

### **Цели и задачи работы:**

- освоение методики измерения линейных размеров тел правильной формы штангенциркулем и микрометром и массы тела с использованием аналитических весов,
- определение линейных размеров, объема и плотности материала выданных тел;
- оценка погрешности прямых измерений размеров и массы, а также косвенных измерений объема и плотности тел;
- анализ полученных результатов, сравнение их с литературными данными и оценка точность использованных методов.

**Приборы и принадлежности:** штангенциркуль с нониусом (цена деления 0,1 мм, 0,05 мм или 0,02 мм), микрометр, лабораторные весы ВНА-В, набор измеряемых тел.

### **Краткая теория и основы работы с измерительным инструментом**

*Физическое тело* – это ограниченный объем вещества, имеющий массу и форму (или занимающий определенный объем в пространстве), который можно наблюдать и изучать как отдельный объект.

*Измерение* – экспериментальное определение значения физической величины с помощью специальных средств (измерительных приборов), результатом которого является её численное значение.

Цель измерений в лабораторной работе – получить *достоверные* численные значения физических величин (линейных размеров и плотности физического тела) с помощью измерительных инструментов (штангенциркуля, микрометра). Для этого *необходимо* хорошо понимать теорию метода и устройство приборов, тщательно подготовить объект и прибор и выполнять измерения, контролировать условия проведения опыта, чтобы внешние воздействия не искажали результаты.

Измерения разделяют на *прямые* и *косвенные*.

*Прямое измерение* – это такой вид измерения, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно из показаний измерительного прибора, без необходимости проведения дополнительных расчетов по каким-либо формулам. Примерами прямых измерений в лабораторной практике являются: определение длины бруска по шкале линейки или штангенциркуля, считывание массы тела с дисплея электронных весов, измерение диаметра цилиндра микрометром, отсчет времени секундомером или показаний силы тока амперметром.

*Косвенное измерение* – это такой вид измерения, при котором искомое значение физической величины не считывается непосредственно с прибора, а рассчитывается по известной математической формуле на основе результатов одного или нескольких прямых измерений других величин. Примерами косвенных измерений являются определение объема параллелепипеда по прямым измерениям его длины, ширины и высоты; вычисление скорости по измеренному пути и времени.

*Линейные размеры тела* – это физические величины, характеризующие протяженность тела в пространстве по основным направлениям. К ним относятся:

– длина ( $l$ ), ширина ( $b$ ), высота ( $h$ ) – для тел в форме прямоугольного параллелепипеда;

– диаметр ( $d$ ) – для цилиндров, шаров, отверстий.

*Масса тела* ( $m$ ) – это фундаментальная физическая величина, являющаяся мерой инертности тела (чем больше масса, тем труднее изменить скорость тела) и мерой гравитационного взаимодействия (чем больше масса, тем сильнее тело притягивается к Земле и само сильнее притягивает другие тела).

*Объем тела* ( $V$ ) – величина, характеризующая количество пространства, занимаемое телом.

*Плотность вещества* ( $\rho$ ) – это физическая величина, равная отношению массы вещества к занимаемому им объему. Плотность характеризует,

насколько плотно "упаковано" вещество в данном теле, то есть какая масса вещества приходится на единицу объема.

## 1. Измерение линейных размеров тела

Точное определение линейных размеров тела – длины, ширины, высоты, диаметра – является основополагающей задачей в экспериментальной физике, инженерии и контроле качества. Успех измерения напрямую зависит от обоснованного выбора методики и инструмента, который определяется комплексом взаимосвязанных факторов. Главным критерием выступает требуемая точность результата.

