

**МИНИСТЕРСТВО
ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР**

**НИКОЛАЕВСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
имени адмирала С. О. Макарова**

М Е Х А Н И К А

**Методические указания к лабораторным работам
по курсу физики**

Под общ. ред. Н. Г. ГРИПИЧА

**АБС
ФИЗИКА**

Николаев 1985

Механика: Методические указания к лабораторным работам по курсу физики / Под общ. ред. Н.Г. Грипича. — Николаев: НКИ, 1985. — 58 с.

Кафедра физики

В методических указаниях представлены описания работ, поставленных в лабораториях кафедры физики НКИ и апробированных на протяжении ряда лет в ходе студенческих лабораторных занятий. Описания работ составлены в соответствии с программой по курсу общей физики для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений. Во введении дана теория погрешностей, а в каждой работе — методика ее выполнения.

Приводятся контрольные вопросы ко всем работам, которые могут быть использованы при машинном способе контроля подготовленности студентов к их выполнению.

Указания предназначены для студентов всех факультетов.

Методические указания составлены преподавателями кафедры физики: И.И. Бокко (введение), Н.Г. Грипич (работа М-1), Н.И. Коваль, А.Н. Трунов (работа М-5), А.А. Мочалов (работа М-6), В.П. Сыпко (работа М-4), А.А. Таранчук (работа М-2), Л.П. Титушина (работа М-7), Г.Е. Четверкина (работа М-3).

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доцент В.Н. Шмандина

© Николаевский ордена Трудового Красного Знамени кораблестроительный институт, 1985

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач лабораторного практикума помимо содействия лучшему усвоению идей и законов физики является воспитание у студентов навыков самостоятельной практической работы и прежде всего — грамотного выполнения измерений физических величин.

При выполнении работ студентам приходится измерять те или иные физические величины с помощью различных приборов. Измерить какую-либо величину — значит узнать, сколько раз в ней содержится однородная с ней величина, принятая за единицу измерения.

В результате измерений получается приближенное значение искомой величины, которое содержит в себе погрешности, обусловленные неточностью метода экспериментирования, недостаточной чувствительностью приборов, а также несовершенством наших органов чувств.

Отклонение измеренной величины x_i от ее истинного значения носит название погрешности измерения $\Delta x = x_i - x$. Погрешности делятся на три типа: грубые погрешности (или промахи), систематические и случайные.

Грубые погрешности (промахи) получаются в результате каких-либо упущений со стороны экспериментатора, например неправильных отсчетов или неправильных записей показаний приборов. Эти погрешности по абсолютной величине в три и более раза превышают среднюю абсолютную погрешность (см. ниже определение погрешности), и измерения с такими погрешностями отбрасываются, если нет возможности установить их и исключить.

Систематические погрешности — постоянные или мало меняющиеся по определенному закону погрешности измерений; причины их появления:

1) неисправность приборов, например неточная установка нуля прибора, несоответствие шкалы ее номинальному значению;

2) ошибочность методов экспериментирования, например, из-за несферической формы шариков при выполнении работы М-14, нарушения адиабатического режима при выполнении работы М-8 и другие;

3) одностороннее влияние внешних условий на показания приборов (температуры, давления, неправильного освещения, потоков воздуха и т.д.).

Систематические погрешности, как правило, повторяются из опыта в опыт и, следовательно, входят полностью в среднеарифметические значения измеряемой величины. Для того чтобы свести влияние таких погрешностей к минимуму, следует строго придерживаться методики измерений и правил пользования измерительными приборами.

Случайные погрешности — это погрешности, меняющиеся от измерения к измерению и по величине и по знаку, обычно очень небольшие по сравнению с измеряемой величиной; они получаются в результате незначительных неточностей в установке приборов и отсчетов их показаний, которые произвольно может внести любой исследователь. Эти погрешности носят статистический характер, т.е. вероятность получения как завышенного, так и заниженного значений одинакова. Учетом случайных погрешностей занимается теория погрешностей.

Некоторые источники систематических погрешностей и меры по их учету или устранению

Источником погрешностей могут быть внешние воздействия — изменение температуры, давления, влажности, напряжения в электрической сети, вибрации и т.д.

1. При изменении температуры во время опытов меняются физические и геометрические характеристики приборов, тел измерения, а вследствие этого — и показания приборов. Для уменьшения погрешностей необходимо обеспечивать термостатирование во время измерения, обязательно описывать существенные условия эксперимента — температуру, давление, влажность и, если возможно, измерение организовать симметрично относительно середины опытов, т.е. если начали производить замеры с одной метки, затем перешли ко второй, третьей, то второй этап следует начать с третьей метки, затем второй и закончить первой.

2. Из-за неправильного положения глаза наблюдателя при от-

счете прибора возникает погрешность параллакса. Глаз следует располагать перпендикулярно шкале прибора.

3. Многие приборы (катетометр, гониметр и другие) снабжены зажимными и микрометрическими винтами. Чтобы повернуть трубу такого прибора на большой угол, следует отжать зажимный винт. Точная наводка прибора производится микрометрическим винтом при зажатом зажимном винте. Отсчет прибора зависит, в силу недостаточной жесткости пружин в конструкции винта, от того, как производилось последнее движение микрометрического винта — по часовой стрелке или против. Рекомендуется последнее вращение винта делать всегда против часовой стрелки.

4. Существует погрешность "нуля". Следует всегда проверять установку прибора и учитывать поправку на нуль. Целесообразнее организовать измерения так, чтобы измеряемая величина была равна разности двух отсчетов — конечного и начального.

1. ОЦЕНКА СЛУЧАЙНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

К прямым измерениям относятся измерения величин, произведенные непосредственно приборами.

1.1. Определение погрешности способом среднего

Пусть искомая величина x измерена n раз в одинаковых условиях и при этом получен ряд близких значений x_i .

Разные значения величины x_i получились потому, что при ее измерениях были допущены случайные погрешности.

Благодаря статистическому характеру случайных погрешностей, наиболее близким к истинному значению измеряемой величины будет среднее арифметическое результатов всех измерений

$$x_{cp} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

При этом чем больше будет сделано измерений, тем ближе окажется среднее арифметическое значение к истинному значению искомой величины.

Так как истинное значение x измеряемой величины зачастую не-

известно, за эту величину принимается среднее арифметическое результатов отдельных измерений: $x = x_{cp}$.

За погрешность отдельных измерений принимается разность между измеренными значениями искомой величины и их среднеарифметическим:

$$\Delta x = x_i - x_{cp}.$$

Сумма погрешностей в этом случае должна быть равной нулю (и если отличается от нуля, то только из-за округления среднеарифметического значения), поэтому за среднюю арифметическую ошибку измерений принимается величина, равная среднеарифметическому из абсолютных величин отдельных погрешностей измерений, т.е.

$$\Delta x = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \dots + |\Delta x_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|}{n}.$$

При таком вычислении абсолютной погрешности вероятность того, что истинное значение величины x будет лежать в пределах $x_{cp} \pm \Delta x$ (по теории вероятности), составит 64 %, если число измерений будет меньше четырех. При числе измерений, равном четырем, вероятность такого совпадения возрастает до 90 %, а при числе измерений, равном девяти, - до 98 %. Следовательно, значение абсолютной погрешности позволяет указать пределы, в которых с определенной вероятностью лежит искомая величина.

По теории следует, что абсолютная погрешность определяется с малой точностью, поэтому

значение абсолютной погрешности Δx следует записывать с одной значащей цифрой.

Среднеарифметическое значение искомой величины x_{cp} нужно округлять до того же разряда, что и абсолютную погрешность.

Результат записывают так:

$$x = x_{cp} \pm \Delta x.$$

1.2. Относительная погрешность

Отношение абсолютной погрешности измерения к среднему значению искомой величины называется относительной погрешностью из-

мерения E , обычно выражаемой в процентах:

$$E_x = \frac{\Delta x}{x_{cp}} = \frac{\Delta x}{x_{cp}} \cdot 100 \%.$$

Относительная погрешность вычисляется с двумя значащими цифрами.

1.3. Инструментальная погрешность

Из-за различных дефектов в изготовлении приборов, а также вследствие отклонения условий измерений от идеальных, в измерениях всегда наблюдается погрешность, присущая данному прибору, называемая инструментальной погрешностью. Инструментальная погрешность считается, как правило, одинаковой на всем протяжении шкалы. Относительная погрешность измерений будет тем меньше, чем большая часть шкалы прибора используется для измерения.

1.3.1. Определение инструментальной погрешности по классу точности

Приведенный класс точности - умноженное на 100 отношение инструментальной погрешности к пределу измерения. Предел измерения указывается на клеммах прибора или на переключателе пределов измерения. Класс точности - целые и десятые доли, разделенные точкой, указан на циферблате прибора (например: 0.5; 1.5 и т.д.), т.е.

$$\text{Класс точности} = \frac{\Delta x_{\text{приб}}}{\text{Предел измерений}} \cdot 100,$$

отсюда

$$x_{\text{приб}} = \frac{\text{Класс точности} \cdot \text{Предел измерений}}{100}.$$

Приборная погрешность будет тем меньше, чем меньше предел измерения; следует пользоваться наименьшим возможным пределом измерения.

Цена деления c равна пределу измерений, деленному на число делений всей шкалы:

$$c = \frac{\text{Предел измерений}}{\text{Количество делений шкалы}}.$$

Иногда на приборах класс точности указан в виде 1,0; 1,5 и т.д. В этом случае класс точности есть наибольшая относительная погрешность измерения:

$$\frac{\Delta x}{x} \cdot 100 = 0,5 \quad \text{и} \quad \Delta x = \frac{0,5}{100} x.$$

Пример. Необходимо измерить напряжение 10 В. Имеем прибор с пределами измерений 3;7,5;15;60 В; класс точности 1,5. Число делений 75. Предел 3 непригоден, так как подключение к нему может вызвать поломку прибора.

$$\Delta x_{\text{приб}} = \frac{1,5}{100} \cdot 60 \text{ В} = 0,9 \text{ В}; \quad E = \frac{\Delta x_{\text{приб}}}{x} \cdot 100 \% = 9 \%.$$

При пределе 15 В погрешность

$$\Delta x_{\text{приб}} = \frac{1,5 \cdot 15 \text{ В}}{100} = 0,2 \text{ В}; \quad E = \frac{0,2}{10} = 2 \%.$$

Цена деления $c = \frac{15 \text{ В}}{75 \text{ дел.}} = 0,2 \text{ В/дел.}$ и показания прибора при напряжении 10 В будут $N = \frac{10 \text{ В}}{0,2 \text{ В/дел.}} = 50 \text{ дел.}$

Перед измерениями следует оценить приближенное значение измеряемой величины с помощью измерений с наибольшим пределом, а после этого перейти к наименьшему возможному пределу, конечно, большему, чем измеряемая величина.

1.3.2. Определение приборной погрешности по цене деления

Приборы изготавливают таким образом, чтобы их максимальная погрешность была меньше цены самого мелкого деления. В таком случае за приборную погрешность $\Delta x_{\text{приб}}$ принимается половина цены самого мелкого деления.

1.4. Порядок определения погрешности прямых измерений

1. Приступая к измерениям, следует оценить и записать цену деления имеющихся приборов и их инструментальные погрешности согласно пп. 1.3.1 и 1.3.2.

2. Произвести измерения. Если полученные результаты совпадают, за погрешность измерений взять инструментальную погрешность и оценить относительную погрешность $E = \Delta x_{\text{приб}} \cdot 100 \%$.

3. Если при одних и тех же условиях показания прибора меняются от измерения к измерению, то следует определить погрешность методом среднего. Из двух погрешностей - приборной и методом среднего - выбрать наибольшую.

4. Погрешность Δx округлить до первого отличного от нуля разряда. До этого же разряда округлить измеренное среднее $x_{\text{ср}}$. Определить относительную погрешность $E = \Delta x / x_{\text{ср}} \cdot 100 \%$ с двумя знаками.

5. Результат записать в виде $x = x_{\text{ср}} \pm \Delta x$.

Удобно записывать значение x в нормализованном виде, т.е. $x = (x_0 \pm \Delta x_0) \cdot 10^k$ единиц измерения, где $0,1 \leq x_0 < 1,0$, а k - порядок числа. Можно использовать долевые приставки СИ: Мега (М) - 10^6 , кило (к) - 10^3 , милли (м) - 10^{-3} , микро (мк) - 10^{-6} от основной величины.

Примечание. При вычислениях приближенно можно руководствоваться следующим правилом: в измеренных значениях оставлять те разряды, которые повторяются (верные цифры), и еще два разряда, меняющихся от опыта к опыту, остальные отбрасываются или округляются. Тогда разности Δx_i будут содержать не более двух цифр, что значительно облегчит вычисления Δx . При записи окончательного результата второй сомнительный знак округляется и отбрасывается (нельзя заменить нулем). Удобно вычисления оформлять в виде таблиц.

Пример. С помощью сферометра (инструментальная погрешность 0,0005 мм) измерена в разных местах линзы стрелка h . Результаты измерений и вычислений приведены в следующей таблице:

Номер опыта	h , мм	Округление h , мм	$\Delta h_i \cdot 10^3$ мм	$ \Delta h_i \cdot 10^3$ мм
1	6,6836	6,684	+08	8
2	6,6975	6,698	+22	22
3	6,6744	6,674	-04	4
4	6,6573	6,657	-19	19
5	6,6682	6,668	-08	8
Среднее		6,676	0	12

Округляем Δh до первого разряда, т.е. вместо 0,012 пишем 0,01, и h_{cp} до этого же разряда, т.е. вместо 6,676 пишем 6,68; окончательный результат записываем в виде

$$h = (6,68 \pm 0,01) \text{ мм} \quad \text{или} \quad h = (0,668 \pm 0,001) \cdot 10^2 \text{ м.}$$

Определяем относительную погрешность

$$E_h = \frac{0,012}{0,68} \cdot 100 \% = 0,2 \%$$

Погрешность Δh получилась больше инструментальной из-за неправильной формы линзы и из-за несоблюдения методики измерения.

2. ОЦЕНКА СЛУЧАЙНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

В большинстве лабораторных работ для определения искомой величины нужно производить прямые измерения нескольких других исходных величин, а затем по формулам вычислять искомую. Такие измерения называются косвенными. Итак, искомая величина A представляется в виде функции от измеренных величин, физических и математических констант, т.е.

$$A = f(x, y, z, u). \quad (1)$$

Для подсчета погрешности искомой величины ΔA используют в зависимости от условий проведения опыта следующие методы.

2.1. Метод частного дифференцирования

Этот метод применяется в том случае, когда все измерения исходных величин проведены в одинаковых условиях или по одному разу. Для всех измеренных величин x, y, z составляются средние арифметические значения x_{cp}, y_{cp}, z_{cp} , определяются погрешности $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ по правилам нахождения погрешностей прямых измерений, т.е. либо методом среднего, либо по цене деления или классу точности прибора. С этими значениями $x_{изм} = x_{cp}; y_{изм} = y_{cp}; z_{изм} = z_{cp}; u_{изм} = u_0$ вычисляется

$$A_{изм} = f(x_{изм}, y_{изм}, z_{изм}, u_{изм}) \quad (2)$$

с точностью, равной наименьшей относительной погрешности исходных величин плюс один запасной разряд (обычно достаточно трех разрядов). Погрешность ΔA находят по формуле

$$\Delta A = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{изм} \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{изм} \Delta y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|_{изм} \Delta z + \left| \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{изм} \Delta u, \quad (3)$$

где $\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{изм}, \dots, \left| \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{изм}$ — взятые по модулю (только положительные значения) частные производные от функции f по аргументам x, y, z, u , вычисленные для значений $x = x_{изм}; y = y_{изм}; z = z_{изм}; u = u_{окр}$ с двумя разрядами; u_0 — округленное значение табличной величины u , $\Delta u_{окр}$ — ошибка округления. Все слагаемые в формуле (3) вычисляются с точностью до 1 % (два разряда), не более, окончательно ошибка ΔA округляется до первого отличного от нуля разряда; до этого же разряда округляется $A_{изм}$. Окончательная запись результата такая же, как и в подразд. I.4.

2.2. Метод дифференцирования натурального логарифма

Этот метод значительно облегчает нахождение погрешности ΔA и применяется в том случае, когда искомая величина A может быть представлена в виде произведения (и частного) исходных величин в некоторых степенях, т.е.

$$A = f(x, y, z, u) = x^{k_x} y^{k_y} z^{k_z} \dots u^{k_u}, \quad (4)$$

где $k_x, k_y, k_z, \dots, k_u$ — любые положительные, отрицательные, целые или дробные числа. Прологарифмировав выражение (4), получим

$$\ln A = k_x \ln x + k_y \ln y + \dots + k_u \ln u,$$

а после дифференцирования —

$$\frac{dA}{A} = k_x \frac{dx}{x} + k_y \frac{dy}{y} + \dots + k_u \frac{du}{u}.$$

Переходя к погрешностям, заменяем дифференциалы погрешностями, значения x, y, z, u — измеренными значениями, т.е. полагая $x = x_{изм}; y = y_{изм}; \dots$, и, взяв значения k_x, k_y, k_z, k_u по модулю, получим

$$\frac{\Delta A}{A_{изм}} = |k_x| \frac{\Delta x}{x_{изм}} + |k_y| \frac{\Delta y}{y_{изм}} + \dots + |k_u| \frac{\Delta u}{u_{изм}}; \quad (5)$$

$$E_A = |k_x| E_x + |k_y| E_y + \dots + |k_u| E_u, \quad (6)$$

где $E_A = \frac{\Delta A}{A_{изм}}$ - относительная погрешность определения A ; $E_x = \frac{\Delta x}{x_{изм}}$; $E_y = \frac{\Delta y}{y_{изм}}$ - относительные погрешности измерения величин x, y, u .

