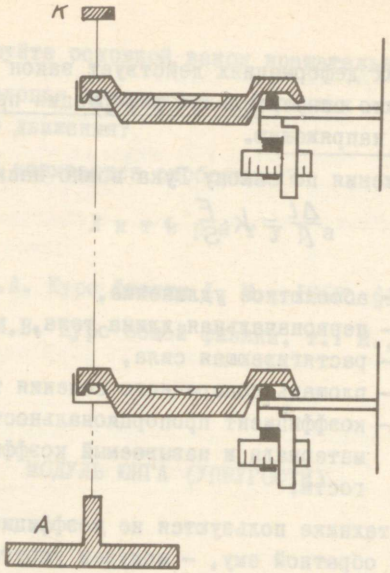


Рис. 20

метрических винтов при ненагруженной проволоке в горизонтальные положения (пузырьки посредине) и делаем отсчеты обоих винтов. (Устройство и принцип работы микрометрического винта см. на стр. 37). Затем нагружаем проволоку, снова устанавливаем уровни горизонтально и делаем отсчеты по винтам. Разность полученных и начальных отсчетов дает понижение уровней. Понижение нижнего уровня вызвано удлинением части проволоки выше зажима и смещением кронштейна. Понижение верхнего зажима вызвано удлинением части проволоки выше зажима, а также смещением кронштейна. Итак, разность понижений уровней дает удлинение проволоки между зажимами.

При выполнении работы увеличивают нагрузку постепенно до 5 кГ, каждый раз устанавливая уровни горизонтально и делая отсчеты. Затем снимают гири в противоположном порядке, делая опять отсчеты по винтам.

Отсчеты при одинаковых нагрузках при увеличении и уменьшении нагрузки должны совпадать в пределах допускаемых ошибок. Если это не так, значит проволока была вначале недостаточно выпрямлена, или конечная нагрузка превышала

предел упругости проволоки, вызывая остаточную деформацию. В последнем случае измерения необходимо повторить с меньшей конечной нагрузкой.

По полученным результатам построим график зависимости $\Delta l = f(F)$. По закону Гука все найденные точки должны лежать на одной прямой. Из-за ошибок отклонения все-таки имеют место, и прямую надо проводить так, чтобы она была как можно ближе ко всем точкам (рис. 21).

Для вычисления E мы могли бы использовать любую пару величин Δl и F, но для получения более точного результата используем для этого график. Так как

$$\cot\alpha = \frac{F}{\Delta l},$$

то формулу (2) можно написать в виде

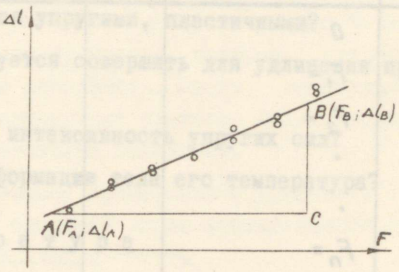


Рис. 21

$$E = \frac{l}{S}\cot\alpha . \qquad (3)$$

Для нахождения $\cot\alpha$ построим прямоугольный треугольник ABC, откуда

$$\cot\alpha = \frac{F_B - F_A}{\Delta l_B - \Delta l_A} .$$

Итак, получим окончательную формулу

$$E = \frac{l}{S}\,\frac{F_B - F_A}{\Delta l_B - \Delta l_A} . \qquad (4)$$

4. Ход работы

1. Измерьте диаметр проволоки в трех местах между зажимами.

2. Измерьте длину проволоки между зажимами.

3. Положите начальный груз на подставку, установите уровни горизонтально и сделайте отсчеты по микрометрическим винтам.

4. Добавляйте грузы на подставку, снимая каждый раз после добавления нагрузки отсчеты по винтам (Нагрузку увеличивайте до 5 кГ). Массы используемых гирь узнайте у преподавателя практикума или определите взвешиванием. Результаты занесите в следующую таблицу:

№	Дополнительный груз (кГ)	Нижний уровень		Верхний уровень		Удлинение (мм)
		отсчет	понижение	отсчет	понижение	
I	0					
2	$F_1 =$					
3	$F_2 =$					
•	•					
•	•					
n	$F_n =$					
•	•					
•	•					
•	$F_2 =$					
•	$F_1 =$					
•	0					

5. Снимите гири в обратном порядке, делая опять отсчеты по винтам.

6. Вычислите удлинения для каждой нагрузки.

7. Постройте график зависимости $\Delta l = f(F)$.

8. Вычислите по формуле (4) модуль упругости.

9. Оцените ошибки полученных результатов.

5. Вопросы

I. Что показывает модуль упругости?

2. В каких единицах измеряется модуль упругости? Как эти единицы связаны?

3. От чего и как зависит ошибка измерения модуля упругости?

4. Изменяется ли под действием растягивающей силы объем проволоки?

5. Чем объясняется разное поведение стекла и алюминия под действием деформирующей силы, хотя они имеют одинаковые модули упругости?

6. На что расходуется работа внешних сил при деформации?

7. Какие тела называются упругими, пластичными?

8. Сколько работы требуется совершить для удлинения проволоки на Δl ?

9. Как характеризуется интенсивность упругих сил?

10. Меняется ли при деформации тела его температура?

Литература

1. Путилов К.А. Курс физики I. М., 1962. § 40,41, 44 - 46.

2. Савельев И.В. Курс общей физики, т. I. М., 1966. §45.

МОДУЛЬ СДВИГА

1, Задание

Определение модуля сдвига проволоки при помощи крутильных колебаний.

2. Принадлежности

Крутильный маятник с добавочными нагрузками, измерительная лента, штангенциркуль, микрометр, секундомер, технические весы.

3. Теоретические основы работы

Пусть прямоугольный параллелепипед с площадью основания S прикреплен к неподвижному основанию. Приложим к его верхней грани силу F (см. рис. 22), параллельную плоскос-

ти грани и действующую одинаково на каждую точку поверхности. Тогда на единицу поверхности действует сила

$$p = \frac{F}{S}, \qquad (1)$$

называемая напряжением сдвига. Под действием силы F прямоугольный параллелепипед деформируется и его ребра образуют со своим первоначальным положением угол α (рис. 22). По закону Гука угол α пропорционален напряжению, т.е. угол α пропорционален действующей силе и обратно пропорционален площади S:

$$\alpha = \frac{F}{GS}. \qquad (2)$$

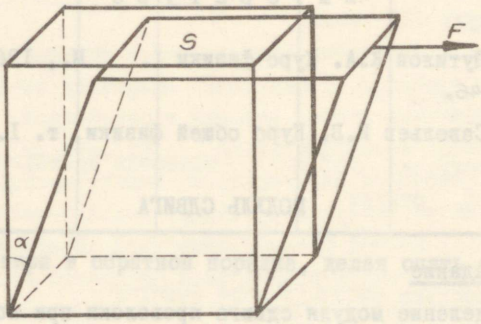


Рис. 22

Величина G свойственная для данного материала константа, называется модулем сдвига.

Так как угол α – величина безразмерная (угол в радианах), то по равенству (2) размерность G должна быть равна размерности напряжения $\frac{F}{S}$. Обычно модуль сдвига измеряется, как и модуль Юнга, в единицах кГ/мм^2, дн/см^2 или н/м^2.

Модуль сдвига можно определить по формуле (2), измерив величины α, F и S. Описанный метод практически не применим для определения модуля сдвига. Модуль сдвига обычно определяют методом крутильных колебаний, теорию которого приводим ниже.

К натянутой цилиндрической проволоке (стержню) прикреплено жестко твердое тело так, что свободная ось тела совпадает с продольной осью проволоки. Если это тело вывести из равновесия поворотом его вокруг свободной оси, тогда проволока деформируется и возникшие упругие силы кручения образуют моменты закручивания, которые стараются привести тело в положение равновесия. После освобождения тело начнет совершать вращательные движения около положения равновесия, или вращательные колебания.

Если твердое тело совершает вращательное движение, то к телу может быть применен основной закон вращательного движения

$$M = I\frac{d\omega}{dt}, \qquad (3)$$

где M – момент закручивания относительно данной оси,
I – момент инерции тела относительно этой же оси,
$\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение тела.

Учитывая, что в пределах упругости закручивающий момент противоположно направлен углу φ и пропорционален ему, и используя равенство (3), получим дифференциальное уравнение гармонического крутящего колебания

$$I\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -f\varphi, \qquad (4)$$

где $f\varphi$ – численно равно вращательному моменту М.
Из уравнения (4) следует, что периоды этих колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{f}}, \qquad (5)$$

где $\frac{f}{I}$ – множитель пропорциональности между $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$ и углом φ.

Величину $f = \frac{M}{\varphi}$ называют модулем кручения. Численно она равна моменту, который нужно приложить, чтобы закрутить проволоку на угол в один радиан. Модуль сдвига G и модуль кручения f связаны между собой соотношением

$$f = \frac{G\pi r^4}{2L}, \qquad (6)$$

где r – радиус цилиндрической проволоки, а
L – ее длина.

