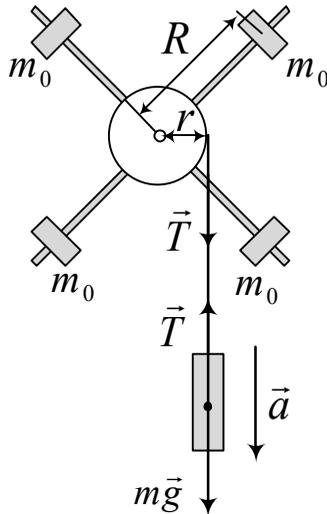


ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра физики

## РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

для лабораторных работ  
по механике, молекулярной физике и термодинамике  
для студентов всех направлений очной формы обучения



Воронеж 2018

УДК 53(075)  
ББК 22.3я7

Составители: канд. физ.-мат. наук А.Г. Москаленко,  
канд. физ.-мат. наук Н.В. Матовых,  
канд. физ.-мат. наук Е.П. Татьянанина

Рабочая тетрадь для лабораторных работ по механике, молекулярной физике и термодинамике для студентов всех направлений очной формы обучения / ФГБОУ ВО “Воронежский государственный технический университет”; сост. А.Г. Москаленко, Н.В. Матовых, Е.П. Татьянанина. Воронеж, 2018. 52 с.

Рабочая тетрадь является приложением к лабораторному практикуму по механике, молекулярной физике и термодинамике. Предназначена для организации самостоятельной работы студентов. Содержит теоретические вопросы для допуска к лабораторным работам, описание установок, таблицы для записи результатов измерений и вычислений, алгоритмы расчета погрешностей.

Рабочая тетрадь подготовлена в электронном виде и содержится в файле Рабочая тетрадь для л\_р по физике\_1.pdf.

Табл. 23. Ил.14. Библиогр.: 5 назв.

УДК 53(075)  
ББК 22.3я7

**Рецензент** канд. техн. наук, доц. М.Н. Гаршина

*Издается по решению учебно-методического совета  
Воронежского государственного технического университета*

© ФГБОУ ВО “Воронежский  
государственный технический  
университет”, 2018

## **Лабораторная работа № 1.0**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ЦИЛИНДРА**

**Цель работы:** определение объема цилиндра, расчет погрешностей прямых и косвенных измерений.

**Принадлежности:** цилиндрическое тело, штангенциркуль, микрометр.

#### **Теоретическое введение**

1. Абсолютная и относительная погрешность.
  
2. Систематическая (приборная) погрешность прямых измерений.
  
3. Формула для расчета систематической погрешности косвенных измерений.
  
4. Формула расчета средней квадратичной ошибки среднего арифметического прямого измерения.
  
5. Доверительный интервал и доверительная вероятность.

### Порядок выполнения работы

Провести не менее 5 раз измерения штангенциркулем диаметра цилиндра, а микрометром его высоту. Результаты измерений занести в таблицу.

### Результаты измерений

№ п/п	$d$ , мм	$ \bar{d} - d_i $ $10^{-3}$ , мм	$ \bar{d} - d_i ^2$ $10^{-6}$ , мм	$h$ , мм	$ \bar{h} - h_i $ $10^{-3}$ , мм	$ \bar{h} - h_i ^2$ $10^{-6}$ , мм
1						
2						
3						
4						
5						
	$\bar{d} =$		$\Sigma =$	$\bar{h} =$		$\Sigma =$

### Вычисление объема цилиндра

Расчетная формула

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4}, \quad V = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мм}^3.$$

### Расчет систематической погрешности

Приборные погрешности прямых измерений

$$\delta d = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мм}, \quad \delta h = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мм}.$$

Систематическая погрешность при измерении объема

$$\delta V = \bar{V} \sqrt{\frac{4\delta d^2}{d^2} + \frac{\delta h^2}{h^2}}, \quad \delta V = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мм}^3.$$

## Расчет случайной погрешности

Среднеквадратичные погрешности среднего арифметического:

$$S_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{d} - d_i)^2}{n(n-1)}}, \quad S_{\bar{d}} = \text{_____мм};$$

$$S_{\bar{h}} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{h} - h_i)^2}{n(n-1)}}, \quad S_{\bar{h}} = \text{_____мм}.$$

Доверительная вероятность  $\alpha = \text{_____}$ , коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha,n} = \text{_____}$ .

Случайные погрешности прямых измерений:

$$\Delta d = t_{\alpha,n} \cdot S_d, \quad \Delta d = \text{_____мм};$$

$$\Delta h = t_{\alpha,n} \cdot S_h, \quad \Delta h = \text{_____мм}.$$

Случайная погрешность объема цилиндра

$$\Delta V = \bar{V} \sqrt{\frac{4\Delta d^2}{d^2} + \frac{\Delta h^2}{h^2}}, \quad \Delta V = \text{_____мм}^3.$$

### Суммарная погрешность измерений

Абсолютная погрешность

$$\Delta_{\Sigma} V = \sqrt{\Delta^2 V + \delta V^2}, \quad \Delta_{\Sigma} V = \text{_____мм}^3.$$

Относительная погрешность

$$E = \frac{\Delta V}{V} \cdot 100\%, \quad E = \text{_____}\%.$$

Окончательный результат

$$V = (\text{_____} \pm \text{_____}), \text{мм}^3. \quad \alpha = \text{_____}, \quad E = \text{_____}\%.$$

# Лабораторная работа № 1.1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА

**Цель работы:** ознакомление с методикой измерения ускорения свободного падения и проверка законов динамики.

**Принадлежности:** машина Атвуда, фотоэлектрический датчик, электронный секундомер, набор грузов и перегрузков.

### Теоретическое введение

1. Кинематические характеристики движущейся точки и твердого тела.

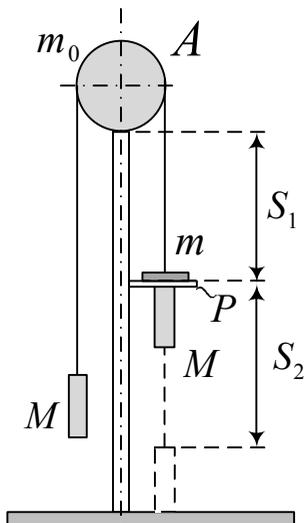
2. Кинематические уравнения равноускоренного движения материальной точки.

3. Уравнения пути и скорости равноускоренного вращательного движения твердого тела.

4. Основное уравнение динамики поступательного движения твердого тела.

5. Основное уравнение динамики вращательного движения тела.

## Установка и методика измерений



Законы динамики поступательного движения грузов и вращательного движения блока:

$$(M+m)g - T_1 = (M+m)a; \quad (1)$$

$$T_2 - Mg = Ma; \quad (2)$$

$$(T_1 - T_2)r = I\varepsilon, \quad (3)$$

где  $I = \frac{1}{2}m_0r^2$  – момент инерции блока  $A$ ;  $\varepsilon = \frac{a}{r}$  – угловое ускорение блока;  $T_1$  и  $T_2$  – силы натяжения правой и левой частей нити;  $m$  – масса перегрузка.