Вычислив $A_{изм}$ по исходной формуле (2), можно найти абсолютную погрешность ΔA по выражению

$$\Delta A = E_A A_{изм}.$$

Значение ΔA округляется до первого отличного от нуля разряда, до этого же разряда округляется и A . Окончательная запись результата такая же, как и в подразд. I.4.

2.3. Метод среднего

Этот метод применяется в том случае, когда измерения проводятся в различных условиях. Например, для определения вязкости жидкости методом Стокса измеряют диаметр d_i различных шариков и время t_i их падения в жидкости; для определения модуля Юнга измеряют удлинение проволоки Δl_i при различных грузах (различной массе m_i) и т.д. Неверно брать среднее из диаметров шариков и времени их падения, так как различие обусловлено не столько случайными погрешностями, сколько фактическим различием шариков по массе.

В этом случае в исходной формуле (I) для определения A необходимо выделить такую комбинацию меняющихся величин x, y , которая должна быть постоянной на протяжении всех опытов. Обозначив эту постоянную величину через B , находят ее среднее значение $B_{ср}$ и погрешность ΔB , как по методу среднего для прямых измерений (см. подразд. I.1). Окончательно величина A и ее погрешность ΔA определяются методом частного дифференцирования или методом дифференцирования натурального логарифма функции с учетом погрешностей измерения и округления других величин.

З а м е ч а н и я

1. Если искомая величина A равна сумме или разности измеряемых величин $A = x \pm y$, то, произведя частное дифференцирование, находим, что погрешность искомой величины равна сумме абсолютных погрешностей измеряемых величин, т.е.

$$\Delta A = \Delta x + \Delta y.$$

В этом случае измерения x и y следует выполнять с одинаковой абсолютной погрешностью $\Delta x \approx \Delta y$ и все три величины округлить до одинакового разряда.

2. Если искомая величина A равна произведению или частному от измеренных величин, то относительная погрешность A равна сумме относительных погрешностей измеренных величин: $\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z}$. В этом случае измерение всех величин следует проводить с одинаковой относительной погрешностью и с одинаковым количеством значащих цифр.

3. Анализ формул (3)-(6) позволяет организовать эксперимент наиболее рациональным образом. Допустим, измерение какой-либо величины y , выполненное с погрешностью Δy , дает наибольшее слагаемое $\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{изм} \Delta y$ в выражении погрешности ΔA . Естественно, нужно стремиться уменьшить именно это слагаемое, применив для измерения y более точные приборы. Если же увеличить точность измерения y не удастся, то для измерения остальных величин x, y, u и т.д. следует, если возможно, пользоваться такими приборами, чтобы соответствующие слагаемые $\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{изм} \Delta x$, $\left| \frac{\partial f}{\partial z} \right|_{изм} \Delta z$ были на порядок (в 2-5 раз) меньше максимального слагаемого. Нецелесообразно чрезмерно увеличивать точность измерения величин x, y, z , случайная погрешность измерения ΔA должна быть того же порядка, что и систематическая погрешность измерения $\Delta A_{сист}$.

Например, необходимо определить объем прямоугольной пластины

$$V = abc,$$

где a - длина; b - ширина; c - толщина пластины.

Формула (5) в этом случае имеет вид

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c}.$$

Допустим, нам нужно измерить объем с точностью до 1 %. Значит, каждое измерение должно быть проведено с относительной погрешностью $E = 0,3 \%$. Для измерения пластины шириной $b \approx 21$ мм необходимо обеспечить погрешность измерения $\Delta b = 21 \text{ мм} \cdot 0,003 = 0,06 \text{ мм}$, т.е. для этой цели вполне пригоден штангенциркуль, точность которого 0,05 мм. Толщина пластины $c \approx 3$ мм и $\Delta c = 3 \text{ мм} \cdot 0,003 = 0,009 \text{ мм}$ должна быть измерена микрометром, обеспечивающим точность 0,005 мм. И, поскольку $a \approx 200$ мм, $\Delta a = 200 \cdot 0,003 = 0,6 \text{ мм}$, измерить a можно обыкновенной линейкой. После проведения измерений все эти оценки погрешностей уточняются согласно подразд. 1.4 и определяется ΔV согласно подразд. 2.2.

3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При вычислении искомой величины следует пользоваться следующими общими правилами вычислений:

- вычисления с одним знаком дают относительную погрешность до 40-50 %;
- вычисления с двумя знаками - от 1 до 10 % (0,01-0,1);
- вычисления с тремя знаками и на логарифмической линейке - 0,1 до 1 % (0,001-0,01) и т.д.

Если же в формуле есть разности близких величин, то погрешность при этом может только возрасти.

3.1. Правила приближенных вычислений

Для указания пределов, в которых лежит искомая величина, решающее значение имеет первая значащая цифра абсолютной погрешности. Поэтому

погрешность обычно вычисляют до второй значащей цифры, а затем округляют до первой.

В полученном приближенном значении искомой величины сохраняют верные и сомнительные знаки, а остальные округляют.

Сомнительным знаком называется знак, совпадающий по разряду с первой значащей цифрой абсолютной погрешности. Все знаки слева до сомнительного будут верными.

Например, в результате вычислений получено: $a = 6,786$; $\Delta a = 0,026$. Здесь целые и десятые являются верными знаками, сотые - сомнительными, а тысячные заведомо лежат в области погрешности. Округляя погрешность до первой значащей цифры, а само число - до сомнительного знака, получим $a = 6,79 \pm 0,03$.

Если в десятичной дроби последние верные знаки - нули, то при записи дроби они сохраняются. Знаки, лежащие в области погрешности и отброшенные при округлении, нулями не заменяются. Например, $B = 4,502$; $\Delta B = 0,01$. Округляя приближенное значение величины до сомнительного знака, получим $B = 4,50 \pm 0,01$. При округлении целого числа отброшенные знаки не следует заменять нулями, а нужно применять умножение на 10 в соответствующей степени. Например, $C = 847625$; $\Delta C = 235$. Здесь сотни являются сомнительным знаком, так как первая слева значащая цифра абсолютной погрешности находится в разряде сотен. Поэтому, округлив погрешность до первой значащей цифры $\Delta C = 2 \cdot 10^2$, а само число - до сомнительного знака ($8476 \cdot 10^2$), получим $C = (8476 \pm 2) \cdot 10^2 = (8,476 \pm 0,002) \cdot 10^5$.

При округлении последняя сохраняемая цифра не изменяется, если первая отбрасываемая меньше 5. Последняя сохраняемая цифра увеличивается на единицу, если первая отбрасываемая больше или равна 5 (за исключением тех случаев, когда сама пятерка - результат округления в сторону увеличения).

При сложении и вычитании приближенных чисел оба слагаемых (или уменьшаемое и вычитаемое) округляют до одинакового порядка десятичных знаков. Количество десятичных знаков, которое необходимо сохранить, определяется слагаемым, содержащим наименьшее число этих знаков.

Чтобы искусственно не увеличивать погрешность за счет округления, нужно делать одинаковое количество округлений как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения слагаемых чисел или сохранять один лишний десятичный знак.

Например, $A = 19063,41 + 0,431 - 48,756 - 4,3678$. Наименьшее количество десятичных знаков имеет число 19063,41 (два). После округления всех чисел получим $A = 19063,41 + 0,43 - 48,76 - 4,37 = 19010,71$.

При умножении и делении приближенных чисел все сомножители (или делимое и делитель) округляют до одинакового числа значащих цифр. Количество значащих цифр, которое необходимо оставить, определяется числом, содержащим наименьшее количество знаков.

Значащими цифрами (или просто знаками) называются все цифры данного числа, начиная с первой слева, отличной от нуля, до последней, которая может быть и нулем. Например, число 0,00047 содержит две значащие цифры (4 и 7), а число 0,00320 — три (3; 2; 0).

При последовательном умножении и делении, а также сложении и вычитании нескольких приближенных чисел промежуточные результаты следует округлить, оставляя одну лишнюю значащую цифру. Окончательный результат округляют, оставляя в нем столько значащих цифр, сколько их имеет приближенное число с наименьшим количеством знаков. Пусть, например, требуется вычислить

$$A = \frac{14,75}{8,6 \cdot 1,27 \cdot 0,5256}.$$

Наименьшее количество знаков имеет число 8,6, поэтому округляем все числа до двух значащих цифр:

$$A = \frac{15}{8,6 \cdot 1,3 \cdot 0,53}.$$

Промежуточные вычисления: $8,6 \cdot 1,3 = 11,18$. Округляем число 11,18, оставляя один лишний знак до третьей значащей цифры, и умножаем на 0,53: $11,2 \cdot 0,53 = 5,936$. Тогда

$$A = \frac{15}{5,94} = 2,52.$$

После округления окончательного результата до двух значащих цифр получим $A = 2,5$. В этом примере деление выполнили с одним лишний знаком, чтобы знать, в какую сторону округлять окончательный результат.

При возведении в степень (не выше четвертой) в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет основание.

При извлечении корня (не выше четвертой степени) в результате следует сохранять столько значащих цифр, сколько их имеет подкоренное число.

3.2. Примеры вычисления погрешностей и оформления ответов некоторых конкретных работ

Пример I. Определение плотности твердого тела цилиндрической формы.

Выразим плотность тела через величины, которые непосредственно измеряются, т.е. через массу тела m , диаметр цилиндра D и его высоту h :

$$\rho = \frac{m}{V}; \quad V = \frac{\pi D^2}{4} h; \quad \rho = \frac{4m}{\pi D^2 h}.$$

Пусть в результате измерений получено:

$$\begin{aligned} h &= 10,58 \text{ см}; & \Delta h &= \pm 0,01 \text{ см}; \\ D &= 2,784 \text{ см}; & \Delta D &= \pm 0,001 \text{ см}; \\ m &= 485,5 \text{ г}; & \Delta m &= \pm 0,1 \text{ г}. \end{aligned}$$

Самая малая из всех измеренных величин — диаметр, поэтому для ее измерения выбран наиболее чувствительный прибор — микрометр. Для получения относительной погрешности такого же порядка при измерении остальных величин высоту достаточно измерить штангенциркулем с точностью до 0,01 см, а взвешивание произвести с точностью до 0,1 г.

Логарифмируя и дифференцируя последнее выражение для ρ , получим

$$\ln \rho = \ln 4 + \ln m - \ln \pi - 2 \ln D - \ln h;$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dm}{m} - \frac{d\pi}{\pi} - \frac{2dD}{D} - \frac{dh}{h}.$$

Заменяя знак d на Δ и сложив абсолютные значения частных дифференциалов, найдем

$$E_{\rho} = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h} = E_m + E_{\pi} + 2E_D + E_h,$$

а после подстановки числовых значений относительных погрешностей m , D , h , π получим числовое значение относительной погрешности ρ

$$\frac{0,1}{485,5} + \frac{0,0004}{3,14} + 2 \cdot \frac{0,001}{2,8} + \frac{0,01}{11} = 10^{-3} (0,20 + 0,13 + 0,70 + 0,91) = 1,9 \cdot 10^{-2} = 0,19 \%.$$

Следовательно, вычислять ρ нужно с четырьмя (минимум с тремя) знаками или на логарифмической линейке. Желательно взять более точное значение x , чем 3,14, а именно 3,142.

Подставив в рабочую формулу результаты измерений и выполнив вычисления, получим приближенное значение

$$\rho_{\text{изм}} = \frac{4 \cdot 0,4855}{3,142 \cdot (2,764 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10,56 \cdot 10^{-2}} \text{ кг/м}^3 = 7,875 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Теперь можно определить абсолютную погрешность

$$\Delta \rho = \rho_{\text{изм}} E_{\rho} = 7,9 \cdot 10^3 \cdot 0,0019 \text{ кг/м}^3 = 0,016 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

После соответствующих округлений получаем окончательный результат:

$$\rho = (7,88 \pm 0,02) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Пример 2. Определение удельной теплоты парообразования воды методом конденсации

Идея опыта состоит в том, что пар при температуре кипения, проходя по змеевику и конденсируясь в нем, отдает теплоту калориметру, воде и погруженным в нее деталям.

Составим уравнение теплового баланса:

$$m_3 \lambda + m_3 c_2 (t_2 - \theta) = (m_1 c_1 + m_2 c_2 + k) (\theta - t_1),$$

где k — теплоемкость калориметра, мешалки и погруженной части термометра;

m_1 — масса змеевика;

c_1 — удельная теплоемкость змеевика;

t_1 — начальная температура калориметра, воды и погруженных в нее деталей;

θ — их конечная температура;

m_2 — масса воды в калориметре;

λ — удельная теплота парообразования;

m_3 — масса сконденсировавшегося пара;

t_2 — начальная температура пара и сконденсированной воды (температура, при которой проходит конденсация пара);

m_4 — масса змеевика с конденсатом.

Отсюда

$$\lambda = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2 + k}{m_3} (\theta - t_1) - c_2 (t_2 - \theta).$$

В результате измерений получили следующие данные:

$$k = 361 \text{ Дж/К};$$

$$c_2 = 4190 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$m_1 = 0,235 \text{ кг};$$

$$m_4 = 0,302 \text{ кг};$$

$$t_1 = 18,3 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta m_1 = 0,001 \text{ кг};$$

$$\theta = 29,7 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p = 10^5 \text{ Па};$$

$$t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_1 = 0,1 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$c_1 = 500 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$\Delta \theta = 0,1 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$m_2 = 3,427 \text{ кг};$$

$$\Delta m_2 = 0,004 \text{ кг}.$$

$$m_3 = m_4 - m_1 = (0,302 - 0,235) \text{ кг} = 0,067 \text{ кг}; \Delta m_3 = 0,002 \text{ кг}.$$

При определении массы максимально возможная погрешность каждого взвешивания 1 г. Масса пара получена путем двух взвешиваний (пустого змеевика m_1 и змеевика с конденсатом m_4) и равна их разности, т.е. $m_3 = m_4 - m_1$, поэтому (см. подразд. 2.4) $\Delta m_3 = \Delta m_4 + \Delta m_1 = 2 \text{ г}$. Определение m_2 производилось двукратным взвешиванием: банки с водой, а также пустой банки. Следовательно, $\Delta m_2 = 2 \cdot (1 \text{ г} + 1 \text{ г}) = 4 \text{ г} = 0,004 \text{ кг}$. Погрешностями табличных величин Δc_1 , Δc_2 , Δk , Δt_2 можно пренебречь вследствие их малости.

Так как выражение, из которого определяется значение удельной теплоты парообразования, не логарифмируется, будем искать его абсолютную погрешность. Для этого найдем частные производные от λ по каждой из измеряемых величин, считая их переменными:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial m_1} = \frac{c_1 (\theta - t_1)}{m_3} = \frac{500 \cdot (29,7 - 18,3)}{0,067} = 0,085 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}^2;$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial m_2} = \frac{c_2 (\theta - t_1)}{m_3} = \frac{4,2 \cdot 10^3 \cdot (29,7 - 18,3)}{6,7 \cdot 10^{-2}} = 0,71 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}^2;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda}{\partial m_3} &= - \frac{(m_1 c_1 + m_2 c_2 + k) (\theta - t_1)}{m_3^2} = \\ &= \frac{(0,24 \cdot 500 + 3,4 \cdot 4,2 \cdot 10^3 + 361) \cdot (29,7 - 18,3)}{(6,7 \cdot 10^{-2})^2} = 37 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}^2; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \theta} = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \kappa}{m_3} + c_2 = \frac{15 \cdot 10^3}{6,7 \cdot 10^{-2}} + 4,2 \cdot 10^3 = 0,22 \cdot 10^6 \text{ Дж/(кг·К)};$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t_1} = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \kappa}{m_3} = 0,22 \cdot 10^6 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Составив выражение полного дифференциала

$$d\lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial m_1} dm_1 + \frac{\partial \lambda}{\partial m_2} dm_2 + \frac{\partial \lambda}{\partial m_3} dm_3 + \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial \lambda}{\partial t_1} dt_1$$

и взяв сумму абсолютных значений частных дифференциалов, получим формулу для вычисления абсолютной погрешности, заменив знак d знаком Δ . Подставив в эту формулу числовые значения частных производных и погрешностей, получим

$$\begin{aligned} \Delta \lambda &= \left| \frac{\partial \lambda}{\partial m_1} \right| \Delta m_1 + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial m_2} \right| \Delta m_2 + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial m_3} \right| \Delta m_3 + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \right| \Delta \theta + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial t_1} \right| \Delta t_1 = \\ &= (10^6 \cdot 0,001 + 0,71 \cdot 10^6 \cdot 0,004 + 37 \cdot 10^6 \cdot 0,002 + 0,22 \cdot 10^6 \cdot 0,1 + 0,22 \cdot 10^6 \cdot 0,1) \cdot \text{кг} = (0,0008 + 0,0028 + 0,074 + 0,022 + 0,022) \times \\ &\times 10^6 \text{ Дж/кг} = 0,122 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}. \end{aligned}$$

Видно, что наибольшее слагаемое в $\Delta \lambda$ — третье. Следовательно, чтобы увеличить точность измерения λ , надо точнее измерить m_3 — массу сконденсированного пара и, по возможности, θ и t_1 .

