

**Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Кафедра «Динамика и прочность машин»**

**Е.В. Кузнецова**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ПРОФИЛЬНЫМ РАЗДЕЛАМ  
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ**

методическое пособие

**2015**

# 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## 1.1. Общие сведения

Любому материальному объекту присущи вполне определенные свойства, большинство из которых характеризуется численными величинами. Например, для куска медного провода можно определить следующие величины: диаметр, длину, массу, электропроводность, температурный коэффициент расширения, электрическое сопротивление и др. Некоторые свойства объектов и явления природы труднее поддаются количественному описанию. К ним можно отнести, например, цвет, блеск, способность противостоять многократным изгибам. Однако даже в таких случаях необходимо определить соответствующие данным свойствам количественные характеристики, без знания которых невозможно описать достаточно точно исследуемый объект.

Для определения численного значения какого-либо параметра необходимо знать, во сколько раз оно больше или меньше эталонной величины.

Операция сравнения определяемой величины для исследуемого объекта с соответствующей величиной эталона называется измерением.

Например, за единицу длины принят эталонный метр – определенное расстояние между штрихами, нанесенными на стержне из особого стойкого сплава. При измерении массы некоторого тела устанавливается, во сколько раз измеряемая масса превосходит массу эталонного образца в один килограмм. Разумеется, очень редко пользуются сравнением измеряемых величин с величинами эталонов, хранящихся в государственных метрологических учреждениях. В основном используют различного рода измерительные устройства и приборы, тем или иным способом сверенные с эталонами. Это относится в одинаковой мере как к устройствам и приборам для измерения длины (различные линейки, микрометр, измерительный микроскоп и т. п.), так и к измерителям времени, массы, а также электроизмерительным, оптическим и многим другим приборам.

Принято различать два вида экспериментальных измерений – прямые и косвенные. При *прямом измерении* определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно при помощи измерительного прибора. Измерение длины рулеткой либо штангенциркулем, измерение промежутков времени секундомером, измерение силы тока амперметром и т. п. – все это примеры прямых измерений, при которых измеряемая величина отсчитывается непосредственно по шкале прибора.

При *косвенном измерении* определяемая величина вычисляется по формуле, включающей результаты прямых измерений. К косвенным измерениям относятся, например, определение площади прямоугольника по измеренным двум его сторонам, определение сопротивления участка цепи по силе тока и напряжению, определение концентрации примесей по интенсивности ее спектральных линий и т. п.

Независимо от способа измерения определение той или иной физической величины сопровождается ошибкой, показывающей, насколько искомая величина отличается от ее истинного значения.

## 1.2. Ошибки измерений

*Никакое измерение нельзя выполнить абсолютно точно.* Другими словами, при измерении какой-либо величины любым способом абсолютное значение ее недостижимо, а это означает, что результат измерения содержит некоторую погрешность – ошибку измерений. Такой вывод следует из одного из положений теории естественнонаучного познания окружающего мира – любое научное знание относительно. Ограниченные возможности измерительных приборов, несовершенство органов чувств, неоднородность измерительных объектов, внешние и внутренние факторы, влияющие на объекты и т. п. – вот основные причины недостижимости абсолютного значения измеряемой величины.

Точность измерений возрастает по мере увеличения чувствительности измерительного прибора. Однако при измерении сколь угодно чувствительным прибором нельзя сделать ошибку измерений меньше ошибки измерительного прибора, даже при многократном повторении измерений. Например, если линейка позволяет измерить длину с относительной ошибкой 0,1 %, что соответствует 1 мм на линейке длиной 1 м, то, применяя ее для измерения длины любых объектов, нельзя определить длину с ошибкой, меньшей 0,1 %. Абсолютное значение является идеальным, недостижимым на практике. Чем точнее поставлен эксперимент, чем совершеннее измерительная техника и т. п., тем ближе измеряемая величина к абсолютной. Одна из важных целей экспериментатора – приблизить получаемые экспериментальные данные к их абсолютным величинам.

В зависимости от причин, порождающих ошибки, различают систематические, случайные и приборные ошибки. К ним не относят грубые ошибки, вызванные невниманием при снятии показаний приборов, неправильной записью измеряемых данных, ошибками при вычислениях и т. п. Такие ошибки не подчиняются какому-либо закону и устраняются при промежуточной оценке результатов измерений.

*Систематические ошибки* возникают при многократном повторении измерений и обуславливаются неисправностью измерительных приборов, неточностью методов измерений и использованием для расчетов неточных данных. Если, например, стрелка амперметра изогнута или смещен «нуль» прибора, то при измерении таким прибором всегда получится ошибочная величина. Сколько бы раз ни проводились измерения, как бы тщательно ни записывались показания прибора, в измерениях всегда будет одна и та же ошибка. Для устранения систематической ошибки, вызванной неисправностью прибора, необходимо ввести соответствующие поправки, полученные при сравнении показаний неисправного и исправного приборов. Систематическая ошибка всегда увеличивает или уменьшает результат измерений на одну и ту же величину. Следовательно, даже полное совпадение ряда измеренных величин не является признаком отсутствия систематической ошибки – ее нельзя выявить при повторных измерениях.

Сущность систематических ошибок, обусловленных методом измерений, можно пояснить на примере определения электрического сопротивления, при котором возникает систематическая ошибка, вызванная неучтенным электрическим сопротивлением соединительных проводов в цепи измерительной схемы. Чтобы ее устранить, нужно ввести поправки на неучтенное сопротивление.

Для устранения систематических ошибок требуются тщательная проверка всех измерительных приборов и кропотливый анализ методов измерений.

*Случайные ошибки* возникают случайно при совокупном действии многих факторов и остаются при устранении грубых и систематических ошибок. Можно назвать многочисленные объективные и субъективные причины случайных ошибок: изменение напряжения в сети при электрических измерениях, неоднородность вещества при определении плотности, изменение условий окружающей среды (температуры, давления), и др. Подобные причины приводят к тому, что несколько измерений одной и той же величины дают различные результаты. К случайным ошибкам относятся и те, причины которых неизвестны или неясны.

Вследствие непредсказуемых обстоятельств случайные ошибки могут как увеличивать, так и уменьшать значения измеряемой величины. Обычно случайные ошибки не устраняются – их нельзя избежать в каждом из результатов измерений.

Случайные ошибки подчиняются законам теории вероятностей, установленным для случайных явлений. С помощью методов теории вероятностей можно уменьшить влияние случайных ошибок на результат эксперимента. Широко известен нормальный закон распределения случайных ошибок (закон Гаусса), из которого следуют важные выводы:

- малые по модулю ошибки встречаются чаще;
- равные по модулю случайные ошибки разных знаков встречаются одинаково часто;
- с увеличением точности (уменьшением интервала разброса измеренных значений) плотность случайных ошибок возрастет.

Теория случайных ошибок позволяет определить наиболее вероятные значения измеряемых величин и возможные отклонения от них. Однако следует отметить, что выводы теории

вероятностей справедливы только для достаточно большого числа случайных событий. Поэтому, строго говоря, применение теории случайных ошибок целесообразно только к сравнительно большому числу измерений. На практике же часто ограничиваются 5–10 измерениями, хотя следует помнить, что увеличение числа измерений уменьшает влияние случайных ошибок. В каждом конкретном случае для получения заданной точности устанавливается необходимое число измерений.

*Приборные ошибки* обуславливаются конструктивными особенностями измерительных приборов. Приборную ошибку иногда называют точностью измерительного прибора. По величине ошибок, которые могут вносить при измерении электроизмерительные приборы, различают семь классов точности приборов, которые обозначаются цифрами: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Цифра класса точности показывает величину относительной ошибки в процентах при отклонении стрелки прибора до последнего деления шкалы. Абсолютная ошибка прибора при любом отклонении стрелки одинакова. Поэтому при меньших отклонениях стрелки относительная ошибка больше. Например, если у прибора класса точности 0,5 вся шкала содержит 150 делений, то относительная ошибка при отклонении на все 150 делений составляет 0,5%, а абсолютная ошибка равна 0,75 деления. При отклонении стрелки на 25 делений абсолютная ошибка та же – 0,75 деления, а относительная ошибка – 3 %. Для получения возможно меньших относительных ошибок при пользовании измерительными приборами необходимо добиваться достаточно большого отклонения стрелки, не меньше, чем на половину шкалы. Для этого нужно выбирать прибор с достаточно высокой чувствительностью или переходить к меньшим пределам измерений многопредельного прибора.

### 1.3. Измерительные приборы

Большинство приборов для измерения разных физических величин содержит линейные, угловые или круговые шкалы. Показание того или иного прибора соответствует длине отрезков прямой или дуги. Чем больше точность прибора, тем больше должно быть число делений, на которые разбита шкала. Для одной и той же шкалы с увеличением числа делений расстояние между штрихами уменьшается.