Решение данной системы уравнений даёт следующее выражение для  $g$ :

$$g = \left( \frac{4M + 2m + m_0}{2m} \right) \cdot a. \quad (4)$$

Уравнение равноускоренного движения правого груза с перегрузком на участке пути  $S_1$ :

$$S_1 = \frac{v^2}{2a}, \quad (5)$$

где  $v$  – конечная скорость на участке  $S_1$ .

Измеряя путь  $S_2$  и время  $t$  равномерного движения правого груза без перегрузки, можно определить скорость  $v = \frac{S_2}{t}$ . Тогда ускорение на первом участке

$$a = \frac{v^2}{2S_1} = \frac{S_2^2}{2S_1 t^2}. \quad (6)$$

Окончательно получим:

$$g = \frac{(4M + 2m + m_0)S_2^2}{4mS_1 t^2}. \quad (7)$$

Пути  $S_1$  и  $S_2$  определяются по шкале прибора.

### Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что прибор установлен строго по вертикали и правый груз  $M$  свободно проходит сквозь съемное кольцо  $P$ .

2. Включить прибор клавишей **СЕТЬ**, при этом клавиша **СБРОС** должна быть отжата, а клавиша **ПУСК** нажата.

3. Положить на правый груз перегрузок и поднять груз вверх, совместив нижнюю грань груза с чертой, нанесенной на верхнем кронштейне.

4. Отжать клавишу **ПУСК**, зафиксировав тем самым груз в верхнем положении. Нажать на сброс.

5. Измерить по шкале на стойке прибора пути равноускоренного  $S_1$  и равномерного  $S_2$  движений груза.

6. Нажать клавишу **ПУСК**.

7. Записать измеренное секундомером время движения груза на пути  $S_2$ .

8. Нажать клавишу **СБРОС** и проверить обнуление показаний прибора и выключение электромагнита.

9. Повторить опыт три раза. Определить среднее время движения груза на участке  $S_2$  при заданном перегрузке.

10. Повторить опыт, взяв второй перегрузок, а затем два перегрузка вместе. Результаты записать в табл. 2.

11. Рассчитать значение  $g$  и погрешность измерений.

## Результаты измерений и вычислений

Таблица 1

$m_0$ , кг	$M$ , кг	$m$ , кг			$S_1$ , м	$S_2$ , м
		$m_1$	$m_2$	$m_3$		

Таблица 2

№	Первый перегрузок ( $m_1$ )			Второй перегрузок ( $m_2$ )			Два перегрузка ( $m_3=m_1+m_2$ )		
	$t_1$ , с	$ \bar{t}-t_i $ , с	$ \bar{t}-t_i ^2$ , с <sup>2</sup>	$t_2$ , с	$ \bar{t}-t_i $ , с	$ \bar{t}-t_i ^2$ , с <sup>2</sup>	$t_3$ , с	$ \bar{t}-t_i $ , с	$ \bar{t}-t_i ^2$ , с <sup>2</sup>
1									
2									
3									
	$\bar{t}_1 =$		$\Sigma =$	$\bar{t}_2 =$		$\Sigma =$	$\bar{t}_3 =$		$\Sigma =$

### Вычисление искомой величины

$$g = \frac{(4M + 2m + m_0)S_2^2}{4mS_1t^2}, \quad g_1 = \underline{\quad}, \quad g_2 = \underline{\quad}, \quad g_3 = \underline{\quad}.$$

$$\bar{g} = \frac{g_1 + g_2 + g_3}{3} =$$

### Расчет систематической погрешности

Таблица 3

$\delta m$ , кг	$\delta S$ , м	$\delta t$ , с

Систематическая погрешность ускорения свободного падения

$$\delta g = \bar{g} \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta S}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{2\delta S}{S_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{3\delta m}{4M + 2M + m_0}\right)^2 + \left(\frac{2\delta t}{t}\right)^2}.$$

$$\delta g =$$

## Расчет случайной погрешности

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для  $t$  (первый перегрузок):

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum(\bar{t} - t_i)^2}{n(n-1)}}, \quad S_t =$$

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для  $g$ :

$$S_g = \bar{g} \cdot \frac{2S_t}{t}, \quad S_g =$$

Доверительная вероятность  $\alpha =$  , коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha,n} =$

Случайная погрешность:  $\Delta g = t_{\alpha,n} \cdot S_g$ ;  $\Delta g =$

## Суммарная погрешность

Абсолютная погрешность

$$\Delta_{\Sigma} g = \sqrt{(\Delta g)^2 + (\delta g)^2}; \quad \Delta_{\Sigma} g =$$

Относительная погрешность

$$E = \frac{\Delta_{\Sigma} g}{\bar{g}} \cdot 100\%; \quad E =$$

## Окончательный результат

$$g = \quad \alpha = \quad E =$$

**Лабораторная работа № 1.2**  
**ИЗМЕРЕНИЕ УПРУГОГО МОДУЛЯ СДВИГА**  
**СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ МЕТОДОМ КРУТИЛЬНЫХ**  
**КОЛЕБАНИЙ**

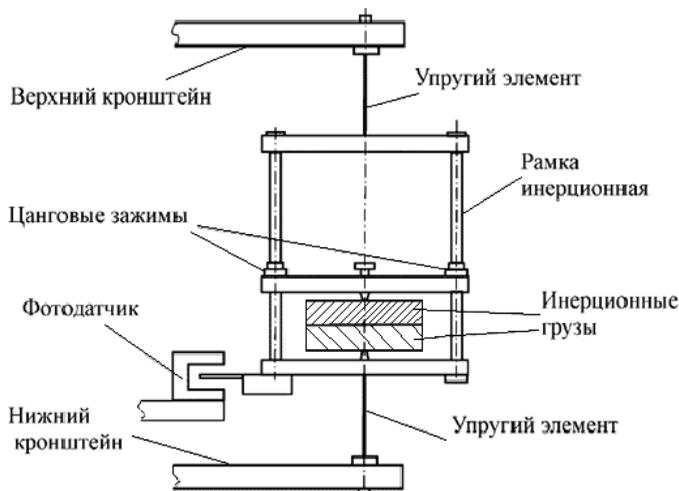
**Цель работы:** исследовать деформацию кручения цилиндрического тела и определить модуль сдвига образца.

**Принадлежности:** крутильный маятник, измеритель периода крутильных колебаний системы, набор металлических дисков с известными моментами инерции, стальная проволока, электромагнит.

**Теоретическое введение**

1. Нормальное и касательное напряжения. Единицы измерения напряжения.
  
2. Закон Гука для деформации растяжения, сдвига и кручения.
  
3. Физический смысл модулей упругости.
  
4. Коэффициент Пуассона.

## Установка и методика измерений



Динамическое уравнение свободных колебаний крутильного маятника:

$$I \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -M, \quad (1)$$

где  $I$  – момент инерции колеблющейся системы,  $\frac{d^2\varphi}{dt^2}$  – угловое ускорение,  $M$  – момент упругих касательных сил.

