

**ИЗМЕРЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА  
РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ.  
ИЗМЕРЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ТЕЛ**

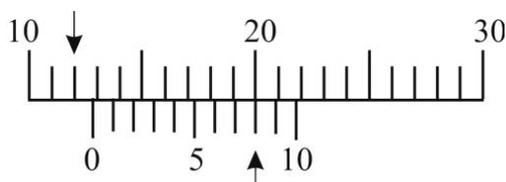
*Цель работы:* знакомство с приборами для измерения линейных размеров, проведение непосредственных измерений и изучение методов расчета погрешностей прямых и косвенных измерений.

*Приборы и принадлежности:* линейка, штангенциркуль, микрометр, измеряемые предметы.

**Общие сведения и методические указания**

Геометрические размеры – одна из характеристик физического тела. Линейные размеры тел измеряют различными приборами, каждый из которых имеет определенную степень точности. При нахождении длины какого-либо тела линейкой с миллиметровым масштабом можно поручиться лишь за цифры, обозначающие число целых миллиметров. Десятые доли миллиметров, хотя и оцениваются на глаз, сомнительны, так как сам способ изготовления обычных линеек не гарантирует их точности до десятых долей миллиметра. Максимальная погрешность при оценке десятых долей миллиметра принимается равной половине наименьшего деления, т. е.  $\pm 0,5$  мм.

Для измерения длины с большей точностью пользуются так называемым нониусом. Линейный нониус – это небольшая линейка, разделенная на 10, 20 или 50 делений, которая скользит вдоль основной шкалы с миллиметровыми делениями. На рис. 1 показан нониус, имеющий 10 делений, скользящий по основной шкале, разделенной на миллиметры. Из рисунка видно, что 10 делений нониуса равны 9 делениям основной шкалы, т. е. 9 мм. А это означает, что одно деление основной шкалы больше одного деления нониуса на 0,1 мм. При сдвиге нуля нониуса на 0,1 мм его первое деление совпадает с первым делением основной шкалы, при сдвиге на 0,2 мм – второе деление нониуса совпадает с делением основной шкалы и т. д. Следовательно, номер деления нониуса, совпадающего с каким-либо делением масштаба, указывает число десятых долей миллиметра. Наибольшая погрешность измерения при использовании нониуса составляет 0,05 мм. В качестве примера на рис. 1. приведено положение нониуса, при котором показания прибора равны 12,8 мм.



**Рис. 1. Нониус.**

Измеряя длину предмета линейкой с миллиметровым масштабом, снабженной нониусом, целое число миллиметров отсчитывают по основной шкале до нуля нониуса, а десятые доли миллиметра по шкале нониуса.

Одним из приборов, снабженных нониусом, является штангенциркуль. На рисунке 2 показан штангенциркуль ШЦ-1, состоящий из штанги с линейкой 1, которая имеет шкалу с ценой деления 1 мм. По штанге 1 передвигается рамка 3 со вспомогательной шкалой-нониусом 5. Штангенциркуль снабжён губками 2 для наружных и внутренних измерений, а также зажимом 4. К рамке 3 прикреплена линейка глубиномера 6.

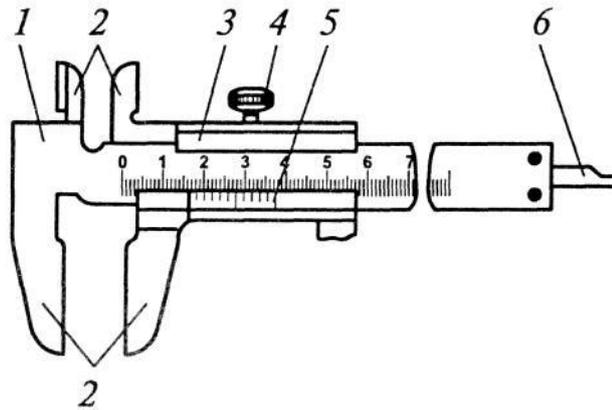


Рис. 2. Штангенциркуль

Измеряемый предмет зажимается между губками штангенциркуля. Длина предмета в миллиметрах измеряется по основной шкале линейки до нулевой черты нониуса, десятые доли миллиметра отсчитываются по нониусу. Наибольшая погрешность при измерении линейных размеров предмета штангенциркулем  $\pm 0,05$  мм. Если необходима большая точность измерения, пользуются микрометром.