Из выражения (5) находим модуль кручения f, а из уравнения (6) – модуль сдвига G. Чтобы избавиться от неизвестного момента инерции I в формуле (5), определяем два различных значения периода колебаний T_1 и T_2 при различных моментах инерции I_1 и I_2 колебательной системы.

На основании равенств

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

можем записать

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{I_1}{I_2}. \qquad (7)$$

Работу можем выполнить на двух установках: на первой (см. рис. 23) и на второй (см. рис. 24), где различия только в возможностях изменения момента инерции прибора.

I) Вывод формул, нужных для выполнения задач работы в случае первой установки.

Момент инерции крутильного маятника равен сумме момента инерции основной части маятника I_0 и моментов инерции дополнительных нагрузок $2ml^2$, где l – расстояние от оси вращения до центра дополнительной нагрузки.

Изменяя расстояние l получим:

$$I_1 = 2ml_1^2 + I_0,$$
$$I_2 = 2ml_2^2 + I_0. \qquad (8)$$

Следовательно

$$I_2 - I_1 = 2m(l_2^2 - l_1^2). \qquad (8а)$$

Момент инерции дополнительных нагрузок можно считать равным ml^2 только тогда, когда $l >> h$ (h – высота дополнительной нагрузки). В нашем случае l нужно брать больше 10 см ($l >$ 10 см). Если $l <$ 10 см, при вычислении момента инерции следует использовать теорему Штейнера (момент инерции цилиндра относительно оси вращения, проходящей через центр тяжести перпендикулярно к оси симметрии $I = m\left(\frac{3r_1^2 + 4h^2}{12}\right)$.

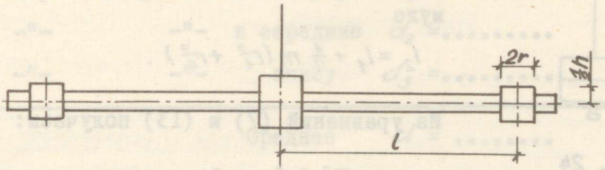


Рис. 23

Учитывая равенство (8а) и (7) получим:

$$I_1 = \frac{2mT_1^2(l_2^2 - l_1^2)}{T_2^2 - T_1^2}. \qquad (9)$$

Подставляя это значение в уравнение (5) получим:

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I_1}{f}} = 2\pi T_1\sqrt{\frac{2m(l_2^2 - l_1^2)}{f(T_2^2 - T_1^2)}},$$

откуда

$$f = \frac{8\pi^2 m(l_2^2 - l_1^2)}{T_2^2 - T_1^2}. \qquad (10)$$

Модуль сдвига определим на основании формулы (6),

$$G = \frac{2fL}{\pi r^4} = \frac{16\pi L m(l_2^2 - l_1^2)}{r^4(T_2^2 - T_1^2)}. \qquad (11)$$

2) Вывод формул, нужных для выполнения задач работы в случае второй установки:

Для определения момента инерции I_I прибавим к системе (рис. 24) один диск, момент инерции которого I можем вычислить по формуле

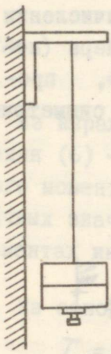


Рис. 24

$$I = \frac{1}{2} m (r_1^2 + r_2^2), \qquad (12)$$

где m – масса диска,

r_1 – внешний радиус диска,

r_2 – радиус внутреннего отверстия.

Следовательно момент инерции системы после прибавления диска можно определить по формуле

$$I_2 = I_1 + \frac{1}{2} m (r_1^2 + r_2^2) . \qquad (13)$$

Из уравнений (7) и (13) получаем:

$$I_1 = \frac{m T_1^2 (r_1^2 + r_2^2)}{2 (T_2^2 - T_1^2)} . \qquad (14)$$

Подставляя это значение в уравнение (5), получим:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{f}} = 2\pi T_1 \sqrt{\frac{m (r_1^2 + r_2^2)}{2 (T_2^2 - T_1^2) f}} ,$$

откуда

$$f = \frac{2\pi^2 m (r_1^2 + r_2^2)}{(T_2^2 - T_1^2)} . \qquad (15)$$

На основании этой формулы определим модуль сдвига:

$$G = \frac{2fL}{\pi r^4} = \frac{4\pi L m (r_1^2 + r_2^2)}{r^4 (T_2^2 - T_1^2)} . \qquad (16)$$

4. Ход работы

I. Определить радиус (r) проволоки. Поскольку относительная ошибка измерения большая, то измерить радиус (r) следует в трех местах микрометром (в каждом месте в двух перпендикулярных направлениях).

2. Измерьте измерительной линейкой длину проволоки (L) (точность до I мм).

а) При работе с первой установкой:

3а. Положите дополнительные нагрузки от оси вращения на расстоянии l_1.

4а. Определите полный период T_1 крутильных колебаний, измеряя время t полных колебаний, число которых дано преподавателем.

5а. Передвиньте добавочные нагрузки от оси вращения на расстояние l_2.

Измерьте снова полный период (T_2) колебания.

Данные опытов запишем по следующей схеме:

I) Поперечник проволоки вверху d_1 =.....

-"- -"- в середине d_2 =.....

-"- -"- внизу d_3 =.....

Среднее d = ...

Радиус проволоки r = ...

2) Длина проволоки L = ...

№	Длина l	Число колебаний	Время	Период
I.				
2.				
3.				
I.				
2.				
3.				

Масса добавочных нагрузок m = ...

Модуль сдвига G = ...

в) При работе со второй установкой.

3в. Определите полный период T_I крутильных колебаний по времени полных колебаний, число n которых дано преподавателем, когда проволоку натягивает только основной диск.

4в. Измерьте радиусы r_1 и r_2 добавочного диска.

5в. Поместите добавочный диск на основной диск и измерьте полный период T_2.

Измерения запишите по следующей схеме.

I) Поперечник проволоки вверху d_1 = ...

–"– –"– в середине d_2 = ...

–"– –"– внизу d_3 = ...

Среднее d = ...

Радиус проволоки r = ...

2) Длина проволоки L = ...

№	Основной диск			Основной + добавочный		
	число колебаний	время	период T_1	число колебаний	время	период T_2
I.						
2.						
3.						

Среднее T_I = ... T_2 = ...

Масса добавочного диска m = ...

Радиус добавочного диска r_1 = ...

Радиус (внутренний) добавочного диска r_2 = ...

Модуль сдвига определим по формуле (I6).

5. Вопросы

I. Что такое сдвиг и закручивание?

2. Сформулируйте закон Гука, применимый к модулю сдвига

3. Что такое модуль сдвига и модуль кручения?

4. В каких единицах измеряется модуль сдвига? Как связаны эти единицы?

5. Что такое напряжение?

6. Что является причиной сдвига?

7. Что называют коэффициентом Пуассона?

8. Как связаны модуль упругости и модуль сдвига?

9. Каксе будет дифференциальное уравнение крутящих колебаний и как из него можно найти период колебания?

10. Что называют моментом инерции материальной точки и тела?

11. Что такое амплитуда, частота и период колебания?

12. Что такое частота и угловая частота? Какая между ними зависимость?

13. Как читается теорема Штейнера?

14. Есть ли другие методы и приемы для определения модуля сдвига?

15. Напишите в порядке возрастания относительные ошибки всех измеренных величин.

16. Можно ли модуль сдвига вычислить из других констант упругости?

17. Какая бывает ошибка при определении числа колебаний?

Литература

1. Путилов К.А. Курс физики, т.I. М., 1963. § 40, 41, 43-46.

2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики, т.I. М., 1958. § 89-91.

3. Савельев И.В. Курс общей физики, т.I. М., 1966. §45.

4. Ландау Д.Д. и др. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. М., 1965. § 101-107.

ОБОРОТНЫЙ МАЯТНИК

I. Задание

Определение ускорения свободного падения.

2. Принадлежности

Оборотный маятник, секундомер, измерительная линейка, цилиндрический стерженек, миллиметровая бумага.

3. Теоретические основы работы

Твердое тело, подвешенное на горизонтальной оси, не проходящей через центр тяжести тела, и качающееся вокруг этой оси под действием силы тяжести, называется физическим маятником.

Упрощенная схема такого маятника: материальная точка подвешенная на невесомой и нерастяжимой нити, называется математическим маятником.

Если на математический маятник не действует никакая другая сила, кроме силы тяжести, то при небольшой амплитуде качаний период полного качания T_M выражается:

$$T_M = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\ , \qquad (I)$$

где l - длина нити подвеса, g - ускорение свободного падения.

Формула применяется только при небольших амплитудах, когда можем считать, что колебания являются гармоническими. Если амплитуда качания $\sim 5^0$, то ошибка, полученная при вычислении по формуле (I), достигает 0,05 %. При амплитуде $\sim 23^0$ эта ошибка будет больше I%.

В настоящей работе ускорение свободного падения определяется при помощи физического маятника, который устроен как оборотный маятник, (см. рис. 25).

