

**Методические указания к лабораторной работе по курсу  
физике «Определение плотности твердого тела»**

## Оглавление

Оформление и порядок выполнения лабораторной работы.....	3
Допуск к лабораторной работе.....	3
Оформление конспекта .....	3
Оформление лабораторной работы к зачету.....	4
Требования к графикам .....	4
Шаблон вывода по графику .....	5
Шаблон ответа.....	5
Шаблон вывода по ответу .....	5
Лабораторная работа.....	6
Описание аппаратуры и методики измерений.....	6
Устройство штангенциркуля и правила измерения .....	7
Устройство микрометра .....	9
Порядок выполнения работы.....	10
Обработка результатов измерений.....	11
Теоретическое введение.....	12
Вычисление погрешностей прямых измерений .....	12
Расчет погрешностей косвенных измерений .....	14
Приложение .....	16

## Оформление и порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа состоит из трех этапов: допуск к лабораторной работе, ее выполнение и защита.

### Допуск к лабораторной работе

- Каждый студент **предварительно** оформляет свой персональный конспект в тетради в клетку для лабораторных работ (ЛР).
- Преподаватель индивидуально проверяет оформление конспекта и задает вопросы по теории, методике измерений, установке и обработке результатов.
- Студент отвечает на заданные вопросы (письменно в черновике конспекта или устно).
- Преподаватель допускает студента к работе и ставит свою подпись в конспекте студента (графа ДОПУСК в таблице перед лабораторной работой).

### Оформление конспекта

Конспект оформляется строго в порядке, представленном ниже:

1. Перед лабораторной работой должна быть начерчена таблица:

Допуск	Номер бригады	Выполнение	Зачет

2. Название лабораторной работы.
3. Цель работы (переписать полностью из описания).
4. Краткая теория (выписать основные определения, формулы и пояснить каждый символ, входящий в формулу).
5. Экспериментальная установка (нарисовать чертеж и написать наименование деталей).

6. Таблицы (состав таблиц и их количество, определить самостоятельно в соответствии с методикой измерений и обработкой их результатов).
7. После выполнения работы оформляется отчет (его содержание указано в описании лабораторной работы). Этот раздел в описании может иметь и другое название.

### Оформление лабораторной работы к зачету

Полностью оформленная и подготовленная к зачету работа должна соответствовать следующим требованиям:

1. Выполнение всех **пунктов** раздела описания “Оформление отчета” (в тетради представлены все расчеты требуемых величин, заполнены чернилами все таблицы, построены все графики).
2. **Графики** должны удовлетворять всем требованиям, приведенным ниже.
3. Для всех величин в таблицах должна быть записана соответствующая единица измерения.
4. Записаны **выводы** по каждому графику (см. ниже шаблон)
5. Выписан **ответ** по установленной форме (см. ниже шаблон).
6. Записаны **выводы** по ответу (см. ниже шаблон).

### Требования к графикам

- чертятся на миллиметровке, размер не менее 1/2 тетрадного листа;
- на графике отмечены: оси декартовой системы, на концах осей — стрелки, индексы величин, единицы измерения;
- на каждой оси — **равномерный масштаб** (риски через равные промежутки, числа через равное количество рисок);
- под графиком — полное название графика **словами**;
- на графике экспериментальные и теоретические точки отмечаются четко;
- форма графика должна соответствовать теоретической зависимости (не ломаная).

### **Шаблон вывода по графику**

Полученный экспериментально график зависимости «название функции словами» от «название аргумента» имеет вид прямой (проходящей через начало координат, параболы, гиперболы, плавной кривой) и качественно совпадает с теоретической зависимостью данных характеристик, имеющей вид «формула».

### **Шаблон ответа**

По результатам измерений и расчетов получено значение «название физической характеристики», равное «символ» = («среднее» ± «ошибка») «един. измер.».