*Точность результата измерения* – характеристика качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности его результата. Для оперативных или грубых измерений, например, при оценке габаритов мебели или крупных заготовок, где допустима погрешность порядка 1 миллиметра и выше, часто достаточно простой *линейки* или рулетки. Когда необходима более высокая точность, в диапазоне сотых долей миллиметра (0,05 – 0,1 мм), оптимальным решением становится *штангенциркуль*. Его преимущество заключается в универсальности: одним инструментом можно измерить внешние и внутренние размеры, а также глубины пазов или отверстий, что делает его незаменимым для большинства технических задач, таких как контроль размеров деталей механизмов или толщины материалов. Для задач, требующих исключительной точности — до тысячных долей миллиметра (0,005 – 0,01 мм), например, при калибровке прецизионных деталей, измерении диаметра тонкой проволоки или толщины тонких пленок, — применяется *микрометр*. Его конструкция с микрометрическим винтом обеспечивает высочайшую точность, но специализирована в основном на измерении наружных размеров типа диаметров или толщин.

Характеристики самого объекта играют не менее важную роль, чем требуемая точность. К ним относятся размер измеряемой области (микрометр подходит для малых участков, линейка — для больших), форма и доступность

места измерения, а также материал и твердость поверхности (чтобы не повредить ни деталь, ни измерительные поверхности прибора).

Условия проведения измерений – стационарная лаборатория или цех, полевые работы – также влияют на выбор: сложные электронные или оптические системы требуют стабильности, в то время как механические штангенциркуль или микрометр более устойчивы к вибрациям или запыленности.

Наконец, нельзя исключать человеческий фактор. Навыки экспериментатора в обращении с конкретным инструментом напрямую влияют на достоверность результата. Важна и эргономика инструмента, обеспечивающая удобство и снижающая утомляемость при многочисленных измерениях.

Таким образом, выбор оптимального метода и инструмента – это всегда взвешенный компромисс между требуемой точностью, характеристиками измеряемого объекта, условиями эксплуатации и возможностями оператора. Правильный выбор — это первый и критически важный шаг к получению надежных и воспроизводимых данных о геометрических параметрах тела. Следующими шагами являются строгое соблюдение методики измерений и корректная обработка результатов с учетом погрешностей.

### Методика проведения измерений

#### *Штангенциркуль*

На рисунке 1 представлен внешний вид прибора для определения наружных и внутренних размеров деталей, а также глубины отверстий.

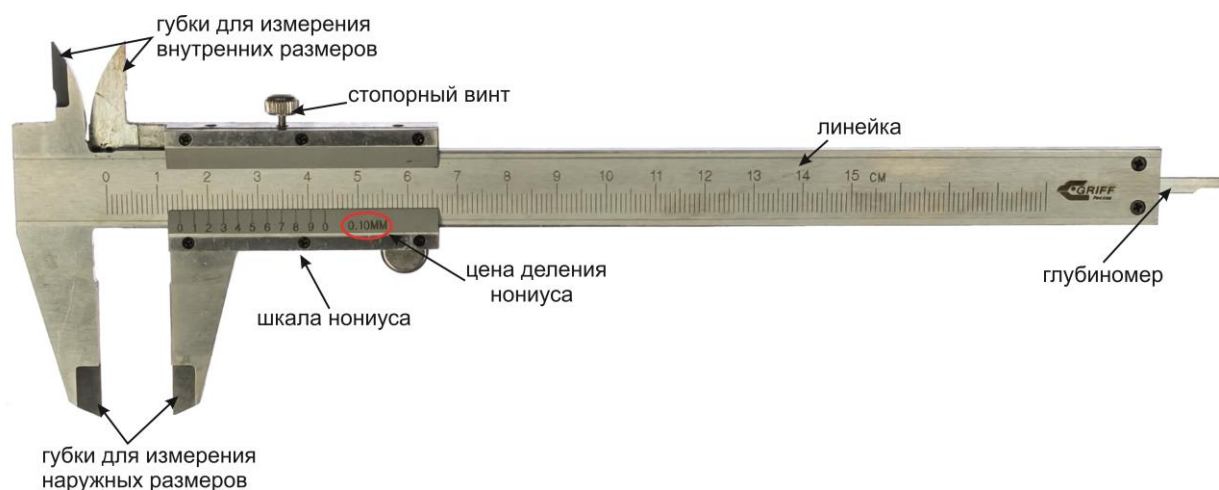


Рисунок 1 – Внешний вид и основные элементы штангенциркуля

Перед началом измерений штангенциркулем необходимо убедиться в чистоте измерительных поверхностей инструмента и измеряемого объекта. Губки штангенциркуля (как нижние, так и верхние) и глубиномер должны быть чистыми и сухими. Инструмент проверяют на нуль: при полностью сдвинутых губках нулевой штрих шкалы на нониусе должен точно совпадать с нулевым штрихом основной шкалы линейки.