Оборотный маятник состоит из стержня NN_1, к которому прикреплены две двугранные стальные призмы p_1 и p_2, обращенные ребрами друг к другу и передвигаемых по стержню

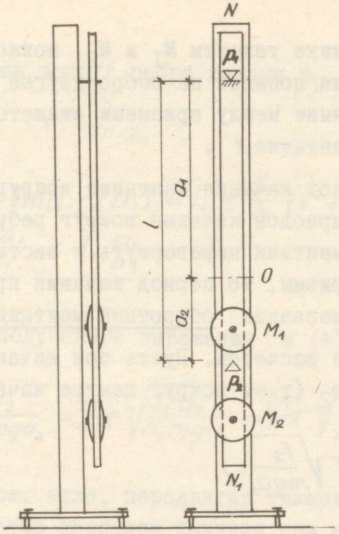


Рис. 25

двух линзообразных тяжестей M_I и M_2. Маятник можно подвесить или на грани p_I, или на грани призмы p_2. Полный период качания физического маятника определяется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mga}}\,, \qquad (2)$$

где I – момент инерции физического маятника относительно оси качания,

a – расстояние центра масс до оси качания и

m – масса маятника.

Сравнивая это выражение с формулой (I), можем представить математический маятник, качающийся с таким же периодом T, как и наш физический маятник. Из (I) и (2) находим длину такого математического маятника:

$$l = \frac{I}{ma}\,. \qquad (3)$$

Длина l называется <u>длиной приведенного маятника</u>. Точку находящуюся на перпендикуляре, опущенном из центра масс на ось качания K, и отстоящую от оси качания на расстоянии l называют <u>центром качания физического маятника</u>.

На оборотном маятнике тяжести M_I и M_2 можно расположить так, что центр качания попадет на ребро другой призмы (p_2), т.е. при этом расстояние между призмами окажется равным длине приведенного маятника l .

В этом случае период качания маятника вокруг ребра одной призмы совпадает с периодом качания вокруг ребра второй призмы. Т.е. если маятник перевернуть и заставить качаться на ребре другой призмы, то период качания при этом не изменится. Отсюда и название оборотный маятник.

Объясним сказанное расчетом. Пусть при качании маятника вокруг ребра призмы p_2 (т.е. вокруг центра качания) период будет

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I_2}{mga_2}}, \qquad (4)$$

где I_2 – момент инерции маятника относительно ребра призмы p_2,

a_2 – расстояние центра масс до ребра призмы p_2.

Напомним, что по теореме Штейнера

$$I_2 = I_0 + ma_2^2,$$

где I_0 – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс и параллельной ребру призмы p_2.

Если тяжести M_I и M_2 расположить, так, что приведенная длина маятника будет равна расстоянию между ребрами призм p_I и p_2, то

$$l = a_1 + a_2 ,$$

где a_1 – расстояние центра масс до ребра призмы p_I.

Тогда

$$I_2 = I_0 + (l - a_1)^2 m = I_0 + ma_1^2 - 2mla_1 + ml^2 =$$

$$= I_0 + ma_1^2 + ml(l - 2a_1).$$

Поскольку момент инерции относительно ребра призмы p_I выражается

$$I_1 = I_0 + ma_1^2$$

и при качании вокруг ребра призмы p_I

$$l = \frac{I_1}{ma_1},$$

то

$$I_2 = I_1 + lm(l - 2a_1) = I_1 + \frac{I_1}{a_1}(l - 2a_1) =$$
$$= I_1 \frac{l - a_1}{a_1} = I_1 \frac{a_2}{a_1}.$$

Подставляя полученное выражение в (4) вместо I_2, имеем:

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I_2}{mga_2}} = 2\pi\sqrt{\frac{I_1 a_2}{a_1 mga_2}} = 2\pi\sqrt{\frac{I_1}{mga_1}} = T_1.$$

Таким образом, если, передвигая тяжести M_I и M_2, удается достичь равенства периодов качания при качании на любой из обоих призм т.е. $T_2 = T_I$, то расстояние между ребрами призм будет равно приведенной длине физического маятника. Измерив это расстояние и период качания, вычислим по формуле (I) ускорение свободного падения g.

Для нахождения расположения тяжести M_I и M_2, при котором обращение маятника не меняет периода качания, поступаем следующим образом. Подвешиваем маятник на ребре призмы p_I и определяем период качания маятника при разных положениях тяжести M_I. Положение тяжести M_2 остается неизменным. Полученные данные: период T и отсчет положения тяжести M_I (на стержне имеется специальная шкала) - наносим на диаграмму и строим по ним кривую. Затем оборачиваем маятник и определяем периоды качания при разных положениях тяжести M_I. Нанося эти данные на ту же диаграмму, получаем другую кривую. Точка пересечения обоих кривых даст нам положение тяжести M_I, при котором период маятника при обращении не меняется, а, следовательно, расстояние между ребрами призм p_I и p_2 равно приведенной длине физического маятника.

Устанавливаем тяжесть M_I в найденном положении и определяем с возможно большей точностью периоды качаний: T_I - при качании на призме p_I и T_2 - при качании на призме p_2. По-

скольку положение тяжести M_I определено (и установлено) не абсолютно точно, то периоды будут несколько различаться.

Чтобы получить по возможности более точный результат, для вычисления ускорения свободного падения используем оба значения периодов.

Так как

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I_0 + ma_1^2}{mga_1}} \quad \text{и} \quad T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I_0 + ma_2^2}{mga_2}},$$

то

$$T_1^2 ga_1 - T_2^2 ga_2 = 4\pi^2(a_1^2 - a_2^2). \qquad (5)$$

Решая последнее уравнение относительно ускорения свободного падения и преобразуя его, получаем выражение

$$g = \frac{8\pi^2 l}{T_1^2 + T_2^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{(T_1^2 - T_2^2)l}{(T_1^2 + T_2^2)(a_1 - a_2)}}. \qquad (6)$$

Чтобы использовать приведенную формулу для вычисления необходимо измерить расстояния от центра масс до граней призм, т.е. величины a_1 и a_2. Для этого кладем на стол цилиндрический стершенек, а на него оборотный маятник так, чтобы, опираясь лишь на цилиндрический стерженек, он оставался в равновесии. Тогда центр масс маятника будет лежать над точкой опоры маятника. Измеряя расстояние от точки опоры до граней призм, найдем a_1 и a_2.

4. Ход работы

I. Познакомьтесь с устройством оборотного маятника и с возможностями его регулирования.

2. Установите штатив маятника в вертикальном положении, обеспечив качание маятника с минимальным сопротивлением.

3. Закрепите тяжесть M_2 в положении, указанном руководителем практикума.

4. Определите период качания маятника при пяти разных

положениях тяжести M_I (период определяется измерением времени сотни качаний).

5. На основе полученных данных постройте график положение тяжести M_I - период качания.

6. Определите периоды качания на другой призме при 5-ти положениях тяжести M_I и занесите данные на график.

7. Определите периоды качания T_I и T_2 на обоих призмах при найденном положении тяжести M_I.

8. Определите центр масс маятника, положив его горизонтально на цилиндрический стержень так, чтобы маятник был в равновесии. Измерьде расстояния (a_1 и a_2) от центра масс до ребер призм.

9. Вычислите значение g , пользуясь формулой (I) и формулой (6). Сравните результаты.

5. Вопросы

I. Что такое момент инерции?

2. Что такое свободная ось и каковы ее свойства?

3. Что такое главные оси инерции?

4. От чего зависит ускорение свободного падения?

5. Что такое момент импульса и каковы его свойства?

6. Как выражается кинетическая энергия вращающегося тела?

7. Почему у всех точек абсолютно твердого тела одна и та же угловая скорость?

8. Что такое вектор угловой скорости?

9. Какие параметры влияют на длительность периода качания маятника? Как?

IO. Как выражается сила, действующая на ось вращения маятника в момент прохождения маятника через положение равновесия.

Литература

Путилов К.А. Физика I. М., 1963. § 5, 36, 37, 56, 57.

КОЭФФИЦИЕНТ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОДЫ

I. Задание

Определить коэффициент внутреннего трения воды по Пуазейлю.

2. Принадлежности

Прибор для определения вязкости воды, линейка, секундомер, сосуд для воды, мензурка или весы, термометр.

3. Теоретические основы работы

При ламинарном потоке сила внутреннего трения между двумя слоями жидкости дается формулой Ньютона

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S, \qquad (I)$$

где S – площадь соприкосновения рассматриваемых слоев,
η – коэффициент внутреннего трения,
$\frac{dv}{dx}$ – градиент скорости в направлении, перпендикулярном площади S (то-есть изменение скорости при перемещении на единицу длины перпендикулярно потоку и площади S).

Таким образом, из приведенной формулы выясняется физический смысл коэффициента внутреннего трения: если в формуле (I) площадь S и градиент скорости $\frac{dv}{dx}$ единичны, то $\eta = F$. Это значит, что коэффициент внутреннего трения равняется силе, действующей между двумя слоями жидкости единичной площадью, на которой градиент скорости равняется единице.