Подставив в рабочую формулу результаты измерений и произведя вычисления, запишем приближенное значение $\lambda_{\text{изм}}$:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{изм}} &= \frac{(0,235 \cdot 500 + 3,427 \cdot 4190 + 361) \cdot (29,7 - 18,3)}{0,067} - (100 - \\ &- 29,7) \cdot 4190 = 2,29 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}. \end{aligned}$$

После соответствующих округлений получим окончательный результат:

$$\lambda = (2,3 \pm 0,1) \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.$$

Для того чтобы установить степень точности полученного нами результата, определим относительную погрешность

$$E_{\lambda} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{0,12 \cdot 10^6}{2,3 \cdot 10^6} = 5,5 \, \%.$$

Пример 3. Определение вязкости жидкости методом Стокса. Формула для определения вязкости имеет вид

$$\eta = \frac{g(\rho_T - \rho_K)}{18t} d^2 t,$$

из нее видно, что для разных шариков величина $B = d^2 t$ должна быть постоянной, не зависящей от размеров шариков с точностью до случайных погрешностей измерения. Поэтому, произведя измерения d и t для 10 шариков, вычисляют для каждого опыта $B_i = d_i^2 t_i$; после этого находят среднее значение $B_{\text{изм}} = B_{\text{ср}}$ и погрешность ΔB , а затем уже вычисляют

$$\eta_{\text{изм}} = \frac{g(\rho_T - \rho_K)}{18t_{\text{изм}}} B_{\text{изм}}$$

и погрешность

$$\Delta \eta = E_{\eta} \eta_{\text{изм}},$$

где

$$E_{\eta} = \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta \rho_T + \Delta \rho_K}{\rho_T - \rho_K} + \frac{\Delta t}{t_{\text{изм}}} + \frac{\Delta B}{B_{\text{изм}}}.$$

4. ГРАФИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТ, ПОСТРОЕНИЕ ПОЛЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Часто задачей лабораторной работы является получение графической зависимости одной физической величины от другой: $A = f(x)$. Например, требуется исследовать зависимость коэффициента внутреннего трения жидкости от температуры $\eta = f(t)$. Для этого при разных температурах производят измерения и вычисляют коэффициент внутреннего трения.

Работу оформляют графически, откладывая по оси абсцисс температуру (аргумент), а по оси ординат коэффициент внутреннего трения (функцию). График следует строить на миллиметровке. Масштаб выбирают так, чтобы легко было переходить к нему от натуре, т.е. чтобы в 1 см укладывалось $1 \cdot 10^k$, или $2 \cdot 10^k$, или $5 \cdot 10^k$, или $4 \cdot 10^k$ единиц измеряемой величины (k — произвольное целое

число). Для удобства пользования графиком по осям проставляют число единиц через каждые 1-2 см.

Соотношение между масштабами по осям должно быть таким, чтобы кривая не была очень пологой и очень крутой. Это значит, что если изменение аргумента вызывает небольшое изменение функции, то по оси ординат следует взять больший масштаб, чем по оси абсцисс.

После нанесения экспериментальных точек на графике строят поле погрешностей, т.е. в масштабе графика влево и вправо от экспериментальных точек откладывают погрешность измерения аргумента Δx , а вверх и вниз - погрешность измерения искомой величины ΔA . Затем проводят горизонтальные и вертикальные линии длиной $2\Delta x$ и $2\Delta A$ или строят прямоугольники со сторонами $2\Delta x$ и $2\Delta A$. Длина этих линий должна быть порядка 1-5 мм.

В экспериментальных кривых часто наблюдается некоторый разброс точек, обусловленный погрешностями измерений. При построении графика необходимо нанести все точки (размер точек должен быть не менее 1 мм) соответственно измерениям; построить поле погрешностей для каждой точки, а затем провести плавную кривую так, чтобы точки равномерно располагались по обе стороны кривой и кривая проходила через поля погрешностей экспериментальных точек. Если поле погрешностей одной-двух точек не пересекаются плавной кривой, то это свидетельствует о грубой погрешности в данном измерении.

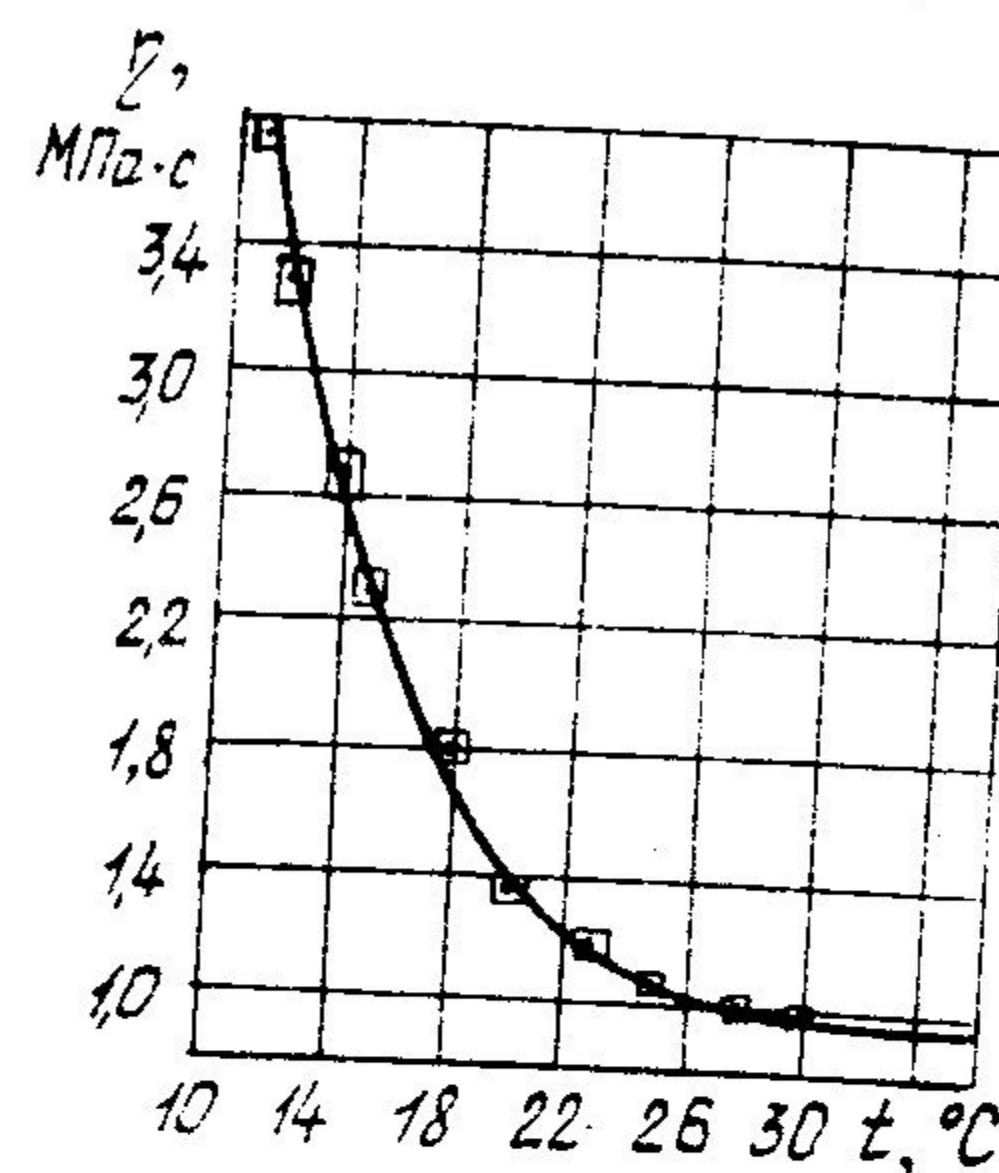
П р и м е р. Пусть при измерении зависимости вязкости глицерина от температуры получены следующие значения вязкости с относительной погрешностью 3 %.

$t, ^\circ\text{C}$	11	12	14	15	18	20	23	25	28	30
$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	3,8	3,3	2,68	2,30	1,80	1,35	1,20	1,06	1,00	1,00
$\Delta\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	0,1	0,1	0,08	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03

Погрешность измерения температуры $\Delta t = 0,5 ^\circ\text{C}$. Интервал изменения температуры 10-30 $^\circ\text{C}$. Выбираем масштаб 10 $^\circ\text{C}$ на 5 см, тогда длина графика будет 10 см, а $2\Delta t$ изобразится линией длиной 5 мм.

Интервал изменения $\eta = 1,0-3,8 \text{ МПа}\cdot\text{с}$, т.е. 2,8 $\text{МПа}\cdot\text{с}$; вы-

брав масштаб 1 $\text{МПа}\cdot\text{с}$ на 5 см, получим размер графика по вертикали 14 см; длина линии при $2\Delta\eta = 0,06 \text{ МПа}\cdot\text{с}$ составит 3 мм, а при $2\Delta\eta = 0,2 \text{ МПа}\cdot\text{с}$ будет 10 мм. Чтобы не увеличивать размеры чертежа, начало оси выбираем в точке 10 $^\circ\text{C}$, а начало оси η - в точке 1,0 $\text{МПа}\cdot\text{с}$, затем проводим оси координат, на осях отмечаем значения аргумента и функции через 1-2 см так, чтобы против пятисантиметровых линий по возможности стояли круглые значения; наносим экспериментальные точки, строим поле погрешностей и проводим гладкую кривую (см. рисунок).



5. ПОЛЬЗОВАНИЕ СПРАВОЧНЫМИ ТАБЛИЦАМИ

Часто в рабочую формулу кроме измеренных величин входят и такие, которые берутся из справочных таблиц (удельная теплоемкость, ускорение силы тяжести g , число π и др.).

Так как в числовых значениях величин, приведенных в таблицах, оставлены только верные знаки, то абсолютная погрешность числа, взятого из таблицы, не может превышать половины единицы последней значащей цифры этого числа. Например, в таблице указано, что удельная теплоемкость меди $c = 395 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$. В этом случае абсолютная ее погрешность $\Delta c = 0,5 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$.

В некоторых случаях в таблице приведено больше значащих цифр, чем нужно для расчета (согласно правилам приближенных вычислений). Тогда табличную величину округляют, оставляя в ней нужное количество знаков, а абсолютную погрешность округления принимают равной погрешности округления.

Например, при определении объема цилиндра высота и диаметр его были измерены до четвертой значащей цифры. Тогда число π , равное 3,1415826525, следует округлить до такого же количества знаков, т.е. принять равным 3,142. Погрешность округления в этом случае $\Delta\pi = 4\cdot 10^{-4}$. Погрешность эта уже лежит в пятом знаке, в то время как все остальные - в четвертом, поэтому без особого ущерба ее можно пренебречь.

В константах следует оставлять количество знаков, равное или большее на один, чем в измеренных величинах. В последнем случае погрешность округления можно пренебречь.

В некоторых таблицах отражена зависимость двух физических величин, одна из которых измеряется непосредственно, например: зависимость плотности воды от температуры, температуры кипения от давления и др.

Абсолютная погрешность такой величины обусловлена погрешностью измерения аргумента. Например, температура воды $t = 22^\circ\text{C}$; $\Delta t = 0,5^\circ\text{C}$. Требуется определить плотность (ρ) воды и ее абсолютную погрешность ($\Delta\rho$).

По таблицам определяем: при $t = 22^\circ\text{C}$ $\rho = 997,80 \text{ кг/м}^3$; $t_1 = 21^\circ\text{C}$ $\rho_1 = 998,02 \text{ кг/м}^3$; $t_2 = 23^\circ\text{C}$ $\rho_2 = 997,57 \text{ кг/м}^3$. Находим среднюю скорость изменения функции

$$\beta = \frac{\rho_2 - \rho_1}{t_2 - t_1} = \frac{997,57 - 998,02}{23 - 21} \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{K}^{-1}) = -0,22 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{K}^{-1})$$

Тогда погрешность $\Delta\rho = |\beta| \Delta t = 0,22 \cdot 0,5 \text{ кг/м}^3 = 0,11 \text{ кг/м}^3$.

Округлив абсолютную погрешность до первой значащей цифры, а само значение плотности — до сомнительного знака, получим

$$\rho = (997,8 \pm 0,1) \text{ кг/м}^3.$$

6. ЛИНЕЙНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ

Часто в таблицах нет значения аргумента, для которого отыскивается функция, а есть большее или меньшее значение. Определение значения функции в этом случае производится методом интерполяции.

Линейную интерполяцию можно применять в тех случаях, когда с достаточной точностью зависимость функции от аргумента является линейной, т.е. имеет вид $f(x) = f(x_1) + \beta(x - x_1)$. В остальных случаях применяется более сложная интерполяция.

В таблице даны следующие зависимости: при $t_1 = 15^\circ\text{C}$ $\alpha_1 = 73,26 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; $t_2 = 20^\circ\text{C}$ $\alpha_2 = 72,53 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Принимая, что в пределах $\pm 5^\circ\text{C}$ α зависит от температуры линейно, т.е. $\alpha = \alpha_1 + \beta(t - t_1)$, находим $\beta = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t_2 - t_1} = \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta t}\right)$, со-

ответствующее изменению температуры на 1°C . Для этого разность соседних значений функции делим на "шаг" таблицы ("шаг" таблицы равен разности значений аргумента), т.е.

$$\beta = \frac{(72,53 - 73,26) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}}{(20 - 15) \text{ град}} = -0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Н/(м} \cdot \text{град}^{-1})$$

Далее находим значение функции α по формуле

$$\alpha = \alpha_1 + \beta(t - t_1)$$

$$\text{или } \alpha = 73,26 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м} + (-0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Н/(м} \cdot \text{град}^{-1})) \cdot (18 - 15) \text{ град} = 72,81 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}.$$

Если температура была измерена с погрешностью $\Delta t = 0,5^\circ\text{C}$, то абсолютная погрешность $\Delta\alpha$, соответствующая этой погрешности Δt ,

$$\Delta\alpha = |\beta| \Delta t = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Н/(м} \cdot \text{град}^{-1}) \cdot 0,5 \text{ град} = 0,075 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}.$$

Окончательный результат определения α записывается так:

$$\alpha \pm \Delta\alpha = (72,81 \pm 0,08) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}.$$

Лабораторная работа М-1

ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ И МАССЫ

Ц е л ь р а б о т ы — ознакомить студентов с устройством и применением приборов для измерения линейных размеров тел и определения массы с точностью до $0,1 \text{ мг}$.

Измерение длины производят масштабными линейками. Величина наименьшего деления такой линейки называется ценой одного деления. Обычно цена одного деления линейки равна 1 мм . Для получения большей точности применяются следующие методы и приборы: метод линейного нониуса, метод микрометрического винта, катетометр и др.

М е т о д л и н е й н о г о н о н и у с а. Нониусом называют вспомогательную линейку N , которая может перемещаться вдоль основного масштаба M и с помощью которой отсчитывают доли делений основной шкалы. На нониусе нанесено некоторое число n делений. Цена деления нониуса a находится в определенном отношении

к цене деления масштаба b . В некоторых случаях^{*} общая длина всех $n-1$ делений нониуса равна длине масштаба (рис. I.1), т.е.

$$an = b(n-1). \quad (1)$$

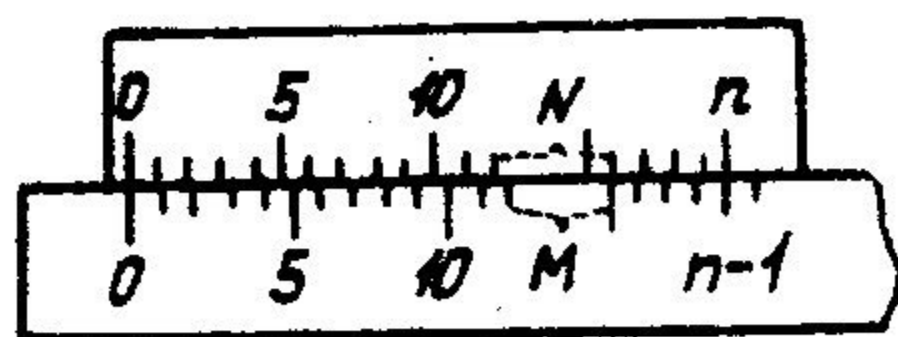


Рис. I.1

Отсюда находим разность между длиной одного деления масштаба и одного деления нониуса:

$$b-a = \frac{b}{n}. \quad (2)$$

Эта формула дает выражение точности нониуса, которая определяется отношением цены наименьшего деления масштаба к числу делений на нониусе. Точность нониуса часто бывает равна 1/10 мм, в этом случае $b = 1$ мм, $n = 10$.

Измерения с помощью нониуса производят следующим образом: к измеряемому отрезку (рис. I.2) прикладывается масштаб так, чтобы его нулевое деление совпадало с одним концом; к другому концу, который, предположим, приходится между k и $k+1$ делениями масштаба, прикладывают нониус его нулевым делением.