В некоторых приборах для повышения точности измерений применяют различные приспособления, позволяющие отсчитывать доли деления шкалы. Наиболее широко распространены нониусы и микрометрические винты, их обычно применяют в приборах для измерения длины или угла, в которых части прибора перемещаются относительно друг друга. На одной из частей наносится основная шкала, а на другой – нониус, представляющий собой небольшую дополнительную шкалу, передвигающуюся при измерении вдоль основной шкалы. Удобство отсчета с применением нониуса заключается в том, что человеческий глаз легко различает, является ли один штрих продолжением другого или они сдвинуты друг относительно друга.

Иногда для отсчета долей деления применяют специальный циферблат, указатель которого связан с перемещением измерительного устройства механической передачей. В оптических приборах современных конструкций наносят микроскопические цифры около каждого штриха шкалы, и показание отсчетов снимают при помощи отсчетного микроскопа, в поле зрения которого видна только одна необходимая цифра и дополнительная шкала для отсчета долей деления.

Для измерения небольших линейных размеров наиболее часто применяют штангенциркуль и микрометр. Размеры от 3 до 5 мм удобно определять измерительным микроскопом.

Современные технические средства позволяют определить минимальное расстояние, примерно равное  $10^{-18}$  м. Максимальное расстояние, доступное современным измерениям, составляет около  $10^{26}$  м (такому расстоянию соответствует радиус космологического горизонта).

В экспериментальной работе для измерения малых промежутков времени (до 30 мин) часто применяют секундомер. Цена самого мелкого деления секундной шкалы, например секундомера СМ-60, равна 0,2 с. В настоящее время широко применяют электронные измерители времени с цифровой индикацией.

В повседневной жизни легко воспринимаются привычные интервалы времени: минута, час, сутки и т. п. В то же время в современном естествознании оперируют и совершенно другими интервалами времени – миллиардами лет при определении возраста Вселенной и ничтожно малыми долями секунды –  $10^{-20}$  – для характеристики продолжительности ядерных процессов.

Для измерения электрических величин используют электроизмерительные приборы. Принцип их действия основан на превращении электрической энергии в другие виды энергии, например, механическую, тепловую, магнитную и т. д. Каждый электрический прибор состоит из двух основных частей: электрического и отсчетного механизмов. Отсчетный механизм большинства приборов содержит шкалу и указатель, который определяет точку шкалы, соответствующую отсчету измеренной величины. Обычно указатель представляет собой тонкую стрелку или световое пятно. В современных электроизмерительных приборах отсчетным устройством служит электронное табло с цифровой индикацией, очень удобной для снятия показаний прибора.

Электроизмерительные приборы широко применяют и для измерения неэлектрических величин: температуры, давления, скорости движения, освещенности и т. п. Принцип действия таких приборов основан на связи между электрическими и другими физическими явлениями, обуславливающей возникновение термоэлектрических, фотоэлектрических, электромагнитной индукции и т. п.

На практике часто необходимы косвенные измерения, основанные на законах или закономерностях, устанавливающих зависимость между различными физическими величинами. Например, электрическое сопротивление проводника можно определить, измерив на нем падение напряжения и силу тока.

Электрические измерения производят двумя способами:

- 1) сравнением измеряемой величины с ее соответствующими эталонами ЭДС, сопротивления, емкости, индуктивности и т. п.;
- 2) с помощью приборов, показывающих численные значения измеряемой величины.

По своему назначению основные электроизмерительные приборы можно классифицировать следующим образом:

- амперметры и миллиамперметры – измерители силы тока;
- вольтметры и милливольтметры – измерители напряжения;
- ваттметры – приборы для измерения электрической мощности;
- счетчики электрической энергии – приборы для измерения электрической энергии;
- омметры – приборы для измерения электрического сопротивления;
- частотометры – приборы для измерения частоты переменного тока;
- приборы для измерения емкости и т. п.

По принципу действия электроизмерительные приборы подразделяются на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, тепловые, индукционные, электронные и др.

Одна из основных характеристик электроизмерительного прибора – *чувствительность, определяемая отношением линейного или углового перемещения указателя к изменению измеряемой величины*. Величина, обратная чувствительности, называется ценой деления прибора. Она определяет значение измеряемой величины при отклонении на одно деление.

#### **1.4. Обработка результатов измерений**

После измерительной операции наступает следующая стадия экспериментальной работы – математическая обработка результатов измерений. Все числа, получаемые при измерениях, являются приближенными. Точность измерений нельзя повысить математическими действиями над полученными результатами измерений. Учет большого числа значащих цифр без оценки их достоверности затрудняет вычисления и оказывается бесполезным.

В качестве истинного, наиболее вероятного значения измеряемой величины обычно принимают среднее арифметическое измеренных значений:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – значения измеренной величины;  $n$  – число измерений.

После расчета среднего арифметического значения измеряемой величины приступают к определению абсолютной и относительной ошибок измерений.

Абсолютное значение разности между средним арифметическим  $\langle X \rangle$  и каждым из отдельных результатов измерений называется *абсолютной ошибкой отдельного измерения* и обозначается

$$\Delta x_i = |\langle x \rangle - x_i|.$$

Часто *среднюю абсолютную ошибку* определяют как среднее арифметическое абсолютных ошибок отдельных измерений, т. е.

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

Абсолютная ошибка указывает два значения измеряемой величины, между которыми заключено ее истинное значение. Например, в результате измерений и последующих вычислений диаметра проволоки получили:

$$\langle d \rangle = 2,4 \text{ мм и } \langle \Delta d_i \rangle = \pm 0,1 \text{ мм.}$$

Это означает, что истинное значение диаметра проволоки находится в интервале между 2,3 и 2,5 мм.

Можно уменьшить абсолютную ошибку и, следовательно, уменьшить интервал, в котором находится истинное значение измеряемой величины, но абсолютная ошибка не может быть равной нулю.

Для полной характеристики точности измерений рассчитывают относительную ошибку, равную отношению средней абсолютной ошибки к среднему результату измерений:

$$E = \frac{\langle \Delta x_i \rangle}{\langle x \rangle}.$$

Если выполнено достаточно большое число измерений и результаты подчиняются закону статистического распределения, то вместо средней абсолютной ошибки определяется *средняя квадратичная ошибка*

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 / n(n-1)}.$$

Относительная ошибка в данном случае

$$E_s = \frac{S}{\langle x \rangle}.$$

Относительная ошибка – безразмерная величина. Ее часто выражают в процентах, для чего безразмерную величину надо умножить на 100 %.

Если необходимо учитывать как приборную ( $\delta$ ), так и случайную ( $S_x$ ) ошибки, то *полная абсолютная ошибка среднего значения* измеренной величины

$$\Delta_{\langle x \rangle} = \sqrt{\delta^2 + S^2_{\langle x \rangle}} .$$

Если одна из данных ошибок меньше другой в 4 и более раз, то ее в окончательном результате можно не учитывать.

Для косвенных измерений, когда определяемая величина получается путем вычислений по известной формуле, ошибки в простейших случаях находят следующим образом.

Если определяемая величина  $A$  связана с непосредственно измеряемыми величинами  $B$  и  $C$  выражением

$$A=BC,$$

то относительная ошибка величины  $A$  равна сумме относительных ошибок величин  $B$  и  $C$ , т. е.

$$E = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C},$$

а абсолютная ошибка

$$\Delta A = EA.$$

Относительные ошибки складываются и при делении двух измеряемых величин.

Если же определяемая величина  $A$  равна сумме или разности измеряемых величин  $B$  и  $C$ , т. е. если

$$A = B \pm C,$$

то абсолютная ошибка  $A$  равна сумме абсолютных ошибок  $B$  и  $C$ :

$$\Delta A = \Delta B + \Delta C.$$

Относительная ошибка в данном случае

$$E = \Delta A/A.$$

Окончательный результат измерений обычно записывают в стандартной форме, удобной для анализа:

- вначале записывают название определяемой физической величины;
- затем пишется буквенный символ определяемой величины, знак равенства и в скобках ее среднее значение плюс-минус средняя абсолютная ошибка, а за скобкой указывается единица измерения;

- отдельно записывают значение относительной ошибки в процентах;

- окончательные результаты заключаются в общую рамку.

Среднее значение, полная абсолютная ошибка и относительная ошибка округляются по следующим правилам:

- вначале округляют до одной или двух значащих цифр среднюю абсолютную ошибку (если старшая цифра больше 4, оставляют одну значащую цифру, в остальных случаях — две);

- затем округляют среднее значение до разряда, совпадающего с младшим разрядом абсолютной ошибки;

- относительную ошибку записывают в % с точностью до двух значащих цифр.