Пуазейлем дана формула для расчета объема жидкости V, вытекающей через капилляр с радиусом r и длиной l за время t :

$$V = \frac{\pi r^4 t}{8 l \eta} p, \qquad (2)$$

где p – разность давлений на концах капилляра, а
η – коэффициент внутреннего трения.

Решая (2) относительно η , получим

$$\eta = \frac{\pi r^4 t}{8 l V} P. \qquad (3)$$

Устройство прибора схематически изображено на рис. 26.

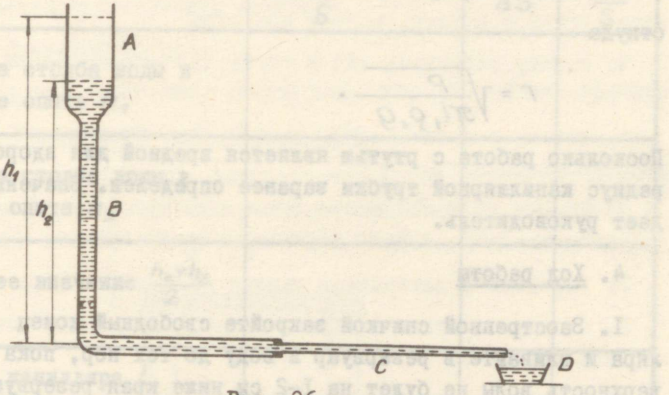


Рис. 26

Стеклянный резервуар (А) кончается длинной (около I м) и широкой (диаметр IO– 20 мм) коленчатой трубкой (В). В нижний конец трубки при помощи резиновой пробки горизонтально вставлена капиллярная трубка С, под открытым концом которой поставлен сосуд D .

Объем воды, вытекший через капилляр в сосуд D , определяется формулой (2). Разность давлений на концах капиллярной трубки зависит от высоты столба воды над капилляром, но так как она почти равномерно уменьшается от первоначального значения h_1 до h_2 , то мы вправе взять среднее значение $h = \frac{h_1 + h_2}{2}$ и считать его постоянным в продолжение всего опыта. Давление столба жидкости, как известно, дается формулой:

$$p = \rho g h . \qquad (4)$$

Радиус капилляра определяется следующим образом. В высушенный чистый капилляр засасывается столб ртути длиной IOO – I50 мм. Измеряется его длина l, с точностью до I мм. Затем этот столбик выливается в легкую стеклянную чашечку и на аналитических весах определяют его вес Р.

Объем V_1 этого цилиндрического столбика выражается

$$V_1 = \frac{P}{\rho_1 g} = \pi r^2 l_1, \qquad (5)$$

откуда

$$r = \sqrt{\frac{P}{\pi l_1 \rho_1 g}}. \qquad (6)$$

Поскольку работа с ртутью является вредной для здоровья, то радиус капиллярной трубки заранее определен. Значение его дает руководитель.

4. Ход работы

I. Заостренной спичкой закройте свободный конец капилляра и вливайте в резервуар A воду до тех пор, пока поверхность воды не будет на I–2 см ниже края резервуара (см. рис. 26).

2. Измерьте линейкой высоту столба воды h_1 над свободным концом капилляра и длину капилляра l.

3. Следя за секундной стрелкой часов, откройте отверстие капилляра и занесите в протокол момент открытия капилляра. Дайте воде вытекать и собираться в сосуд D до тех пор, пока поверхность воды в резервуаре A не понизится примерно на I0–I5 см. Закройте капилляр и занесите в протокол показание часов.

4. Определите высоту столба жидкости h_2 и взвесьте с точностью до I г массу воды, вытекший через капилляр в сосуд D.

5. Так как внутреннее трение сильно зависит от температуры следует измерять и температуру вытекающей воды. Измеренные величины занесите в следующую таблицу:

Измеряемые величины	Результат измерения S	Погрешность	
		ΔS	$\frac{\Delta S}{S}$
Высота столба воды в начале опыта h_1			
Высота столба воды в конце опыта h_2			
Среднее значение $\frac{h_1+h_2}{2}$			
Длина капилляра l			
Объем вытекшей воды V			
Радиус капилляра r			
Продолжительность вытекания t			
Температура воды t^o			
Коэффициент вязкости воды η			

5. Вопросы

I. Определить размерность коэффициента вязкости в системе СИ.

2. Что означает градиент скорости $0{,}I \ \frac{I}{\text{сек}}$?

3. Какое направление имеет сила трения, действующая на данную воображаемую плоскость в движущейся жидкости?

4. Какая жидкость имеет наибольший коэффициент внутреннего трения - бензин, молоко или вода?

5. Почему резервуар (А) и труба (В) должны иметь большие размеры?

6. Почему при вычислении давления не учитывают атмосферного давления?

7. Почему за конечный уровень воды нужно взять какой-нибудь уровень в сосуде (А), а не в трубе (В)?

8. Определить давление в океане на глубине I км.

9. Почему во время измерения в воде не должно быть пузырьков воздуха?

IO. Если увеличить длину капиллярной трубки С, то начиная с некоторой длины ее, вода не вытекает из капиллярной трубки. Почему?

II. Почему для измерения радиуса капиллярной трубки применяется ртуть?

I2. Почему надо выбрать большое (а не малое) понижение уровня воды в сосуде (А)?

Литература

I. Путилов К.А. Курс физики. I, М.,I963. §48,49,5I,54, 94,95,II5.

2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики I. М., I958. § 40 -42,56,57,82.

ВИСКОЗИМЕТР КЭМПФА

I. Задание

Определение вязкости жидкости.

2. Принадлежности

Вискозиметр Кэмпфа, секундомер, дополнительные грузики.

3. Описание вискозиметра Кэмпфа

Вискозиметр Кэмпфа представляет собой весьма удобный технический прибор для измерения вязкостей выше 3 пуазов. Схема его устройства показана на рис. 27.

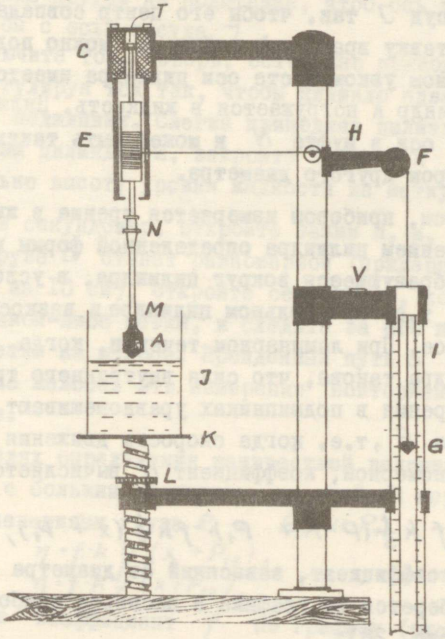


Рис. 27

Его главная составная часть - это цилиндр А, подвешенный на особом подшипнике. Ось цилиндра затягивается соленоидом С наверх, так что острие оси упирается в подшипник из твердого камня (агат или рубин). Ток в соленоиде С регулируется так, что цилиндр с осью практически висит в магнитном поле соленоида, то-есть сила, с которой острие оси упирается в

подшипник, минимальна. Этим достигается весьма малая величина трения в подшипнике. В средней части оси имеется цилиндр Е с винтовыми пазами, на который наматывается нить, перекинутая через блок F .

Грузом G при помощи намотанной на цилиндр Е нитки ось приводится во вращение. Зажимом Н действие груза выключается. Груз G движется свободно в цилиндрическом желобе I, защищающем груз от воздушных течений и пр. Цилиндрический сосуд J с исследуемой жидкостью ставится на подставку К, на поверхности которой имеются концентрические круги, центром которых является ось цилиндра А. По этим кругам устанавливается сосуд J так, чтобы его центр совпадал с осью цилиндра. Подставку вращением гайки L можно поднимать и опускать. В самом узком месте оси цилиндра имеется метка М, до которой цилиндр А погружается в жидкость. Цилиндр А отвинчивается от оси в муфте N и может быть таким образом заменен цилиндром другого диаметра.

Таким образом, прибором измеряется трение в жидкости, вызванное вращением цилиндра определенной формы и диаметра. Течение, образующееся вокруг цилиндра, в условиях работы аппарата, т.е. при большом цилиндре и вязкости выше 3-х пуаз, ламинарное. При ламинарном течении, когда скорость вращения цилиндра такова, что сила внутреннего трения жидкости и сила трения в подшипниках уравновешивают тяжесть падающего груза G , т.е. когда скорость движения груза G становится равномерной, коэффициент η вычисляется по формуле

$$\eta = f \cdot k \frac{t}{S}(P - F + P_1) = f k \frac{t}{S}(x + P_1),$$

где f – коэффициент, зависящий от диаметра сосуда, берется из графика в паспорте прибора (см. рис. 28);

k – постоянная цилиндра А (в случае большого цилиндра $k = 19{,}3$);

P_1 – вес добавочного груза;

P – вес подставки;

F – сила трения в подшипниках цилиндра А и блока F ;

$\frac{s}{t}$ – скорость равномерного падения груза;

Разницу $P - F = x$, называемую эффективным весом подставки, определяем каждый раз опытным путем.