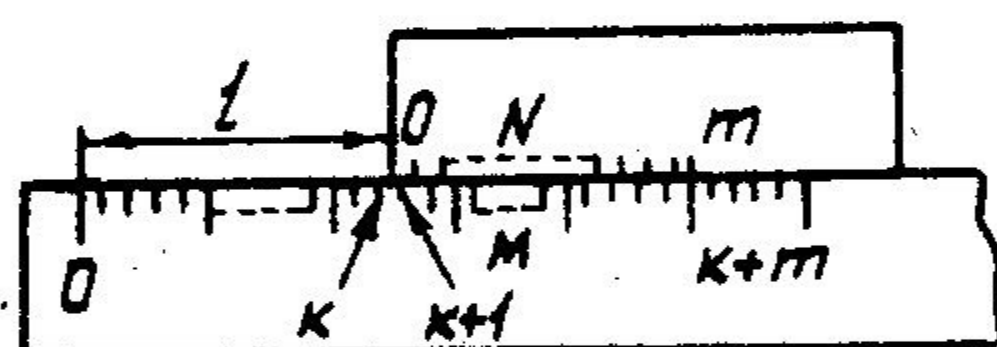


Рис. I.2

Так как цена деления масштаба и нониуса различна, то на некотором расстоянии от начала нониуса одно из его делений совпадает с некоторым делением масштаба; допустим, что это оказывается m -е деление нониуса. В таком случае расстояние от нулевого деления масштаба до m -го деления нониуса, с одной стороны, можно считать равным $k+m$ делениям масштаба, с другой стороны, его можно рассматривать как сумму длины измеряемого отрезка и делений нониуса, т.е. можно записать: $(k+m)b = l + ma$. Отсюда $l = kb + m(b-a)$ или, на основании формулы (2),

$$l = kb + \frac{b}{n} m. \quad (3)$$

^{*} В общем случае n делений нониуса могут соответствовать $(pn-1)$ делениям основной шкалы, где p — целое число. Например, 10 делений нониуса берутся равными 19 делениям основной шкалы ($p=2$). В этом, более общем, случае правила отсчета по нониусу будут те же, что и в случае $p=1$, точность нониуса определяется также значением b/n , т.е. не зависит от p .

Последнее выражение можно формулировать так: измеряемая длина равна числу целых делений масштаба, содержащихся в ней (kb), сложенному с точностью нониуса b/n , умноженному на номер m -го деления, совпадающего с каким-либо делением масштаба.

Иногда не достигается полного совпадения делений нониуса и масштаба. В этом случае берется номер того деления нониуса, для которого наблюдается лучшее совпадение. При этом допускается погрешность в измерении величины b/n . Отсюда следует, что погрешность при измерениях с нониусом не может превышать половины его точности.

Линейный нониус применяется в штангенциркуле. Этот прибор (рис. I.3) состоит из масштаба M , на котором в одном конце укреплен перпендикулярно к нему неподвижная ножка K , вторая такая же ножка L может перемещаться вдоль масштаба, она снабжена зажимным винтом C . На муфте подвижной ножки в ее вырезе нанесены деления нониуса. Измеряемый предмет вводят между ножками штангенциркуля, которые затем сдвигаются до соприкосновения с его поверхностями. Для точной установки подвижной ножки служит винт S . Отсчет производят при закате винта C .

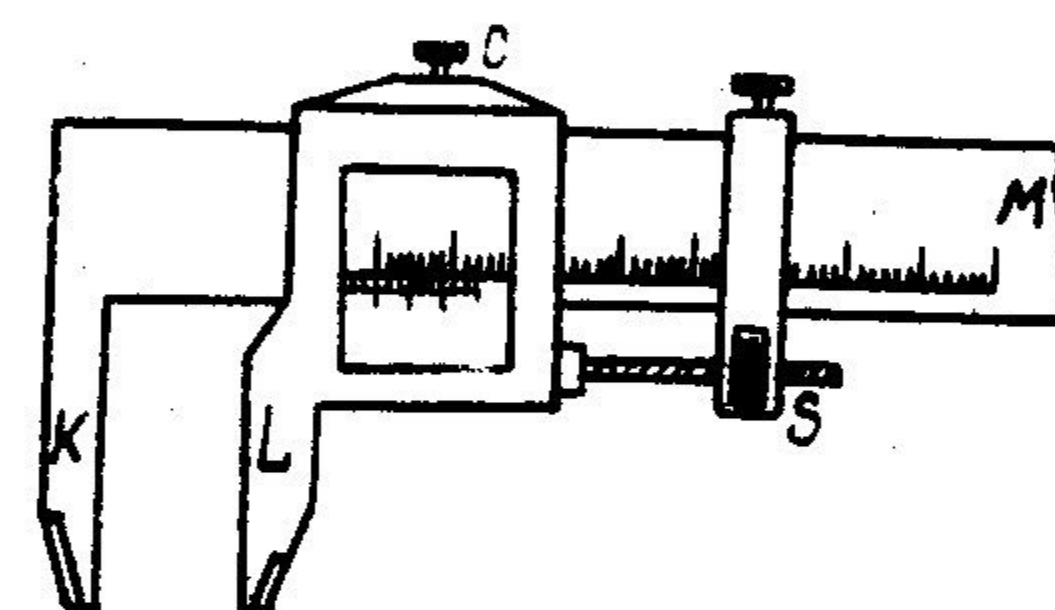


Рис. I.3

При внутренних промерах концы ножек вводят внутрь отверстия и, раздвинув их до соприкосновения с внутренней поверхностью предмета, выполняют отсчет также при закрепленной подвижной ножке.

В этом случае надо принять во внимание толщину концов обеих ножек штангенциркуля.

З а д а н и е № 1. При помощи штангенциркуля найти диаметр d и высоту h цилиндра, а также линейные размеры параллелепипеда, проводя по пять-семь измерений каждого размера. Затем по средним значениям найти объем V этих предметов.

Погрешность расчетов объемов вычислить путем дифференцирования натурального логарифма.

Данные измерений и вычислений записывают в таблицу типа таблицы I.1.

Т а б л и ц а I.1

Номер измерения	Цилиндр				Параллелепипед				
	Диаметр d	Высота h	Объем V	$\frac{\Delta V}{V} \cdot 100\%$	Длина a	Ширина b	Высота c	Объем V	$\frac{\Delta V}{V} \cdot 100\%$

Метод микрометрического винта

Микрометрическим винтом называют тщательно изготовленный винт с соответствующей гайкой, который имеет особую головку с делениями, называемую барабаном. Шаг винта точно известен и дается как постоянная прибора. Метод микрометрического винта позволяет производить измерения с большой точностью. Так, при шаге винта, равном 0,5 мм и при 500 делениях на барабане точность измерений может быть доведена до 0,001 мм.

Микрометрический винт применяется в микрометрах.

Микрометры представляют собой массивную металлическую скобу, (рис. I.4), на концах которой находятся друг против друга неподвижный упор a и микрометрический винт b . Шаг винта равен 0,5 мм (1 мм), а на барабане K нанесено 50 (100 или 25) делений.

Измеряемый предмет вводят между упорами a и b и, вращая микрометрический винт, доводят их до соприкосновения с поверхностями измеряемого предмета. Показания прибора отсчитываются следующим

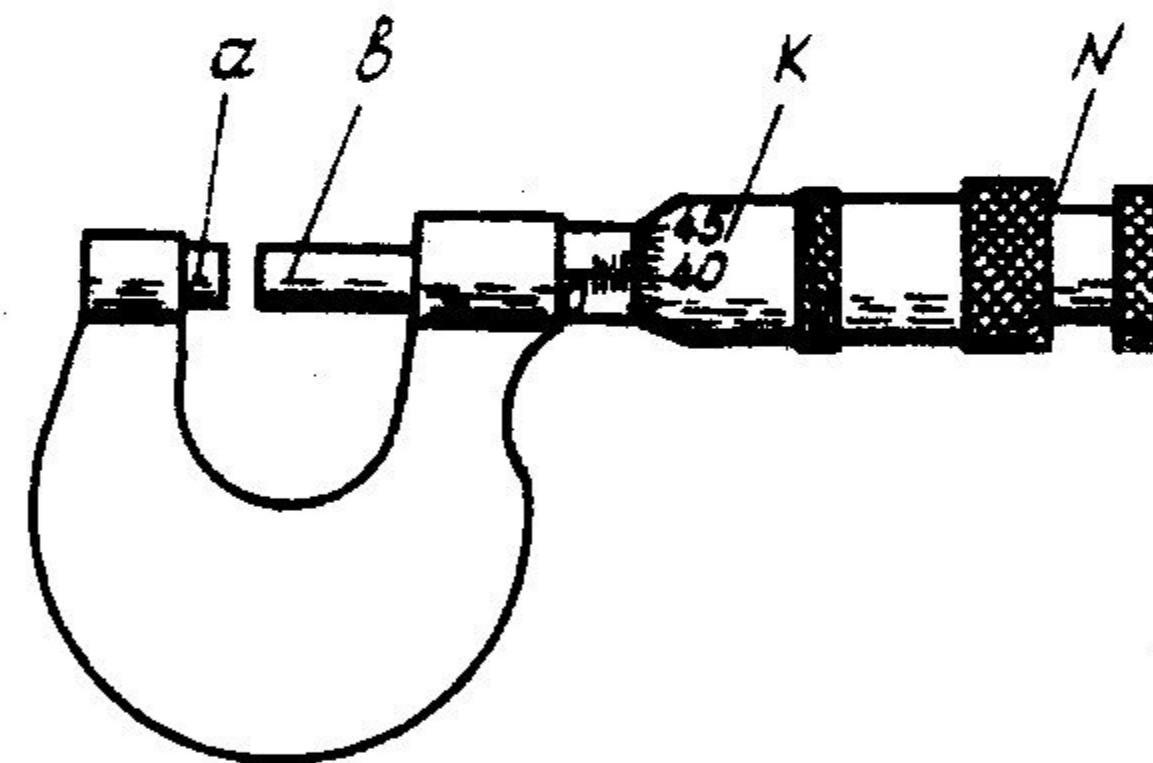


Рис. I.4

образом: целые и половины миллиметров - по линейной шкале, нанесенной на удлиненном конце гайки микрометрического винта, а доли миллиметра - по делениям барабана. Для устранения погрешностей в измерениях микрометр снабжается фрикционной (т.е. основанной на трении) головкой с трещоткой.

Точность микрометра при этом равна отношению шага винта к числу делений барабана. В нашем случае $0,5 \text{ мм} : 50 = 0,01 \text{ мм}$.

З а д а н и е № 2. При помощи микрометра определить диамет-

ры трех проволок и найти линейные размеры цилиндра, сделав пять-семь измерений каждой длины. Данные измерений записать в таблицу типа табл. I.2.

Найти средние значения и оценить погрешность. Определить объем цилиндра. Погрешность измерения объема найти таким же методом, как и в задании № I.

Т а б л и ц а I.2

Номер измерения	Проволока				Цилиндр			
	Диаметр I проволоки	Диаметр II проволоки	Диаметр III проволоки	$\frac{\Delta d}{d} \cdot 100\%$	Диаметр d	Высота h	Объем V	$\frac{\Delta V}{V} \cdot 100\%$

К а т е т о м е т р

Катетометр предназначен для измерения расстояний между двумя точками на одной вертикали. Он состоит из массивной цилиндрической колонки 4 (рис. I.5) на треножнике 3, измерительной каретки 6, которая может перемещаться вдоль колонки зрительной трубы 8, отсчетного микроскопа 7. Сущность метода измерения состоит в следующем. Зрительная труба наводится на горизонтальную линию объекта, смещение которого необходимо определить. Производится отсчет положения измерительной каретки до и после смещения объекта. Разность отсчетов представляет величину смещения.

При измерении колонка 4 должна находиться в строго вертикальном положении. Установка ее контролируется по круглому уровню II и регулируется с помощью винтов, расположенных в основании треножника. Зрительная труба устанавливается горизонтально с помощью уровня, прикрепленного к ней микрометрическим винтом 10. Точная выводка зрительной трубы на избранную линию на измеряемом объекте производится микрометрическим винтом 5. Небольшой поворот визирной линии в горизонтальной плос-

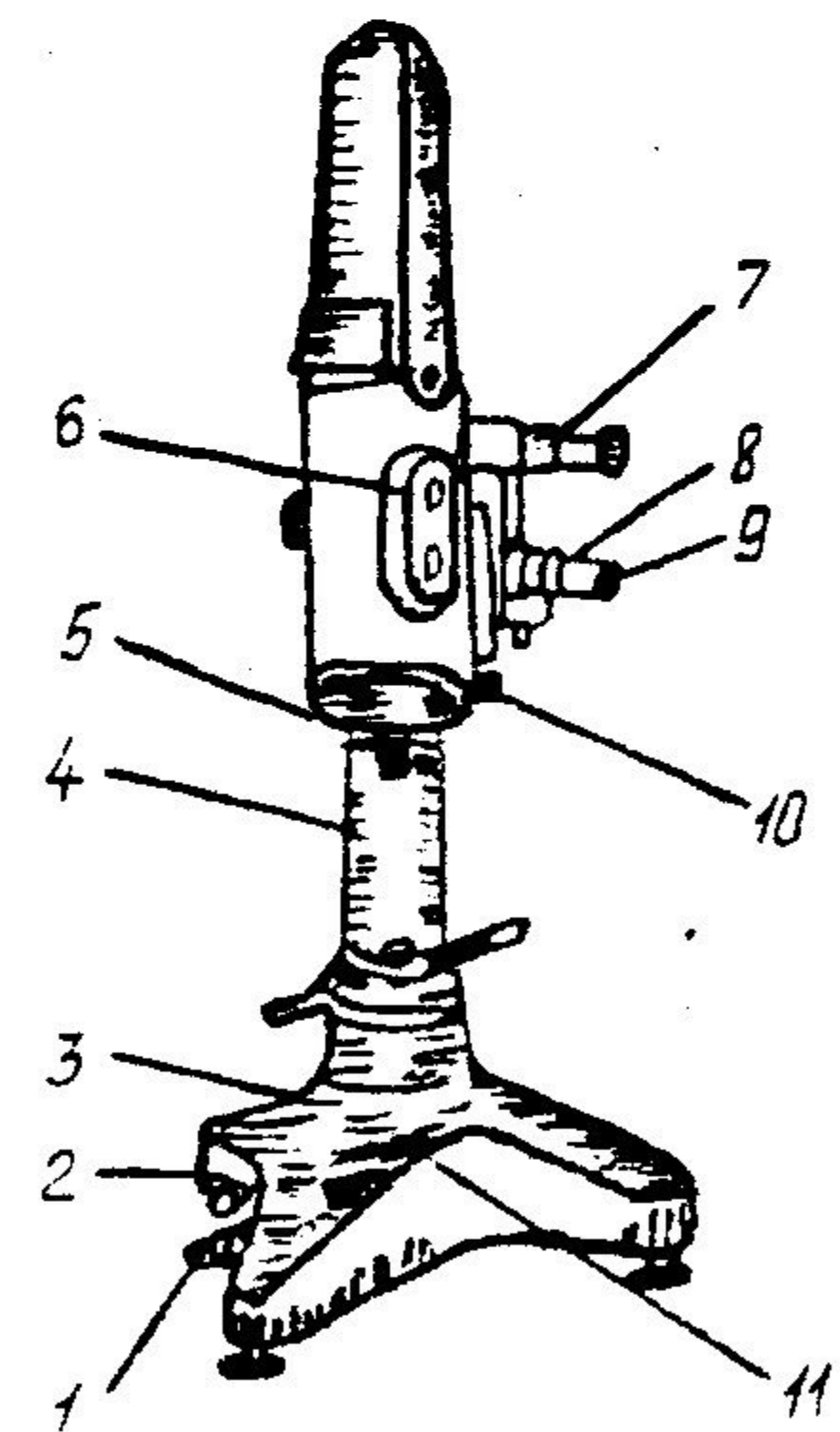


Рис. I.5

кости может быть сделан микрометрическим винтом 2 при закрепленном винте 1. Сетка зрительной трубы имеет перекрестие, правый горизонтальный штрих ее выполнен в виде углового биссектора. При наведении выбранная линия должна находиться точно посередине углового биссектора.

Так как измерения должны обеспечивать тысячные доли миллиметра, следует контролировать как положение визирной линии (наводку зрительной трубы на линию объекта), так и положение пузырька уровня на зрительной трубе (рассматриваемого в лупу 9) - "дужки" изображения пузырька уровня должны совпадать своими концами, образуя сплошную дугу. Нельзя производить отсчеты при сколь угодно заметных смещениях визирной линии или пузырька уровня.

Для создания более устойчивых условий работы не следует прислоняться к столу или опираться на него рукой.

Для выполнения измерений включить осветительную часть в сеть переменного тока, поворотом окуляра 7 добиться более четкого изображения шкалы, видимой в поле зрения микроскопа. Шкала представляет собой темное прямоугольное поле на зеленом освещенном фоне, пересеченное вертикальными узкими и более широкими полосами. Индексом для отсчета служит горизонтальный миллиметровый штрих, видимый в поле зрения микроскопа одновременно с отсчетной шкалой. Его положение относительно шкалы и дает отсчет. При этом (рис. I.6) целое число миллиметров в отсчете - это цифра, стоящая слева от штриха. Десятые доли миллиметра определяются по ближайшей к штриху меньшей цифре вертикального ряда цифр. Для отсчета сотых и тысячных долей миллиметра необходимо найти положение точки пересечения отсчетного штриха со светлой наклонной линией прямоугольника. Число сотых долей - ближайшая цифра горизонтального ряда цифр, стоящая слева от точки пересечения. Число тысячных долей определяется на глаз. Таким образом, отсчет, сделанный при положении визира, соответствующего рис. I.6, читается так: 162,237.