Например, запись окончательного результата определения объема цилиндрического тела имеет вид

**Объем цилиндрического  
тела**  
 $V=(10,43 \pm 0,25) \text{ см}^3$   
 $E=2,4\%$

При совпадении двух результатов, т. е. при установлении их равенства, когда указаны полные абсолютные ошибки, удобно пользоваться следующим правилом определения наличия

систематической ошибки: если модуль разности средних значений двух измеренных величин не превышает суммы их абсолютных ошибок, сравниваемые величины можно считать равными или совпадающими в пределах ошибок измерений. В противном случае данные величины считаются неравными или несовпадающими. При таком сравнении в пределах указанных ошибок, если измеренная величина не совпадает, например, с табличной (более точной), можно говорить о наличии в измерениях систематической ошибки.

Рассмотрим два характерных примера решения простейших задач на определение ошибки измерений.

**Пример 1.** При измерении периода колебаний маятника были получены следующие результаты:  $T_1 = 3,1$ ;  $T_2 = 3,2$ ;  $T_3 = 3,0$ ;  $T_4 = 3,5$ ;  $T_5 = 3,3$ ;  $T_6 = 3,2$  с. Определить среднюю квадратичную ошибку периода, относительную ошибку и представить окончательный результат в стандартной форме.

*Решение.* Вначале находим среднее значение периода:

$$\langle T \rangle = (3,1 + 3,2 + 3,0 + 3,5 + 3,3 + 3,2)/6 = 3,21(6) \approx 3,22 \text{ с.}$$

Округление промежуточного результата произведено до трех значащих цифр.

Далее по формуле

$$\Delta T_i = |\langle T \rangle - T_i|$$

вычисляем абсолютные ошибки отдельных измерений (с):

$$\Delta T_1 = |3,22 - 3,1| = 0,12; \quad \Delta T_2 = |3,22 - 3,2| = 0,02;$$

$$\Delta T_3 = |3,22 - 3,0| = 0,22; \quad \Delta T_4 = |3,22 - 3,5| = 0,28;$$

$$\Delta T_5 = |3,22 - 3,3| = 0,08; \quad \Delta T_6 = |3,22 - 3,2| = 0,02.$$

Затем находим среднюю квадратичную ошибку среднего значения периода

$$S_{\langle T \rangle} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i)^2 / n(n-1)} =$$

$$= \sqrt{(0,12^2 + 0,02^2 + 0,22^2 + 0,28^2 + 0,08^2 + 0,02^2) / 30} = 0,0703 \text{ с.}$$

Вычисляем относительную ошибку среднего значения периода:

$$E_{\langle T \rangle} = 0,0703 \cdot 100 \% / 3,22 = 2,19 \%$$

В окончательном результате величину  $S_{\langle T \rangle}$  округляем до одной значащей цифры (поскольку старшая значащая цифра равна 7), среднее значение периода – до разряда округленной величины  $S_{\langle T \rangle}$ , т. е. до сотых долей, а относительную ошибку – до двух значащих цифр.

*Ответ:*

**Период колебаний маятника**

$$T = (3,22 \pm 0,07) \text{ с}$$

$$E_{\langle T \rangle} = 2,2\%$$

**Пример 2.** Равны ли в пределах ошибок измерений определяемое значение плотности жидкости  $\rho$  и ее табличное значение  $\rho_T$ , если

$$\rho = (0,9567 \pm 0,0003) \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_T = (0,9561 \pm 0,0001) \text{ г/см}^3?$$

Имеется ли систематическая ошибка при определении плотности?



*Решение.* Сумма абсолютных ошибок определенного в результате измерений и табличного значений плотности составляет  $0,0004 \text{ г/см}^3$ . Эта сумма меньше разности по модулю их средних значений, равной  $0,0006 \text{ г/см}^3$ . Следовательно, данные результаты нельзя считать равными в пределах ошибок измерений. Так как  $\rho > \rho_T$ , то в измерениях допущена систематическая ошибка, которая привела к завышенному результату по сравнению с табличным.

*Ответ:* значения плотности  $\rho$  и  $\rho_T$  в пределах ошибок измерений не равны; при измерении  $\rho$  допущена систематическая ошибка.

### Вопросы для самопроверки

- Назовите свойства материальных объектов, трудно поддающиеся количественному описанию.
- Что называется измерением?
- Чем обуславливается невозможность выполнения абсолютно точных измерений?
- Как зависит точность измерений от чувствительности прибора?
- Определение плотности вещества относится к прямым или косвенным измерениям?
- Что обычно принимают в качестве истинного значения измеряемой величины?
- Какие ошибки измерений различают в зависимости от причин, порождающих ошибки?
- Назовите два вида ошибок для оценки истинности измеряемой величины.
- Какова специфика грубых ошибок?
- Дайте краткую характеристику систематических ошибок.
- Каким образом устраняется систематическая ошибка?
- Какие факторы обуславливают случайные ошибки?
- Назовите основные следствия из нормального закона распределения случайных ошибок.
- Что означает цифра класса точности прибора?
- Изменяется ли абсолютная ошибка прибора при отклонении стрелки?
- Для чего применяют нониусы и микрометрические винты?
- Какие минимальные и максимальные расстояния позволяют определить современные измерительные средства?
- На чем основан принцип работы электроизмерительных приборов?
- Применяются ли электроизмерительные приборы для измерения неэлектрических величин?
- Назовите два основных способа электрических измерений.
- Как классифицируют электроизмерительные приборы по назначению?
- Что такое чувствительность прибора?
- Назовите основные правила округления приближенных чисел.
- Как определяется наиболее вероятное значение измеряемой величины?
- Дайте определение средней абсолютной ошибки.
- Как определяется средняя квадратичная ошибка?
- Что такое относительная ошибка?
- Как определяются абсолютная и относительная ошибки для простейших косвенных измерений?
- Сформулируйте правила округления окончательных результатов измерений.
- Приведите пример записи окончательного результата измерений.
- Как определяется наличие систематической ошибки в измерениях.

## Задачи по разделу «Погрешности экспериментальных измерений»

1. Измерение длины сторон детали в форме прямоугольного параллелепипеда производилось штангенциркулем с точностью 0,1 мм; результаты измерений: 12,6, 15,3 и 18,7 мм. Определите объем детали. Окончательный результат запишите в стандартной форме с учетом абсолютной и относительной ошибок, а также правил округления.

2. Чему равны абсолютные ошибки отдельных измерений и средняя квадратичная ошибка среднего значения величины  $A$ , если при ее измерении были получены следующие результаты: 38,21; 39,11; 37,98; 38,52; 39,32; 37,94; 37,09 с? Какую физическую величину представляет  $A$ ?

3. Результаты измерений диаметра диска составляют 42,4; 42,6; 42,8; 42,7; 41,9; 41,8; 42,0 мм. Чему равна площадь диска? Ответ запишите в стандартной форме с учетом правил округления, абсолютной и относительной ошибок.

4. После округления получены следующие результаты измерений:  $A = (12,3 \pm 0,2)$  с;  $B = (21,3 \pm 0,4)$  мм;  $C = (832 \pm 6)$  г. Чему равны относительные ошибки данных результатов? Какие физические величины представляют  $A$ ,  $B$  и  $C$ ?

5. Масса тела составляет  $(64,2 \pm 0,3)$  г, а его объем  $(148,2 \pm 0,3)$  мм<sup>3</sup>. Найти плотность вещества тела, а также относительную и абсолютную ошибки определения плотности.

6. Определите среднюю квадратичную ошибку и относительную ошибку измерений величины  $A$ , если ее среднее значение и абсолютные ошибки отдельных измерений соответственно равны (г):

$$\langle A \rangle = 1150,3; \Delta A_1 = 2,4; \Delta A_2 = 1,8; \Delta A_3 = 0,8;$$

$$\Delta A_4 = 1,5; \Delta A_5 = 1,1; \Delta A_6 = 2,1; \Delta A_7 = 1,9; \Delta A_8 = 2,0.$$

7. Класс точности прибора равен 1,5. Какова абсолютная ошибка измерений данным прибором, если вся шкала прибора содержит 100 делений, а цена деления 0,1 А.

8. Рассчитать абсолютные и относительные ошибки отдельных измерений величины  $A$ , если при ее измерении были получены следующие значения: 2,1; 2,3; 2,0; 2,4 и 2,2 с.

9. Какова относительная ошибка измерений прибором класса точности 1,0 при отклонении стрелки на 10 делений, если вся шкала прибора содержит 200 делений?