### **Шаблон вывода по ответу**

Полученное экспериментально значение величины «полное название словами», равное «число, единица измерения», с точностью до ошибки измерений, составляющей «число, единица измерения», совпадает (не совпадает) с табличным (теоретическим) значением данной величины, равным «число, единица измерения».

## **Лабораторная работа** **«Определение плотности твердого тела»**

*Цель работы* — определение плотности твердого тела и освоение методов определения погрешностей измерений и их расчёта.

*Задание* — определить плотность твердого тела. Оценить погрешность проведённых измерений.

*Подготовка к выполнению лабораторной работы:* изучить основные положения теории погрешностей и ознакомиться с измерительной аппаратурой. Ответить на контрольные вопросы.

### **Описание аппаратуры и методики измерений**

Основными элементами экспериментальной установки являются:

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

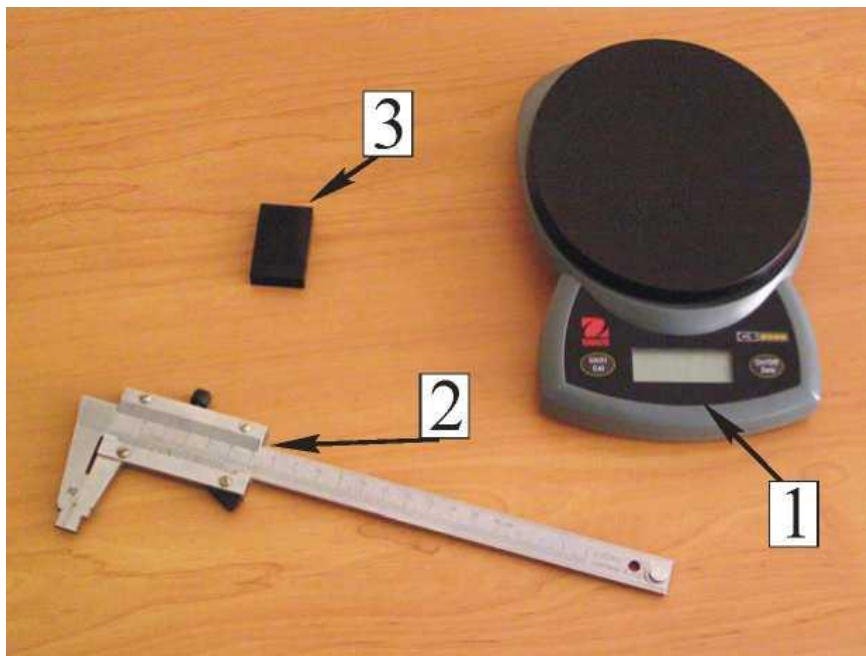


Рис.1. Основные элементы экспериментальной установки.

Если тело однородно, то плотность материала, из которого изготовлено исследуемое тело, определяют по формуле

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

где  $m$  — масса тела,  $V$  — его объем.

### Устройство штангенциркуля и правила измерения

Самым популярным инструментом для высокоточных измерений наружных и внутренних размеров является штангенциркуль. Штангенциркуль имеет измерительную штангу (отсюда и его название) с основной шкалой и нониус — вспомогательную шкалу для отсчета долей делений.