4. Ход работы

I. Установите прибор при помощи уровня в горизонтальное положение. Этим достигается вертикальная установка желоба l, тогда груз G может двигаться свободно, не прикасаясь к стенкам желоба.

2. Удостоверившись, что цилиндр А совершенно сухой и чистый, вращением гайки L поднимите сосуд J так, чтобы уровень жидкости был около метки М. При этом проверьте по концентрическим кругам на подставке, чтоб ось цилиндра A совпала бы с осью сосуда J.

3. Включите ток. Теперь, осторожно приподнимите цилиндр рукой, регулируя ток так, чтобы цилиндр едва-едва упирался в верхний подшипник. Слегка приподняв цилиндр А, намотайте нить в пазы цилиндра Е, закройте зажим Н и регулируйте окончательно высоту уровня жидкости на метку М.

4. Взяв секундомер, откройте зажим Н, и, когда скорость падения груза G станет равномерной (примерно после падения груза на I0 см), откройте секундомер, когда груз находится у какой-либо метки, и следите за его падением до последней метки на желобе. Пройденный путь s определяется по шкале на желобе. Эти измерения повторяем по крайней мере 5 раз.

5. В целях определения неизвестной величины x проводим измерения с большим цилиндром, по крайней мере с двумя разными значениями груза $P_1 - P_{11}$ и P_{12}:

$$\eta = f \cdot k \frac{t_1}{s}(x + P_{11}),$$
$$\eta = f \cdot k \frac{t_2}{s}(x + P_{12}).$$

Найдите коэффициент f по графику (рис. 28).

6. Если жидкость с очень большой вязкостью, то цилиндр с большими размерами не подходит. В этом случае берут цилиндр с малыми размерами и определяют соответствующий коэффициент k_I в жидкости с известной вязкостью. В данном случае коэффициент малого цилиндра определяют, используя ту же жидкость, но не прибавляя добавочных грузов на G ($P_1 = 0$): $\eta = f k_1 \frac{t_3}{s} x$.

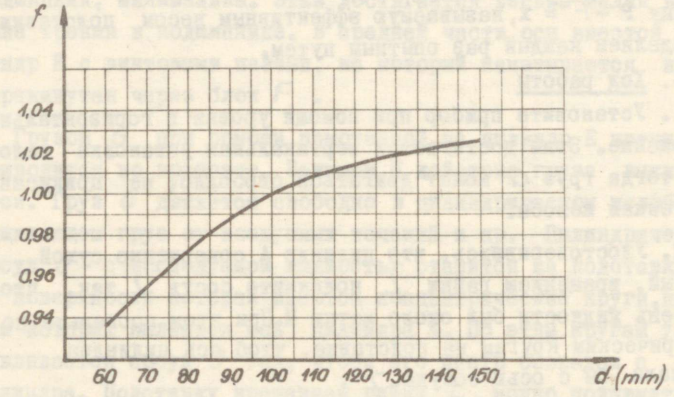


Рис. 28

7. Для получения величин $\varkappa$, η и K_I проведите три пятикратных опыта: два с большим цилиндром при двух различных P_I и один опыт с малым цилиндром без добавочных грузов ($P_I = 0$). Данные внесите в таблицу:

№	Большой цилиндр		Малый цилиндр
	Добавочный груз P_{II} = ...	Добавочный груз P_{I2} = ...	Добавочный груз P_I = 0
I.	t_1 = ... сек	t_2 = ... сек	t_3 =.... сек
2.	t_1 = ... сек		
3.			
4.			
5.			

Средн. t_1=.... сек Средн. t_2=.... сек Средн. t_3 =..... сек.

$\frac{t_1}{S}$ =..... $\frac{t_2}{S}$ =..... $\frac{t_3}{S}$ = ...

Внутренний диаметр сосуда d = ... мм

Коэффициент сосуда f = (из графика на рис. 28).

8. По средним данным опыта получаем 3 уравнения с тремя неизвестными, из которых определим η , k_I и x.

9. Оценивая погрешности измеряемых величин s и t (погрешности остальных величин считаем малыми по сравнению с последними и не учитываем), определяем погрешности измеренных величин $\Delta\eta, \Delta k, и\ \Delta x$.

5. Вопросы

I. Определить размерность коэффициента вязкости в системе СИ.

2. Что означает градиент скорости $I0\ \frac{I}{сек}$?

3. Какое направление имеет сила трения, действующая на данную воображаемую плоскость в движущейся жидкости?

4. Какая жидкость имеет наибольший коэффициент внутреннего трения - керосин, молоко, вода или спирт?

5. Почему должны совпадать оси сосуда J и цилиндра A?

6. Почему ось цилиндра A и сосуд J должны иметь вертикальное положение?

7. Определить размерность коэффициента f .

8. Почему этот метод не применим для определения коэффициента вязкости воды?

9. Почему не сразу устанавливается равномерное движение груза G ?

I0. От чего зависит сила трения при движении данного тела в жидкости?

II. Почему при турбулентном течении сила трения больше, чем при ламинарном течении жидкости ?

I2. Почему коэффициент вязкости у жидкостей с температурой убывает, а у газов - возрастает?

Литература

I. Путилов К.А. Курс физики I. М., I963. § 48,5I,53,54, 94,95.

2. Фриш С.Э. и Тиморева А.В. Курс общей физики I. М., 1958. § 40 - 42, 56, 57.

МЕХАНИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ ТЕПЛОТЫ

I. Задание

Экспериментальное определение механического эквивалента теплоты.

2. Принадлежности

Прибор Каллендера с нужными средствами (пружинные весы, лента, грузы), термометр, мензурка, воронка.

3. Теоретические основы работы

При работе сил трения затраченная механическая энергия превращается в тепловую энергию. И наоборот, затрачиваемая на совершение работы тепловая энергия в тепловых машинах превращается в механическую энергию. При таких процессах одна и та же физическая величина - энергия - переходит из одного вида в другой и при этом выполняется закон сохранения энергии.

Исторически вышло так, что разные виды одной и той же физической величины - энергии начали измерять в разных единицах, тепловую энергию измеряли в калориях (кал) и килокалориях (ккал), механическую энергию (работу) - в джоулях (дж), в киллограммометрах (кГм), в эргах (эрг) и т.д. Позднее, когда открыли превращение энергии из одного вида в другой, в физике возникли термины "механический эквивалент теплоты" и "термический эквивалент работы". Открыли, что при затрачивании определенного количества механической энергии всегда получаем определенное количество тепловой энергии и наоборот. При полном превращении определенное количество теплоты дает всегда одно и то же количество работы.

Механический эквивалент теплоты показывает, сколько нужно совершить работы (затратить механической энергии), чтобы получить одну единицу количества тепла при превращении работы в теплоту. Зная совершенную работу А и соответственно

полученное эквивалентное количество тепла Q, можно найти механический эквивалент теплоты следующим образом:

$$E = \frac{A}{Q} .$$

Если оба количества энергии были измерены в одинаковых единицах, тогда E = I (закон сохранения энергии). Следует, что эквиваленты означают ничто иное, как соотношение между единицами количества теплоты и работы. При измерении всех видов энергии в одинаковых единицах отпадает необходимость в эквивалентах. Такое положение возникло в связи с использованием системы единиц СИ. Каждый вид энергии в этой системе измеряют в джоулях (дж).

При помощи прибора Каллендера измеряют с одной стороны совершенную работу A, с другой стороны - полученное количество тепла Q .

Прибор Каллендера представляет собой цилиндрический калориметр, укрепленный на горизонтальной оси. На боковую поверхность цилиндра одевается система лент, которые натягиваются грузами. При вращении цилиндра возникает трение, вследствие которого работа превращается в тепло.

Работу вычисляем как произведение силы трения на пройденный путь

$$A = Fs .$$

Пройденный путь равняется длине окружности цилиндра, умноженной на число оборотов. Если число оборотов при опыте равно n , тогда путь

$$s = n\pi D,$$

где D - диаметр цилиндра.

Силу трения F следует вычислять соответственно системе натягивания лент. Эта система должна быть такой, чтобы при опыте сила трения была достаточно постоянной и чтобы эту силу можно было достаточно точно измерить.

В данном приборе ленту с грузами натягивают с обеих сторон (см. рис. 29). Если цилиндр не вращается, груз P опирается на основание. Величину груза P_2 выбираем опытным путем. Для получения равновесия используются еще пружин-

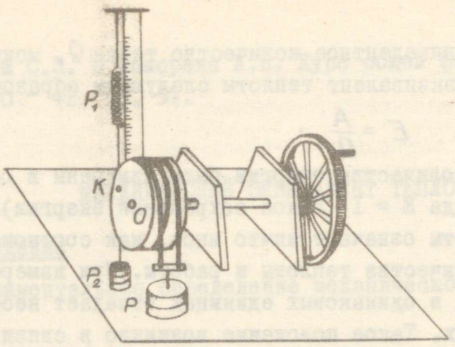


Рис. 29

ные весы P_I, которые связаны с грузом P_2. Если величина груза P_2 выбрана правильно и цилиндр вращается равномерно, тогда груз P остается все время на одной высоте и показание пружинных весов P_I не изменяется.