10. Чему равны абсолютные ошибки отдельных измерений и относительная ошибка измерений величины  $A$ , если известны результаты измерений 230; 228; 232; 233; 235; 229 Н? Какую физическую величину представляет  $A$ ?

11. Величины  $A$ ,  $B$  и  $C$  связаны между собой соотношением  $A = BC$ , где  $B = (0,96 \pm 0,04)$  Н и  $C = (1,6 \pm 0,5)$  м. Рассчитать значение  $A$ , его абсолютную и относительную ошибки и представить окончательный результат в стандартной форме с учетом правил округления.

12. Величины  $A$ ,  $B$  и  $C$  связаны соотношением  $A = B + C$ , где  $B = (8,53 \pm 0,02)$  Дж и  $C = (30,7 \pm 0,3)$  Дж. Рассчитать значение  $A$  и написать окончательный результат в стандартной форме. Какую физическую величину представляет  $A$ ?

13. Случайная или приборная ошибка преобладает в измерении величины  $A$ , если результаты ее измерений равны: 100; 102; 92; 98; 114 с. Приборная ошибка равна 1 с.

14. При определении ускорения свободного падения получен результат  $g = (9,82 \pm 0,02)$  м/с<sup>2</sup>. Табличное значение ускорения для данной местности  $g_T = (9,84 \pm 0,01)$  м/с<sup>2</sup>. Чему равны относительные ошибки определения  $g$  и  $g_T$ ? Можно ли утверждать о наличии систематической ошибки при определении  $g$ ? Почему?

15. Стоит ли продолжать измерения диаметра проволоки микрометром для получения более точного результата, если измеренные значения равны: 1,38; 1,39; 1,38 и 1,38 мм. Приборная ошибка — 0,01 мм. Чему равна относительная приборная ошибка?

## 2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

### 2.1. Выполнение и оформление лабораторных работ

Выполняя лабораторную работу, студент самостоятельно получает экспериментальные результаты и оценивает их достоверность. Основу лабораторных работ составляют измерения – неотъемлемая часть любого эксперимента.

Физическая направленность представленных лабораторных работ обусловлена возможностью с помощью простых измерительных средств получить количественные экспериментальные результаты, что гораздо сложнее сделать, например, в химических и биологических опытах. Кроме того, многие крупные естественно-научные достижения в области химии, биологии и т. п. получены с применением современных физических экспериментальных методов: спектрального анализа, ядерного магнитного резонанса, рентгеноструктурного анализа, нейтронографии и т. д. Практическая реализация таких методов в виде лабораторных работ – сложная задача, и ее решение возможно только с применением моделирования и компьютерной техники.

При выполнении лабораторных работ полезно помнить следующие правила:

- Лабораторную работу следует выполнять самостоятельно. Только в этом случае она окажется интересной и полезной. Описание лабораторных работ – всего лишь ориентир для самостоятельной работы. Успех определяется главным образом не столько изучением описания работы, сколько сознательным отношением к экспериментальным измерениям.

- Необходимое условие для начала выполнения лабораторной работы – ясное понимание сущности изучаемого объекта.

- Главное условие успешного выполнения измерений – внимательное и неторопливое ознакомление с лабораторной установкой и приборами перед измерениями.

- Работу с приборами следует начинать лишь после изучения инструкции и необходимых мер предосторожности. Не следует вскрывать приборы, прикасаться к оптическим и тонким деталям лабораторных установок. Необходимо бережно обращаться с экспериментальным оборудованием.

- В лабораторных работах, содержащих электрические схемы, источник питания подключают после того, как вся схема тщательно проверена и получен допуск от преподавателя к выполнению измерений. Нарушение данного правила может привести к несчастному случаю.

- Измерения должны производиться с максимальной точностью. Только точные, достоверные результаты позволяют наиболее полно количественно описать изучаемый объект и представляют интерес при их математической обработке.

- При измерениях следует учесть, что некоторые приборы могут существенно изменить физическое состояние исследуемого объекта. Например, при измерении температуры нагретой жидкости в пробирке с помощью ртутного термометра произойдет охлаждение жидкости, термометр покажет вовсе не ту температуру, которую имела жидкость до измерения. Более достоверные результаты в данном случае можно получить, например, при измерении температуры термпарой.

- Стремясь получить достоверную картину изучаемого объекта, следует согласовать точность измерений различных величин. Например, даже при больших изменениях температуры изменение длины стержня относительно мало. Поэтому важно измерять изменение длины стержня с максимально достижимой точностью, и нет смысла измерять температуру, например, до сотых долей градуса.

- В описаниях лабораторных работ обычно указывается приближенное число измерений. Как правило, число измерений устанавливает сам экспериментатор, основываясь на точности приборов и результатах измерений. Если в результатах измерений получен большой разброс, лучше еще раз обратиться к описанию установки, чем продолжать измерения.

- При построении кривой зависимости одной величины от другой плотность числа экспериментальных точек на различных участках кривой выбирается с таким расчетом, чтобы четко изображались изгибы, максимумы и минимумы. На участках плавного хода кривой зависимости плотность точек может быть меньшей. - Следует стремиться к аккуратности и полноте

первичных (черновых) записей при выполнении лабораторных работ. Записи измерений лучше вести в виде таблиц с указанием единиц измеряемых величин. Необходимо записывать точность и чувствительность приборов.

*При оформлении лабораторных работ необходимо выполнять ряд правил:*

1. Лабораторные работы оформляются в отдельной тетради, на первой странице которой чертится таблица для пометок преподавателя о допуске к лабораторной работе, о выполнении измерений и защите ее.

2. Оформление каждой лабораторной работы начинается с новой страницы. Вначале указывают номер лабораторной работы, ее название, дату выполнения. Затем кратко излагают сущность теории, описание лабораторной установки и основное содержание заданий вместе с таблицами для занесения результатов измерений. Желательно нарисовать схему установки. Затем производят запись обработки результатов измерений и окончательного результата в стандартной форме, указанной в § 1.1.

3. Если в лабораторной работе предусмотрено выполнение графиков, то их следует чертить на миллиметровой бумаге (бумага в клетку для такой цели не совсем подходит). По осям нужно выбрать удобный для нанесения экспериментальных точек масштаб. Кривая на графике проводится таким образом, чтобы были видны отдельные точки, полученные в результате эксперимента. Вначале кривая проводится карандашом, чтобы можно было вносить необходимые поправки при анализе окончательных результатов.

4. При обработке результатов лабораторной работы следует тщательно обдумывать возможные источники ошибок. Сравнивая свои результаты с данными таблиц либо с полученными ранее результатами других студентов, не следует при их несовпадении сразу считать свои результаты ошибочными. В таком случае нужно еще раз продумать методику измерений. При сдаче работы с «плохими» результатами студент после обсуждения с преподавателем часто получает значительно больше пользы, чем при наличии «хороших» результатов.

## **2.2. Порядок выполнения и защиты лабораторных работ**

1. Изучить описание лабораторной работы и оформить ее в лабораторной тетради, оставляя свободные места для занесения результатов измерений, их обработки и окончательного результата.

2. Перед началом выполнения лабораторной работы следует получить допуск-разрешение от преподавателя на выполнение измерений. Если студент показал знание сущности выполняемой работы и порядка измерений, то преподаватель делает пометку «допуск» в таблице его лабораторной тетради.

3. Получив допуск к выполнению работы, студент проводит измерения и заносит их в соответствующие таблицы.

4. Сделав пробный расчет определяемого параметра, студент обязан предъявить результаты измерений преподавателю. Если результаты приняты, преподаватель делает пометку о выполнении измерений в лабораторной тетради студента.

5. Далее производится обработка результатов эксперимента: вычисляются промежуточные и окончательные данные и заносятся в тетрадь.

6. Лабораторная работа считается полностью выполненной, если она защищена. При защите преподаватель вправе спросить не только о сущности выполненной работы и о результатах измерений, но и теоретический материал того раздела, к которому относится данная лабораторная работа. После защиты преподаватель выставляет в тетради студента оценку.

7. Студент, не защитивший две лабораторные работы, к выполнению третьей не допускается.

## 2.3. Лабораторная работа № 1 «Определение линейных размеров»

### Описание измерительных приборов

В данной лабораторной работе используются масштабная линейка, штангенциркуль, микрометр, деталь цилиндрической формы, кусок проволоки.

В повседневной жизни – в быту, на производстве, в торговле и т.п. – довольно часто прибегают к измерению длины, ширины и толщины различных предметов и деталей, т. е. к определению их линейных размеров. Для простейших измерений широко применяются масштабные линейки, штангенциркули и микрометры.