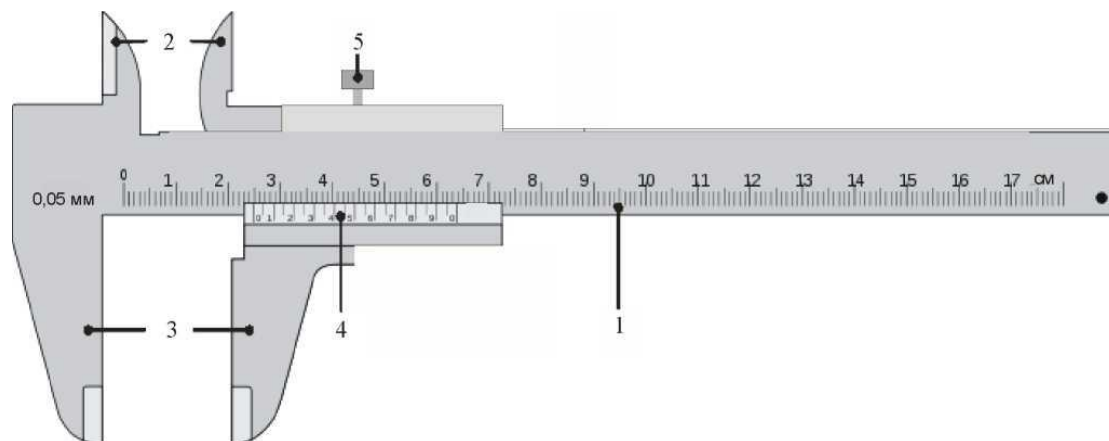


Рис.2. Штангенциркуль: 1 — штанга с основной шкалой; 2 — губки для внутренних измерений; 3 — губки для внешних измерений; 4 — вспомогательная шкала (нониус); 5 — винт для зажима.

Для определения размера исследуемого тела его нужно зажать между зажимами штангенциркуля. После этого размер определяется по следующим правилам:

1. по числу на основной шкале, напротив которого остановился ноль нониусной шкалы, определяют длину тела в миллиметрах (на рис.3 она равна 17 мм);
2. определение остатка в десятичных долях миллиметра производится по числу на нониусной шкале, с которым точно совпало какое-либо деление основной шкалы (на рис.3 он равен 0.3 мм);

3. Чтобы рассчитать величину зазора, надо к показанию основной шкалы прибавить показание нониусной шкалы (на рис.3 — 17.3 мм).

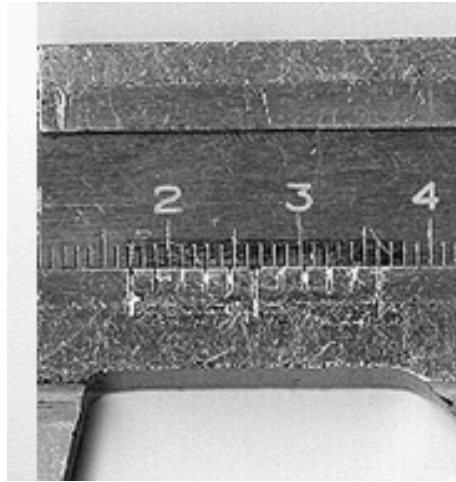


Рис.3. Шкалы штангенциркуля.