Момент упругих сил определяется через модуль упругости, параметры упругого элемента и угол закручивания:

$$M = \frac{\pi \cdot G \cdot R^4}{2L} \varphi. \quad (2)$$

С учетом (2) уравнение (1) запишется в виде:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{\pi \cdot G \cdot R^4}{2LI} \varphi = 0.$$

Из сопоставления полученного уравнения со стандартным уравнением гармонических колебаний следует

$$\omega^2 = \frac{\pi GR^4}{2IL} \text{ и } T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{2IL}{\pi GR^4}},$$

отсюда

$$G = \frac{8\pi \cdot I \cdot L}{T^2 R^4} = \frac{128\pi \cdot I \cdot L}{T^2 d^4}.$$

Чтобы исключить неизвестный собственный момент инерции маятника используются два дополнительных тела с известными моментами инерции. В этом случае имеем систему двух уравнений:

$$\begin{cases} GT_1^2 d^4 = 128\pi(I_0 + I_1) \cdot L; \\ GT_2^2 d^4 = 128\pi(I_0 + I_2) \cdot L. \end{cases}$$

Решая систему, получим:

$$G = \frac{128\pi L(I_1 - I_2)}{d^4(T_1^2 - T_2^2)}. \quad (3)$$

Здесь  $L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$ , где  $L_1$  и  $L_2$  – длины верхней и нижней

проволочных подвесок маятника,  $I_1$  – момент инерции одного из инерционных дисков,  $I_2$  – суммарный момент инерции двух дисков,  $d$  – диаметр проволоки.

### Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что крутильный маятник в исходном состоянии имеет вертикальное положение.

2. Установить один из инерционных дисков в рамку маятника. Измерить время  $N=10$  колебаний. Результаты измерений занести в табл. 2. По данным этих измерений найти среднее значение периода колебаний  $\bar{T}_1$ .

3. Установить второй инерционный диск в рамку маятника, не снимая первый. Измерить время  $N=10$  колебаний. Результаты измерений занести в табл. 3. По данным этих измерений найти среднее значение периода колебаний  $\bar{T}_2$ .

4. По формуле (3) найти модуль сдвига стальной проволоки.

## Результаты измерений и вычислений

Таблица 1

$d, м$	$I_{д1}, кг.м^2$	$I_{д2}, кг.м^2$	$L_1, м$	$L_2, м$	$L, м$

Таблица 2

№	N	t, с	$\bar{t} - t_i$  , с	$\bar{t} - t_i$   <sup>2</sup> , с <sup>2</sup>	T <sub>1</sub> , с
1					
2					
3					
		$\bar{t} =$		$\Sigma =$	$\bar{T}_1 =$

Таблица 3

№	N	t, с	$\bar{t} - t_i$  , с	$\bar{t} - t_i$   <sup>2</sup> , с <sup>2</sup>	T <sub>2</sub> , с
1					
2					
3					
		$\bar{t} =$		$\Sigma =$	$\bar{T}_2 =$

Вычисление модуля сдвига

$$G = \frac{128\pi L(I_1 - I_2)}{d^4(\bar{T}_1^2 - \bar{T}_2^2)}; \quad \bar{G} =$$

**Расчет систематической погрешности**

Таблица 4

$\delta L, м$	$\Delta d, м$	$\delta I, кг.м^2$	$\delta T, с$

Систематическая погрешность модуля сдвига

$$\delta G = \bar{G} \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{4\delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{2\delta I}{I_2 - I_1}\right)^2 + \left(\frac{4\delta T}{T_2 - T_1}\right)^2};$$

$$\delta G =$$

## Расчет случайной погрешности

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для  $t$ :

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum(\bar{t} - t_i)^2}{n(n-1)}}; \quad S_{t_1} = \quad S_{t_2} =$$

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для  $T$ :

$$S_T = \frac{S_t}{N}; \quad S_{T_1} = \quad S_{T_2} =$$

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для  $G$ :

$$S_G = \bar{G} \cdot \sqrt{\left(\frac{2S_{T_1}}{T_1}\right)^2 + \left(\frac{2S_{T_2}}{T_2}\right)^2}; \quad S_G =$$

Доверительная вероятность:  $\alpha =$

Коэффициент Стьюдента:  $t_{\alpha, n} =$

Случайная погрешность:  $\Delta G = t_{\alpha, n} \cdot S_G; \quad \Delta G =$

## Суммарная погрешность

Абсолютная погрешность

$$\Delta_{\Sigma} G = \sqrt{(\Delta G)^2 + (\delta G)^2}; \quad \Delta_{\Sigma} G =$$

Относительная погрешность

$$E = \frac{\Delta_{\Sigma} G}{G} \cdot 100\%; \quad E =$$

## Окончательный результат

$G =$

$\alpha =$

$E =$

## Лабораторная работа № 1.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МЕТОДОМ ТРИФИЛЯРНОГО ПОДВЕСА

**Цель работы:** изучение законов динамики вращательного движения и экспериментальное определение момента инерции тел вращения с помощью трифилярного подвеса.

**Принадлежности:** трифилярный подвес, секундомер, штангенциркуль, образцы для измерений, линейка.

### Теоретическое введение

1. Момент инерции материальной точки и твердого тела.

2. Физический смысл момента инерции.

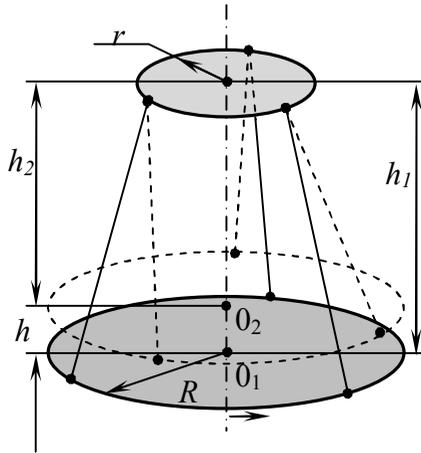
3. Моменты инерции простейших тел относительно оси, проходящей через центр масс.

Обруч	Диск	Шар	Стержень

4. Теорема Штейнера.

5. Кинетическая энергия при вращательном движении тела относительно неподвижной оси.

## Установка и методика измерений



Закон сохранения энергии для трифилярного подвеса

$$\frac{I\omega^2}{2} = m_0gh,$$

где  $I$  – момент инерции платформы,  $m_0$  – масса платформы.

Уравнение гармонических колебаний подвеса

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right).$$

Угловая скорость вращения платформы

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi\varphi_0}{T} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right).$$

Максимальная угловая скорость

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi\varphi_0}{T},$$

где  $\varphi_0$  – максимальный угол кручения платформы.

Связь между высотой подъема платформы и углом закручивания

$$h = \frac{Rr\varphi_0}{2\ell},$$

где  $R$  – радиус платформы,  $r$  – радиус верхнего диска,  $\ell$  – длина нитей подвеса.

Расчетная формула для момента инерции подвеса

$$I = \frac{mgRr}{4\pi^2\ell} T^2.$$

### Порядок выполнения работы

1. Измерить внешний и внутренний диаметры диска. Значения массы диска  $m$ , его внешний и внутренний радиусы, а также параметры трифилярного подвеса занести в табл. 1.

2. Привести пустую платформу в состояние крутильных колебаний, измерить время 10 полных колебаний, рассчитать период колебаний. Опыт проделать 3 раза и полученные результаты занести в табл. 2.