*Масштабная линейка.* Для определения линейных размеров в пределах от одного сантиметра до нескольких метров часто используют масштабные линейки и рулетки с сантиметровыми и миллиметровыми делениями. Металлические линейки более прочные и точные, чем деревянные или пластмассовые, которые усыхают с течением времени и легче подвергаются разрушению.

*Штангенциркуль.* В различных отраслях производства, и в особенности в машиностроении, широко применяют штангенциркуль, позволяющий определить линейные размеры небольших деталей и предметов в пределах от 0 до 20 см с точностью до десятых и сотых долей миллиметра.

Штангенциркуль (рис. 1.1) состоит из жесткой металлической линейки (штанги) 1 с миллиметровыми делениями и подвижной части 8 со штоком 9, которая может передвигаться вдоль линейки. В линейке и подвижной части имеются выступы 3 – 6 для определения внешних 3, 4 и внутренних 5, 6 размеров деталей. Подвижная часть закрепляется стопорным винтом 7.

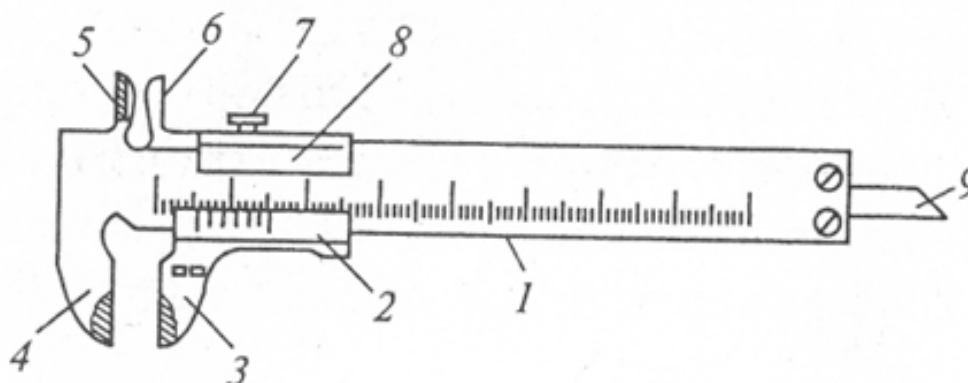


Рис. 1.1

На подвижной части штангенциркуля нанесена вспомогательная шкала – *линейный нониус* 9 с делениями другого масштаба, чем деления основной шкалы (рис. 1.2, а). Нониус позволяет повысить точность измерений в 10 или 20 раз в зависимости от полного числа его делений. Отношение цены деления шкалы основной линейки к числу делений нониуса называется *точностью нониуса*. Точностью нониуса определяется абсолютная ошибка прибора, в котором применяется нониус. Число делений нониуса большинства модификаций штангенциркулей составляет 10 или 20, что позволят измерять линейные размеры соответственно с точностью 0,1 или 0,05 мм.

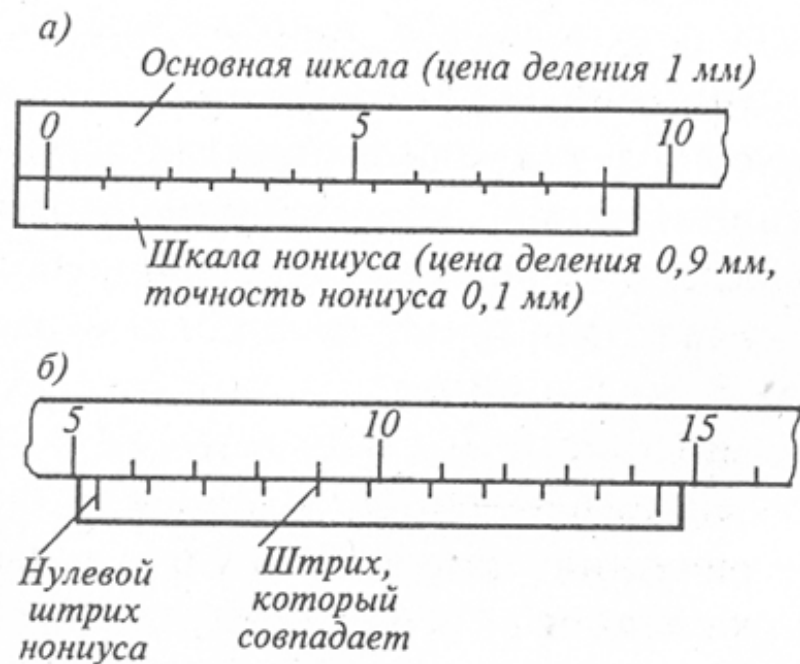


Рис. 1.2

Для определения размера детали, например, диаметра детали цилиндрической формы, ее помещают между выступами 4 и 5 штангенциркуля и перемещают подвижную часть 2 до соприкосновения детали с обоими выступами. Затем снимают показание штангенциркуля. Если нулевой штрих шкалы нониуса совпадает с каким-либо штрихом основной миллиметровой шкалы, то измеряемое расстояние равно целому числу миллиметров основной шкалы до нулевого штриха нониуса. Обычно со штрихом основной шкалы совпадает не нулевой штрих нониуса, а другие его штрихи. Измеряемое расстояние в этом случае складывается из целого числа миллиметров основной шкалы слева от нулевого штриха и десятых долей миллиметра, число которых равно номеру штриха нониуса, совпадающего с каким-либо штрихом основной шкалы или близко расположенного от него. Например, показание штангенциркуля, представленное на рис. 2.2, б, соответствует 5,4 мм.

С помощью штангенциркуля можно определить внешние и внутренние размеры деталей, например внешний и внутренний диаметры трубок, а также глубину вырезов и отверстий посредством штока 9, длина выдвигающейся части которого равна расстоянию между выступами 4 и 3 штангенциркуля.

Порядок измерений с помощью приборов с линейным нониусом такой же, как и для приборов с угловым нониусом, которым снабжен, например, теодолит и другие приборы.

**Микрометр.** Микрометр служит для определения внешних размеров небольших предметов и деталей в пределах от 0 до 25 мм с точностью до 0,01 мм.

Микрометр (рис. 1.3) состоит из стальной скобы 1 с цилиндрическим упором 2 и подвижного цилиндрического стержня 3 с микрометрическим винтом. Плоскость упора 2 параллельна плоскости стержня 3. Положение подвижного стержня фиксируется стопорным винтом 4. Микрометрический винт вращается внутри неподвижной втулки 5 с внутренней резьбой. Шаг резьбы обычно составляет 0,5 мм. На внешней поверхности втулки нанесена продольная шкала б, состоящая из двух частей, разделенных горизонтальной линией. Нижняя часть служит для отсчета целого числа миллиметров, а верхняя – для отсчета половинных долей миллиметра. На обеих частях шкалы нанесены штрихи через 1 миллиметр. Штрихи верхней шкалы делят каждый миллиметр нижней шкалы пополам.

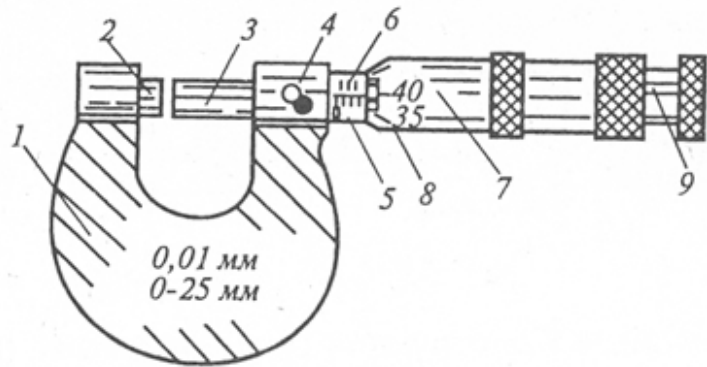


Рис. 1.3

На микрометрический винт насажен удлиненный барабан 7, левая скошенная кромка которого перемещается относительно шкалы на втулке. На кромке барабана нанесена круговая шкала 8, содержащая 50 равных делений. На правом конце винта расположена фрикционная головка с трещоткой 9. Конструкция головки такова, что вращательное движение от трещотки передается винту посредством трения, благодаря чему при достижении определенной силы нажима цилиндрического стержня на упор или на измеряемый предмет дальнейшее вращение прекращается. При одном полном обороте барабан перемещает цилиндрический стержень на 0,5 мм, а поворот барабана на одно деление круговой шкалы соответствует 0,01 мм, т. е. 10 мкм, что и определяет точность прибора.