Для измерения *наружного* размера (например, диаметра цилиндра или высоты параллелепипеда) объект аккуратно размещают между *нижними* губками. Губки плавно сдвигают до легкого соприкосновения с поверхностью детали по всей длине измерительных поверхностей губок. Очень важно избегать перекоса губок относительно детали и приложения чрезмерного усилия, которое может деформировать деталь или сам инструмент. Деталь должна быть зажата ровно и с небольшим, постоянным усилием. После фиксации положения губок с помощью стопорного винта инструмент снимают с детали для считывания показаний.

Считывание показаний штангенциркуля требует внимательности. Сначала на основной шкале линейки смотрят, сколько *целых* миллиметров (мм) прошло *слева* от нуля нониуса. Затем на шкале нониуса находят штрих, который точнее всего совпадает с каким-либо штрихом основной шкалы. Порядковый номер этого совпавшего штриха нониуса (начиная с нуля)

указывает на количество десятых долей миллиметра (0,1 мм). Если нониус имеет цену деления нониуса 0,05 мм, то совпавший штрих покажет количество этих долей. Сумма значения по основной шкале (целые мм) и значения по нониусу (доли мм) дает итоговый размер. Примеры считывания показаний штангенциркуля с разными ценами деления показана на рисунке 2.

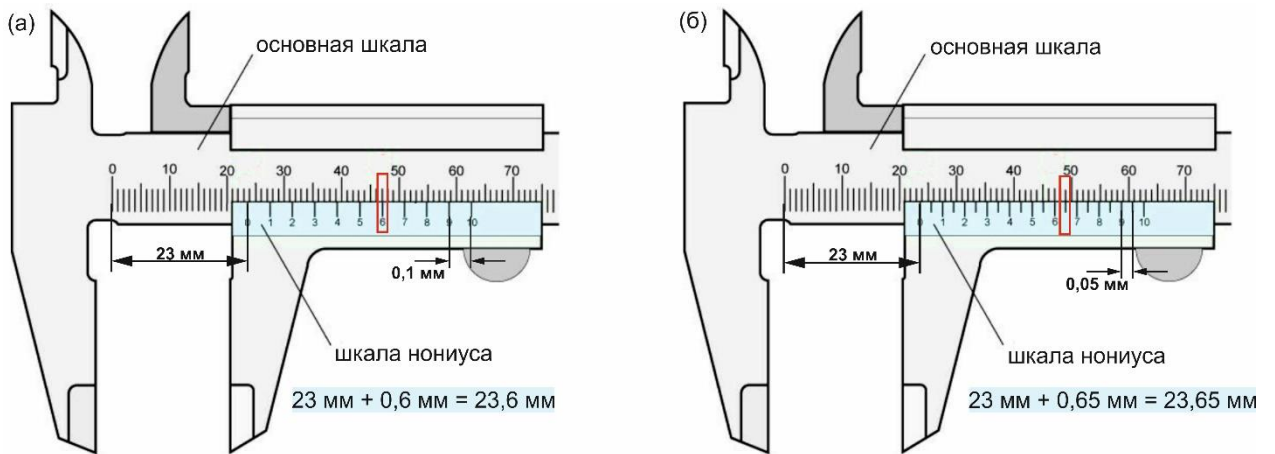


Рисунок 2 – Примеры считывания показаний штангенциркуля с ценой деления 0,1 мм (а) и 0,05 мм (б)

### Микрометр

На рисунке 3 представлен внешний вид прибора для получения значений линейных размеров с высокой точностью.