3. Аналогичные измерения и расчёты сделать для нагруженной платформы. Результаты занести в табл. 2.

4. Вычислить моменты инерции  $I_0$  и  $I_1$  ненагруженной и нагруженной платформы. Определить момент инерции измеряемого диска по формуле  $I = I_1 - I_0$ . Рассчитать погрешности эксперимента и записать окончательный результат.

### Таблицы результатов измерений и вычислений

Таблица 1

$g, \text{ м/с}^2$	$m_0, \text{ кг}$	$m, \text{ кг}$	$\ell, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$

Таблица 2

Номер опыта	Ненагруженная платформа				Нагруженная платформа					
	$t_0,$ с	$n_0$	$T_0,$ с	$ T_i - \bar{T}_0 ,$ с	$ T_i - \bar{T} ^2,$ с <sup>2</sup>	$t_1,$ с	$n_1$	$T_1,$ с	$ T_i - \bar{T}_1 ,$ с	$ T_i - \bar{T}_1 ^2,$ с <sup>2</sup>
1		10				10				
2		10				10				
3		10				10				
			$\bar{T}_0 =$		$\Sigma =$			$\bar{T}_1 =$		$\Sigma =$

### Расчет моментов инерции платформы и диска

Ненагруженная платформа

$$I_0 = \frac{m_0 g R r}{4\pi^2 l} \bar{T}_0^2, \quad I_0 =$$

Нагруженная платформа

$$I_1 = \frac{(m_0 + m) g R r}{4\pi^2 l} \bar{T}_1^2, \quad I_1 =$$

Момент инерции диска

$$I = I_1 - I_0, \quad I =$$

### Расчет теоретического значения момента инерции диска

$$I_T = \frac{1}{2} m (R_1^2 + R_2^2), \quad I_T =$$

## Расчет систематической погрешности

Таблица 3

$\delta m_0, \text{кг}$	$\delta R, \text{м}$	$\delta r, \text{м}$	$\delta l, \text{м}$	$\delta g, \text{м/с}^2$	$\delta t, \text{с}$	$\delta m, \text{кг}$

Систематическая погрешность измерения момента инерции

$$\delta I_1 = I_1 \sqrt{\frac{\delta m^2}{m^2} + \frac{\delta R^2}{R^2} + \frac{4\delta t^2}{T^2} + \frac{\delta \ell^2}{\ell^2} + \frac{\delta g^2}{g^2} + \frac{\delta r^2}{r^2}};$$

$$\delta I_1 =$$

## Расчет случайной погрешности

Среднеквадратичная погрешность среднего арифметического значения  $T$ :

$$S_T = \sqrt{\frac{\sum(\bar{T} - T_i)^2}{n(n-1)}}. \quad S_T =$$

Доверительная вероятность  $\alpha =$

Коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n} =$

Случайная погрешность при измерении  $T$ :

$$\Delta T = t_{\alpha, n} \cdot S_T. \quad \Delta T =$$

Случайная погрешность при измерении  $I$ :

$$\Delta I = \bar{I}(2\Delta T / \bar{T}). \quad \Delta I =$$

## Суммарная погрешность измерений

Абсолютная погрешность

$$\Delta I_{\Sigma} = \sqrt{\delta I^2 + \Delta I^2}. \quad \Delta I_{\Sigma} =$$

Относительная погрешность

$$E = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\% \quad E =$$

## Окончательный результат

$$I = \quad \alpha = \quad E =$$

**Лабораторная работа № 1.5**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ**  
**ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**  
**И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ**  
**КРЕСТООБРАЗНОГО МАЯТНИКА**

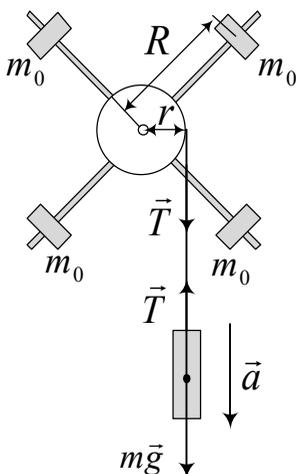
**Цель работы:** экспериментальная проверка основного закона динамики вращательного движения.

**Принадлежности:** крестообразный маятник, секундомер, набор грузов, штангенциркуль.

**Теоретическое введение**

1. Момент инерции тела и его физический смысл.
  
2. Момент силы относительно точки и оси вращения.
  
3. Момент импульса материальной точки и тела относительно оси вращения.
  
4. Закон сохранения момента импульса.
  
5. Основное уравнение динамики вращательного движения.

## Установка и методика измерений



Уравнение динамики для поступательного движения груза

$$ma = mg - T. \quad (1)$$

Уравнение динамики для вращательного движения крестообразного маятника

$$M = I\varepsilon, \quad (2)$$

где  $M$  – вращательный момент сил,  $I$  – момент инерции нагруженного маятника.

Угловое ускорение маятника связано с ускорением падающего груза соотношением

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{2a}{d},$$

где  $r$  и  $d$  – радиус и диаметр шкива соответственно.

Линейное ускорение  $a$  можно определить из уравнения прямолинейного равноускоренного движения:

$$a = \frac{2H}{t^2},$$

где  $H$  – путь, пройденный грузом за времени  $t$ .

Тогда угловое ускорение можно записать в виде

$$\varepsilon = \frac{4H}{dt^2}.$$

Вращательный момент, действующий на крестообразный маятник равен

$$M = Tr = T \frac{d}{2}.$$

Подставляя выражение для силы натяжения нити из (1), получим

$$M = \frac{md(gt^2 - 2H)}{2t^2}. \quad (3)$$

По данным проведенных опытов можно рассчитать величины  $M$  и соответствующие им значения  $\varepsilon$ , а затем построить график зависимости  $M = f(\varepsilon)$ . Искомый момент инерции определяется из графика как тангенс угла наклона отрезка прямой.

Момент инерции ненагруженного маятника вычислить по формуле

$$I_0 = I - 4m_0R^2, \quad (4)$$

где  $R$  - расстояние центра тяжести груза  $m_0$  до оси вращения.

### Порядок выполнения работы

1. Убедиться в вертикальной установке прибора.
2. Установить груз с минимальным значением массы.
3. Измерить штангенциркулем диаметры большего шкива  $D$  и меньшего шкива  $d$ .
4. Подключить сетевой кабель в розетку и нажать клавишу **СЕТЬ**.
5. Нажать клавишу **ПУСК** и намотать нить на большой шкив, вращая маятник против часовой стрелки. При этом рукой держаться только за ось, а не за стержень. Груз поднимать до такой высоты, чтобы нижняя грань груза была на одном уровне с риской на верхнем кронштейне (тело груза не должно перекрывать окошко фотодатчика).

6. Отжать клавишу **ПУСК** и убедиться, что электромагнит удерживает груз в фиксированном положении, а на секундомере – нули.

7. Нажать клавишу **ПУСК**. Электромагнит отключится, и груз станет опускаться вниз, вращая маятник. При достижении грузом нижнего фотодатчика происходит автоматическая остановка секундомера и включается электромагнит.