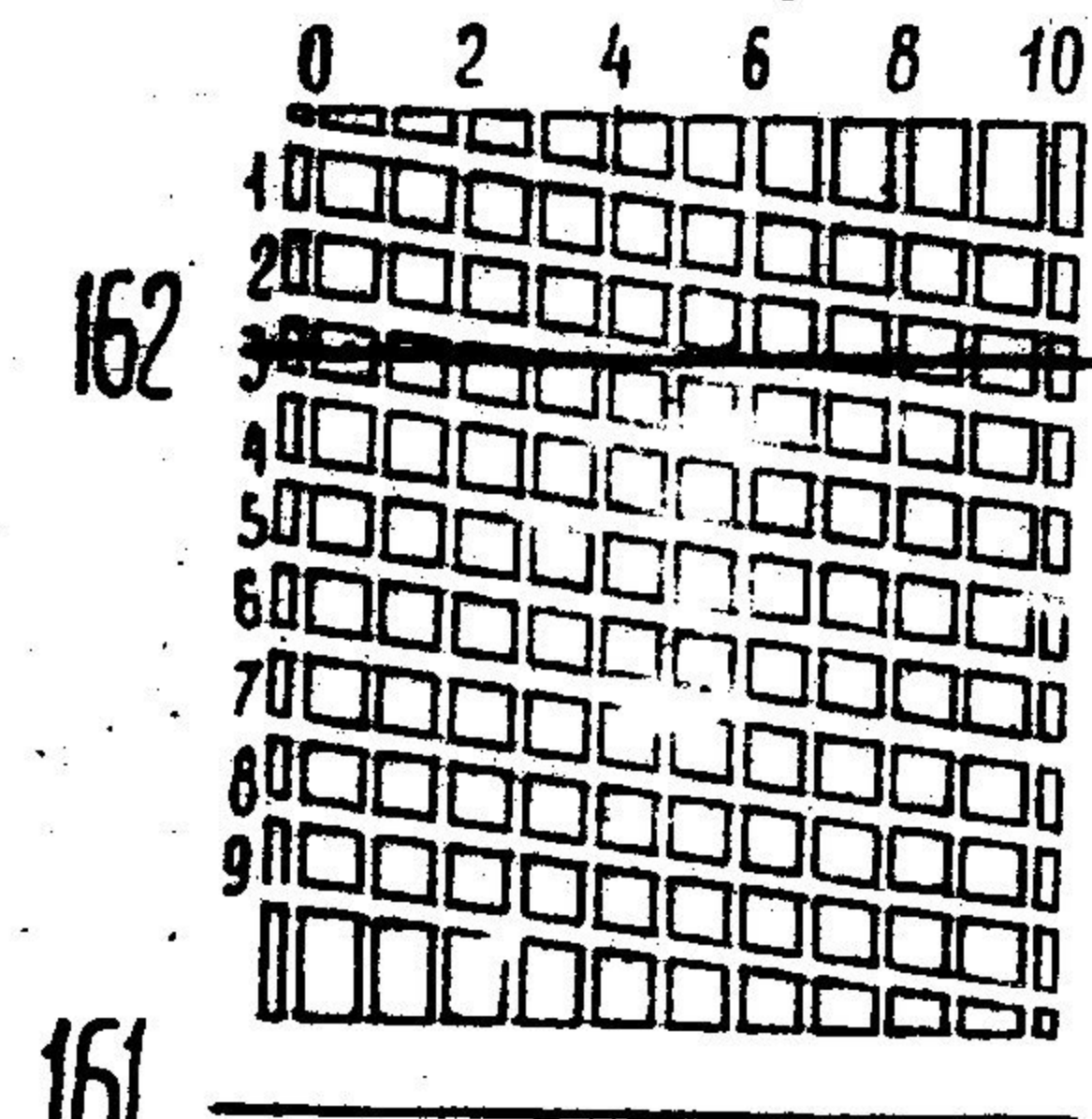


Рис. I.6

З а д а н и е № 3. Определить при помощи катетометра внутренний $d_{вн}$ и внешний $d_{внеш}$ диаметры капилляра. Измерения выполнить три раза, записывая в таблицу типа табл. I.3.

Т а б л и ц а I.3

Внутренний диаметр			Внешний диаметр		
Начало отсчета	Конец отсчета	$d_{вн}$	Начало отсчета	Конец отсчета	$d_{внеш}$

Результаты усреднить, погрешность измерения рассчитать по среднему значению.

В е с ы а н а л и т и ч е с к и е

Весы аналитические заключены в металлическую витрину с боковыми выдвижными стеклянными дверцами. Витрина закреплена на металлическом основании (рис. I.7). На основании 1 прикреплена колонка 2. На колонке укрепляются два кронштейна с воздушными успокоителями-демпферами 3. На колонке помещена опорная подушка, на которую опирается средняя призма коромысла 6. На концах коромысла в специальных седлах 5 закреплены грузоподъемные призмы, на которые навешиваются серьги 4 с грузоподъемными подушками. На верхние крючки серег подвешиваются чашки 12 с дужками, на нижние - стаканы демпферов, входящие в корпуса, укрепленные на колонке.

Весы снабжены встроенными в них миллиграммовыми гирями от 10 до 120 мг, навешиваемыми на планку, скрепленную с правой серьгой. Управление гирями производится с помощью вращающихся лимбов, расположенных справа витрины весов, через рычаги 7. При вращении малого лимба 9 происходит наложение или снятие десятков миллиграммов, при вращении большого лимба 8 - сотен миллиграммов.

На коромысле укреплена стрелка 10, на нижнем конце которой установлена микрошкала с отсче-

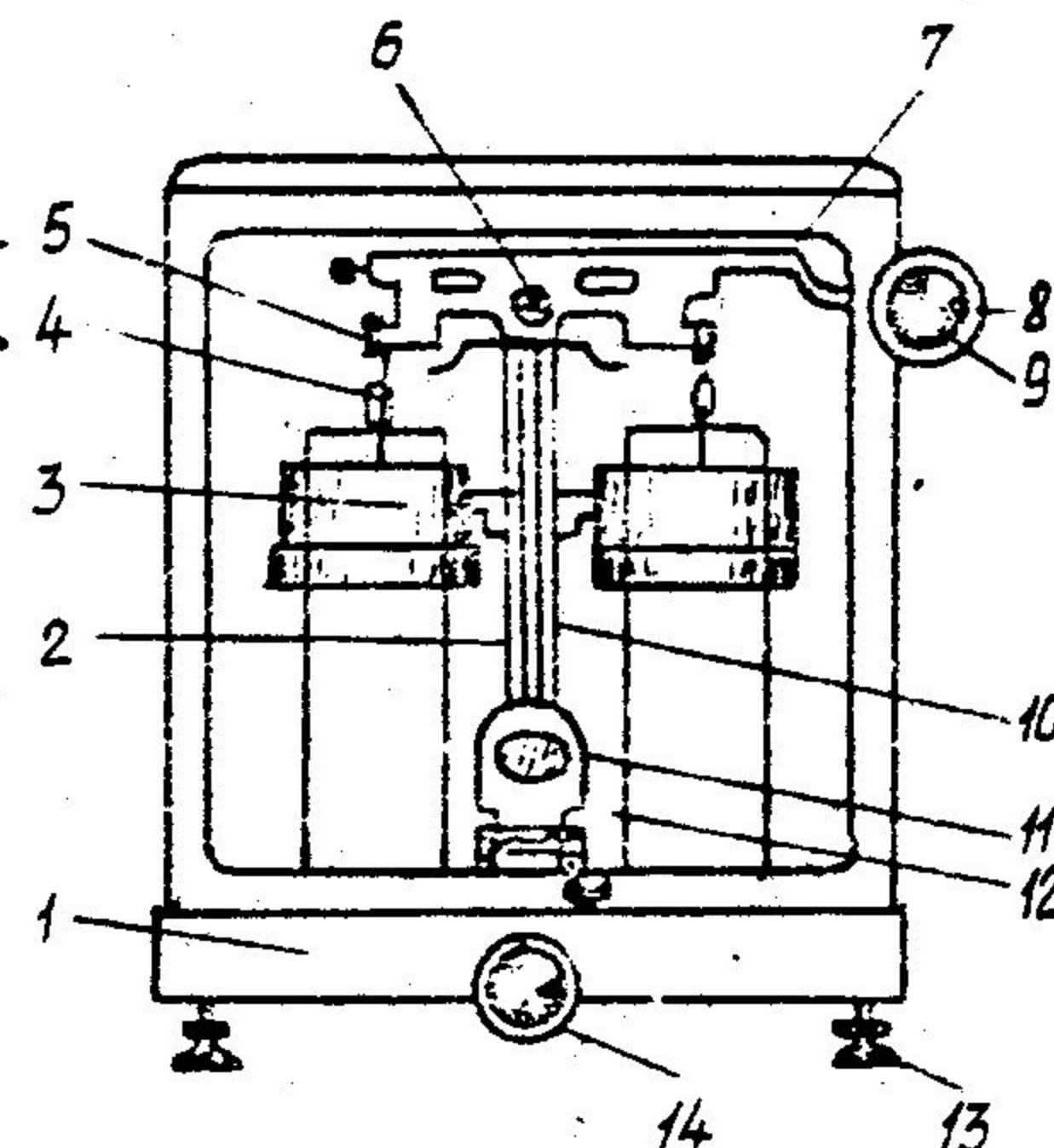


Рис. I.7

том от 0 до 10 мг в обе стороны. Микрошкала с помощью оптического устройства, состоящего из подсветки, объектива и отражающих зеркал, проектируется на экран II, расположенный перед колонкой весов. Под основанием весов смонтировано арретирующее устройство, которое приводится в действие с помощью маховика 14. Осветитель расположен сзади витрины. Весы имеют заднюю нерегулируемую ножку и две боковые регулируемые 13, с помощью которых они устанавливаются по уровню, укрепленному в основании весов.

При работе с весами необходимо выполнять следующие правила:

1. Нельзя выходить за пределы той максимальной нагрузки, на которую рассчитаны данные весы.

2. Класть на чашки или снимать с них взвешиваемое тело и разновески, а также перемещать рейтер по коромыслу можно только при арретированных весах. Если весы не арретированы, не следует даже открывать дверцы весов, а тем более прикасаться к коромыслу и чашкам.

3. Нагрузки на чашках нужно располагать так, чтобы их общий центр тяжести приходился приблизительно посередине чашки.

4. Нельзя брать разновески руками, для этого служит специальный пинцет. Снимая разновески с весов, следует класть их только в соответствующие гнезда футляра.

5. Опускать и поднимать арретир нужно медленно и плавно. Если коромысло совершает колебания, то поднимать арретир надо в тот момент, когда стрелка весов проходит через среднее положение, иначе коромысло получает толчки.

6. Не следует полностью опускать арретир, пока чашки весов еще мало уравновешены; сначала коромысло освобождается от арретира лишь настолько, чтобы можно было по отклонению стрелки судить, какая из чашек легче. После этого сразу же поднимают арретир и соответственно изменяют вес разновесок.

7. Если при опускании арретира чашки весов начинают качаться маятникообразно, то следует, не опуская полностью арретира, приоткрыть дверцу весов и успокоить чашки, прикасаясь к их краям кусочком бумаги.

З а д а н и е № 4

1. Определить цену деления оптической шкалы. Для этого нагрузить правую чашку десятью миллиграммами и отметить число делений шкалы, на котором остановится визирная линия. Разделив

10 мг на число делений, получим цену деления в миллиграммах на деление (мг/дел.).

2. Определить массу тела точным взвешиванием. Погрешность определения массы принять равным половине цены деления оптической шкалы.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА. Физический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1984, с.70-71.

Лабораторная работа М-2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Ц е л ь р а б о т ы - научить студентов определять плотность тел различной формы.

Определение плотности тела правильной геометрической формы

Плотность ρ - величина, определяемая для однородного вещества его массой в единице объема. Плотность неоднородного вещества в определенной точке - предел отношения массы m тела к его объему V , когда объем стягивается к этой точке. Средняя плотность $\langle \rho \rangle$ неоднородного тела также есть отношение m/V .

Объем тела правильной формы может быть вычислен по его линейным размерам, а масса тела - взвешиванием на рычажных весах. Методика измерения линейных размеров микрометром и штангенциркулем, а также правила взвешивания тел приводятся в работе М-1.

О п р е д е л и т ь о т н о с и т е л ь н у ю п о г р е ш н о с т ь плотности тела путем дифференцирования натурального логарифма.

Относительные погрешности входящих в формулы величин должны быть приблизительно одинаковыми. Поэтому отдельные линейные размеры следует измерять разными приборами. Размеры, имеющие меньшую величину, измеряют более чувствительными приборами. Результаты измерений и вычислений нужно записать в таблицу типа таблицы 2.1.

Таблица 2.1

Номер	m	Δm	Линейные размеры тела								$\frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot 100\%$	$\rho_{ист}$
			a	Δa	b	Δb	c	Δc	ρ	$\Delta \rho$		

Определение плотности тела неправильной геометрической формы

В этом случае объем определяется с помощью так называемого гидростатического взвешивания. В соответствии с законом Архимеда погруженное в жидкость тело "теряет" в своем весе

$$\rho_{ж} V g,$$

где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости (воды), берется из табл.2.2,
 g - ускорение силы тяжести.

Таблица 2.2

t, °C	Плотность воды $\rho_{ж} \cdot 10^3$, кг/м ³
0	1,0000
5	1,0000
10	0,9997
15	0,9991
20	0,9982
25	0,9971
30	0,9935
35	0,9935

"Потерю" в весе можно определить и другим способом. Взвешиваем тело в воздухе m_1 , а затем в жидкости m_2 . Разность полученных результатов ($m_1 - m_2$) и будет "потерей" веса данного тела в жидкости.

Следовательно,

$$\rho_{ж} V g = (m_1 - m_2) g,$$

откуда

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_{ж}}$$

Тогда плотность тела

$$\rho_T = \frac{m_1}{V} = \frac{m_1 \rho_{ж}}{m_1 - m_2}.$$

При определении плотности легких тел (дерева, пробки и других) расчет следует вести по формуле

$$\rho_T = \frac{m_1}{m_1 - m_2} (\rho_{ж} - \rho) + \rho, \quad (I)$$

где ρ - плотность воздуха.

Для облегчения взвешивания тела в воде используется тяжелая площадка, подвешенная к крючку укороченной чашки весов и полностью погруженная в воду. Сначала взвешивают площадку, погруженную в воду. Пусть результат взвешивания будет M_1 . После этого взвешивают испытываемое тело в воздухе с погруженной в воду площадкой, определяя массу M_2 . Очевидно, что $M_2 - M_1 = m_1$. Помещая испытываемое тело на погруженную в воду площадку, определяют массу M_3 . Тогда $M_2 - M_3 = m_1 - m_2$.

С учетом вышесказанного формула (I) принимает вид

$$\rho_T = \frac{m_1 \rho_{ж}}{m_1 - m_2} = \frac{M_2 - M_1}{M_2 - M_3} \rho_{ж}.$$

Погрешность в данном случае определяется путем дифференцирования в частных производных по формуле

$$\Delta \rho_T = \frac{\rho_{ж}}{M_2 - M_3} \left[\Delta M_1 - \frac{(M_1 - M_3) \Delta M_2}{M_2 - M_3} + \frac{(M_2 - M_1) \Delta M_3}{M_2 - M_3} \right].$$

Вывести формулу для расчета абсолютной погрешности ρ_T . Результаты измерений и вычислений записать в таблицу табл.2.3.

Таблица 2.3

M_1	ΔM_1	M_2	ΔM_2	M_3	ΔM_3	ρ	$\Delta \rho$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot 100\%$	$\rho_{ист}$

Погрешности измерения m , M_1 , M_2 , M_3 , а также линейных размеров найти методом определения погрешностей прямых измерений.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1977, с.141-142.
2. Физический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1984. - 550 с.