Основанием микрометра (рисунок 3 а) является скоба 1, а передаточным (преобразующим) устройством служит винтовая пара, состоящая из микрометрического винта 3 и микрометрической гайки, укрепленной внутри стебля 5, которые часто называют микропарой. В скобу 1 запрессованы пятка 2 и стержень 5.

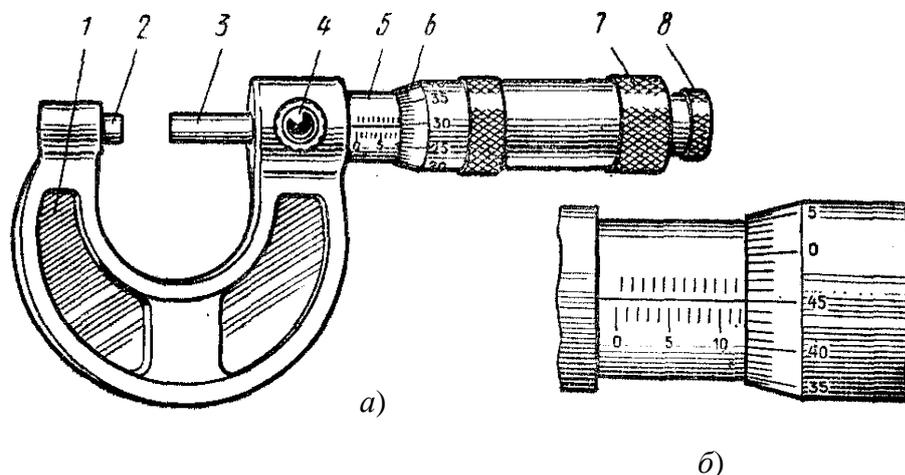


Рис. 3. Микрометр

Барабан 6 присоединен к микровинту 3 корпусом трещотки 7. Для приближения микровинта 3 к пятке 2 его вращают за барабан или за трещотку 8 по часовой стрелке (от себя), а для удаления микровинта от пятки его вращают против часовой стрелки (на себя). Закрепляют микровинт в требуемом положении стопором 4. Шаг микровинта – 0,5 мм, т. е. один оборот передвигает микровинт на 0,5 мм или 50 делений барабана (рис. 3 б), т. е. 1 деление равно 0,01 мм.

Показания по шкалам гладкого микрометра отсчитывают в следующем порядке: сначала по шкале стебля 5 читают значение штриха, ближайшего к торцу скоса барабана 6 (на рис. 2 б – это число 12,00 мм). Затем по шкале барабана читают значение штриха, ближайшего к продольному штриху стебля (на рис. 2 б – это число 0,45 мм). Сложив оба значения, получают показание микрометра, это значение 12,45 мм.

Диапазоны измерения гладкого микрометра: 0...24 мм; 25...50 мм и т.д. до 275...300 мм, дальше 300...400; 400...500 и 500...600 мм.

Для установки на ноль все микрометры, кроме 0...25 мм, снабжаются установочными мерами, размер которых равен нижнему пределу измерения. Цена деления микрометра – 0.01 мм.

В целях повышения удобства и ускорения отсчёта показаний микрометра выпускается гладкий микрометр с цифровой индикацией.

Измеряемая деталь охватывается поверхностями микровинта 3 и пятки 2. При сильном зажимании измеряемого предмета винтом микрометра предмет (например, проволока) может деформироваться. Чтобы нажим был не сильный и всегда одинаковый (10 Н), микрометр снабжен особой головкой, трещоткой 8, которая вращает винт микрометра с небольшим трением. При попытках завернуть трещотку сильнее, она проворачивается. Именно за трещотку и следует вращать винт при измерении линейных размеров тела микрометром.

### *Задание 1*

#### **Измерение толщины пластинки микрометром**

Измерить толщину  $x$  пластинки микрометром.