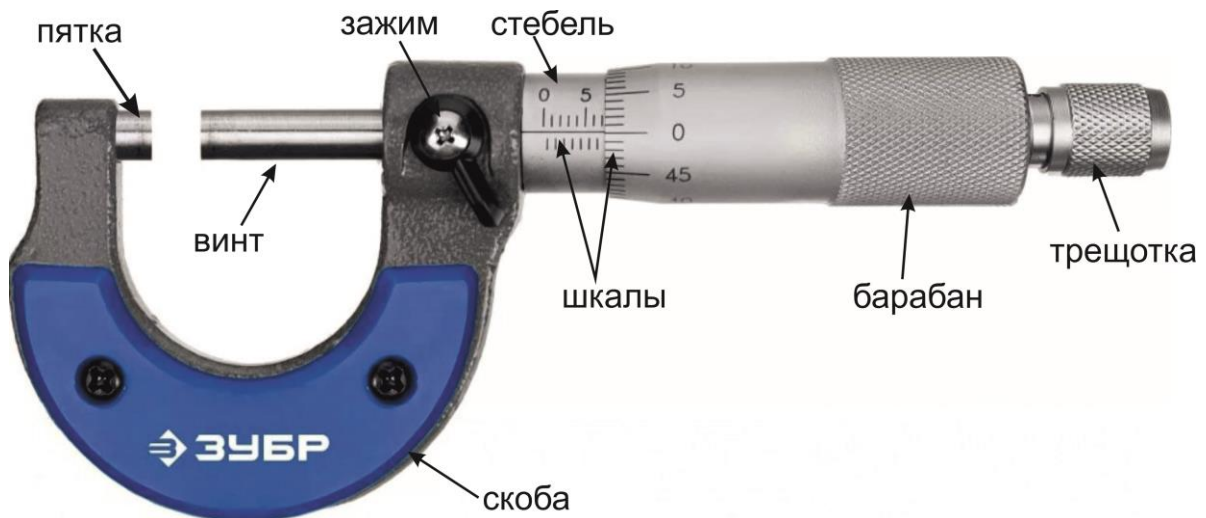


Рисунок 3 – Внешний вид и основные элементы микрометра

Перед использованием микрометра также проверяют чистоту измерительных поверхностей пятки и микрометрического винта (шпинделя), а также измеряемого объекта. Обязательна проверка нуля при сомкнутых измерительных поверхностях. Для микрометров диапазона 0-25 мм барабан должен показывать "0", когда пятка и шпиндель плотно соприкасаются (без объекта!). Если показание не нулевое, микрометр требует калибровки или поправки к результатам.

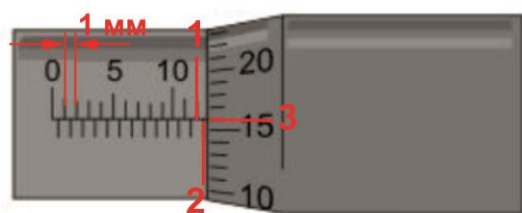
Объект размещают между неподвижной пяткой и подвижным шпинделем. Шпиндель вращают с помощью трещотки, а **НЕ** барабана напрямую. Трещотка предназначена для обеспечения строго определенного, стандартного измерительного усилия. Вращение трещотки продолжают до характерного звука (треска или проскальзывания) 3-5 раз. Этот звук сигнализирует о том, что достигнуто правильное измерительное усилие – достаточное для надежного контакта, но не вызывающее деформации детали или инструмента. Использование трещотки – ключевое правило для получения точных результатов микрометром. Прикладывать дополнительное усилие после срабатывания трещотки категорически запрещено. Деталь должна быть зажата ровно, без перекоса.

После установки правильного контакта с помощью трещотки, положение фиксируется стопорным кольцом (или рычажком), чтобы предотвратить случайное смещение шпинделя при считывании показаний. Только после фиксации микрометр можно убрать от объекта для считывания.