Перед началом измерений необходимо проверить нулевое положение микрометра, при котором плоскость упора 2 и подвижного стержня 3 соприкасаются друг с другом. Такое соприкосновение обеспечивается вращением по часовой стрелке с помощью фрикционной головки до появления характерного треска от трещотки. В нулевом положении настроенного микрометра нулевой штрих круговой шкалы барабана должен находиться против горизонтальной линии на неподвижной втулке. При нарушении нулевого положения микрометр следует настроить, что может сделать только специалист, или при обработке результатов следует учесть систематическую ошибку, вызванную отклонением от нулевого положения.

*Во избежание нарушения настройки микрометра вращательное движение барабана следует осуществлять только с помощью фрикционной головки до появления треска.*

Процедура измерения с помощью микрометра следующая: измеряемый предмет помещается между плоскостями цилиндрического упора 2 скобы и подвижного цилиндрического стержня 3. Вращением фрикционной головки до появления треска плоскости упора и подвижного стержня доводятся до соприкосновения с поверхностями измеряемого предмета. Затем снимается показание микрометра. Отсчет производят по нижней линейной шкале на втулке слева от скошенной кромки барабана и по круговой шкале. По нижней линейной шкале отсчитывают число целых миллиметров и их половинные доли, а по круговой шкале – сотые доли миллиметра.

При измерениях возможны два случая:

- скошенная кромка барабана закрывает штрих верхней линейной шкалы, делящей последний миллиметр, отсчитанных по нижней шкале, пополам. В этом случае показания микрометра складываются из целого числа миллиметров, отсчитанного по нижней линейной шкале до кромки барабана, и сотых долей миллиметра, отсчитанных по круговой шкале при совпадении ее штриха с горизонтальной линией продольной шкалы. Если микрометр не настроен, в показаниях микрометра следует учесть поправку, компенсирующую систематическую ошибку.

### Задание 1

#### Измерение диаметра цилиндрической детали микрометром

После получения допуска к выполнению данной лабораторной работы студенты самостоятельно измеряют микрометром диаметр проволоки и затем обрабатывают результаты измерений с учетом правил, изложенных в разделе 2.

Проволока слегка деформирована, поэтому для более полного учета случайных ошибок диаметр измеряется не менее 10 раз и в разных местах проволоки.

Результаты измерений заносятся в табл. 1, начерченную в лабораторной тетради.

Таблица 1

Номер измерения, $i$	$D_i$ , мм	$\Delta D_i$ , мм	Точность микрометра $\delta_1 = \dots$ мм
1			
2			
3			
.			
.			
Средние значения	$\langle D \rangle = \dots$	$\langle \Delta D \rangle = \dots$	Окончательный результат: Диаметр проволоки $D = \langle \Delta D \rangle + \langle D \rangle_{\text{мм}} E_{\langle D \rangle} = \dots\%$

После измерений вычисляют среднее значение диаметра  $\langle D \rangle$  и абсолютные ошибки отдельных измерений:

$$\Delta D_i = |\langle D \rangle - D_i|.$$

Промежуточные и окончательные результаты записывают в табл. 1.

### Задание 2

#### Определение объема детали цилиндрической формы

Определение объема цилиндрической детали – пример простейших косвенных измерений. С учетом результатов прямых измерений диаметра  $D$  и длины  $L$  цилиндрического тела его объем вычисляют по формуле

$$V = \pi \cdot D^2 L / 4.$$

Диаметр цилиндрического тела измеряют микрометром, а его длину – штангенциркулем. Измерения диаметра производят в разных местах цилиндрического тела не менее 10 раз.

Результаты измерений заносятся в табл. 2 в лабораторной тетради.

Таблица 2

Номер измерения, $i$	$D_i$ , мм	$\Delta D_i$ , мм	$L_i$ , мм	$\Delta L_i$ , мм
1				
2				
3				
.				
Средние значения	$\langle D \rangle = \dots$	$\langle \Delta D \rangle = \dots$	$\langle L \rangle = \dots$	$\langle \Delta L \rangle = \dots$
Точность штангенциркуля $\delta_1 = \dots$	Точность прибора для измерения диаметра $\delta_1 = \dots$ мм		Точность прибора для измерения длины $\delta_2 = \dots$ мм	



После измерений вычисляют средние значения диаметра  $\langle D \rangle$ , длины  $\langle L \rangle$  цилиндрического тела и их абсолютные ошибки  $\langle \Delta D \rangle$  и  $\langle \Delta L \rangle$ .

Среднее значение объема  $\langle V \rangle$  рассчитывают по формуле

$$\langle V \rangle = \pi \langle D \rangle^2 \langle L \rangle / 4.$$

Затем вычисляют относительные ошибки диаметра  $E_D$  и длины  $E_L$ . Относительную ошибку объема  $E_V$  определяют по формуле

$$E_V = \sqrt{(2E_D)^2 + (E_L)^2},$$

абсолютную ошибку среднего значения объема вычисляют по формуле

$$\Delta V = \langle V \rangle E_V.$$

При вычислении среднего значения объема для исключения дополнительной ошибки при округлении в числе  $\pi$  следует взять не менее пяти значащих цифр, т. е.  $\pi = 3,1416$ .

Окончательный результат представляют в стандартной форме:

**Объем цилиндрического тела**  
 $V = (\langle V \rangle \pm \Delta V) \text{ мм}^3$   
 $E_V = \dots \%$

### Контрольные вопросы

1. Для чего служит нониус в штангенциркуле?
2. Какова точность штангенциркуля, с помощью которого производилось измерение длины цилиндрического тела?
3. Как определяется абсолютная ошибка измерения диаметра проволоки, если все показания микрометра совпали?
4. Что такое точность нониуса?
5. Можно ли существенно повысить точность определения объема цилиндрического тела при увеличении числа измерений его диаметра и длины до 20 и более раз?
6. От чего зависит точность штангенциркуля?
7. Длину предмета измеряли штангенциркулем пять раз. Результаты измерений: 6,2; 6,3; 6,4; 6,2 и 6,2 мм. Чему равны абсолютная и относительная ошибки измерений?
8. Как изменится точность нониуса при увеличении числа его делений в два раза?
9. Можно ли компенсировать ошибку микрометра, обусловленную смещением нулевого положения?
10. Можно ли считать абсолютно точными результаты измерений диаметра микрометром, если все десять его показаний совпали?

## 2.4. Лабораторная работа № 2 «Определение плотности вещества»

### Общие сведения

Плотность вещества  $\rho$  равна отношению его массы  $m$  к объему  $V$ , т. е.

$$\rho = m/V.$$

Масса  $m$  определяется взвешиванием. Объем  $V$  твердых тел правильной геометрической формы рассчитывается по известным формулам с учетом измеренных их линейных размеров. Для твердых тел из нерастворимого вещества любой неправильной формы объем находят погружением их в воду, налитую в мензурку. Плотность вещества таких тел часто определяют методом *гидростатического взвешивания*, основанным на взвешивании исследуемого тела в жидкости с известной плотностью. Этот метод применим и для нахождения плотности жидких веществ.

Объем тел из волокнистых, пористых, сыпучих и растворимых в жидкости веществ измеряется газовым объемометром, принцип действия которого основан на законе Бойля–Мариотта.

При равномерном распределении массы в объеме тело считается однородным. Для однородных тел точность определения плотности более высокая, чем для неоднородных. Для неоднородных тел обычно находят среднюю плотность.

Объем тела линейно возрастает с увеличением температуры. Поэтому при определении плотности вещества тела необходимо учитывать температурное изменение его объема.

### Описание измерительных приборов

В данной лабораторной работе используются аналитические весы, разновески, рычажные весы, штангенциркуль, микрометр, исследуемый образец цилиндрической формы. Исследуемое тело имеет правильную цилиндрическую форму. Объем его вычисляют по измеренным диаметру и длине. Измерение диаметра производят микрометром, а длины – штангенциркулем. Описание микрометра и штангенциркуля дано в лабораторной работе №1.

Массу определяют взвешиванием исследуемого тела вначале на рычажных весах, а затем на более чувствительных – аналитических. Для повышения точности взвешивания в рычажных весах применяется опорная призма, выполненная из твердого сплава. Точность аналитических весов составляет десятые доли миллиграмма. В аналитических весах подвижное коромысло опирается призмой на агатовую подушку. Призма имеет заостренную грань; изготавливается она обычно из закаленной стали. К концам коромысла на призмах подвешены чашки весов, на которые помещают взвешиваемое тело и гири (разновески). Призматические опоры коромысла и подвесов позволяют существенно уменьшить трение между подвижными и неподвижными деталями весов и тем самым повысить их точность.

Большинство современных аналитических весов снабжено воздушным демпфером – успокоителем колебаний. При освобождении от арретира – фиксирующего устройств – коромысло весов приходит в колебательное движение, которое без демпфера может продолжаться довольно долго. Весы с демпфером успокаиваются после нескольких колебаний.