Записать результат измерения в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

### *Задание 2*

#### **Измерение толщины пластинки штангенциркулем**

Измерить толщину пластинки. Измерения записать в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (3)$$

Вычислить относительную погрешность измерения

$$\delta = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

**Задание 3****Измерение толщины пластинки миллиметровой линейкой**

Измерить толщину пластинки и результат измерения записать в виде

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (5)$$

Вычислить относительную погрешность измерения

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Записать результаты, полученные при выполнении задания 1, 2 и 3 в общую таблицу.

Измерительный прибор	Приборная погрешность	Толщина пластинки	Предельная абсолютная погрешность измерений	Относительная погрешность	Результат измерения	Доверительная вероятность
Микрометр						
Штангенциркуль						
Миллиметровая линейка						

Провести анализ полученных данных, сравнить точности измерения толщины пластинки разными методами.

**Задание 4****Измерение объема тела**

Необходимо вычислить объем цилиндра по непосредственно измеренным высоте  $h$  и диаметру  $D$ . Измерения величин  $h$  и  $D$  произвести с помощью штангенциркуля, где  $h$  и  $D$  - суть средние значения. Результаты измерений занести в таблицу, указав предельные погрешности  $\Delta D$  и  $\Delta h$ .

Измеряемые величины и предельные погрешности				Объем $V$	$\Delta V$	$\delta = \frac{\Delta V}{V}$	$V \pm \Delta V$
$D$	$\Delta D$	$h$	$\Delta h$				

Предельная (максимальная) относительная погрешность косвенно измеренной величины – объема цилиндра  $V = \pi R^2 h = \frac{\pi D^2 h}{4}$  вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}. \quad (7)$$

**Замечание.** Когда в расчетную формулу входят константы ( $\pi$ ,  $c$ ,  $R$ ,  $k$  и т. д.), то при вычислении результата косвенных измерений их округляют так, чтобы число значащих цифр в них было на единицу больше, чем в значениях измеряемых величин. В этом случае константы практически не вносят погрешностей в результаты вычислений и при оценке погрешности их не учитывают.

По найденному значению относительной погрешности следует определить предельную (наибольшую) абсолютную погрешность величины объема  $\Delta V = \delta \cdot V$  и конечный результат записать в виде

$$V = \bar{V} \pm \Delta V. \quad (8)$$

Необходимо помнить, что использованный в работе метод оценки погрешности косвенных измерений справедлив только тогда, когда погрешности непосредственно измеряемых величин обусловлены недостаточно высокой точностью приборов. Он дает максимальную (предельную) погрешность конечного результата измерений. Если основными являются не приборные, а случайные погрешности, расчет погрешности косвенных измерений следует проводить по соответствующим формулам, даваемым теорией ошибок.

### Контрольные вопросы

1. Что называется ценой деления шкалы? Укажите цену деления шкалы используемых измерительных средств.
2. Что называется пределом измерения? Укажите диапазон измерения применяемых измерительных средств.
3. Что называют нониусом? Как им пользоваться?
3. Что называют инструментальными (приборными) погрешностями? Укажите погрешности применяемых измерительных средств.
4. Как следует обрабатывать результаты измерений, если погрешность измерения определяется инструментальной погрешностью?
5. Каким способом обрабатывают результаты прямых измерений?
6. Объясните устройство каждого измерительного средства, используемого в работе.
7. Объясните правила пользования измерительными средствами во время работы.



4. Рассчитайте среднее значение массы  $m_{cp}$  по формуле

$$m_{cp} = \frac{\sum m_i}{n} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5}{n}. \quad (2)$$

5. Заполните оставшиеся столбцы таблицы, используя формулы:

$$\Delta m_i = |m_i - m_{cp}|; \quad S_n = \sqrt{\frac{\sum (\Delta m_i)^2}{n(n-1)}}; \quad \Delta m = t_{p,n} S_n,$$

где  $t_{p,n} = 2,8$  – коэффициент Стьюдента для  $n = 5$  при  $P = 0,95$ .

6. Аналогично рассчитайте среднее значение объема  $V_{cp}$ .