8. После записи времени опускания в табл. 1 нажать клавишу **СБРОС**. При этом отключается электромагнит и обнуляется секундомер. Установка готова к повторению опыта.

9. Измерение времени для каждого груза проводят три раза и вычисляют среднее значение. Опыт проделать не менее чем с тремя грузами. Данные занести в табл. 1.

10. Все опыты повторить с малым шкивом и заполнить аналогичную таблицу.

### Результаты измерений и вычислений

Таблица 1

№ опыта	$H, м$	$m, кг$	$t, с$	$t_{cp}, с$	$\varepsilon, рад/с^2$	$M, Н\cdot м$
<i>Диаметр большого шкива <math>D=</math> м</i>						
1						
2						
3						
<i>Диаметр малого шкива <math>d=</math> м</i>						
1						
2						
3						

Графики зависимости  $M = f(\varepsilon)$  представить на миллиметровой бумаге. Определить момент инерции нагруженного маятника и найти его среднее значение.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta M}{\Delta \varepsilon} = I;$$

$$I_1 =$$

$$I_2 =$$

$$I_{cp} =$$

Момент инерции ненагруженного маятника  $I_0$ :

$$I_0 = I - 4m_0R^2;$$

$$m_0 =$$

$$R =$$

$$I_0 =$$

**Лабораторная работа № 1.6**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПУЛИ**  
**С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА**

**Цель работы:** определение скорости полёта пули с помощью баллистического маятника.

**Принадлежности:** баллистический маятник, пружинная пушка, миллиметровая шкала отсчета, набор снарядов (пуль).

**Теоретическое введение**

1. Момент импульса материальной точки и твердого тела относительно оси вращения.

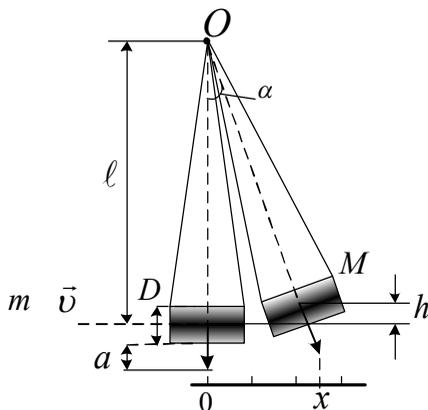
2. Момент силы относительно точки и оси вращения.

3. Закон сохранения момента импульса механической системы.

4. Закон сохранения механической энергии.

## Установка и методика измерений

### Баллистический маятник



Закон сохранения момента импульса для системы “пуля-маятник”

$$m v_0 \ell = (I + m \ell^2) \omega_0, \quad (1)$$

где  $m$  – масса пули,  $v_0$  – скорость пули до удара;  $I$  и  $\omega_0$  – момент инерции маятника относительно оси вращения и его начальная угловая скорость;  $\ell$  – длина нитей подвеса.

Закон сохранения механической энергии после удара

$$\frac{1}{2} (I + m \ell^2) \omega_0^2 = (M + m) g h, \quad (2)$$

где  $M$  – масса маятника;  $h$  – высота подъема центра тяжести маятника.

Связь высоты  $h$  с углом отклонения маятника от положения равновесия

$$h = \ell - \ell \cos \alpha = 2 \ell \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (1)-(3), получим:

$$v_0 = 2 \frac{\sin(\alpha/2)}{m} \sqrt{\frac{g}{\ell} (M + m)(I + m \ell^2)}.$$

Полагая  $I = M \ell^2$  и  $2 \sin \frac{\alpha}{2} \cong \alpha \cong \operatorname{tg} \alpha \cong \frac{x}{R}$ , где  $R = \ell + \frac{D}{2} + a$  ( $D$  – диаметр цилиндра,  $a$  – длина стрелки), окончательно имеем:

$$v_0 = \bar{x} \frac{M + m}{Rm} \sqrt{g\ell}. \quad (4)$$

### Порядок выполнения работы

1. Записать в табл. 1 все постоянные для данной установки величины.

2. Установить шкалу параллельно оси цилиндра и подготовить “пушку” к выстрелу. Произвести пять выстрелов каждой пулей и полученные результаты записать в табл. 2.

### Результаты измерений и вычислений

Таблица 1

$\ell, м$	$R, м$	$a, мм$	$D, мм$	$M, мм$	$m_1, кг$	$m_2, кг$

Таблица 2

Номер Опыта	Первая пуля			Вторая пуля		
	$x_i,$ мм	$ x_i - \bar{x} ,$ мм	$ x_i - \bar{x} ^2,$ мм <sup>2</sup>	$x_i,$ мм	$ x_i - \bar{x} ,$ мм	$ x_i - \bar{x} ^2,$ мм <sup>2</sup>
1						
2						
3						
4						
5						
Ср.	$\bar{x} =$		$\Sigma =$	$\bar{x} =$		$\Sigma =$

Вычисление среднего значения скорости по формуле (4) каждой пули по среднему значению смещения стрелки из положения равновесия:  $\bar{v}_1 =$  ,  $\bar{v}_2 =$

## Расчет систематической погрешности

Таблица 3

$\delta R, м$	$\delta \ell, м$	$\delta M, кг$	$\delta m, кг$	$\delta g, м/с^2$	$\delta x, м$

Систематическая погрешность измерения скорости пули

$$\delta v = \bar{v} \cdot \sqrt{\frac{\delta x^2}{x^2} + \frac{\delta R^2}{R^2} + \frac{\delta m^2}{m^2} + \frac{\delta M^2}{(m+M)^2} + \frac{\delta g^2}{g^2} + \frac{\delta \ell^2}{\ell^2}},$$

$\delta v_1 = \qquad \qquad \qquad \delta v_2 =$

### Расчет случайной погрешности

Среднеквадратичная погрешность среднего

арифметического значения  $x$ :  $S_x = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}$ ;

$S_{x1} = \qquad \qquad \qquad S_{x2} =$   
 Доверительная вероятность  $\alpha =$   
 Коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n} =$

Случайная погрешность:  
 $\Delta x = t_{\alpha, n} \cdot S_x$ ;       $\Delta x_1 = \qquad \qquad \qquad \Delta x_2 =$   
 $\Delta v = \bar{v} \cdot (\Delta x / \bar{x})$      $\Delta v_1 = \qquad \qquad \qquad \Delta v_2 =$

### Суммарная погрешность измерений

Абсолютная погрешность  
 $\Delta v = \sqrt{\Delta^2 v + \delta v^2}$ ;     $\Delta v_1 = \qquad \qquad \qquad \Delta v_2 =$

Относительная погрешность  
 $E = \frac{\Delta v}{\bar{v}} \cdot 100\%$        $E_1 = \qquad \qquad \qquad E_2 =$

### Окончательный результат

$v_1 = \qquad \qquad \qquad \alpha = \qquad \qquad \qquad E_1 =$   
 $v_2 = \qquad \qquad \qquad \alpha = \qquad \qquad \qquad E_2 =$

## **Лабораторная работа № 1.10**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ В ЖИДКОСТИ**

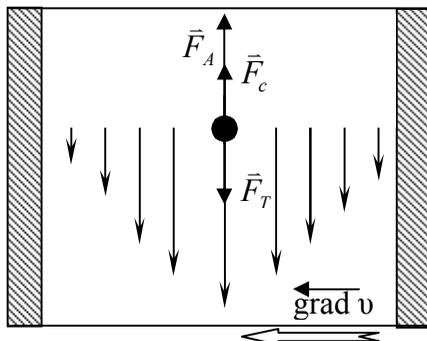
**Цель работы:** освоение методов определения коэффициента вязкости и числа Рейнольдса.