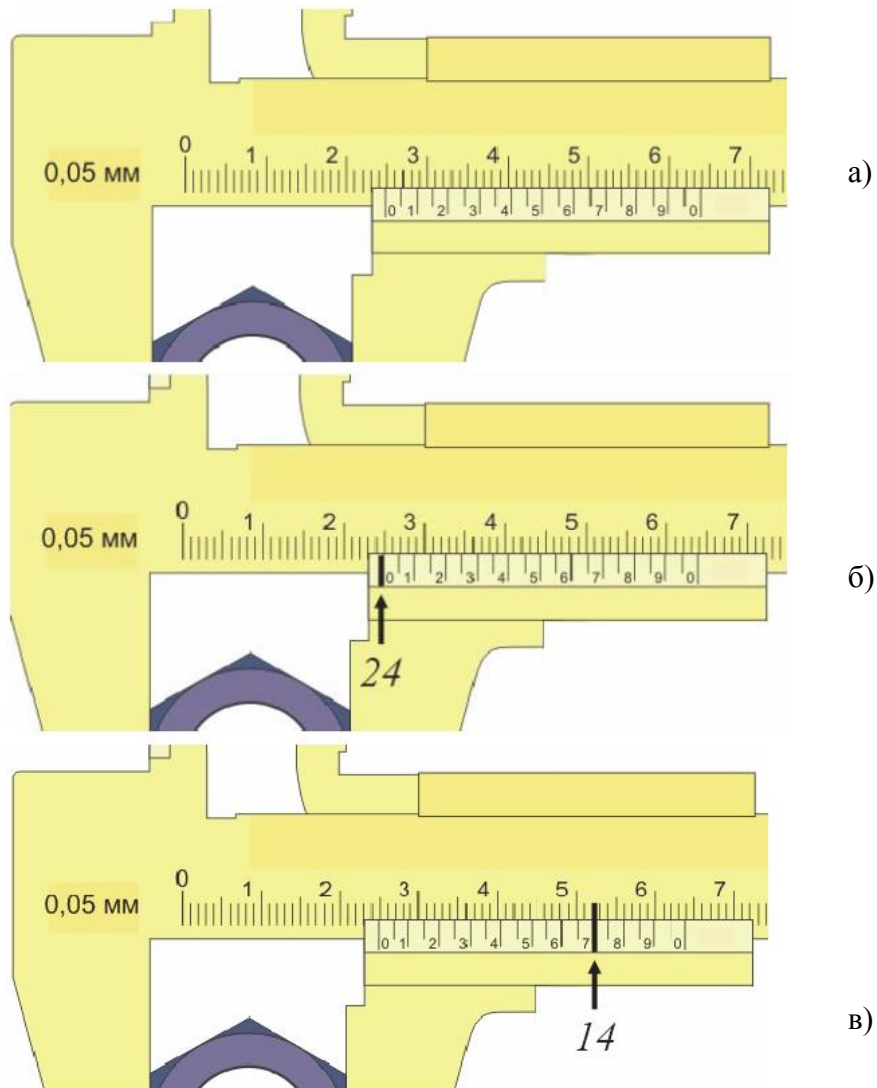


Рис.4. Определение размера исследуемого тела: а) размещение предмета между губками; б) подсчет целых миллиметров; в) подсчет долей миллиметра.



**Измеряемый предмет введите между губками**, которые сдвиньте до соприкосновения с предметом. Затем закрепите подвижную губку зажимом.

**Считайте число целых миллиметров**, для этого найдите на основной шкале штрих, ближайший слева к нулевому штриху нониуса (рис.4б), и запишите его числовое значение: 24 мм.

**Считайте число долей миллиметра**, для этого на шкале нониуса найдите штрих, совпадающий с каким-нибудь штрихом основной шкалы (рис.4в), и умножьте его порядковый номер на цену деления (в нашем случае 0.05 мм) нониуса:  $14 \cdot 0.05 \text{ мм} = 0.7 \text{ мм}$ .

**Подсчитайте полную величину показания штангенциркуля**, для этого сложите число целых миллиметров и долей миллиметра:  $24 \text{ мм} + 0.7 \text{ мм} = 24.7 \text{ мм}$ .

### Устройство микрометра

При точных измерениях расстояний нередко применяют **микрометрические винты** — винты с малым и очень точно выдержанным шагом. Такие винты употребляются, например, в **микрометрах** (рис.5).

Один поворот винта микрометра передвигает его стержень на 0.5 мм. Барабан, связанный со стержнем, разбит на 50 делений. Поворот на одно деление соответствует смещению стержня на 0.01 мм.