7. Рассчитайте среднее значение плотности  $\bar{\rho}$ , подставляя в неё измеренные и рассчитанные средние значения. В частности для цилиндра:

$$\bar{\rho} = \frac{m}{V} = \frac{m \cdot 4}{\pi D^2 h}. \quad (3)$$

8. Затем правилом получения предельной относительной погрешности рассчитать  $\delta$  по формуле

$$\delta = \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{2\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}. \quad (4)$$

**Замечание.** При проведении расчетов часто используют величины, взятые из таблиц. Предельная погрешность измерения этих величин равна половине единицы наименьшего разряда. Если, например, в таблице указано, что плотность воды при  $20^\circ$  равна  $\rho = 0,998$  г/см<sup>3</sup>, следовательно, предельная погрешность измерения  $\Delta \rho = 0,0005$  г/см<sup>3</sup>. Если же  $\rho = 0,99823$  г/см<sup>3</sup>, то  $\Delta \rho = 0,000005$  г/см<sup>3</sup>.

После вычисления предельной относительной погрешности измерения  $\delta$ , следует найти предельную абсолютную погрешность, как

$$\Delta \rho = \delta \cdot \bar{\rho}. \quad (5)$$

### Контрольные вопросы

1. Назовите дополнительные методы определения плотности тела.
2. Какие размеры следует измерять для определения плотности тел простейших правильных форм (пластина, шар, цилиндр, труба, тор)?
3. Что называют косвенными измерениями?
4. Как определить погрешности прямых измерений?
5. Как находят предельные погрешности при косвенных измерениях?
6. Запишите формулу для вычисления объема цилиндра и получите выражение для нахождения относительной и абсолютной погрешностей измерений объема.
7. Провести измерения с помощью штангенциркуля и весов.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА МЕТОДОМ КОЛЕБАНИЙ. ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ ШТЕЙНЕРА

*Цель работы:* определение момента инерции симметричного тела в виде стержня из экспериментальных данных о периоде  $T$  колебаний этого тела. Проверка теоремы Штейнера.

*Приборы и принадлежности:* весы, секундомер, линейка, цилиндрический тонкий стержень (или деревянный брусок длиной около метра).

### Общие сведения и методические указания

Движение, при котором тело, выйдя из некоторого начального состояния, многократно возвращается к нему, называют *колебательным*. Промежуток времени, через который колебания повторяются, называется, *периодом колебаний*  $T$ . В зависимости от физической природы повторяющегося процесса различают колебания механические, электромагнитные и др. В зависимости от характера воздействия, оказываемого на колебательную систему, различают свободные (собственные), вынужденные, автоколебания и др.

Простейшими являются свободные (собственные) колебания, т.е. такие, при которых смещение колеблющейся величины  $x$  от положения равновесия описываются уравнением вида, являющимся преобразованным основным законом динамики вращательного движения:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0, \quad (1)$$

где  $x$  – смещение колеблющейся величины от положения равновесия,  $\frac{d^2 x}{dt^2}$  – вторая производная по времени величины  $x$ ,  $\omega_0$  – собственная циклическая частота колебаний величины  $x$ .

Решение этого уравнения представляет собой уравнение гармонических колебаний и имеет вид:

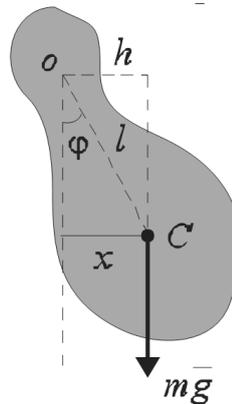
$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2)$$

где  $x$  – смещение в любой момент времени  $T$ ,  $A$  – максимальное смещение, называемое амплитудой колебаний,  $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$  – фаза колебаний, ( $\varphi_0$  – начальная фаза,  $\omega_0$  – круговая (циклическая) собственная частота колебаний, равная

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mga}{J}}. \quad (3)$$

Физическим маятником называется твердое тело (рис. 1), которое совершает колебания в вертикальной плоскости под действием силы тяжести

$F = mg$  около неподвижной горизонтальной оси  $O$  (рис. 1), не проходящая через ее центр масс.  $O$  – точка подвеса маятника. Точка  $C$  является центром масс тела.