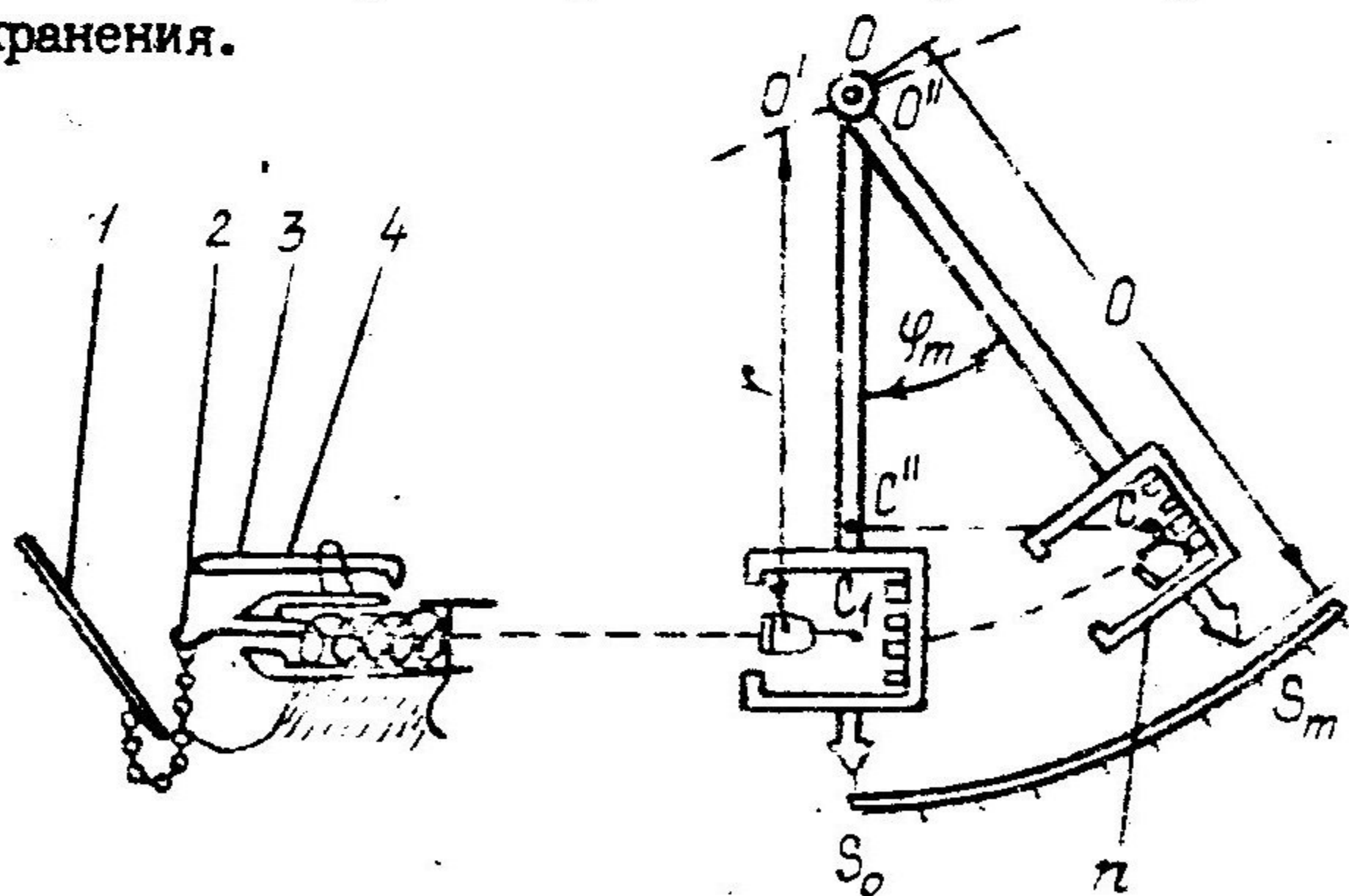
Лабораторная работа М-3
- ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ
БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Ц е л ь р а б о т ы - ознакомление с баллистическим маятником и изучение явления удара.

Баллистический маятник представляет собой подвешенный на тросах ящик с песком или другим вязким материалом, в котором после выстрела застревают пули (снаряд), вследствие чего ящик оказывается поднятым на некоторую высоту h ; измерив ее, можно определить скорость полета.

В данной работе баллистический маятник представляет собой физический маятник, нижняя часть которого выполнена в виде цилиндра.

После выстрела происходит неупругое взаимодействие пули и цилиндра в течение очень короткого промежутка времени. Пуля, застрявшая в цилиндре, начинает колебаться вместе с цилиндром с угловой скоростью ω (см. рисунок). Так как время соударения пули с маятником мало в сравнении с периодом колебания, систему пуля - маятник можно рассматривать замкнутой и применять к ней законы сохранения.



Согласно закону сохранения момента импульса в замкнутой системе, момент импульса остается величиной постоянной, т.е.

$$L_1 = L_2,$$

Здесь L_1 - момент импульса системы до взаимодействия;
 L_2 - момент импульса системы после удара;

$$L_1 = mvr + L_m,$$

где m - масса пули;

v - ее скорость перед ударом;

r - расстояние от оси вращения системы (точка O) до точки встречи летящей пули с маятником в момент удара;

$L_m = 0$ - момент импульса маятника до удара;

$$L_2 = J\omega,$$

где J - момент инерции системы;

ω - угловая скорость ее в момент удара.

Следовательно,

$$mvr = J\omega. \quad (1)$$

Согласно закону сохранения энергии можно записать

$$W_1 = W_2 + \Delta W,$$

где $W_1 = mv^2/2$ - кинетическая энергия пули;

$W_2 = J\omega^2/2$ - кинетическая энергия системы;

ΔW - энергия, рассеиваемая на неупругих деформациях при ударе, которой в расчете пренебрегаем.

В момент наибольшего отклонения маятника кинетическая энергия системы переходит в ее потенциальную, т.е.

$$\frac{J\omega^2}{2} = (M+m)gh, \quad (2)$$

где M - масса маятника (указана на приборе);

$h = OO''$ - максимальная высота подъема центра тяжести системы.

Используя (1) и (2), получим

$$v = \frac{\sqrt{2J(M+m)gh}}{mr}, \quad (3)$$

но

$$h = l - l \cos \varphi_m = 2l \sin^2 \frac{\varphi_m}{2}, \quad (4)$$

где $l = OC$ - расстояние от точки подвеса до центра тяжести системы (указано на приборе).

Ввиду малой величины максимального угла φ_m отклонение маятника

$$\sin \frac{\varphi_m}{2} = \frac{\varphi_m}{2} = \frac{S_m - S_o}{2a}, \quad (5)$$

где S_m - максимальное отклонение указателя после удара;
 S_o - положение указателя до удара;
 a - расстояние между точкой подвеса и концом указателя.

Момент инерции можно определить из формулы для периода колебания физического маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{(M+m)gl}}. \quad (6)$$

Тогда из выражений (3)-(6) следует, что

$$\nu = \frac{T(M+m)gl}{\pi m l} \frac{S_m - S_o}{2a}.$$

В ходе работы производится пять-семь выстрелов, при этом каждый раз выполняется отсчет S_o и S_m . Для производства выстрелов необходимо конец цепочки 2 (см. рисунок) набросить на хвостовик ударника 4. Одной рукой потянуть за рычаг 1 и в этот момент свободной рукой подать максимально вверх спусковую скобу 3. Снять кольцо 2 с хвостовика. Вставить пулю в канал ствола и нажать на спусковую скобу 3. Пуля закладывается в ствол пушки так, чтобы она занимала одинаковое в каждом случае положение в канале ствола.

Из всех измеренных $S_m - S_o$ вычислить среднее значение $(S_m - S_o)_{\text{ср}}$ по нему найти ошибку $\Delta(S_m - S_o)$.

Массу пули определить взвешиванием. Для определения периода колебаний маятника T измерить время t десяти полных колебаний после выстрела для трех-пяти выстрелов. Тогда $T = t/10$; ΔT , Δt определить по среднему.

Расстояние a от линии подвеса до указателя измеряется линейкой. Расстояние l от линии подвеса до линии полета пули указано на приборе. Ошибку ν находят путем дифференцирования логарифма функции. Результаты измерений свести в таблицу:

$$M = \quad \Delta M = \quad m = \quad \Delta m = \quad l = \quad \Delta l = \quad r = \quad \Delta r =$$

S_o	S_m	$(S_m - S_o)$	$\Delta(S_m - S_o)$	$T = \frac{t}{10}$	ΔT	a	Δa	ν

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И в е р о н о в а В.И. Физический практикум. Механика и молекулярная физика. - М.:

2. С а в е л ь е в И.В. Курс физики. - М.: Наука, 1968, т. I, с. 109-114, 128-130.

Лабораторная работа М-4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Ц е л ь р а б о т ы - изучение законов вращательного движения.

Моментом инерции материальной точки (элементарной массы) относительно данной оси называется скалярная величина, равная произведению массы точки m_i на квадрат расстояния ее r_i^2 от этой оси:

$$J_i = m_i r_i^2.$$

Момент инерции твердого тела относительно данной оси равен сумме моментов инерции материальных точек (элементарных масс), из которых состоит твердое тело, взятых относительно этой же оси:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2,$$

где n - число элементарных объемов, на которые мысленно разбито твердое тело;

m - масса i -го элементарного объема;

r_i - расстояние i -го элементарного объема от оси, относительно которой определяют момент инерции.

Расстояния r_i зависят от выбора оси, поэтому и момент инерции тела зависит от расположения оси, относительно которой он определяется.

Момент инерции тел правильной формы легко можно вычислить аналитически, причем задача значительно упрощается, если определить его относительно оси, проходящей через центр тяжести тела.

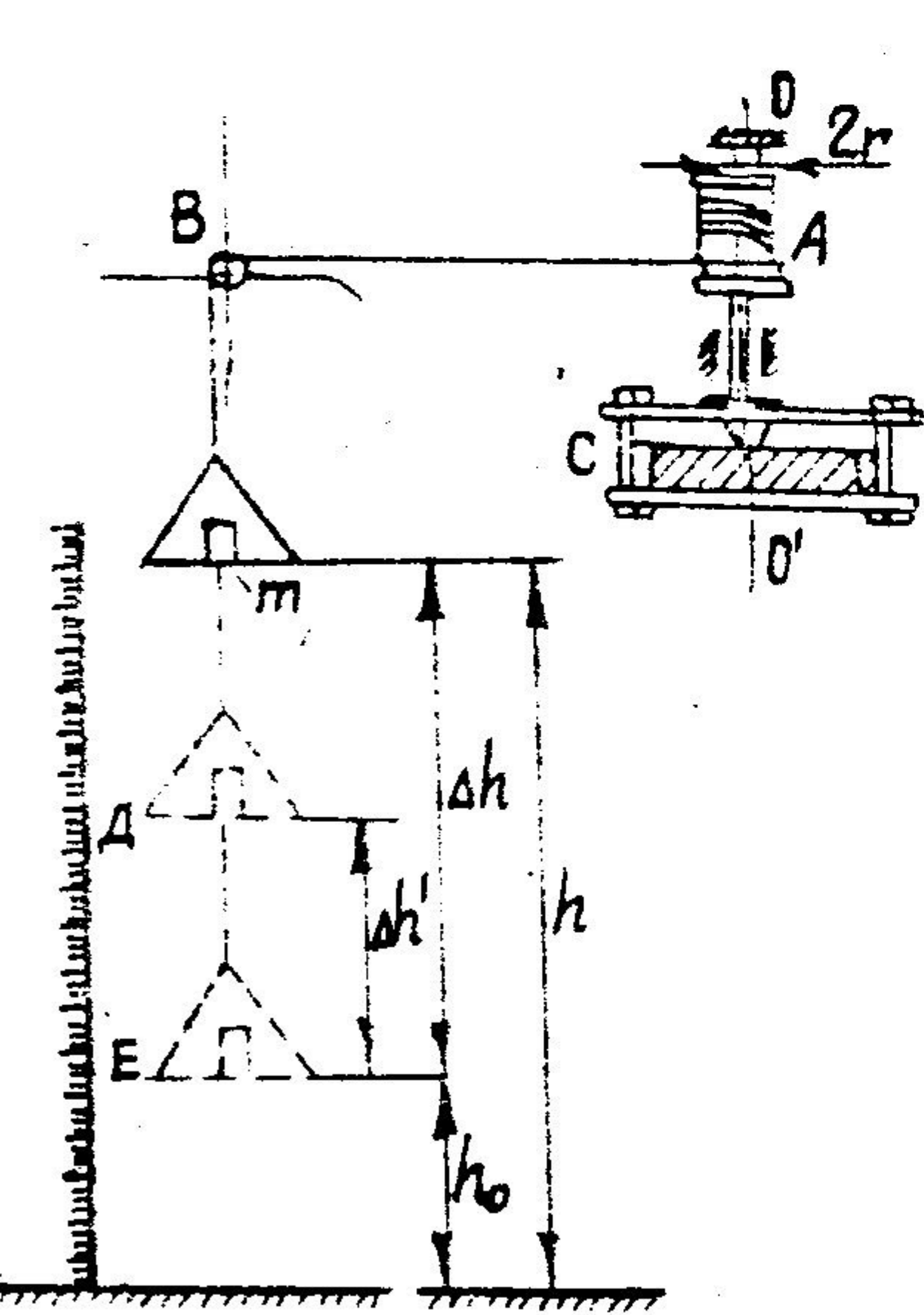
Момент инерции тела относительно произвольной оси можно определить по теореме Штейнера, если известен момент инерции этого тела относительно параллельной оси, проходящей через его центр тяжести:

$$J = J_0 + Ml^2,$$

где J_0 - момент инерции тела относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр тяжести тела;
 M - масса тела;
 l - расстояние между осями.

Момент инерции тел неправильной формы определяют экспериментально.

Установка, с помощью которой выполняется работа, представляет собой два горизонтальных диска с вертикальной осью вращения OO' (см. рисунок). Диски приводятся во вращательное движение грузом



массой m , подвешенным на нити. Нить перекинута через блок B и навита на шкив A . Если при полном разматывании нити груз проходит расстояние $\Delta h = h - h_0$, то его потенциальная энергия уменьшается на $\Delta W_n = mg\Delta h$. Эта энергия расходуется на преодоление сил трения в установке и сообщение кинетической энергии вращательного движения установке и кинетической энергии поступательного движения грузу:

$$mg\Delta h = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{J_1\omega_1^2}{2} + f\Delta h, \quad (I)$$

где m - масса груза;
 v_1 - скорость груза в момент достижения им крайнего положения E ;

где J_1 - момент инерции установки;
 ω_1 - угловая скорость вращательного движения установки в момент достижения грузом положения E ;
 $f\Delta h$ - работа по преодолению сил трения на пути.
 Вращаясь по инерции, система поднимает груз на высоту $\Delta h' = h' - h_0$ (в положение D). В этом положении $\Delta W_n' = mg\Delta h'$.

В соответствии с законом сохранения энергии убыль потенциальной энергии $\Delta W_n'$ по сравнению с ее запасом в первоначальном положении ΔW_n равна работе по преодолению сил трения на пути $\Delta h + \Delta h'$, т.е.

$$mg\Delta h = mg\Delta h' = f(\Delta h + \Delta h'),$$

откуда

$$f = mg \frac{\Delta h - \Delta h'}{\Delta h + \Delta h'}. \quad (2)$$

Так как движение равноускоренное (сила трения при малых изменениях скорости практически не изменяется) и начальные скорости установки и груза равны нулю, то

$$v_1 = a_1 t_1; \quad \Delta h = \frac{a_1 t_1^2}{2},$$

где t_1 - время опускания груза.
 Тогда

$$v_1 = \frac{2\Delta h}{t_1}. \quad (3)$$

Шнур намотан на вал A . Очевидно, что скорость поступательного движения шнура с грузом $v_1 = \omega_1(r + r')$, или $v_1 = \omega_1 r$, так как радиусом шнура r' можно пренебречь по сравнению с радиусом вала r .

Подставив в выражение (I) найденное из последнего соотношения ω_1 с учетом (2) и (3), получим формулу для расчета момента инерции установки

$$J' = mr^2 \left(g t_1^2 \frac{\Delta h'}{\Delta h (\Delta h + \Delta h')} - 1 \right).$$

Если между дисками установки положить тело неправильной формы и закрепить его винтом C , то, определив время опускания груза t_2 и новую высоту поднятия при движении по инерции $\Delta h''$ и при неизменной высоте Δh , найдем момент инерции установки с телом

$$J'' = mr^2 \left(gt^2 \frac{\Delta h''}{\Delta h(\Delta h + \Delta h'')} - 1 \right).$$

Так как момент инерции системы относительно оси вращения равен сумме моментов инерции всех ее частей относительно этой оси, то момент инерции тела можно определять как разность: $J = J'' - J'$. Отсюда

$$J = \frac{mr^2 g}{\Delta h} \left(\frac{t_2^2 \Delta h''}{\Delta h + \Delta h''} - \frac{t_1^2 \Delta h'}{\Delta h + \Delta h'} \right). \quad (4)$$

В связи с тем, что непосредственно измеряется диаметр вала, запишем уравнение (4) через диаметр:

$$\frac{md^2 g}{4\Delta h} \left(\frac{t_2^2 \Delta h''}{\Delta h + \Delta h''} - \frac{t_1^2 \Delta h'}{\Delta h + \Delta h'} \right). \quad (5)$$

Методика выполнения работы

1. Раскрутить нить с вала и линейкой измерить высоту h_0 , до которой опускается груз (отсчет производят по нижней границе груза). Нижняя граница груза при полностью раскрученной нити не должна достичь пола.

2. При ненагруженной установке поднять груз на высоту h (по линейке сделать отсчет) и с помощью секундомера определить время t_1 опускания груза до высоты h_0 .

3. Одновременно с измерением t_1 измерить высоту h' , которой достигает груз при движении по инерции.

4. Опыт произвести с тремя разными грузами, используя для этого добавочные гири, по три раза с каждым грузом, оставляя постоянной высоту h .

5. Между дисками установки положить тело, момент инерции которого нужно определить, и закрепить его в точке C .

6. Указанное в пп. 2, 3, 4 проделать с нагруженной установкой при тех же нагрузках m и высоте h и определить t_2 и h'' .

7. Штангенциркулем из трех-пяти измерений определить средний диаметр d вала.

8. По формуле (5) вычислить для каждого груза m момент инерции тела относительно оси, проходящей через точку соприкосновения винта C с телом, подставив в нее средние значения $d, t_1, t_2, \Delta h, \Delta h', \Delta h''$, соответствующие каждой из масс груза.

9. Погрешность, допущенную при определении момента инерции, считать методом усреднения.

10. Данные измерений и результаты вычислений свести в таблицы типа табл. 4.1 и 4.2

Таблица 4.1

m	t_1	$\Delta h = h - h_0$	$\Delta h' = h' - h_0$	t_2	$\Delta h = h'' - h_0$	d	$\frac{d^2 g}{4\Delta h}$

Таблица 4.2

$\frac{md^2 g}{4\Delta h}$	$\frac{t_1^2 \Delta h'}{\Delta h + \Delta h'}$	$\frac{t_2^2 \Delta h''}{\Delta h + \Delta h''}$	J	$J_{\text{ср}}$	ΔJ

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1966, Т. I, с. I08-III.

2. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. - Л.: ГИТТЛ, 1952, Т. I, с. I42-I43, I47-I50.