Величину силы трения вычисляем следующим образом:

$$F = P - (P_2 - P_I) = P + P_I - P_2,$$

и вся работа

$$A = Fs = (P + P_1 - P_2)\pi Dn.$$

Эта работа идет на нагревание боковой поверхности цилиндра. Так как лента проводит тепло плохо, то практически все тепло идет в калориметр. Калориметр наполнен водой, которая тоже нагревается. Если масса и удельная теплоемкость для калориметра m_1 и c_I, и для воды соответственно m_2 и c_2, то количество тепла, полученное калориметром и водой

$$Q = (c_1 m_1 + c_2 m_2)(t_2 - t_1),$$

где $t_2 - t_1$ - изменение температуры калориметра в течение опыта.

Считая, что вся теплота, которую мы получим, перешла в цилиндр и в воду, можно написать

$$E = \frac{A}{Q} = \frac{(P + P_1 - P_2)\pi Dn}{(m_1 c_1 + m_2 c_2)(t_2 - t_1)}.$$

4. Ход работы

I. Измерьте диаметр цилиндра.

Результаты измерения занесите в следующую таблицу:

I.	Отсчет счетчика оборотов	n_1
		n_2
2.	Грузы	P
		P_2
3.	Средний отсчет пружинных весов	P_1
4.	Сила трения	F
5.	Диаметр цилиндра	D
	Периметр цилиндра	πD
6.	Работа, совершенная силой трения	A
7.	Масса цилиндра (по данным паспорта)	m_1
	Удельная теплоемкость цилиндра	c_1
8.	Масса воды	m_2
	Удельная теплоемкость воды	c_2
9.	Температура вначале	t_1
	-"- после	t_2
IO.	Возникшее количество теплоты	Q
II.	Механический эквивалент теплоты	E

2. Оденьте на калориметр ленту, убедившись заранее, что наружная поверхность цилиндра сухая. Подвесьте грузы и закрепите пружинные весы. Выберите P_2 таким образом, чтобы при равномерном вращении цилиндра грузы и пружинные весы были в равновесии.

3. Залейте в калориметр приблизительно 300 г воды (взвесьте с точностью до 0,1 г) температуру которой (t_1) подберите на 2 – 3°С ниже комнатной.

4. Запишите показание счетчика оборотов n_1. Теперь равномерно вращайте цилиндр так, чтобы грузы были в равновесии и показание пружинных весов P_I было почти постоянное.

5. Температуру воды измеряйте через отверстие на оси цилиндра обычным термометром. Цилиндр должен вращаться до тех пор, пока температура будет настолько выше комнатной, насколько вначале была меньше. После окончания вращения подождите, пока температура больше не будет повышаться, и зарегистрируйте показание термометра t_2.

6. Запишите показание счетчика оборотов n_2.

5. Вопросы

1. Работа, теплота, энергия, их единицы.

2. Какие потери теплоты имеются при таком методе измерения?

3. Почему вначале выбирают температуру воды на 2-3° ниже комнатной, а в конце настолько же выше?

4. Как выражают при вращательном движении работу через момент силы?

5. Что называют термическим эквивалентом работы?

Литература

1. Путилов К.А. Курс физики I. М., 1963. § 128.

2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики I. М., 1955. § 64.

3. Павлов В.И. Механика. Молекулярная физика. М., 1955. Гл. II, § 3.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ ТВЕРДОГО ТЕЛА

I. Задание

Определение удельной теплоемкости твердого тела методом смешивания.

2. Принадлежности

Калориметр, термометр, исследуемое твердое тело, термостат (баня), электрическая плитка, технические весы.

3. Теоретические основы работы

При определении удельной теплоемкости методом смешивания нагретое (или охлажденное) исследуемое тело приводится в соприкосновение с телом (или телами) известной теплоемкости. Определяя количество теплоты, переходящее при теплообмене от более нагретого тела к более холодному телу можем вычислить удельную теплоемкость исследуемого тела. Чтобы при теплообмене часть теплоты не терялась в окружающее пространство, используется при измерениях особый прибор, называемый калориметром. Калориметр состоит из двух сосудов, наружного (А) и внутреннего (В), входящих один в другой и изолированных друг от друга (рис. 30). В калориметре, применяемом на практикуме, изолятором обычно является воздух. Калориметр снабжен крышкой с двумя отверстиями, через которые проходят мешалка S, и термометр T .

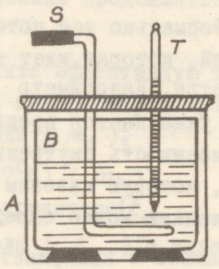


Рис. 30

Если вода в калориметре имеет температуру ниже, чем температура опущенного в нее тела, то она нагревается, а тело охлаждается до тех пор, пока их температуры не сравняются. По закону сохранения

энергии количество теплоты, отданное телом, равно количеству теплоты, полученному калориметром и водой.

Пусть масса внутреннего сосуда калориметра равна m_1, его удельная теплоемкость c_1, масса воды в калориметре m_2, удельная теплоемкость воды c, начальная температура воды и калориметра t_1, масса испытуемого тела m, его удельная теплоемкость c_x, начальная температура t и общая конечная температура калориметра и тела θ.

Тогда результат указанного опыта можно выразить уравнением:

$$c_x m(t-\theta) = c_1 m_1(\theta - t_1) + c m_2(\theta - t_1). \qquad (I)$$

Из уравнения (I) определяется искомая удельная теплоемкость:

$$c_x = \frac{(c_1 m_1 + c m_2)(\theta - t_1)}{m(t-\theta)}.$$

Надо иметь в виду, что, кроме обмена энергией между исследуемым телом, водой и калориметром, часть теплоты идет на нагревание термометра и мешалки. Также возможен такой обмен теплоты между телом и окружающими калориметр предметами. При измерениях необходимо по возможности уменьшить потери энергии и вводить в вычисления поправки, учитывающие ту часть энергии, которая передается в процессе опыта окружающей среде.

Эти потери в большей мере учтены при вычислении эффективной теплоемкости калориметра.

Формально все потери теплоты можно складывать с той теплотой, которая идет на нагревание внутреннего сосуда калориметра. Калориметр как бы поглощает больше теплоты, чем это указывается произведением $c_1 m_1(\theta - t_1)$. Поэтому заменим теплоемкость внутреннего сосуда калориметра $c_1 m_1$ величиной q, которую назовем эффективной теплоемкостью калориметра. Последнюю можно определить при помощи дополнительного опыта.

Нальем в калориметр известное количество воды массой m_3 температура (температуру воды в калориметре отсчитывают непосредственно перед прибавлением следующего количества во-

ды) которой t_3 на несколько градусов ниже комнатной. К этому прибавим количество воды массой m_4, температура (температуру отсчитывают непосредственно перед наливанием в калориметр) которой t_4 на несколько градусов выше комнатной. Теперь начинаем перемешивать мешалкой воду в калориметре и одновременно следим за повышением температуры. Когда температура перестанет подниматься, отсчитываем конечную температуру t_5.

Количество теплоты, отданное теплой водой, равно количеству теплоты, полученному холодной водой и калориметром (эффективная теплоемкость q):

$$cm_4(t_4 - t_5) = cm_3(t_5 - t_3) + q(t_5 - t_3).$$

Из предыдущего уравнения определяют искомую эффективную теплоемкость калориметра:

$$q = c\left(m_4 \frac{t_4 - t_5}{t_5 - t_3} - m_3\right). \qquad (3)$$

4. Ход работы

I. Исследуемое тело дает преподаватель. Взвесьте данное тело на технических весах (m).

2. Налейте в баню (не во внутреннюю полость бани, куда потом помещается исследуемое тело) воду до половины ее объема и поставьте на электрическую плиту.

Опустите исследуемое тело, держа за нить, во внутреннюю полость бани. Чтобы тело могло принять температуру кипения воды (t), кипение в бане должно продолжаться минут I0-I5.

3. Во время нагревания тела определите эффективную теплоемкость калориметра. Взвесьте пустой калориметр (m_0) и налейте в калориметр I00 г холодной воды (m_3).

4. Взвесьте I00 г теплой воды (25-27°С) (m_4).

5. Определите температуру воды в калориметре (t_3).

6. Определите температуру теплой воды (t_4) и налейте ее в калориметр.

Закройте калориметр крышкой. Перемешивайте воду в калориметре и одновременно следите за повышением температуры.

Зафиксируйте максимальную температуру (t_5).

7. Данные для вычисления эффективной теплоемкости занесите сразу в следующую таблицу:

Результаты измерений	m_0	m_0+m_3	m_3	m_4	t_3	t_4	t_5	c	q
Отсчеты и единицы измерения									

Эффективную теплоемкость калориметра вычислите по формуле (3).

8. Вылейте воду из калориметра. Налейте в него холодной воды из-под крана приблизительно до 2/3 его объема и взвесьте вместе с водой (m_c+m_2).