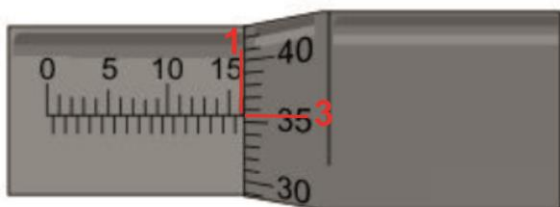
Считывание показаний микрометром происходит по двум шкалам. На стебле нанесена основная шкала с миллиметровыми (верхние штрихи) и полумиллиметровыми (нижние штрихи) делениями. Сначала смотрят, сколько целых миллиметров открыто на стебле (верхняя шкала) – это значение считывается по краю скошенного торца барабана. Затем проверяют, виден ли следующий полумиллиметровый штрих (нижняя шкала) – если да, к целым мм прибавляют 0,5 мм. Далее смотрят на круговую шкалу барабана. Значение, на которое указывает центральная продольная риска на стебле (или край стебля)

на шкале барабана, дает сотые доли миллиметра (0,01 мм). Деления на барабане обычно пронумерованы. Итоговый размер получается сложением значения по основной шкале стебля (целые мм), полумиллиметрового штриха (если виден) и показания по барабану (сотые мм).

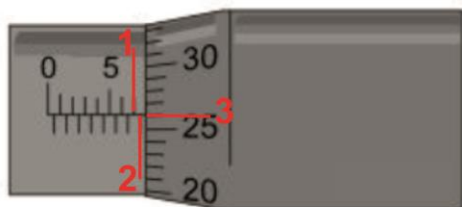
Примеры считывания показаний микрометра показана на рисунке 4.



$$1+2+3=12 \text{ мм}+0,5 \text{ мм}+0,16 \text{ мм}=12,66 \text{ мм}$$



$$1+3=16 \text{ мм}+0,355 \text{ мм}=16,355 \text{ мм}$$



$$1+2+3=7 \text{ мм}+0,5 \text{ мм}+0,26 \text{ мм}=7,76 \text{ мм}$$

Рисунок 4 – Примеры считывания показаний микрометра

После проведения измерений как штангенциркулем, так и микрометром, инструменты следует протереть чистой салфеткой, слегка развести измерительные поверхности (особенно у микрометров) и убрать в футляр для защиты от пыли, влаги и механических повреждений.

## 2. Определение плотности твердого тела

Плотность вещества рассчитывается как отношение массы тела к его объему

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

Для тел правильной формы (куб, шар, цилиндр) массу измеряют прямым взвешиванием, а объем вычисляют по геометрическим формулам. Выбор весов зависит от: требуемой точности (погрешность  $\pm 0,1$  г до  $\pm 0,0001$  г), размера и массы объекта, условий лаборатории.

#### *Правила работы с аналитическими весами*

На рисунке 5 представлен внешний вид лабораторных аналитических весов ВНА-В-600. Данные весы предназначены для измерения массы объектов массой от 0,5 до 600 г, точность составляет 0,01 г.



Рисунок 5 – Внешний вид аналитических весов ВНА-В-600

Перед началом работы необходимо убедиться, что весы размещены на виброзащитной поверхности (каменная плита, антистатический коврик) в помещении без сквозняков, перепадов температуры ( $>24$  ч стабильности) и электромагнитных помех. Важно проверить горизонтальность установки по встроенному уровню (рисунок 6) и при отклонении выровнять весы, регулируя высоту опорных ножек весов.



Рисунок 6 – Вид встроенного уровня при горизонтальном положении весов

Перед взвешиванием необходимо убедиться в том, что показания весов находятся на нулевой отметке. Для исключения ошибки нуля нужно провести тарирование весов (клавиша TARA). При размещении объекта на чаше весов критически важно располагать его строго по центру. Несоблюдение этого правила приводит к возникновению угловых нагрузок, которые искажают результаты измерений из-за неравномерного распределения массы. Все манипуляции с объектами выполняются только пинцетом для исключения контакта с кожей. Дверцы защитного кожуха (при наличии) открываются минимально на необходимое время. Температура образцов должна быть стабилизирована до температуры весов перед взвешиванием.