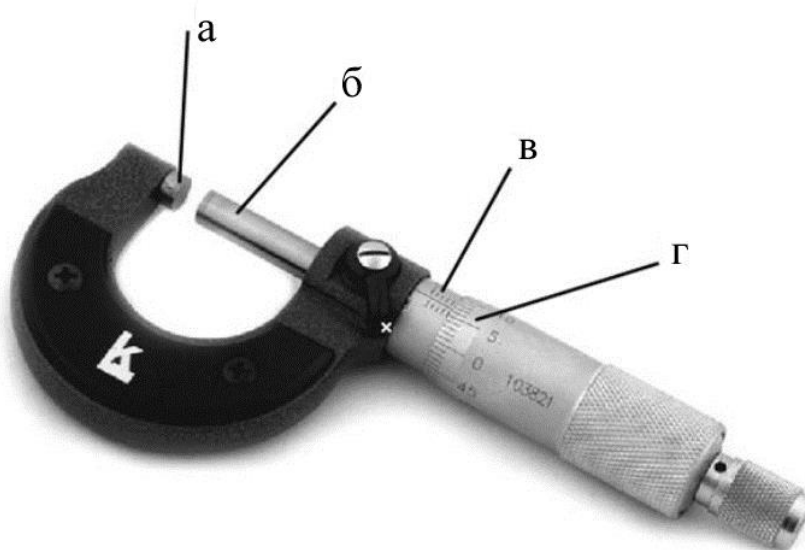


Рис.5. Устройство микрометра: а) неподвижный выступ; б) выступ микрометрического винта; в) линейная шкала; г) круговая шкала.

С этой точностью обычно и производятся измерения с помощью микрометра (рис.5, 6). Внутри правой части рамки микрометра проходит микрометрический винт, который оканчивается выступом (рис.5б). На левой части рамки имеется неподвижный выступ (рис.5а).

На внешней цилиндрической поверхности "хвоста" ролика, через который проходит винт, нанесены две шкалы сверху и снизу с делениями через 1 мм, но смещенными относительно друг друга на 0.5 мм (рис.5в). На винт насажена муфта, на скошенном краю которой по всей окружности нанесена шкала, разделенная на 50 делений.

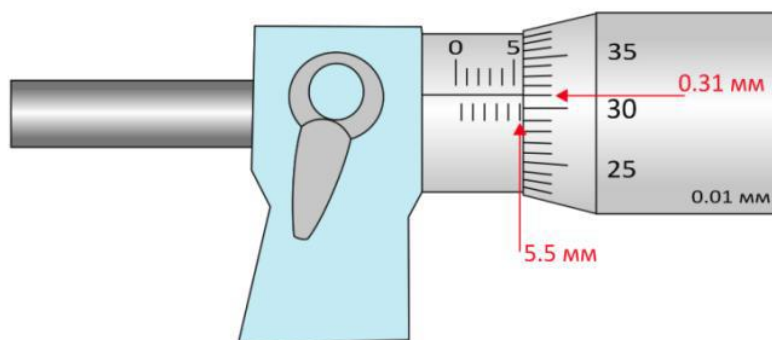


Рис.6. Определение значений микрометра:  $5.5 \text{ мм} + 31 \cdot 0.01 \text{ мм} = 5.81 \text{ мм}$ .

При вращении муфты выступ перемещается и смещается на 0.5 мм при одном обороте. Когда выступы сдвинуты вплотную, край муфты проходит через нуль линейной шкалы, а нуль шкалы муфты совпадает с горизонтальной чертой. Отношение шага винта 0.5 мм к числу делений круговой шкалы 50 и есть точность микрометра: 0.01 мм.

### Порядок выполнения работы

- Определить погрешности приборов, используемых в данной работе.
- С помощью штангенциркуля определить линейные размеры исследуемого тела, необходимые для вычисления его объёма. Каждый параметр измерить не менее пяти раз.
- С помощью весов определить массу тела. Измерения массы также проводить не менее пяти раз.

- Результаты измерений и приборные погрешности занести в таблицу. Примерный вид таблицы для тел цилиндрической формы приведен ниже.