Для предохранения призм и опорных подушек от преждевременного износа весы в нерабочем состоянии необходимо арретировать. При арретировании опорная подушка опускается и положение чашки фиксируется.

Механизм арретированных весов обычно располагается в застекленном корпусе с подъемными либо выдвигаемыми стенками, что защищает весы от загрязнения, толчков и воздушных потоков.

Некоторые современные модификации аналитических весов имеют одночашечный механизм с цифровой индикацией, что существенно упрощает считывание показаний весов.

### Правила пользования аналитическими весами

1. Не пытаться взвешивать на весах относительно тяжелые тела, масса которых превышает допустимую нагрузку, указанную на весах.

2. Изменение нагрузки на чашках весов производить только при арретированных весах.
3. При маятникообразном колебании чашек следует успокоить весы, осторожно их арретировав.
4. Следует пользоваться пинцетом для помещения разновесок и взвешиваемого тела на чашки весов.
5. Запрещается поднимать весы или двигать их, особенно без фиксации арретиром.
6. Необходимо следить за чистотой рабочего места, взвешиваемого тела и чашек весов.
7. После окончания работы необходимо арретировать и разгрузить весы.

### Измерения

*Измерение линейных размеров.* После получения допуска к выполнению данной лабораторной работы студенты самостоятельно приступают к измерениям. Вначале измеряют линейные размеры исследуемого образца цилиндрической формы, а затем его взвешивают.

Диаметр цилиндрического тела  $D$  и его длину  $L$  измеряют штангенциркулем. Измерения диаметра и длины производят в разных местах цилиндрического тела не менее 10 раз. Результаты измерений  $D_i$  и  $L_i$  заносятся в табл. 1 в лабораторной тетради.

Таблица 1

Номер измерения, $i$	$D_i$ , мм	$\Delta D_i$ , мм	$L_i$ , мм	$\Delta L_i$ , мм
1				
2				
3				
⋮				
⋮				
Средние значения	$\langle D \rangle = \dots$	$\langle \Delta D \rangle = \dots$	$\langle L \rangle = \dots$	$\langle \Delta L \rangle = \dots$
Точность штангенциркуля	$\delta_1 = \dots$			

*Взвешивание.* Определение массы  $m$  производят взвешиванием образца вначале на рычажных, а потом на аналитических весах. При пользовании двухчашечными весами применяется метод двойного взвешивания, при котором образец взвешивается два раза: сначала на одной, а затем на другой чашке весов. Всего производится 8 взвешиваний на каждой весах. Полученные результаты взвешивания с помощью рычажных и аналитических весов заносятся в отдельные колонки табл. 2 в лабораторной тетради.

Таблица 2

Номер измерения, $i$	Рычажные весы		Аналитические весы	
	$m_{1i}$ , г	$\Delta m_{1i}$ , г	$m_{2i}$ , г	$\Delta m_{2i}$ , г
1				
2				
⋮				
Средние значения	$\langle m_1 \rangle = \dots$	$\langle \Delta m_1 \rangle = \dots$	$\langle m_2 \rangle = \dots$	$\langle \Delta m_2 \rangle = \dots$
Точность весов				

### Обработка результатов измерений

После измерений вычисляют средние значения диаметра  $\langle D \rangle$ , длины  $\langle L \rangle$ , массы  $\langle m \rangle$  исследуемого образца, а также их средние абсолютные ошибки  $\langle \Delta D \rangle$ , длины  $\langle \Delta L \rangle$ , массы  $\langle \Delta m \rangle$ . Полученные результаты заносятся соответственно в табл. 1 и 2.

Средние значения плотности  $\langle \rho \rangle$  рассчитываются по формуле

$$\langle \rho \rangle = \langle m \rangle / \langle V \rangle = 4 \langle m \rangle / \pi \langle D^2 \rangle \langle L \rangle.$$

Расчет  $\langle \rho \rangle$  производят отдельно для значений  $\langle m_1 \rangle$  и  $\langle m_2 \rangle$ , полученных соответственно с помощью рычажных и аналитических весов.

В расчетах среднего значения плотности  $\langle \rho \rangle$  для исключения дополнительной ошибки при округлении в числе  $\pi$  следует взять не менее пяти значащих цифр, т. е.  $\pi = 3,1416$ . Затем вычисляются относительные ошибки диаметра  $E_D$ , длины  $E_L$  и массы  $E_m$  для обоих видов взвешивания.

Относительная ошибка плотности  $E_\rho$  определяется по формуле

$$E_\rho = \sqrt{(2E_D)^2 + (2E_L)^2 + (2E_m)^2}.$$

Абсолютная ошибка среднего значения плотности вычисляется по формуле

$$\Delta\rho = \langle \rho \rangle E_\rho.$$

Расчет относительной и абсолютной ошибок производят отдельно для обоих видов взвешивания.

При вычислении промежуточных и окончательных результатов, а также при их округлении и записи следует учесть правила, изложенные в разделе 2.

Окончательный результат представляется в стандартной форме:

Плотность	
Рычажные весы	Аналитические весы
$\rho_1 = (\langle \rho \rangle \pm \Delta\rho) \text{ кг/м}^3$	$\rho_2 = (\langle \rho \rangle \pm \Delta\rho) \text{ кг/м}^3$
$E_{\rho_1} = \dots\%$	$E_{\rho_2} = \dots\%$

### Контрольные вопросы

1. Сравните и проанализируйте результаты плотности, абсолютные и относительные ошибки, полученные при определении массы с помощью рычажных и аналитических весов. Сравнив рассчитанные и табличные значения плотности, определите, из какого материала изготовлен образец.
2. Определение плотности вещества относится к прямым или косвенным измерениям?
3. Назовите методы определения плотности вещества.
4. Зависит ли плотность вещества от его однородности?
5. Как влияет температура на плотность вещества?
6. Дайте краткую характеристику метода гидростатического взвешивания.
7. Как достигается сравнительно высокая чувствительность аналитических весов?
8. Для чего служит воздушный демпфер?
9. Назовите основные правила пользования аналитическими весами.
10. Зависит ли точность взвешивания от положения груза на чашке весов?
11. Сравнив окончательные результаты плотности, дайте аргументированный ответ на вопрос: целесообразно ли взвешивание на аналитических весах при данном методе определения плотности либо можно ограничиться взвешиванием с меньшей точностью на рычажных весах?

### 3. СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Приставки для образования кратных и дольных единиц

Приставка	Обозначение	Кратность и дольность	Приставка	Обозначение	Кратность и дольность
Пета	П	$10^{15}$	Деци	д	$10^{-1}$
Тера	Т	$10^{12}$	Санти	с	$10^{-2}$
Гига	Г	$10^9$	Милли	м	$10^{-3}$
Мега	М	$10^6$	Микро	мк	$10^{-6}$
Кило	к	$10^3$	Нано	н	$10^{-9}$
Гекто	г	$10^2$	Пико	п	$10^{-12}$
Дека	да	$10^1$	Фемто	ф	$10^{-15}$

## СВЯЗЬ ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ С ЕДИНИЦАМИ СИ

### Длина

$$1 \text{ ангстрем (А)} = 10^{-10} \text{ м}$$

$$1 \text{ ферми (Фм)} = 10^{-15} \text{ м}$$

$$1 \text{ астрономическая единица длины (а.е.)} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м}$$

$$1 \text{ световой год (св. год)} = 9,4605 \cdot 10^{15} \text{ м}$$

$$1 \text{ парсек (пк)} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

$$1 \text{ морская миля} = 1852 \text{ м}$$

$$1 \text{ дюйм (Д)} = 0,0254 \text{ м}$$

$$1 \text{ фут} = 12 \text{ Д} = 0,3048 \text{ м}$$

### Площадь

$$1 \text{ ар (а)} = 100 \text{ м}^2$$

$$1 \text{ гектар (га)} = 100 \text{ а} = 10^4 \text{ м}^2$$

### Масса

$$1 \text{ грамм (г)} = 10^{-3} \text{ кг}$$

$$1 \text{ центнер (ц)} = 100 \text{ кг}$$

$$1 \text{ тонна (т)} = 1000 \text{ кг}$$

$$1 \text{ карат (кар)} = 0,2 \text{ г} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$1 \text{ атомная единица массы (а.е.м)} = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

### Скорость

$$1 \text{ километр в час (км/ч)} = 0,277 \text{ м/с}$$

$$1 \text{ узел} = 1 \text{ морская миля в час} = 0,514 \text{ м/с}$$

### Сила

$$1 \text{ дина (дин)} = 10^{-5} \text{ Н}$$

### Давление

$$1 \text{ бар (бар)} = 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.)} = 1 \text{ торр (Тор)} = 133,3 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атмосфера физическая (атм.)} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атмосфера техническая (ат)} = 9,807 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

### Энергия

$$1 \text{ эрг (эрг)} = 10^{-7} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ киловатт-час (кВт·ч)} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ электрон-вольт (эВ)} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ калория международная (кал)} = 4,1868 \text{ Дж}$$

## Основные и дополнительные единицы СИ

*Основные единицы СИ.* К основным единицам СИ относятся: *метр* – единица длины; *килограмм* – единица массы; *секунда* – единица времени; *ампер* – единица силы тока; *кельвин* – единица температуры; *кандела* – единица силы света; *моль* – количество вещества.