### **Порядок выполнения работы**

1. Проверьте комплектность и внешнее состояние штангенциркуля и микрометра. Определите цену деления нониуса штангенциркуля и барабана микрометра. Запишите их.

2. Проверьте нулевую установку приборов:

*Штангенциркуль:* Совместите губки. Нулевые штрихи шкалы линейки и нониуса должны точно совпадать. Если есть небольшой сдвиг (нулевая погрешность  $x_0$ ), запишите его значение и знак (для учета в измерениях).

*Микрометр:* Сомкните измерительные поверхности (вращая трещотку до щелчка 3-5 раз). Шкала на барабане должна показывать "0" относительно продольного штриха на стебле. Если есть отклонение (нулевая погрешность  $x_0$ ), запишите его значение и знак.

3. Внимательно осмотрите выданные тела. Определите, какие размеры вам нужно измерить для каждого (например, для цилиндра: диаметр и высота; для шарика: диаметр; для параллелепипеда: длина, ширина, высота; для пластины: толщина). Убедитесь, что поверхности образцов в местах измерений чистые и не имеют видимых дефектов.

4. Аккуратно зажмите измеряемую часть тела между соответствующими губками штангенциркуля (наружными для внешних размеров, внутренними для внутренних размеров, глубиномером для глубин). **Не прилагайте чрезмерных усилий!** Зафиксируйте рамку штангенциркуля (затяните винт). Снимите показания.

5. Повторите измерение данного размера данного тела не менее 5 раз, каждый раз слегка смещая образец между губками. Запишите все значения в таблицу 1.

6. Аккуратно зажмите измеряемую часть тела между соответствующими губками штангенциркуля (наружными для внешних размеров, внутренними для внутренних размеров, глубиномером для глубин). **Не прилагайте чрезмерных усилий!** Зафиксируйте рамку штангенциркуля (затяните винт). Снимите показания.

7. Повторите измерение данного размера данного тела не менее 5 раз, каждый раз слегка смещая образец между губками (для учета возможного перекоса и получения более надежного среднего). Запишите все полученные значения в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерения геометрических размеров тел

Параллелепипед, <u>указать материал</u>				Цилиндр, <u>указать материал</u>	
Номер измерения	<i>a</i> мм	<i>b</i> , мм	<i>c</i> , мм	<i>d</i> , мм	<i>h</i> , мм
		<i>Штангенциркуль / микрометр (выбрать и указать цену деления нониуса)</i>	...	...	...
1					
2					
3					
4					
5					
Среднее значение					
<i>V</i> , мм <sup>3</sup>					
<i>m</i> , г					

8. Включите весы, дождитесь сигнала готовности. Перед взвешиванием необходимо убедиться в том, что показания весов находятся на нулевой отметке.

9. Разместите образец строго в центре чаши. Дождитесь стабилизации показаний ( $\pm 15$  сек). Запишите полученные значения массы в таблицу 1.

### Обработка результатов измерения

**ВАЖНО!** Все расчеты производить вручную, указывая единицы измерения на всех этапах расчетов!

1. Рассчитайте среднее арифметическое значение всех линейных размеров и массы каждого из тел по формуле:

$$\bar{a} = \frac{\sum a_i}{n},$$

где  $a_i$ - измеренная величина,  $n$  – количество измерений данной величины.

**Если была определена ненулевая погрешность ( $\delta_0$ ), внесите в расчеты поправку:  $l_i = l_{i \text{ изм}} - \delta_0$ .**

2. По результатам средних значений величин линейных размеров и массы, полученным в пункте 1, рассчитайте объем и плотность каждого из тел по формулам:

$$\bar{V}_{\text{параллелепипеда}} = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c};$$

$$\bar{V}_{\text{цилиндра}} = \frac{\bar{h} \cdot \pi \cdot \bar{d}^2}{4};$$

$$\rho = \frac{\bar{m}}{\bar{V}}.$$

### *Расчет погрешностей*

1. Рассчитайте величину среднеквадратичного отклонения всех результатов прямых измерений линейных размеров и массы каждого из тел по следующей формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}{n(n-1)}}$$

2. Оцените случайную погрешность для каждой измеренной величины по формуле:

$$\Delta x_{\text{сл}} = t_{\alpha, n} \sigma_x,$$

где  $t_{\alpha, n}$  – коэффициентов Стьюдента при значении надежности  $\alpha = 0,95$ .