**Принадлежности:** стеклянный цилиндр с жидкостью, микрометр, секундомер, металлические шарики.

#### **Теоретическое введение**

1. Сила внутреннего трения между слоями жидкости.
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
2. Коэффициент динамической вязкости и его физический смысл.
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
3. Ламинарный и турбулентный режимы течения жидкости.
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
4. Формула Стокса.
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
5. Число Рейнольдса.

## Установка и методика измерений



На шарик, движущийся в жидкости, действуют сила тяжести  $F_T = mg = 4/3 \pi r^3 \rho_1 g$ , сила Архимеда  $F_A = 4/3 \pi r^3 \rho_2 g$ , сила сопротивления  $F_c = 6 \pi \eta r v$ , где  $\rho_1$  – плотность шарика;  $\rho_2$  – плотность жидкости;  $r$  – радиус шарика;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости.

При равномерном движении действующие силы уравновешены, поэтому

$$\frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_1 - \rho_2) = 6 \pi \eta r v_0,$$

отсюда получим

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho_1 - \rho_2}{v_0} g r^2. \quad (1)$$

Характер движения шарика в жидкости определяется числом Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\rho v r}{\eta} = \frac{v r}{\nu},$$

где  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$  – кинематическая вязкость ( $\rho$  – плотность жидкости).

### Порядок выполнения работы

1. Измерить с помощью микрометра диаметр шарика. Найти среднее значение диаметра  $d$  и радиуса  $r = d/2$ .

2. Опустить шарик в сосуд с жидкостью как можно ближе к оси цилиндра. Измерив время  $t$  прохождения шарика от верхней метки до нижней и расстояние между ними  $L$ ,

рассчитать установившуюся скорость  $v_0$  движения шарика по формуле  $v_0 = L / t$ .

3. Опыт с разными шариками повторить не менее пяти раз. Результаты измерений занести в табл. 2.

4. Рассчитать коэффициент динамической вязкости по формуле (1) для каждого случая и найти среднее значение.

### Результаты измерений и вычислений

Таблица 1

Плотность вещества		
Глицерин $\rho_{\text{гл}}, \text{кг/м}^3$	Свинец $\rho_{\text{св}}, \text{кг/м}^3$	Сталь $\rho_{\text{ст}}, \text{кг/м}^3$
1250	11340	7900

Таблица 2

№ п/п	$d,$ мм	$r,$ мм	$\ell,$ м	$t,$ с	$v_0,$ м/с	$\eta,$ кг/м с	$ \eta_i - \bar{\eta} ,$ кг/м с	$ \eta_i - \bar{\eta} ^2,$ кг <sup>2</sup> /м <sup>2</sup> с <sup>2</sup>
1								
2								
3								
4								
5								
Среднее значение						$\bar{\eta} =$		$\Sigma =$

Кинематический коэффициент вязкости

$$\nu = \frac{\bar{\eta}}{\rho} =$$

Сила лобового сопротивления первого шарика

$$F_1 = 6\pi\bar{\eta}r_1v_{01} =$$

Число Рейнольдса для первого шарика

$$Re = \frac{\rho v_{01} r_1}{\bar{\eta}} =$$

### Расчет случайной погрешности измерений

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для  $\eta$ :

$$S_{\eta} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{\eta} - \eta_i)^2}{n(n-1)}}; \quad S_{\eta} =$$

Доверительная вероятность  $\alpha =$

Коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n} =$

Абсолютная погрешность

$$\Delta\eta = t_{\alpha, n} \cdot S_{\eta}; \quad \Delta\eta =$$

Относительная погрешность

$$E = \frac{\Delta\eta}{\bar{\eta}} \cdot 100\%; \quad E =$$

### Окончательный результат

$\eta =$

$\alpha =$

$E =$

**Лабораторная работа № 1.12**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ**  
**С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ОБОРОТНОГО**  
**МАЯТНИКА**

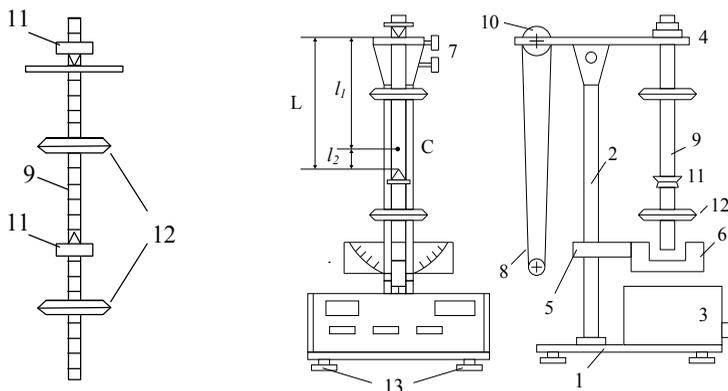
**Цель работы:** определение приведённой длины физического маятника и величины ускорения свободного падения.

**Принадлежности:** математический маятник и обратный физический маятник, фотоэлектрический датчик, электронный секундомер, метрическая линейка.

**Теоретическое введение**

1. Период колебаний математического маятника.
  
2. Период колебаний и приведенная длина физического маятника.
  
3. Дифференциальное уравнение гармонического колебания и его решение.
  
4. Дифференциальное уравнение затухающих колебаний и его решение.
  
5. Основные характеристики затухающих колебаний.

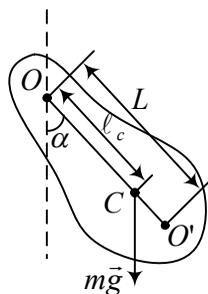
## Установка и методика измерения



## Оборотный физический маятник

Оборотный маятник выполнен в виде стального стержня, на котором фиксированы две опорные призмы 11, повернутые своими лезвиями друг к другу, и два ролика 12. На стержне через 10 миллиметров сделаны кольцевые нарезки, служащие для точного определения длины оборотного маятника (расстояние между лезвиями опорных призм) и надежной фиксации роликов 12 и опорных призм при помощи воротков.

Нижний кронштейн вместе с фотоэлектрическим датчиком можно перемещать вдоль колонки и фиксировать в произвольно избранном положении.



Точка  $O'$ , удаленная на расстояние приведенной длины от оси вращения, называется **центром качания** физического маятника. Точка подвеса и центр качания являются взаимозаменяемыми. Если маятник подвесить за центр качания  $O'$ , то его период не изменится и прежняя точка  $O$  сделается новым центром качания. На этом свойстве основано определение

ускорения свободного падения с помощью оборотного маятника.