**Рис. 1. Физический маятник**

Из отношения  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$  получим:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}, \quad (4)$$

где  $l$  – расстояние между осью колебаний  $O$  и центром масс  $C$  маятника,  $J$  – момент инерции стержня относительно оси, проходящей через точку подвеса  $O$ ,  $m$  – масса маятника,  $g=9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

### Порядок выполнения работы

1. Вбить гвоздь в стержень на расстоянии 3-5 см от одного конца и подвесить стержень на гвозде так, чтобы стержень мог колебаться.

2. Измерить длину стержня  $l$ , массу стержня  $m$  (взвешивая на весах).

3. Отклонить стержень от положения равновесия на небольшой ( $3-5^\circ$ ) угол и отпускают. Стержень начинает колебаться. Далее, измерить время  $t$ , за которое совершено  $N$  полных колебаний. Найти период колебаний  $T = \frac{t}{N}$

для различных значений  $N$ .

4. Опыт выполнить один раз для данного количества полных колебаний  $N$ . По периоду  $T$  рассчитать значение  $J$  по формуле (5).

5. Определить погрешность измерения момента инерции  $\Delta J$ .

Рекомендуемая форма протокола выполнения лабораторной работы приведена ниже.

## Протокол выполнения лабораторной работы.

№ опыта	$N$	$t$	$T$	$T^2$	$J$	$\bar{J}$	$\Delta J$

### Задание 1

#### Экспериментальное определение момента инерции

Из формулы (4) получаем следующее выражение для расчета момента инерции  $J$ :

$$J = \frac{T^2 mgl}{8\pi^2}, \quad (5)$$

и погрешности расчета момента инерции

$$\Delta J = J \cdot \left( \frac{2 \cdot \Delta T}{T} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta l}{l} + 2 \cdot \frac{\Delta \pi}{\pi} \right). \quad (6)$$

### Задание 2

#### Расчет момента инерции по теореме Штейнера

Теорема Штейнера утверждает, что момент инерции тела  $J$  относительно произвольной оси равен моменту инерции  $J_0$  относительно оси, параллельной данной и проходящей через центр масс тела, сложенному с произведением массы тела на квадрат расстояния  $a$  между осями:

$$J = J_0 + ma^2, \quad (7)$$

Если  $J_0 = \frac{1}{12} ml^2$  (момент инерции относительно оси, проходящей через центр масс), тогда для нашего случая

$$J = \frac{1}{12} ml^2 + m \left( \frac{l}{2} \right)^2 = \frac{1}{3} ml^2. \quad (8)$$

Окончательно, зная  $m$  и  $l$ , рассчитываем значение  $J$  по формуле (8) и сравниваем с экспериментальным результатом, вычисляя по формуле (5). Сделайте вывод.

### Контрольные вопросы

1. Какое движение называется колебательным?
2. Назовите основные характеристики колебательного движения.
3. Что такое математический и физический маятник.

4. Напишите формулы для определения периодов колебаний математического и физического маятника.
5. Физический смысл момента инерции и принцип его расчета.
6. Самостоятельно получите уравнение (1).
7. Сформулируйте закон динамики вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси.
8. Приведите примеры полезного использования момента инерции.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

*Цель работы:* изучить методику определения коэффициента вязкости жидкости методом падающего шарика – метод Стокса.

*Приборы и принадлежности:* сосуд с жидкостью, секундомер, масштабная линейка, микрометр и шарики.

### Краткая теория и методические указания

Рассмотрим свободное падение тела внутри покоящейся жидкости. При соприкосновении твёрдого тела с жидкостью к поверхности тела тотчас же прилипают молекулы жидкости, образуя молекулярный слой жидкости, обволакивающей тело. Прилегающий к телу мономолекулярный слой жидкости движется вместе с телом со скоростью движения тела. Он увлекает соседние частицы жидкости. Эти частицы, приходя в вязкостное движение, увлекают более удалённые частицы жидкости. Удалённые от тела частицы жидкости движутся медленнее, более близкие к телу – быстрее. В этих условиях между частицами, движущимися с различными скоростями, действуют силы внутреннего трения. Силы внутреннего трения, действующие со стороны удалённых частиц на прилегающие к телу частицы, тормозят движение тела, являясь силами сопротивления. Они направлены в сторону, противоположную перемещению тела.