Изменяемая величина	1	2	3	4	5	Среднее значение	Случайная погрешность	Погрешность прибора	Погрешность измерения
$d_i$									
$\Delta d_i$									
$(\Delta d_i)^2$									
$h_i$									
$\Delta h_i$									
$(\Delta h_i)^2$									
$m$									
$\Delta m_i$									
$(\Delta m_i)^2$									

### Обработка результатов измерений

- По полученным экспериментальным данным найти средние значения линейных размеров и массы тела.
- Определить абсолютные погрешности отдельных измерений, их квадраты, случайные погрешности прямых измерений.
- Результаты проделанных расчётов занести в таблицу.
- Используя средние значения измеренных параметров, вычислить плотность изучаемого тела.
- Рассчитать относительную погрешность определения плотности.
- Определить абсолютную погрешность  $\Delta\rho$ . Записать окончательный результат определения плотности исследуемого тела, используя правила округления погрешностей и самой определяемой величины.

## Теоретическое введение

Для оценки плотности твердого тела необходимо измерить его объем и массу:

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

Для определения массы, тело нужно взвесить на весах. Для определения объема измерений его линейные размеры.

Измерения делятся на прямые и косвенные. Прямые измерения производятся непосредственно прибором (длина — линейкой, штангенциркулем и т.д.). Косвенные измерения производятся путем вычисления по соответствующим формулам.

Любое измерение производится с некоторой погрешностью. Поэтому любое измеренное значение должно быть записано в виде:  $x + \Delta x$ , где  $\Delta x$  — абсолютная погрешность.

### Вычисление погрешностей прямых измерений

#### Погрешность прибора:

- Линейка имеет погрешность равную половине длины наименьшего деления.
- Штангенциркуль — погрешность равна цене деления нониуса.
- Погрешность весов задается в паспорте:  $\Delta m = 0.1$  г.
- Погрешность секундомера при ручном включения  $\Delta t = 0.1$  с

**Промахи:** если какое-то число резко отличается от массива данных — это промах. Его надо исключить, сделать повторное измерение.

**Систематическая погрешность:** связана с неправильной установкой или регулировкой прибора, или наличием какого-то постоянно действующего фактора. Для систематической ошибки характерно то, что она имеет постоянный знак, завышает или занижает результат.

**Случайная погрешность:** она зависит от большого числа факторов, меняется случайным образом при повторных измерениях. Её нельзя устранить, но можно уменьшить, увеличив число измерений.

Для расчета **случайных погрешностей** необходимо:

1. Измерить величину  $x$ , достаточное число раз.
2. Исключить промахи.
3. Найти среднее арифметическое.

$$x_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

4. Рассчитать абсолютное значение погрешностей отдельных измерений.

$$\Delta x_i = |x_{\text{ср}} - x_i|$$

5. Возвести погрешности  $\Delta x_i$  в квадрат.
6. Найти сумму  $\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2$
7. Подставить найденное значение суммы в формулу:

$$\Delta x_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}$$

где  $n$  — число опытов.

8. Рассчитать случайную погрешность по формуле:

$$\Delta x_{\text{сл}} = \Delta x_{\text{кв}} \cdot t(n, p),$$

где  $t(n, p)$  — коэффициент Стьюдента для заданной доверительной вероятности  $p$  (находится по таблице).

$p = 0.95$		$p = 0.99$	
$n$	$t(n, p)$	$n$	$t(n, p)$
2	12.7	2	63.7
3	4.3	3	9.9
4	3.2	4	5.8
5	2.8	5	4.6
6	2.6	6	4.0
7	2.4	7	3.7
8	2.4	8	3.5
9	2.3	9	3.4
10	2.3	10	3.3
15	2.1	15	3.0
20	2.1	20	2.9
30	2.0	30	2.8
100	2.0	100	2.6

9. Сравнить случайную погрешность  $\Delta x_{сл}$  и приборную  $\Delta x_{пр}$ . Из них выбрать большую.