3. Оцените систематическую погрешность каждой величины  $\Delta x_{\text{сист}}$  с учетом класса точности прибора.

$$\Delta x_{\text{сист}} = \sqrt{\Delta x_{\text{ц.д.}}^2 + \Delta x_{\text{к.т.}}^2}$$

В случае отсутствия класса точности, рассчитать погрешность по формуле

$$\Delta x_{\text{ц.д.}} = \alpha l,$$

где  $l$  – наименьшая цена деления прибора (цена наименьшего деления нониуса).

4. Рассчитайте полную погрешность прямых измерений линейных размеров и массы каждого тела:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл}^2 + \Delta x_{сист}^2}$$

5. Рассчитайте относительную погрешность прямых измерений:

$$\delta x = \frac{\Delta x}{\bar{x}} 100\%$$

6. Запишите окончательный результат в виде (с учетом округления):

$$x = \bar{x} \pm \Delta x.$$

7. Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности объема и плотности каждого из тел, используя правила расчета погрешностей косвенных измерений.

*Запись результатов*

Занесите полученные значения линейных размеров и масс всех тел, а также их объем и плотность с учетом погрешностей в таблицу 2. Для записи используйте правила округления.

Для анализа полученных результатов и подготовки вывода по работе найдите табличные значения плотностей веществ, из которых изготовлены тела и запишите их в таблицу 2. Сравните полученные значения с теоретическими, проанализируйте результаты.

Таблица 2 – Результаты расчетов

Параллелепипед, <i>указать материал</i> ( $\rho_{теор} = \dots$ )					
$\bar{a} \pm \Delta a$ , мм	$\bar{b} \pm \Delta b$ , мм	$\bar{c} \pm \Delta c$ , мм	$\bar{m} \pm \Delta m$ , г	$\bar{V} \pm \Delta V$ , мм <sup>3</sup>	$\bar{\rho} \pm \Delta \rho$ , г/см <sup>3</sup>
Цилиндр, <i>указать материал</i> ( $\rho_{теор} = \dots$ )					
$\bar{d} \pm \Delta d$ , мм	$\bar{h} \pm \Delta h$ , мм	$\bar{m} \pm \Delta m$ , г	$\bar{V} \pm \Delta V$ , мм <sup>3</sup>	$\bar{\rho} \pm \Delta \rho$ , г/см <sup>3</sup>	

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение физической величины "плотность вещества". Какова ее единица измерения в СИ?
2. Опишите устройство и принцип работы штангенциркуля. Как определить цену деления его нониуса? Какие виды измерений им можно проводить?
3. Какие конкретно тела вы измеряли и какие их размеры определяли? Обоснуйте выбор измерительного инструмента (штангенциркуль/микрометр) для каждого размера.
4. Почему необходимо проводить многократные измерения одного и того же размера?
5. Продемонстрируйте правильный прием измерения (диаметра цилиндра микрометром или толщины бруска штангенциркулем). Расскажите, на что нужно обращать внимание.
6. Какие основные источники погрешностей были в работе? Как можно было бы уменьшить их влияние на результат?
7. Что такое относительная погрешность прямого измерения? Как ее рассчитать? Приведите пример из вашей работы. Что показывает эта величина?
8. Сравните погрешности измерений, полученные штангенциркулем и микрометром. Как это повлияло на точность определения объема и плотности?
9. \*Как зависит точность определения объема и плотности от формы тела? Почему для тела неправильной формы метод был бы другим?
10. \*Предположим, тело имеет полость внутри. Как это повлияло бы на результат измерения плотности описанным методом?