Опыты показывают, что сила сопротивления зависит от скорости движения тела, от геометрической формы тела, его линейных размеров, состояния поверхности тела и вязкости среды.

Силу сопротивления среды  $f$  наиболее просто определить для тела сферической формы (шарика), движущегося под действием силы тяжести в покоящейся жидкости. Теоретические расчёты, выполненные Дж. Стоксом, приводят к выражению

$$f = 3\pi d\upsilon\eta, \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости;  $d$  – диаметр шарика;  $\upsilon$  – скорость движения шарика.

На шарик, находящийся в жидкости, действует сила тяжести  $P$  и выталкивающая сила (Архимеда). Их результирующая сила  $F$  равна

$$F = gV(\rho - \rho'), \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести;  $V$  – объём шарика;  $\rho$  – плотность вещества шарика;  $\rho'$  – плотность жидкости.

Под действием сил  $f$  и  $F$  шарик движется с ускорением. Основной закон динамики рассматриваемого случая запишется так:

$$F - f = ma, \quad (3)$$

где  $m$  – масса шарика.

Сила  $F$  увеличивает скорость шарик. Наряду с возрастанием скорости шарика увеличивается и сила сопротивления  $f$  среды, в которой перемещается шарик. По мере падения шарика наступит момент, когда абсолютные значения сил  $F$  и  $f$  будут одинаковы, а ускорение равно нулю. Дальнейшее движение шарика происходит равномерно со скоростью  $v_0$ , тогда

$$gV(\rho - \rho') = 3\pi d\eta v_0. \quad (4)$$

Подставляя значение объёма шарика, и решая (4) относительно  $\eta$ , получим

$$\eta = \frac{g}{18} d^2 \frac{\rho - \rho'}{v_0}. \quad (5)$$

Скорость равномерного движения  $v_0$  можно определить по наблюдению времени  $\tau$  прохождения шариком определённого пути  $l$ . Тогда (5) принимает вид

$$\eta = \frac{g}{18} \frac{\rho - \rho'}{l} d^2 \tau. \quad (6)$$

Таким образом, наблюдая за равномерным движением шарика в жидкости, можно определить коэффициент вязкости.

Следует иметь в виду, что коэффициент вязкости сильно зависит от температуры и с её ростом уменьшается.

### Описание аппаратуры и метода измерений

На рисунке 1 представлен прибор, применяемый для определения коэффициента вязкости методом шарика, падающего в испытуемой жидкости. Прибор представляет собой стеклянный цилиндр  $A$ , укрепленный на деревянной пяте  $B$ . Цилиндр заполнен испытуемой жидкостью (например, трансформаторным маслом, глицерином).

На внешней поверхности цилиндра имеются две метки  $m$  и  $n$ , расположенные на расстоянии  $l$  друг от друга. Метки представляют собой проволочные кольца. Верхнее кольцо находится ниже уровня жидкости.

Диаметры шариков измеряются на микроскопе, снабженном окулярным микрометром или микрометром.

Окулярный микрометр представляет собой тонкую стеклянную пластинку с нанесённой на ней шкалой. Эта пластинка установлена в фокальной плоскости окуляра микроскопа. При рассмотрении шарика в микроскоп в поле зрения окуляра одновременно видны изображение шарика и шкала окулярного микрометра. Цена деления окулярного микрометра указана на микроскопе. Время падения шарика измеряют секундомером.