### Расчет погрешностей косвенных измерений

Рассмотрим на примере тела цилиндрической формы, расчетную формула представлена в виде:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi d^2 H}$$

- Сначала рассчитывают относительную погрешность.

$$E = \frac{\Delta x}{x}$$

- Расчетную формулу логарифмируем:

$$\ln \rho = \ln 4 + \ln m - \ln \pi - 2 \ln d - \ln H$$

- Все минусы в формуле, заменяем на плюсы:

$$\ln \rho = \ln 4 + \ln m + \ln \pi + 2 \ln d + \ln H$$

- Дифференцируем:

$$\frac{dp}{p} = \frac{dm}{m} + \frac{d\pi}{\pi} + \frac{2dD}{D} + \frac{dH}{H},$$

- Бесконечно малые значения заменяем на погрешности

$$E = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta\pi}{\pi} + \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta H}{H},$$

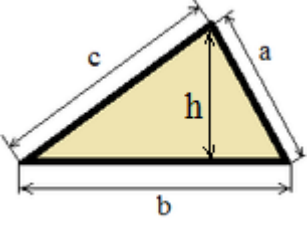
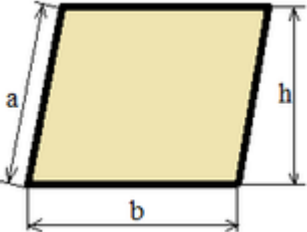
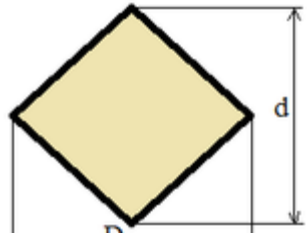
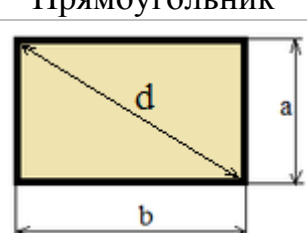
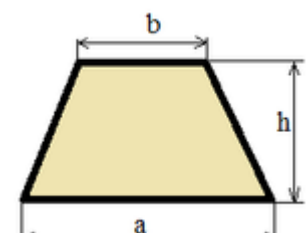
*здесь  $m$ ,  $d$  и  $H$  – среднее значение измерений;*

*$\Delta m$ ,  $\Delta d$  и  $\Delta H$  – погрешности прямых измерений  $m$ ,  $d$  и  $H$ .*

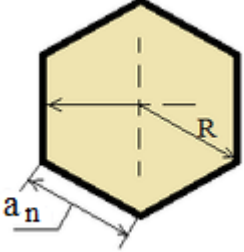
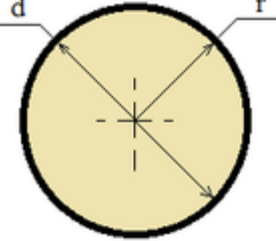
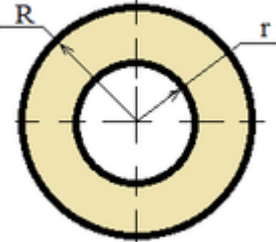
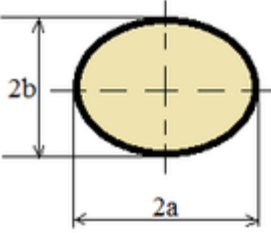
- По формуле рассчитываем  $E$
- Находим абсолютную погрешность измерения  $\Delta\rho = \rho_{\text{ср}} \cdot E$
- Округляем  $\Delta\rho$  до одной значащей цифры, если эта цифра не единица.  
*Если первая значащая цифра единица, то округляем до двух значащих цифр.*
- Округляем  $\rho$  так, что последующая значащая цифра в результате должна находиться в той же десятичной позиции, что и значащая цифра в погрешности.

## Приложение

Формулы для расчета площади геометрических фигур:  $S$  — площадь;  $h$  — высота;  $n$  — число сторон правильного многоугольника;  $r$  — радиус вписанной окружности.