Совпадение периодов

$$T_1 = T_2 \Rightarrow 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{mg\ell_{c1}}} = 2\pi \sqrt{\frac{I_2}{mg\ell_{c2}}}$$

возможно только в случае равенства приведённых длин прямого и обратного положений маятника, т.е.

$$\frac{I_1}{mg\ell_{c1}} = \frac{I_2}{mg\ell_{c2}},$$

где  $\ell_{c1} = OC$ ,  $\ell_{c2} = O'C$ .

По теореме Штейнера

$$I_1 = I_0 + m\ell_{c1}^2 \quad \text{и} \quad I_2 = I_0 + m\ell_{c2}^2.$$

Тогда

$$T^2 g(\ell_{c1} - \ell_{c2}) = 4\pi^2(\ell_{c1}^2 - \ell_{c2}^2),$$
$$T^2 g = 4\pi^2(\ell_{c1} + \ell_{c2}).$$

Отсюда ускорение свободного падения

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2},$$

где  $L = (\ell_{c1} + \ell_{c2})$  – приведенная длина оборотного маятника.

## Порядок выполнения работы

### Оборотный маятник

1. На стержне 9 закрепите несимметрично два ролика 12 и опорные призмы 11. Один из роликов расположите вблизи конца стержня, а второй – вблизи его середины. Призмы 11 закрепите по обеим сторонам центра тяжести маятника лезвиями друг к другу. При этом лезвия опорных призм должны соответствовать кольцевым проточкам стержня. Одну из призм установите на расстоянии 3 см от свободного конца стержня, а вторую – на половине расстояния между роликами.

Опустите нижний кронштейн 5 в нижнее положение и установите маятник на опорные вкладыши верхнего кронштейна.

Включите прибор нажатием клавиши «сеть». При этом на индикаторах измерителя должны высвечиваться нули и должна гореть лампочка фотоэлектрического датчика.

Нижний кронштейн 5 с фотоэлектрическим датчиком переместите вверх и зафиксируйте таким образом, чтобы стержень маятника пересекал оптическую ось датчика.

После указанных действий прибор готов к работе.

2. Отклонить маятник на 4-5 градусов от положения равновесия и отпустить маятник нажав клавишу «сброс».

3. После девяти полных колебаний маятника нажать клавишу «стоп», а десятое колебание прибор измерит автоматически. При этом измеритель покажет соответствующий этому числу колебаний  $N = 10$  промежуток времени  $t$ . Период колебаний маятника рассчитать по формуле  $T = t/N$ . Сделать  $n=3$  измерения, а полученные результаты записать в табл.1.

Таблица 1.

№	$N$	$t, c$	$T, c$	Примечания
1	10			$T_i = \frac{t_i}{N}; \langle T \rangle = \frac{1}{n} \sum T_i$
2	10			
3	10			
Средн. знач.				$N = 10, n = 3$

4. Снять маятник и подвесить его на вторую призму. При этом нижний кронштейн с фотоэлектрическим датчиком потребует перемещения таким образом, чтобы маятник пересекал оптическую ось датчика.

5. Отклонить маятник на 4-5 градусов от положения равновесия и измерить период колебаний обратного маятника  $T_{об}$ .

6. Сравнить период колебаний обратного маятника и среднее значение периода  $\langle T \rangle$  из таблицы. В случае несовпадения значений, повторить измерения, изменив положение второй призмы. Положение роликов и первой

призмы не менять. Изменять положения второй призмы до момента получения значения периода обратного маятника, отличающегося от  $\langle T \rangle$  не более чем на

$$\varepsilon = \frac{|T_{об} - \langle T \rangle|}{\langle T \rangle} \cdot 100\% = 0,5\%.$$

7. Определить приведенную длину  $L$  обратного маятника, равную расстоянию между лезвиями опорных призм при условии  $T_{об} = \langle T \rangle$ .

8. По формуле  $g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2}$  вычислить ускорение свободного падения.

9. Оценить относительную погрешность измерений, сравнив экспериментальное значение ускорения свободного падения с табличной величиной ( $g_T = 9,8 \text{ м/с}^2$ ):

$$\varepsilon_{об} = \frac{\Delta g}{g_T} \cdot 100\% .$$

### **Определение ускорения свободного падения с помощью математического маятника**

1. Поворотом верхнего кронштейна расположить над датчиком математический маятник.

2. Вращая вороток 10 на верхнем кронштейне, установить длину математического маятника 8, равную приведенной длине  $L$  физического маятника. При этом необходимо обратить внимание на то, чтобы черта на шарике была продолжением черты на корпусе фотоэлектрического датчика.

3. Включить прибор в сеть.

4. Отклонить маятник на 4-5 градусов от положения равновесия. Нажав клавишу «сброс», отпустить маятник.

5. После девяти полных колебаний маятника нажать клавишу «стоп». При этом измеритель покажет промежуток времени  $t$ , соответствующий  $N = 10$  колебаниям. Период колебаний маятника рассчитать по формуле  $T = t/N$ . По совокупности нескольких измерений определить средний

период  $T_m$  колебаний математического маятника. Результаты занести в табл. 2.

Таблица 2

№	$N$	$t, c$	$T_m, c$	Примечания
1	10			$T_i = \frac{t_i}{N}; \langle T \rangle = \frac{1}{n} \sum T_i$ $N = 10, n = 3$
2	10			
3	10			
Средн. знач.				

6. По формуле  $g = \frac{4\pi^2 L}{T_m^2}$  определить ускорение свободного падения.

7. Оценить относительную погрешность измерений, сравнив экспериментальное значение ускорения свободного падения с табличной величиной ( $g_T = 9,8 \text{ м/с}^2$ ):

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta g}{g_T} \cdot 100\% .$$

8. Результаты измерений и вычислений ускорения свободного падения занести в табл. 3. Сравнить полученные результаты и сделать вывод.

Таблица 3

Маятник	$T, c$	$L, м$	$g, м/с^2$	$\varepsilon, \%$
Оборотный				
Математический				

**Лабораторная работа № 1.15 б**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТОДОМ**  
**СДВИГА ФАЗ**

**Цель работы:** изучение метода сдвига фаз и определение скорости звука при комнатной температуре.

**Принадлежности:** акустическая труба с микрофоном и телефоном, звуковой генератор, осциллограф.

**Теоретическое введение**

1. Уравнение гармонических колебаний.

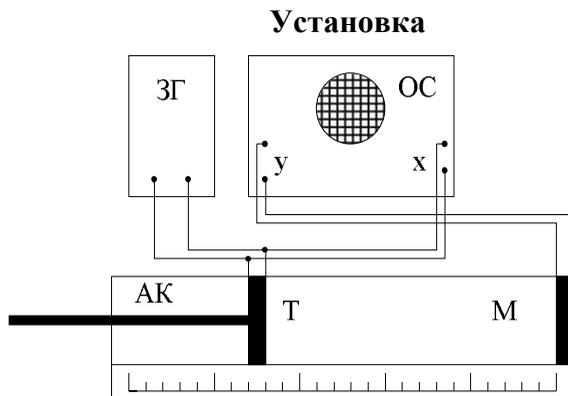
2. Частные случаи сложения взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты ( $\Delta\varphi = 0; = \pi; = \pi / 2$ ).

3. Уравнение бегущей волны. Графическое представление бегущей волны.

4. Скорость распространения звуковых волн.