9. Закройте его крышкой, опустите через соответствующее отверстие термометр в воду. Помешивайте воду в калориметре и следите за повышением температуры. Желательно, чтобы температура воды была на несколько градусов ниже комнатной.

10. Если тело в бане достаточно нагрелось, измерьте температуру воды в калориметре (t_1) и опустите исследуемое тело немедленно, но осторожно в воду калориметра. Держите при этом тело за нить (на дно не опускать) и помешивайте воду в калориметре. Калориметр должен быть закрыт крышкой. Следя за повышением температуры воды, зафиксируйте ее максимальную величину (θ).

11. Результаты опыта для определения удельной теплоемкости занесите в следующую таблицу:

Измеряемая величина	Результат измерений S и единица измерения	Погрешность	
		ΔS	$\frac{\Delta S}{S}$
Масса исследуемого тела m			
Масса калориметра с водой m_0+m_2			
Масса воды m_2			
Начальная температура воды t_1			
Начальная температура исследуемого тела t			
Конечная температура θ			
Удельная теплоемкость c_x			

Удельную теплоемкость исследуемого тела вычислите по формуле (2), заменяя теплоемкость внутреннего сосуда калориметра $c_1 m_1$ эффективной теплоемкостью q .

I2. Найдите, какая из измеряемых величин имеет наибольшую относительную ошибку. Проверьте неравенство $c_1 m_1 < q$.

Величины c_1 и m_1 скажет преподаватель.

5. Вопросы

I. Дать определение единиц количества теплоты (кал, ккал, дж).

2. Сколько калорий содержится в I джоуле (дж)?

3. Что называется удельной теплоемкостью твердого тела?

4. Какая разница между понятиями теплоемкость и удельная теплоемкость?

5. Единицы удельной теплоемкости.

6. Как можно измерить удельную теплоемкость твердого тела?

7. По какому принципу составляют уравнение теплового баланса?

8. Чему равна удельная теплоемкость воды в системе СИ?

9. Сколько требуется калорий, чтобы m граммов воды при температуре t_1 нагревалось до температуры t_2 ?

10. Имеются куски меди, олова и алюминия, одинаковые по объему. Какой из этих кусков обладает наибольшей и какой наименьшей теплоемкостью?

11. Почему нагревают тело сухим, а не держа его в кипящей воде?

12. Всегда ли кипит вода при температуре $100^{\circ}C$?

13. Почему нагретое тело нельзя опускать на дно калориметра?

14. Зависит ли удельная теплоемкость вещества от исходной температуры, с которой началось нагревание?

15. Опишите строение калориметра.

Литература

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики I. М.,1964. § 19, стр. 106, § 32, стр. 156.

2. Путилов К.А. Курс физики I. М., 1963, § 78, стр. 318 § 127, стр. 501.

3. Яворский Б.М. и др. Курс физики I. М., 1965. § 15.4, стр. 323.

4. Бурдун Г.Д. и др. Международная система единиц. М., 1964. § 9, стр. 25, § 18, стр. 51, § 25, стр. 96.

5. Аристов Е.М. Физические величины и единицы их измерения. Л., 1963. Стр. 45 - 56.

6. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики I. М.,1967. § 207, 208, 209.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ ВОДЫ

I. Задание

Определение удельной теплоты парообразования воды при температуре кипения.

2. Принадлежности

Калориметр, термометр, кипятильник , технические весы, электрическая плита, колба.

3. Теоретические основы работы

Если воду или какую-нибудь другую жидкость нагреем до температуры кипения и будем продолжать нагревание, то мы не заметим дальнейшего повышения температуры жидкости. Сообщаемая ей теплота идет при этом на превращение жидкости в пар, т.е. на преодоление молекулярных сил сцепления и на работу расширения.

Количество теплоты, необходимое для превращения единицы массы жидкости при температуре кипения в пар, называется удельной теплотой парообразования.

При охлаждении пар, конденсируясь в жидкость, будет отдавать то же количество теплоты. На этом принципе и основано определение удельной теплоты парообразования.

М г пара при температуре кипения t , превратившись в жидкость при той же температуре, выделит $\lambda \cdot M$ калорий теплоты, где λ - удельная теплота парообразования. В калориметре этот сжиженный пар смешивается с водой температуры t_1 и охлаждаясь нагревает ее до конечной температуры смеси θ , при этом передается количество теплоты

$$cM(t-\theta),$$

где c - удельная теплоемкость жидкости.

Следовательно общее количество теплоты, отданное паром, будет

$$L M + c M (t - \theta). \qquad (I)$$

Это количество теплоты пойдет на нагревание воды и внутреннего сосуда калориметра. Теплотой, которая пойдет на нагревание термометра и мешалки, пренебрегаем.

Если масса воды в калориметре будет m граммов, то количество теплоты, которое пойдет на нагревание воды и калориметра, выражается так:

$$cm(\theta - t_1) + m_1 c_1 (\theta - t_1), \qquad (2)$$

где m_1 – масса внутреннего сосуда калориметра и
c_1 – его удельная теплоемкость.

Это количество теплоты должно равняться тому количеству теплоты (I), которое отдали пар при конденсации и жидкость, образовавшаяся из пара, при ее охлаждении до окончательной температуры θ, т.е.

$$L M + M c (t - \theta) = mc(\theta - t_1) + m_1 c_1 (\theta - t_1).$$

Отсюда получим формулу для вычисления удельной теплоты парообразования:

$$L = \frac{(mc + m_1 c_1)(\theta - t_1) - Mc(t - \theta)}{M}. \qquad (3)$$

При точных измерениях необходимо учитывать то количество теплоты, которое идет на нагревание термометра и мешалки, а также то количество теплоты, которое передается в процессе опыта окружающей среде. В большей части эти потери теплоты учтены при вычислении эффективной теплоемкости калориметра (см. стр. I39). Если мы определим эффективную теплоемкость калориметра q, тогда заменим теплоемкость сосуда c, m_1 в формуле (3) на q.

4. Ход работы

I. Налейте в кипятильник до трех четвертей его объема воды и поставьте его на электрическую плиту.

2. Возьмите пустой калориметр и определите его массу m_0 на технических весах.

3. Налейте калориметр до трех четвертей его объема холодной водой и взвесьте снова, чтобы найти массу воды m .

4. Если из кипятильника выходит уже достаточно пара, то сравните температуру воды в калориметре t_1 с комнатной температурой t_0 .

5. Введите конец трубки в воду калориметра, где пар будет конденсироваться. Осторожно смешивайте воду и наблюдайте за повышением температуры. Температуру калориметра поднимайте на столько же градусов выше комнатной, на сколько температура воды раньше была ниже комнатной.

Чтобы устранить попадание из трубки конденсированных капель воды в калориметр, используют при точных измерениях ловушку, через которую проходит только пар. При отсутствии ловушки нужно держать калориметр выше кипятильника ,чтобы конденсирующийся (частично) в трубке пар стекал обратно.

6. Когда нужная температура достигнута, сначала вынимают трубку из калориметра, а затем прекращают нагревание. Запишите конечную температуру.

7. Выньте термометр и взвесьте калориметр с водой еще раз, чтобы определить ту массу воды, которая прибавилась от конденсации пара (M)

8. Уточните задание у преподавателя. Если лабораторную работу требуется выполнить без определения эффективной теплоемкости калориметра, то преподаватель скажет массу внутреннего сосуда калориметра (m_1) и удельную теплоемкость калориметра (c_I). В противном случае определите эффективную теплоемкость калориметра, как указано на стр. I39.

9. Результаты измерений и вычислений занесите в следующую таблицу:

Измеряемая величина		Результат и единица измерения S	Погрешность	
			ΔS	$\frac{\Delta S}{S}$
Масса пустого калориметра	m_0			
Масса калориметра с водой	m_0+m			
Масса воды	m			
Начальная температура воды	t_1			
Комнатная температура	t_0			
Температура смеси	θ			
Масса конденсированного пара	M			
Температура пара	t			
Теплоемкость калориметра	$q=c_1 m_1$			
Удельная теплота парообразования воды	L			

Определение эффективной теплоемкости калориметра

Измеряемая величина	m_0+m_3	m_3	m_4	t_3	t_4	t_5	q
Результат и единица измерения							

5. Вопросы

I. Дать определение единиц количества теплоты (кал, ккал, дж). Найти их соотношение.

2. Что называется удельной теплотой парообразования?

3. Единицы удельной теплоты парообразования.

4. Что называется испарением?

5. Какая разница между насыщающим и ненасыщающим паром?

6. Сформулировать закон кипения.

7. По какому принципу составляют уравнение теплового баланса?

8. Как зависит температура кипения от давления?

9. Почему вода идет из калориметра в колбу, если погасить горелку раньше, чем вынуть трубку из калориметра?

10. Определить количество теплоты, требующееся для превращения 1 кг воды, взятой при $0^{\circ}C$, в пар при $100^{\circ}C$.

11. Какое количество теплоты необходимо, чтобы превратить 1 кг льда при $0^{\circ}C$ в пар при $100^{\circ}C$?