*Метр* равен длине пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени  $1/299792458$  секунды.

*Килограмм* равен массе международного прототипа килограмма, принятого на 1 Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) в 1989 г. и подтвержденного ГКМВ в 1991 г.

*Секунда* равна  $9192631770$  периодам излучения, соответствующим его переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей.

*Ампер* равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным на расстоянии  $1$  м друг от друга, вызвал бы на каждом участке проводника длиной  $1$  м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

*Кельвин* равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды.

*Кандела* равна силе света в заданном направлении источника, испускающего излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/с.

*Моль* равен количеству вещества, содержащему столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой  $0,012$  кг.

**Дополнительные единицы.** К дополнительным единицам относятся радиан и стерadian.

*Радиан* равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

*Стерadian* равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

## Температура, °С

Точка абсолютного нуля	– 273,15
Наименьшая, полученная в лаборатории	– 273,14
Кипения гелия	– 268,93
Наименьшая, измеренная на поверхности Луны	– 160
Наименьшая, измеренная на поверхности Земли	– 89,2
Воздуха на высоте 20 км над уровнем моря	– 60
Воздуха на высоте 3 км над уровнем моря	– 5
Таяния льда	0
Плавления цезия	28,5
Нормальная человеческого тела	36,5—37,0
Под землей на глубине 1 км	50
Наибольшая, измеренная на поверхности Земли	57,8
Кипения воды при нормальном давлении	100
Плавления золота	1064
Пламени газовой горелки	1600—1850
Нити лампы накаливания	2500
Плавления вольфрама	3410
Электрической дуги	4000—6000
Поверхности Солнца	6000—2 000 000
В центре Земли	20 000
Наибольшая, полученная в лаборатории	50 000
Короны Солнца	2 000 000
Термоядерной реакции	10 000 000

## Свойства некоторых твердых тел

Вещество	Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)	Температурный коэффициент линейного расширения, $10^{-5} \cdot \text{К}^{-1}$
Алюминий	2,6	659	896	2,3
Железо	7,9	1530	500	1,2
Латунь	8,4	900	386	1,9
Медь	8,6	1100	395	1,6
Олово	7,2	232	230	2,7
Платина	21,4	1770	117	0,89
Серебро	10,5	960	234	1,9
Цинк	7,0	420	391	2,9



Модули упругости и коэффициенты Пуассона

Материал	Модуль упругости, кгс/см <sup>2</sup>		Коэффициент Пуассона $\mu$
	E	G	
Чугун серый, белый	$(1,15 \div 1,60) \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^5$	0,23—0,27
» ковкий	$1,55 \cdot 10^6$	—	—
Стали углеродистые	$(2,0 \div 2,1) \cdot 10^6$	$(8,0 \div 8,1) \cdot 10^5$	0,24—0,28
» легированные	$(2,1 \div 2,2) \cdot 10^6$	$(8,0 \div 8,1) \cdot 10^5$	0,25—0,30
Медь прокатанная	$1,1 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$	0,31—0,34
» холодноотянутая	$1,3 \cdot 10^6$	$4,9 \cdot 10^5$	—
» литая	$0,84 \cdot 10^6$	—	—
Бронза фосфористая	$1,15 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^5$	0,32—0,35
катаная			
Бронза марганцовистая	$1,1 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$	0,35
катаная			
Бронза алюминиевая	$1,05 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^5$	—
литая			
Латунь холодноотянутая	$(0,91 \div 0,99) \cdot 10^6$	$(3,5 \div 3,7) \cdot 10^5$	0,32—0,42
» корабельная	$1,0 \cdot 10^6$	—	0,36
катаная			
Алюминий катаный	$0,69 \cdot 10^6$	$(2,6 \div 2,7) \cdot 10^5$	0,32—0,36
Проволока алюминиевая	$0,7 \cdot 10^6$	—	—
тянутая			
Дуралюмин катаный	$0,71 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^5$	—
Цинк катаный	$0,84 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^5$	0,27
Свинец	$0,17 \cdot 10^6$	$0,70 \cdot 10^5$	0,42
Лед	$0,1 \cdot 10^6$	$(0,28 \div 0,3) \cdot 10^5$	—
Стекло	$0,56 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^5$	0,25
Гранит	$0,49 \cdot 10^6$	—	—
Известняк	$0,42 \cdot 10^6$	—	—
Мрамор	$0,56 \cdot 10^6$	—	—
Песчаник	$0,18 \cdot 10^6$	—	—
Каменная кладка из	$(0,09 \div 0,1) \cdot 10^6$	—	—
гранита			
Каменная кладка из	$0,06 \cdot 10^6$	—	—
известняка			
Каменная кладка из	$(0,027 \div 0,030) \cdot 10^6$	—	—
кирпича			
Бетон при пределе			
прочности, кгс/см <sup>2</sup>			
100	$(0,146 \div 0,196) \cdot 10^6$	—	0,16—0,18
150	$(0,164 \div 0,214) \cdot 10^6$	—	0,16—0,18
200	$(0,182 \div 0,232) \cdot 10^6$	—	0,16—0,18
Дерево вдоль волокон	$(0,1 \div 0,12) \cdot 10^6$	$0,055 \cdot 10^5$	—
» поперек »	$(0,005 \div 0,01) \cdot 10^6$	—	—
Каучук	$0,00008 \cdot 10^6$	—	0,47
Текстолит	$(0,06 \div 0,1) \cdot 10^6$	—	—
Бакелит	$43 \cdot 10^6$	—	0,36
Вискомлит (ИМ-44)	$(40 \div 42) \cdot 10^3$	—	0,37
Целлулоид	$(14,3 \div 27,5) \cdot 10^3$	—	0,33—0,38

**Ориентировочные значения основных допускаемых напряжений  
на растяжение и сжатие**

Материал	Допускаемое напряжение, кгс/см <sup>2</sup> , на	
	растяжение	сжатие
Чугун серый в отливках . . . . .	280—800	1200—1500
Сталь Ст2 . . . . .	1400	
» Ст3 . . . . .	1600	
» Ст3 в мостах . . . . .	1400	
» машиностроительная (конструкционная) углеродистая . . . . .	600—2500	
Сталь машиностроительная (конструкционная) легированная . . . . .	1000—4000 и выше	
Медь . . . . .	300—1200	
Латунь . . . . .	700—1400	
Бронза . . . . .	600—1200	
Алюминий . . . . .	300—800	
Алюминиевая бронза . . . . .	800—1200	
Дуралюмин . . . . .	800—1500	
Текстолит . . . . .	300—400	
Гетинакс . . . . .	500—700	
Бакелизированная фанера . . . . .	400—500	
Сосна вдоль волокон . . . . .	70—100	100—120
» поперек » . . . . .	—	15—20
Дуб вдоль волокон . . . . .	90—130	130—150
» поперек » . . . . .	—	20—35
Каменная кладка . . . . .	до 3	4—40
Кирпичная » . . . . .	до 2	6—25
Бетон . . . . .	1—7	10—90

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецова Е.В. Специальные разделы естествознания / Учебно-методическое пособие. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2006. 80 с.
2. Горохов В.Г. Концепции современного естествознания и техники / В.Г. Горохов. М.: ИНФРА-М, 2000. 608 с.
3. Воронов В.К. Основы современного естествознания / В.К. Воронов, М.В. Гречнева, Р.З. Сагдеев. М.: Высш. шк., 1999. 247 с.
4. Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания / С.Х. Карпенков. М.: Высш. шк., 2003. 334 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ .....	1
1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	1
1.2. ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ .....	1
1.3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ .....	3
1.4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ .....	4
<i>Задачи по разделу «Погрешности экспериментальных измерений» .....</i>	<i>9</i>
<b>2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.....</b>	<b>10</b>
2.1. ВЫПОЛНЕНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	10
2.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	11
2.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 .....	12
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ».....	12
2.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 .....	17
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА» .....	17
<b>3. СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ .....</b>	<b>20</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>26</b>