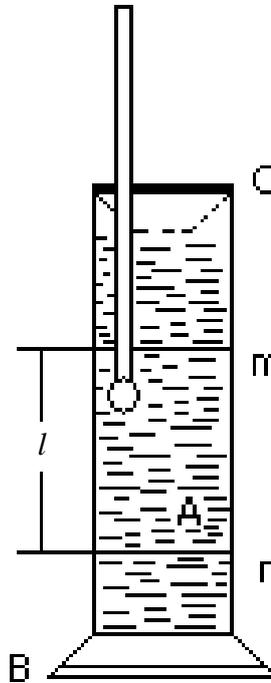


Рис. 1

### Порядок выполнения работы

*Работа может быть выполнена в двух вариантах, виртуальном и реальном. Виртуальный выполняется в случае невозможного выполнения реального варианта.*

#### 1. Вариант – виртуальный.

Загрузить из яндекс-диска файл, ссылка <https://yadi.sk/d/dzs5qMxjyeaSrW>

Если система защиты не позволяет запуск, нажать *Подробнее* и выполнить. Можно также открыть книгу, находящуюся в электронной библиотеке ТГТУ по ссылке <https://www.tstu.ru/book/elib3/mm/2017/golovin/> на стр. 106.

Просмотреть выполнение лабораторной работы, записать полученные в эксперименте данные и далее выполнять задания как в реальном варианте.

#### 2. Вариант – реальный.

С помощью микроскопа или микрометра измеряют диаметр пяти шариков. Диаметр каждого шарика измеряют три раза по окулярному микрометру. Измерения соответствуют противоположным концам ( $a$  и  $b$ ) диаметра каждого шарика или по микрометру.

Измеряют время падения каждого шарика между двумя метками  $m$  и  $n$ . Для этого фиксируют глазом каждую метку. Проволочное кольцо должно сливаться в прямую линию.

Шарик бросают в отверстие воронки. В момент его прохождения через верхнюю метку включают секундомер, а в момент прохождения шарика через нижнюю метку его выключают. Время падения шарика записывают в табл. 2.

Масштабной линейкой с точностью до 1 мм измеряют расстояние между метками  $m$  и  $n$ . Производят пять таких измерений по различным образующим цилиндра.

Таблица 1

Шарик	Числовые отметки по окулярному микрометру микроскопа						Диаметр шарика $d$ , мм			Средний диаметр шарика $d_{\text{ср}}$ , мм
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	
1										
2										
3										
4										
5										

### Обработка результатов измерения

По числовым отметкам окулярного микрометра микроскопа или с помощью обычного микрометра определяют диаметры шариков. Результаты отчётов заносят в таблицу 1, затем переносят в таблицу 2.

Находят среднее значение  $l$ . Также в таблицу 2 записывают плотности шариков и жидкости, считая её температуру равной комнатной температуре воздуха.

3. По формуле (6) рассчитывают значение коэффициента внутреннего трения жидкости (с точностью до тысячных долей), заносят в табл. 2.

Таблица 2

	$d_{\text{ср}}, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$l, \text{ м}$	$\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$
1				
2				
3				
4				
5				
				$\eta_{\text{ср}}$

$\rho = (\dots \pm \dots) \text{ кг/м}^3$
$\rho' = (\dots \pm \dots) \text{ кг/м}^3$
$g = (\dots \pm \dots) \text{ м/с}^2$
$t = (\dots \pm \dots) \text{ }^\circ\text{C}$

Для одного из опытов (например, относящегося к пятому шарик) определяют относительную и абсолютную погрешности измерения  $\eta$ . Относительную погрешность находят по формуле

$$E = \frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta\rho + \Delta\rho'}{\rho - \rho'} + \frac{\Delta l}{l} + 2\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta\tau}{\tau};$$

абсолютную по формуле

$$\Delta\eta = E\eta.$$

Результат измерения представляют в виде:

$$\eta = \left( \eta_{\text{ср}} \pm \Delta\eta \right), \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

### Контрольные вопросы

1. Почему формула Стокса справедлива при медленном равномерном движении шарика малого диаметра в безграничной среде?
2. Что означает понятие «безграничная среда»?
3. Какие течения называются ламинарными и турбулентными?
4. Для какого движения справедлива формула для определения силы сопротивления (по Ньютону)?
5. Что называется коэффициентом вязкости? Поясните физический смысл.
6. Поясните физический смысл единицы измерения коэффициента вязкости в системе СИ.
7. Поясните причины погрешности измеряемых величин.
8. Зачем нужно знать величину вязкости жидкостей и газов?