Треугольник		$S = (b \cdot h) / 2$
Параллелограмм		$S = b \cdot h$
Ромб		$S = (D \cdot d) / 2$
Прямоугольник		$S = a \cdot b$
Трапеция		$S = ((a + b) / 2) \cdot h$



<p>Правильный многоугольник</p>		$S_n = \frac{1}{2}(n \cdot a_n \cdot r)$
<p>Круг</p>		$S = \pi \cdot r^2$
<p>Кольцо</p>		$S = \pi \cdot (R^2 - r^2)$
<p>Эллипс</p>		$S = \pi \cdot a \cdot b$

**Таблица плотности веществ**

Плотности некоторых твердых тел  
(при норм. атм. давл.,  $t = 20^{\circ}\text{C}$ )

Твердое тело	$\rho$ , кг / м <sup>3</sup>	$\rho$ , г / см <sup>3</sup>	Твердое тело	$\rho$ , кг / м <sup>3</sup>	$\rho$ , г / см <sup>3</sup>
Осмий	22 600	22.6	Мрамор	2700	2.7
Иридий	22 400	22.4	Стекло оконное	2 500	2.5
Платина	21 500	21.5	Фарфор	2 300	2.3
Золото	19 300	19.3	Бетон	2 300	2.3
Свинец	11 300	11.3	Кирпич	1 800	1.8
Серебро	10 500	10.5	Сахар-рафинад	1 600	1.6
Медь	8 900	8.9	Оргстекло	1 200	1.2
Латунь	8 500	8.5	Капрон	1 100	1.1
Сталь, железо	7 800	7.8	Полиэтилен	920	0.92
Олово	7 300	7.3	Парафин	900	0.90
Цинк	7 100	7.1	Лёд	900	0.90
Чугун	7 000	7.0	Дуб (сухой)	700	0.70
Корунд	4 000	4.0	Сосна (сухая)	400	0.40
Алюминий	2 700	2.7	Пробка	240	0.24
Фторопласт	2 200	2.2			

**Плотности некоторых газов  
(при норм. атм. давл.,  $t = 20^{\circ}\text{C}$ )**

<b>Газ</b>	<b><math>\rho</math>, кг / м<sup>3</sup></b>	<b><math>\rho</math>, г / см<sup>3</sup></b>	<b>Газ</b>	<b><math>\rho</math>, кг / м<sup>3</sup></b>	<b><math>\rho</math>, г / см<sup>3</sup></b>
Хлор	3.210	0.00321	Оксид углерода (II) (угарный газ)	1.250	0.00125
Оксид углерода (IV) (углекислый газ)	1.980	0.00198	Природный газ	0.800	0.0008
Кислород	1.430	0.00143	Водяной пар (при $t = 100^{\circ}\text{C}$ )	0.590	0.00059
Воздух (при $0^{\circ}\text{C}$ )	1.290	0.00129	Гелий	0.180	0.00018
Азот	1.250	0.00125	Водород	0.090	0.00009

**Плотности некоторых жидкостей  
(при норм. атм. давл.,  $t = 20^{\circ}\text{C}$ )**

<b>Жидкость</b>	<b><math>\rho</math>, кг / м<sup>3</sup></b>	<b><math>\rho</math>, г / см<sup>3</sup></b>	<b>Жидкость</b>	<b><math>\rho</math>, кг / м<sup>3</sup></b>	<b><math>\rho</math>, г / см<sup>3</sup></b>
Ртуть	13 600	13.60	Керосин	800	0.80
Серная кислота	1 800	1.80	Спирт	800	0.80
Мёд	1 350	1.35	Нефть	800	0.80
Вода морская	1 030	1.03	Ацетон	790	0.79
Молоко цельное	1 030	1.03	Эфир	710	0.71
Вода чистая	1000	1.00	Бензин	710	0.71
Масло подсолнечное	930	0.93	Жидкое олово (при $t = 400^{\circ}\text{C}$ )	6 800	6.80
Масло машинное	900	0.90	Жидкий воздух (при $t = -194^{\circ}\text{C}$ )	860	0.86