Лабораторная работа М-5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ КАТЕТОМЕТРА

Цель работы - ознакомление с основными положениями теории и экспериментальное определение модуля упругости (модуля Юнга) для некоторых материалов.

Изменение формы или размеров тел под действием внешних сил называется деформацией тела. Величина изменения размера l тела называется абсолютной деформацией Δl . Относительная деформация $\varepsilon = \Delta l / l$ показывает, какую часть от первоначального размера тела составляет абсолютная деформация.

Твердые тела, как известно, имеют кристаллическое строение. Расстояние между соседними атомами решетки таково, что силы отталкивания и притяжения, действующие между ними, уравниваются, и атомы совершают колебания около положения равновесия.

При деформациях происходит смещение частиц, находящихся в узлах кристаллических решеток, из первоначальных положений равновесия в новые. Этому препятствуют силы взаимодействия между частицами, вследствие чего в деформированном теле возникают внутренние упругие силы, которые уравнивают внешние силы, приложенные к телу.

Упругой называется деформация, которая исчезает после прекращения действия вызывающей ее силы. При этом происходят "обратимые" смещения частиц из новых положений равновесия в кристаллической решетке в прежние. Неупругие деформации твердого тела, сопровождающиеся необратимой перестройкой его кристаллической решетки, называются пластическими.

Физическая величина G , численно равная упругой силе F , приходящейся на единицу площади S сечения тела, называется напряжением,

$$G = \frac{F}{S}.$$

Для упругой деформации растяжения (сжатия) относительная деформация пропорциональна величине G (закон Гука):

$$\frac{\Delta l}{l} = \kappa G; \quad \frac{\Delta l}{l} = \kappa \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где κ — коэффициент упругости.

Величина E , численно равная отношению напряжения G к относительному удлинению, называется модулем Юнга для деформации растяжения (сжатия),

$$E = \frac{G}{\varepsilon} = \frac{1}{\kappa} = \frac{El}{S \Delta l}. \quad (2)$$

Модуль Юнга — величина, обратная коэффициенту упругости; измеряется в ньютонах на метр квадратный (Н/м^2) — в единицах СИ. Модуль Юнга численно равен напряжению G , вызывающему относительное изменение длины, равное единице, т.е. $\Delta l = l$; $l = 2l$, или модуль Юнга численно равен напряжению G , растягивающему стержень вдвое. Равенство (2) позволяет вычислить модуль Юнга, используя экспериментальные данные.

Установка измерения модуля состоит из проволоки, верхний конец которой прикреплен с помощью кронштейна к стене. На нижнем конце проволоки имеется площадка, на которую укладываются грузы различного веса. Удлинение проволоки измеряется катетометром КМ-6 (с точностью до 10^{-5} м), длина проволоки — линейкой, диаметр — микрометром. Чтобы исключить влияние изогнутости проволоки на величину Δl , площадка для грузов сделана достаточно тяжелой. С ее помощью осуществляется предварительное выпрямление проволоки.

Описание катетометра и методика измерения длин с его помощью изложены в работе М-1.

Измерения следует начинать с нулевой нагрузки ($F = 0$), постепенно увеличивая ее на 300–500 г. При каждой из нагрузок производить отсчет N . Удлинение проволоки, соответствующее весу гири, найти как разность между полученным и нулевым отсчетом. Опыт провести с пятью грузами, сначала нагружая площадку, а затем снимая грузы. Расчет модуля Юнга выполнить по формуле (2). Результаты свести в таблицу:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \quad l = \quad d = \quad \Delta l = \quad \Delta d = \quad \Delta F =$$

Нагрузка F	N	Δl	E	ΔE
0	N_0			
$+P_1$	N_1	$N_1 - N_0$		
$+P_2$	N_2	$N_2 - N_0$		
		$N_3 - N_0$		

Погрешность определить по методу среднего.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. — М.: Наука, 1967, Т. I, с. 255–259.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. — М.: Наука, 1968, Т. I, с. 138–144.
3. Яворский Б.И. Курс физики. — М.: Высшая школа, 1965, Т. I, с. 81–87.

Лабораторная работа М-6 ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА ПРИ ПОМОЩИ УДАРА ШАРОВ

Цель работы — изучение удара шаров, вычисление импульса и определение коэффициента восстановления энергии.

Ударом называется кратковременное взаимодействие тел при столкновении, в результате которого происходит конечное изменение скоростей этих тел.

Различают два предельных вида удара: абсолютно упругий и абсолютно неупругий.

Абсолютно упругим называется такой, при котором механическая энергия тел не переходит в другие виды энергии. При абсолютно упругом ударе выполняются законы сохранения механической энергии системы и закон сохранения импульса.

При **абсолютно неупругом** ударе не соблюдается закон сохранения механической энергии — имеет место лишь закон сохранения суммарной энергии различных видов. В результате неупругого удара столкнувшиеся тела движутся с одинаковой скоростью как одно целое либо покоятся. При этом выполняется закон сохранения импульса.

Удар называется центральным, если центры масс соударяющихся тел лежат на линии удара, а их скорости параллельны этой линии.

Линией удара называется общая нормаль к поверхности соударяющихся тел в точке их касания. Так как при ударе вза-

имодействие тел очень кратко временно, то систему соударяющихся тел можно считать изолированной.

Установка, на которой проверяется закон сохранения импульса, состоит из высокой стойки I на подъемных винтах (рис. 6. I), трубы 3, несущей подвески шаров 6. Бифилярный подвес 4, несущий шар, может перемещаться, изменяя тем самым межцентровое расстояние шаров. Перемещение направляющей с подвесками происходит при помощи ручки 9.

При изменении межцентрового расстояния левую шкалу 2 необходимо сдвинуть. Электромагнит 7, удерживающий шар, подвешен на штанге 5 и может перемещаться вдоль шкалы 8.

При исследовании абсолютно упругого удара используются шары. Пусть масса шаров m_1 и m_2 , их скорости до удара v_1 и v_2 , после удара u_1 и u_2 . Закон сохранения импульса имеет вид

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2.$$

Так как при центральном ударе векторы скоростей направлены по одной прямой, то геометрическую сумму импульсов можно заменить алгебраической.

Если правый шар массой m_1 отклонить на угол α_1 и зафиксировать его в этом положении с помощью электромагнита, то при замыкании цепи электромагнита правый шар, возвращаясь в положение равновесия, ударит по покоящемуся левому шару ($v_2 = 0$). Закон сохранения импульса имеет вид

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2.$$

Скорость v_1 бьющего шара в момент удара можно определить по закону сохранения энергии

$$mgh_1 = \frac{m_1 v_1^2}{2},$$

откуда $v_1 = \sqrt{2gh_1}$.

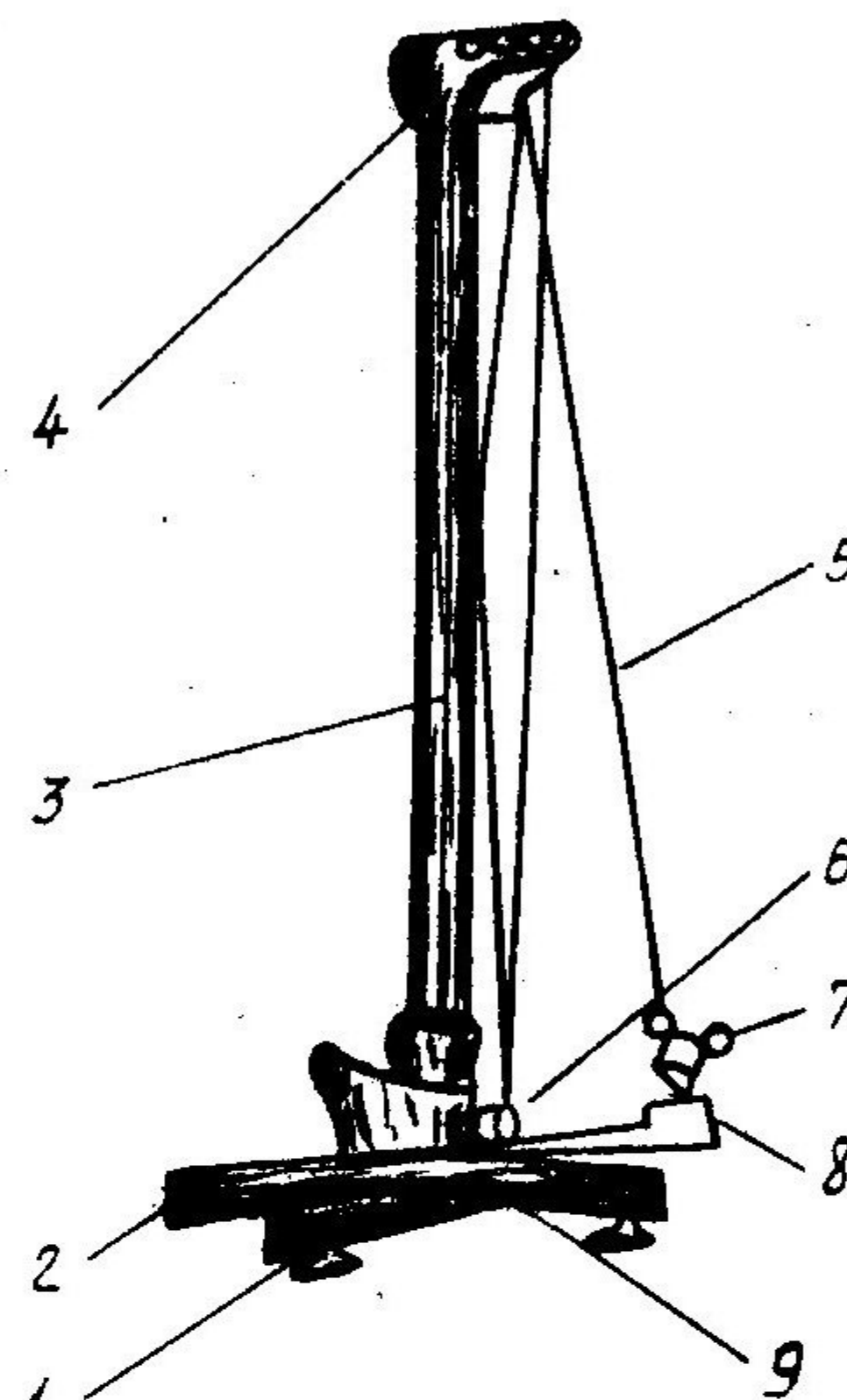


Рис. 6. I

Здесь h_1 - высота поднятия центра масс правого шара, когда он притянут электромагнитом (рис.6.2), может быть найдена из выражения

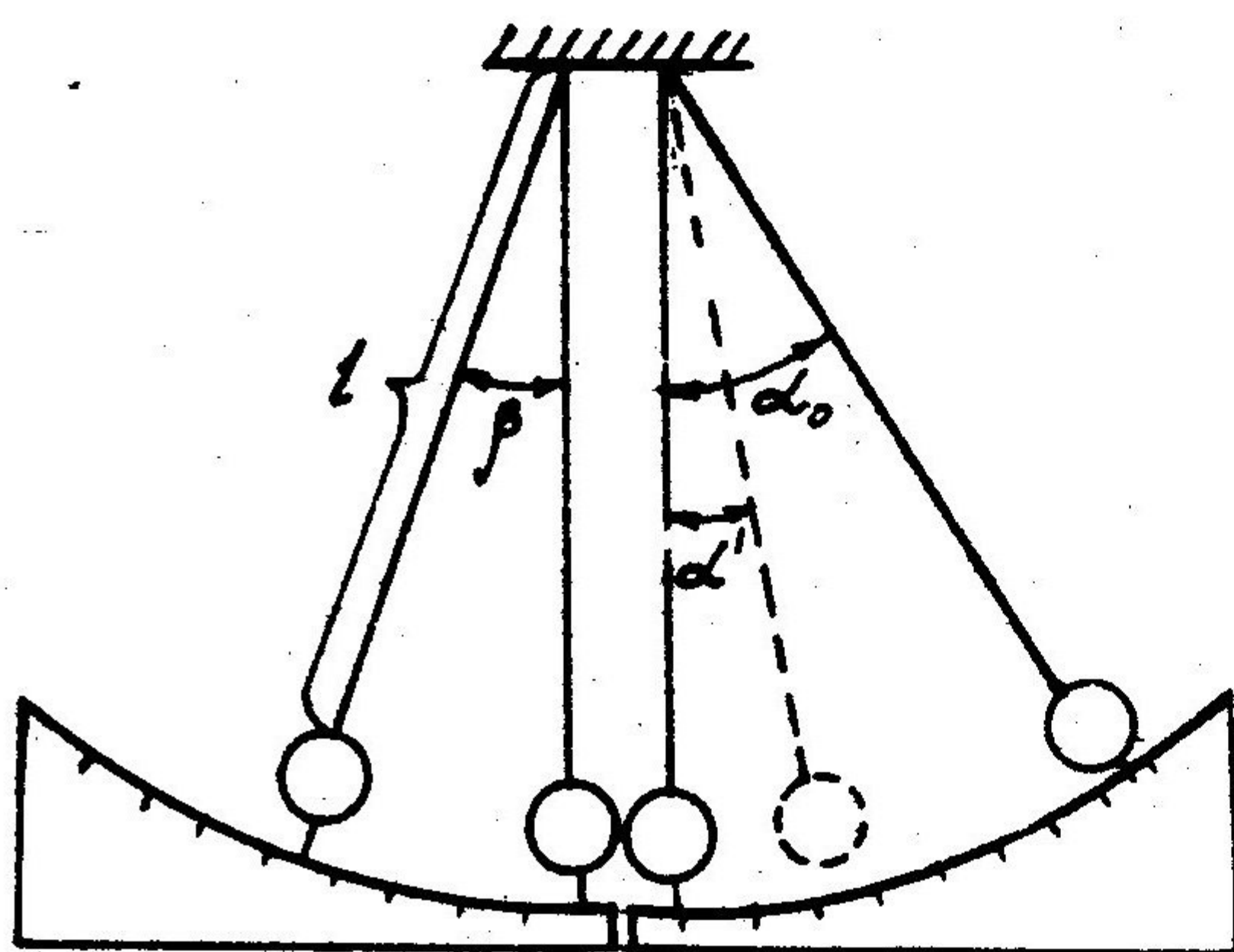


Рис.6.2

$$h_1 = l - l \cos \alpha_1 = 2l \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}.$$

Из тех же соображений, высота поднятия после удара:

- правого шара

$$h_1' = 2l \sin^2 \frac{\alpha_1'}{2};$$

- левого шара

$$h_2 = 2l \sin^2 \frac{\beta}{2}.$$

Импульс системы до удара равен импульсу бывшего шара:

$$K_1 = m_1 v_1 = m_1 \sqrt{2gh_1} = 2m_1 \sin \frac{\alpha_1}{2} \sqrt{gl}. \quad (I)$$

Импульс системы после удара

$$K_2 = -2m_1 \sin \frac{\alpha_1}{2} \sqrt{gl} + 2m_2 \sin \frac{\beta}{2} \sqrt{gl}. \quad (2)$$

Абсолютно упругий удар - идеализированный случай. При соударении реальных тел обычно имеют место упругие и остаточные деформации, механическая энергия системы после удара убывает.

Отношение механической энергии системы после удара к механической энергии до удара называется коэффициентом восстановления энергии,

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}}{\frac{m_1 v_1^2}{2}}.$$

Так как $v^2 = 2gh = 4gl \sin^2 \frac{\alpha}{2}$, то коэффициент восстановления энергии можно вычислять по соотношению

$$\frac{E_{K_2}}{E_{K_1}} = \frac{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_1'}{2} + m_2 \sin^2 \frac{\beta}{2}}{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}}. \quad (3)$$

При абсолютно неупругом ударе скорость шаров после удара можно определить по (I). Импульс системы после удара

$$K_2 = (m_1 + m_2) u = 2(m_1 + m_2) \sin^2 \frac{\beta}{2} \sqrt{gl}. \quad (4)$$

Коэффициент восстановления энергии системы при неупругом ударе

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\frac{(m_1 + m_2) u^2}{2}}{\frac{m_1 v_1^2}{2}} = \frac{(m_1 + m_2) \sin^2 \frac{\beta}{2}}{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}}. \quad (5)$$

Методика выполнения работы

А б с о л ю т н о у п р у г и й у д а р

1. Взвесить шары.
2. Правый шар притянуть электромагнитом и отсчитать по круговой шкале угол α .
3. При помощи ключа разомкнуть цепь электромагнита и измерить углы отброса α' и β правого и левого шаров после удара. Опыт повторить 10 раз.

П р и м е ч а н и е. Для облегчения наблюдений в первых пяти опытах произвести отсчет только α' , а во вторых пяти - только β .

4. Измерить длину нити, на которой подвешены шары.
5. По уравнениям (I), (2) вычислить импульсы системы до и после удара, сравнить их. В пределах эксперимента импульс системы должен сохраниться неизменным.

6. По уравнению (3) определить коэффициент восстановления энергии.

7. Погрешность результатов найти методом усреднения.

Неупругий удар

1. С помощью пресс-формы изготовить два шара из пластилина. Пресс-форма сдавливается при помощи винта пресса. Перед закладкой в пресс-форму пластилин необходимо разогреть и размять, а в пресс-форму заложить металлическую пластинку, которая нужна для удержания шара при включенном положении электромагнита.

2. Взвесить шары.

3. Правый шар притянуть электромагнитом и отсчитать по круговой шкале угол α .