12. Удельная теплота парообразования воды больше, чем эфира. Почему же эфир, если им смочить руку, сильнее охлаждает ее, чем вода в таких случаях?

13. Как зависит удельная теплота парообразования от температуры?

14. Чему равняется удельная теплота парообразования воды при температуре кипения при атмосферном давлении?

Литература

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики I. М., 1964. § 19, стр. 106, § 39 стр. 200.

2. Путилов К.А. Курс физики I. М., 1963. § 78, стр. 318, § 108, стр. 434, § 109, стр. 441.

3. Бурдин Г.Д. и др. Международная система единиц. М., 1964. § 9, стр. 25, § 25, стр. 96, § 18, стр. 51.

ПОСТОЯННАЯ ПУАССОНА

I. Задание

Определение отношения молярных (удельных) теплоемкостей воздуха методом Клемана-Дезорма.

2. Принадлежности

Прибор Клемана и Дезорма, наручные часы.

3. Теоретические основы работы

У газов следует различать две молярные теплоемкости: молярная теплоемкость газа при постоянном давлении C_p и молярная теплоемкость при постоянном объеме C_V.

$C_p > C_V$, так как, нагреваясь при постоянном давлении, газ расширяется и совершает при этом внешнюю работу.

Для определения отношения C_p/C_V, называемого постоянной Пуассона, в 1819 году Клеманом и Дезормом был предложен чрезвычайно простой метод. Соответствующий аппарат состоит из герметически закрытого баллона (ок. 10 л.), в который проходит трубка, один конец которой соединен с манометром (керосинным) М, а другой В закрыт краном.

В крышке баллона имеется довольно большое отверстие А (диаметр 15–20 мм), закрытое клапаном, при помощи которого баллон можно открыть на очень короткое время, в течение которого давление в баллоне сравняется с внешним давлением.

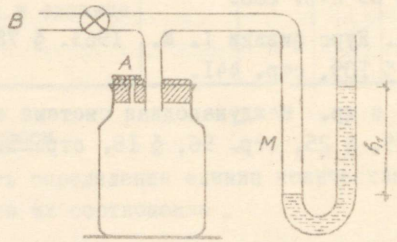


Рис. 31

Метод основан на адиабатическом расширении или сжатии газа, т.е. на таком процессе, при котором газ не вступает в тепловой обмен с окружающим пространством и изменение температуры газа достигается только расширением или сжатием газа. Адиабатические процессы подчиняются формуле Пуассона

$$p_1 V_1^{\varkappa} = p_2 V_2^{\varkappa} = const,$$

где $\varkappa = C_p/C_V$, p_1 и V_1 – давление и объем до адиабатического процесса, а P_2 и V_2 – давление и объем по окончании адиабатического процесса.

Пусть объем газа в баллоне при комнатной температуре будет V_1. В то же время давление p_1 пусть будет немного больше атмосферного давления. Разницу показывает жидкостный манометр (отсчет h_1). Если открыть на момент клапан A, то в баллоне давление станет равным атмосферному p_2, а объем газа – V_2. Так как выравнивание давления происходит весьма быстро, то этот процесс мы можем считать адиабатическим и написать:

$$p_1 V_1^{\varkappa} = p_2 V_2^{\varkappa}. \qquad (1)$$

В данном процессе температура газа понижается. Вследствие теплообмена она начнет повышаться. Но так как мы баллон сразу же закрыли, то давление в баллоне будет изменяться, и, когда температура станет равной комнатной, в баллоне установится давление p_3 (отсчет на манометре h_2).

Во время теплообмена увеличивается и объем газа V_2 – за счет движения жидкости в манометре. Но так как объем баллона велик по сравнению с трубкой манометра, это изменение не учитывается.

Так как начальное и конечное состояние имеют одну и ту же температуру, то относительно этих состояний и для того же самого количества газа действительно уравнение Бойля-Мариотта

$$p_1 V_1 = p_3 V_2 . \qquad (2)$$

Но тогда, если V_1 считать равным объему баллона, V_2 будет неизвестно, т.к. при открывании клапана у нас количество газа изменилось. Однако, возведя уравнение (2) в степень $\varkappa$:

$$p_1^{\varkappa} V_1^{\varkappa} = p_2^{\varkappa} V_2^{\varkappa} \qquad (3)$$

и, поделив уравнение (3) на уравнение (I), мы исключим объем вообще:

$$\frac{p_1^{\varkappa}}{p_1} = \frac{p_3^{\varkappa}}{p_2} = p_1^{\varkappa-1} . \qquad (4)$$

Прологарифмировав, получим

$$(\varkappa-1)\log p_1 = \varkappa \log p_3 - \log p_2 \quad \text{или} \quad \varkappa = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log p_1 - \log p_3}$$

Давления p_1 и p_3 можем написать через атмосферное давление p_2 и показания манометра h_1 и h_2: $p_1 = p_2 + e h_1$ и $p_3 = p_2 + e h_2$, где e – удельный вес жидкости в манометре.

Разложив теперь логарифмы в ряд и взяв только два первых члена, так как давления $e h_1$ и $e h_2$ малы по сравнению с атмосферным, получим:

$$\varkappa = \frac{C_p}{C_v} = \frac{h_1}{h_1 - h_2} .$$

4. Ход работы

I. Откройте кран В. Вызовите в баллоне изменение давления, вдувая или высасывая воздух через кран В. Делать это следует осторожно, не поднимая уровня керосина в манометре выше красной черты. Вследствие изменения давления в баллоне изменилась вместе с тем и температура. Чтобы получить давление в баллоне при комнатной температуре, нужно подождать минут IO, пока температура в баллоне сравняется с комнатной. После этого отсчитайте h_1 .

2. Откройте на момент (0,2–0,5 сек) полностью клапан А. Как сказано выше, изменение давления в баллоне во время открытия клапана происходит адиабатически, ибо – 0,2–0,5 секунд слишком малый промежуток времени для того, чтобы мог произойти заметный теплообмен с окружающей средой и стенками самого баллона. После этого подождите минут IO, пока воздух в баллоне примет комнатную температуру и отсчитайте h_2 .

3. Опыт следует повторить по меньшей мере 3 раза и вычислить арифметическое среднее.

4. Оцените погрешности измерения величин h_1, h_2 и вычислите погрешность для полученного значения $\varkappa$.

5. Результаты измерения занесите в следующую таблицу.

№ опыта	h_1	h_2	$h_1 - h_2$	$\varkappa$

Среднее $\frac{C_p}{C_v}$ = ...

5. Вопросы

I. Что называется числом степеней свободы?

2. Какая энергия соответствует одной степени свободы молекулы?

3. Какой физический смысл имеет универсальная газовая постоянная?

4. Какую связь имеет молярная теплоемкость с числом степеней свободы?

5. Вычислить молярные теплоемкости воздуха.

6. Какие из встречающихся в практике процессов можно всегда считать адиабатическими?

7. В каких условиях применимо уравнение Клапейрона (Менделеева)?

8. Что такое идеальный газ?

9. Найти давление в единицах системы СИ в сосуде Клемана и Дезорма, если разность уровней в керосинном манометре равна I см.

10. Что называется температурой?

11. Что следует понимать под термодинамическим равновесием?

12. Можно ли говорить о температуре, если процесс неравновесный?

13. Что происходит с внутренней энергией газа при адиабатическом процессе?

14. Почему в данной установке манометр наполнен керосином, а не ртутью?

Литература

1. Путилов К.А. Курс физики I. М., 1962. § 73-79, 81-84, 86-87, 100, 110.

2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики I. М.,1958. § 43-46, 48-49, 70-71.

Оглавление

	Стр.
Предисловие	3
Внутренний порядок в практикуме физики (А.Талкоп, К.Тоомик)	4
Правила безопасности в практикуме физики (А.Талкоп, К. Тоомик)	7
Руководство по вычислению ошибок измерений (Ю. Удер)	8
Общие измерения (Т. Пикка, Ю. Удер)	35
Катетометр (Ю. Удер)	40
Аналитические весы (Г.Пеэтс)	48
Масса легкого тела (Г.Пеэтс)	55
Вес тела (Ю. Удер)	61
Плотность твердого тела (Т. Руус, Ю.Удер)	68
Весы Мора (Т. Руус)	71
Машина Атвуда (М. Вахеметса)	76
Трифилярный маятник (Н. Лумп)	84
Крутильный баллистический маятник (А. Паат)	90
Основной закон вращательного движения (В.Бендер)	97
Модуль Юнга (упругости) (В. Бендер)	I02
Модуль сдвига (Э. Тимма)	I07
Оборотный маятник (Г.Метс)	II6
Коэффициент внутреннего трения воды (Ю. Удер)	I22
Вискозиметр Кэмпфа (Ю. Удер)	I27
Механический эквивалент теплоты (Я. Вальдур)	I32
Удельная теплоемкость твердого тела (М.Вахеметса)	I37
Удельная теплота парообразования воды (М. Вахеметса)	I43
Постоянная Пуассона (Ю. Удер)	I48

Бесплатно

ARH
X
1A-19607
1.

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 01014754 6