4. Разомкнуть цепь электромагнита с помощью ключа и измерить угол отброса β шаров после удара. Опыт повторить 10 раз.

Примечание. Измерить угол отброса правого шара и прибавлять к результату половину углового расстояния между двумя шарами.

5. По уравнению (1) и (4) вычислить импульсы системы до и после удара. Сравнить их.

6. Измерить длину нити, на которой подвешены шары.

7. По уравнению (5) определить коэффициент восстановления энергии.

8. Погрешность результатов вычислить методом усреднения.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1966, Т.1, с.86-89.

2. Яворский В.М., Детлаф А.А. Курс физики. - М.: Высшая школа, Т.1, 1963, с.44-46.

Лабораторная работа М-7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НАКЛОННОГО МАЯТНИКА

Цель работы - изучение способа определения коэффициента трения качения с помощью наклонного маятника.

При перемещении одного тела по поверхности другого возникают силы трения (так называемое внешнее трение). Они обусловлены в основном атомным и молекулярным взаимодействием соприкасающихся тел. Трение сопровождается потерей энергии - переходом механической энергии в другие виды (тепловую, энергию звуковых колебаний, электрическую и т.д.). Потери энергии при качении, как правило, значительно меньше, чем при скольжении, однако в механизмах прецизионных приборов (например, гироскопах, измерительных устройствах), где развиваемая мощность весьма мала, доля энергии в подшипниках может оказаться значительной. Трение качения обусловлено в основном проскальзыванием и упругим гистерезисом, возникающим при деформировании слоев материала в зоне контакта при качении.

При качении по плоской поверхности сферических или цилиндрических тел возникают не только упругие, но и пластические деформации, поэтому линия действия реакции плоской поверхности $\bar{Q}_n$ не совпадает с линией действия силы нормального давления $\bar{N}$ (рис.7.1). В этом случае возникает момент пары сил

$$M = \kappa N, \quad (1)$$

где κ - плечо этой пары, которое называется коэффициентом трения качения, равным моменту пары сил трения $F_{тр}$;

$$M = F_{тр} R \quad (2)$$

где R - радиус цилиндрического тела.

Из выражений (1) и (2) следует формула Кулона

$$F_{тр} = \kappa \frac{N}{R}$$

Коэффициент трения качения имеет размерность длины.

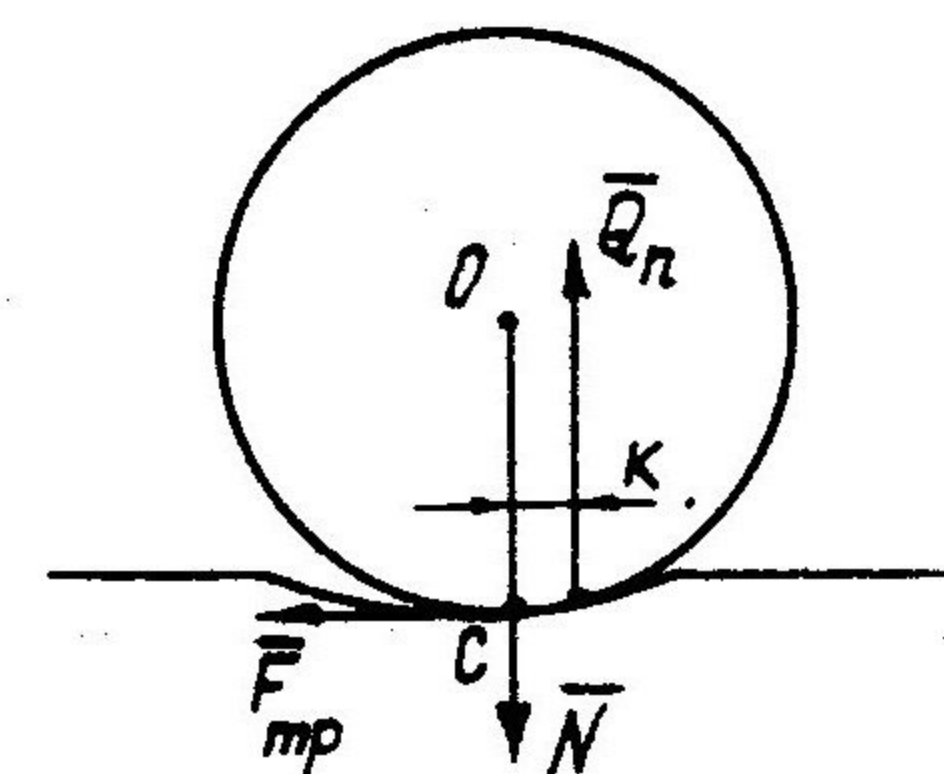


Рис.7.1

В данной работе необходимо определить коэффициент трения качения методом наклонного маятника, который представляет собой сочетание математического маятника с наклонной плоскостью.

За время n полных колебаний наклонного маятника происходит рассеяние потенциальной энергии ΔE и переход ее в работу сил трения:

$$\Delta E = \Delta E' + \Delta A, \quad (3)$$

где ΔA - работа сил трения;

$\Delta E'$ - потеря (рассеяние) энергии, обусловленная сопротивлением среды, трением подвеса, деформацией закручивания нити.

Изменение потенциальной энергии ΔE определяется выражением

$$\Delta E = mg \Delta h \sin \beta,$$

где Δh - потеря высоты центром тяжести шарика маятника за n полных колебаний (рис.7.2).

Если за n колебаний шарик сделал поворот на угол $\Delta \varphi$ относительно нити, то работа силы трения качения

$$\Delta A = M \Delta \varphi, \quad (4)$$

где M - момент силы трения относительно нити, который полагаем постоянным.

Так как $N = mg \cos \beta$, то из (I) имеем

$$M = k mg \cos \beta. \quad (5)$$

Если ΔS - общая длина пути, прой-

денная шаром за n колебаний, то

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta S}{R}. \quad (6)$$

Подставив (4) и (5) в (3), будем иметь с учетом (6):

$$\frac{R \Delta h}{\Delta S} \sin \beta = k \cos \beta + \frac{\Delta E' R}{\Delta S mg}.$$

Если силы трения постоянны, то амплитуда колебаний уменьшается со временем по закону арифметической прогрессии. Тогда общая длина пути ΔS шара за n полных колебаний определится как сумма арифметической прогрессии:

$$\Delta S = n(a_0 + a_n).$$

Так как $a_0 = l \alpha_0$; $a_n = l \alpha_n$ (l - длина маятника; α_0 и α_n - углы его отклонения в начальный момент и через n колебаний), получим

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

Учитывая, что

$$\Delta h = l (\cos \alpha_n - \cos \alpha_0),$$

и полагая

$$\Delta E' = c \Delta S,$$

получим

$$\frac{R(\alpha_0 - \alpha_n)}{2n} \sin \beta = k \cos \beta + \frac{CR}{mg}. \quad (7)$$

В силу малости углов α_0 и α_n можем записать $\alpha_0 = \frac{a_0}{l}$; $\alpha_n = \frac{a_n}{l}$, тогда

$$\frac{R(a_0 - a_n)}{2nl} \sin \beta = k \cos \beta + \frac{CR}{mg}.$$

Как видно, $\frac{CR}{mg}$ - величина постоянная для данного маятника, ее можно исключить, если вычесть выражения (7), записанные для двух углов.

Обозначив $T = \frac{(a_0 - a_n)R}{2nl}$, запишем расчетное выражение для определения коэффициента трения

$$k = \frac{T_1 \sin \beta_1 - T_2 \sin \beta_2}{\cos \beta_1 - \cos \beta_2}.$$

В последней формуле значения T_1 и T_2 различаются лишь величиной a_n .

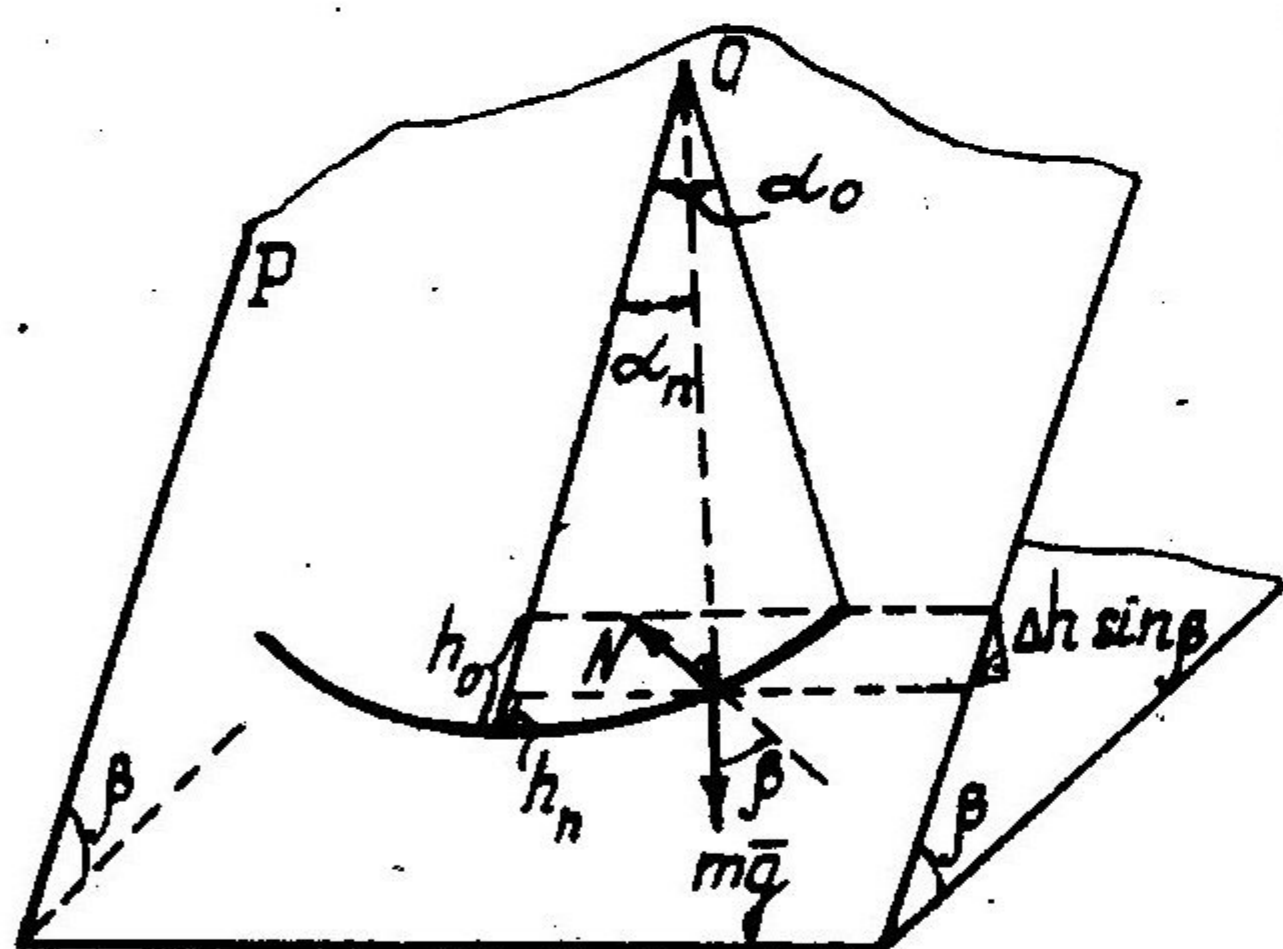


Рис.7.2

A technical drawing of a mechanical device, possibly a surveying instrument or a specialized measuring tool. The device features a base with two legs (13, 14) and a central vertical support (11, 12). A long, angled arm (10) is attached to the base. At the top of the arm is a horizontal bar (7) with a sliding component (8, 9). A vertical scale or ruler (18) is mounted on the arm. A circular dial or gauge (15) is located near the base of the arm, with a pointer (16) and a scale (17). Various adjustment screws and components are labeled with numbers 1 through 18.

лонная плоскость 7, на которой исследуется трение качения, может изменять угол наклона при помощи устройства II. На наклонной плоскости жестко смонтированы линейка 17 шкала 10 для определения положений отклоненного маятника (Q_0 и Q_n), держатель 18, оптический квадрант 16. Вдоль наклонной плоскости может перемещаться каретка 8, в которой закреплена нить маятника. Между держате-

Методика выполнения работы

-
- A circular diagram representing a 52-foot scale. The scale is marked with numbers 0, 10, 20, 30, 40, 50, and 60. The scale is divided into two sections: 0 to 30 feet and 30 to 52 feet. The 0 to 30 section is labeled '0' to '30' and the 30 to 52 section is labeled '30' to '52'. The total length is 52 feet.

4. Измерить в трех плоскостях штангенциркулем диаметр шарика D . Результат измерения усреднить.

5. Отвести маятник из начального положения влево или вправо в положение a_0 (5–6 см) и отпустить его. После $n = 10$ колебаний снять отсчет в положении a_n (a_0 и a_n счи-

6. Результаты измерений и расчетов свести в таблицу:

[illegible]

8. Погрешность вычислить по среднему.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Физматгиз, 1968, Т.1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

М-1

1. Какой из приборов измерения линейных размеров дает наибольшую точность?
2. Каким образом определяется длина образца с помощью линейного нониуса?
3. Как снимается отсчет показания микрометра?
4. Для какой цели служит микрометрический винт в микрометре?
5. Как определяется цена деления оптической шкалы аналитических весов?
6. Каково назначение арретирующего устройства?
7. Как производится точная наводка зрительной трубы катетометра на избранную линию на измеряемом объекте?
8. Как определить сотые доли миллиметра при измерении катетометром?
9. По какой формуле определяется точность линейного нониуса?

М-2

1. Какими единицами СИ измеряется плотность твердого тела?
2. Каково соотношение между плотностью и удельным весом твердого тела?
3. Что называют плотностью твердого тела?
4. Как формулировать закон Архимеда?
5. Как определяется объем тела неправильной формы в случае гидростатического взвешивания?
6. При взвешивании какого материала (даже при самой большой точности) нет надобности принимать в расчет выталкивающую силу воздуха?
7. Каким прибором измеряется толщина твердого тела правильной геометрической формы в данной работе?
8. Каким методом целесообразно определить погрешность измерения плотности тел неправильной геометрической формы в данной работе?
9. Какой вид имеет формула плотности твердого тела неправильной формы?

М-3

1. В каких единицах СИ измеряется момент количества движения?
2. Какова запись закона сохранения момента количества движения?
3. Что представляет собой баллистический маятник?
4. Какова запись закона сохранения энергии в момент максимального подъема маятника?
5. В какие виды энергии превращается кинетическая энергия летящей пули?
6. Какой вид имеет формула для периода колебаний маятника, из которой определяется момент инерции маятника с пулей?
7. Как определяется период T колебаний маятника?
8. Каким методом определяется погрешность скорости полета пули?

М-4

1. Чему равен момент инерции материальной точки?
2. Чему равен момент инерции твердого тела относительно данной оси?
3. Записать формулу Штейнера.
4. В каких единицах измеряется момент инерции?
5. Что является мерой инерции в поступательном движении?
6. Что является мерой инерции во вращательном движении?
7. Записать формулу силы трения в данной установке.
8. На что расходуется потенциальная энергия падающего груза?
9. Как теоретически определяется момент инерции любого твердого тела?

М-5

1. Что определяется формулой $\epsilon = \Delta l / l$?
2. Какая формула является выражением закона Гука?
3. Какая физическая величина называется модулем Юнга?
4. В каких единицах СИ измеряется модуль Юнга?
5. Устройство и назначение микрометрических винтов.
6. Как снимается отсчет по шкале катетометра?
7. Каким прибором измеряется удлинение проволоки?
8. Каким методом целесообразно находить погрешность определения модуля Юнга?

1. Какой вид имеет запись закона сохранения импульса?
2. В каких единицах измеряется импульс силы?
3. Что называется коэффициентом восстановления энергии при ударе?
4. Что называется ударом?
5. В каких случаях удар двух шариков будет абсолютно упругим?
6. Как движутся шары после столкновения при неупругом ударе?
7. Какой удар называется центральным прямым ударом?
8. Что называется линией удара?
9. Какой удар называется абсолютно упругим ударом?

1. Какой прибор используется для измерения угла наклона маятника?
2. Какой тип трения исследуется в данной работе?
3. Между какими поверхностями исследуется трение в работе?
4. Записать рабочую формулу и объяснить смысл входящих в нее обозначений.
5. Как из графика $y = y(x)$ найти численное значение коэффициента трения?
6. От чего зависит коэффициент трения?
7. Записать зависимость, из которой определяется коэффициент трения.
8. Как правильно снимать по лимбу оптического квадранта?

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Оценка случайной погрешности при прямых измерениях	5
2. Оценка случайной погрешности при косвенных измерениях	10
3. Обработка результатов измерений	14
4. Графическое оформление работ, построение поля погрешностей	21
5. Пользование справочными таблицами	23
6. Линейная интерполяция	24
Лабораторная работа М-1. Измерение линейных размеров и массы	25
Лабораторная работа М-2. Определение плотности твердого тела	33
Лабораторная работа М-3. Определение скорости пули с помощью баллистического маятника	36
Лабораторная работа М-4. Определение момента инерции тела произвольной формы	39
Лабораторная работа М-5. Определение модуля упругости материала с помощью катетометра	43
Лабораторная работа М-6. Проверка закона сохранения импульса при помощи удара шаров	46
Лабораторная работа М-7. Определение коэффициента трения с помощью наклонного маятника	51
Приложение	56