## Установка и методика измерений

Метод основан на преобразовании звуковых колебаний в электромагнитные, а затем сложении двух колебаний, происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях на экране осциллографа.



ЗГ – звуковой генератор, ОС – осциллограф, М – микрофон, Т – подвижный телефон, АК- акустическая труба

Уравнение волны, распространяющейся от телефона к микрофону:

$$\xi = \xi_0 \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \right],$$

где  $v$  – скорость звуковой волны;  $x$  – расстояние от источника колебаний (телефона);  $\xi$  – смещение колеблющейся точки от равновесного положения.

Колебания в микрофоне сдвинуты по фазе относительно колебаний телефона на величину

$$\varphi = \omega \frac{x}{v}.$$

При некотором расстоянии  $x_1$  между телефоном и микрофоном, удовлетворяющем условию

$$2k\pi = \omega \frac{x_1}{v},$$

на экране осциллографа получается прямая линия.

Перемещая телефон и продолжая увеличивать расстояние до микрофона, снова получим идентичную прямую линию при условии

$$2\pi(k+1) = \omega \frac{x_2}{v}.$$

Решая систему последних двух уравнений, получим

$$2\pi = \omega \frac{\Delta x}{v} \text{ или } v = \Delta x \cdot \nu,$$

где  $\nu$  - частота колебаний звукового генератора,  $\Delta x = x_2 - x_1$ .

### Порядок выполнения работы

1. Установить на звуковом генераторе частоту 1000 Гц, на осциллографе ручку диапазона в положение **ВЫКЛ.**

Включить звуковой генератор и осциллограф и дать прогреться в течение 2-4 минут. Ручками **РЕГ. НАПРЯЖЕНИЯ** на звуковом генераторе и **УСИЛЕНИЕ** по горизонтали и вертикали на панели осциллографа добиться появления на экране осциллографа фигуры Лиссажу.

Перемещая телефон относительно микрофона с помощью штока со шкалой, добиться появления на экране прямой линии. Отсчитать расстояние между телефоном и микрофоном  $x_1$ . Поскольку наименьшее деление шкалы на трубке равно 1 см, следует миллиметровой линейкой определить расстояние от последнего деления шкалы до края акустической трубы и уточнить результат. Перемещая телефон, снова получить на экране осциллографа ту же самую прямую и отсчитать расстояние  $x_2$ .

2. Зная частоту колебаний генератора  $\nu$ , по формуле  $v = \Delta x \cdot \nu$  определить скорость звука. Измерения проделать не менее трех раз для различных расстояний между микрофоном и телефоном и для различных частот генератора (1000; 1500; 2000 Гц.). Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1

$N$ п/п	$\nu$ , Гц	$x_1$ , м	$x_2$ , м	$\Delta x$ , м	$\nu$ , м/с
1	1000				
2	1500				
3	2000				
Среднее значение					$\bar{\nu} =$

3. Рассчитать теоретическое значения скорости звука в воздухе при комнатной температуре  $T$ :

$$\nu_{\text{т}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}},$$

где  $\gamma = 1,4$  и  $\mu = 0,029$  кг/моль - показатель адиабаты и молярная масса воздуха соответственно.

4. Оценить в процентах разницу между измеренным и вычисленным значением скорости звука по формуле

$$\varepsilon = \frac{|\nu_{\text{сп}} - \nu_{\text{т}}|}{\nu_{\text{в}}} \cdot 100\%.$$

### Расчет случайной погрешности измерений

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для  $\nu$ :

$$S_{\nu} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{\nu} - \nu_i)^2}{n(n-1)}}; \quad S_{\nu} =$$

Доверительная вероятность  $\alpha =$

Коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n} =$

Абсолютная погрешность  $\Delta \nu = t_{\alpha, n} \cdot S_{\nu}$ ,  $\Delta \nu =$

Относительная погрешность

$$E = \frac{\Delta \nu}{\bar{\nu}} \cdot 100\%; \quad E =$$

### Окончательный результат

$$\nu = \quad \alpha = \quad E =$$

**Лабораторная работа № 1.16**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО**  
**ТРЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

**Цель работы:** исследовать зависимость коэффициента внутреннего трения воздуха от температуры и сопоставить её с теоретической.

**Принадлежности:** установка для определения коэффициента внутреннего трения вязкости.

**Теоретическое введение**

1. Эффективный диаметр и длина свободного пробега молекул.

2. Сила внутреннего трения. Механизм возникновения внутреннего трения в газах.

3. Коэффициент вязкости и его зависимость от температуры.

4. Формула Пуазейля.

## Установка и методика измерений

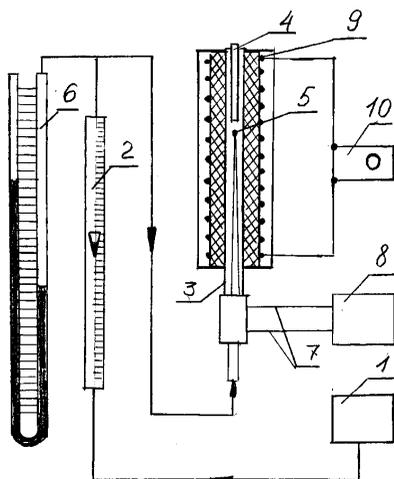
Метод определения коэффициента внутреннего трения газа основан на истечении воздуха через капилляр.

Коэффициент внутреннего трения воздуха рассчитывается по формуле Пуазейля

$$\eta = \frac{\pi r_0^4 (p_1 - p_2) \tau}{8LV}, \quad (1)$$

где  $p_1 - p_2 = \rho_B g(h_1 - h_2)$  – разность давлений воздуха на входе и выходе из капилляра;  $(h_1 - h_2)$  – разность уровней воды в манометре;  $r_0$  – радиус капилляра;  $L$  – длина капилляра;  $V$  – объём воздуха, протекающего через капилляр за время  $\tau$  при данной температуре;  $\rho_B$  – плотность воды при температуре и давлении в лаборатории.

Микрокомпрессор 1 прокачивает воздух через ротаметр 2, и затем воздух направляется в медный термостат (цилиндрическая трубка) 3, внутри которой находится капилляр 4. Внутри медного



термостата находится спай термопары 5, измеряющей температуру воздуха, протекающего через капилляр 4 в атмосферу. Термоэлектроды 7 соединены с измерителем температуры 8. Перепад давления на капилляре измеряется манометром 6. Медный термостат 3 находится в керамическом цилиндре, на внешней поверхности которого находится электрический нагреватель 9, соединённый с регулятором мощности 10.

### Порядок выполнения работы

1. Включить электропитание установки.

2. Включить компрессор и измеритель температуры.

3. При комнатной температуре снять показания ротаметра и манометра (разность положений менисков на шкале).

4. Включить питание термостата. Повернуть со щелчком ручку регулятора температуры по часовой стрелке и установить его метку в среднее положение.

5. Через каждые 25-30 °C вплоть до 150 °C снимать показания ротаметра и манометра. Результаты всех измерений занести в табл. 1.

6. Объёмный расход воздуха  $V$  м<sup>3</sup>/с через капилляр определяется из градуировочной кривой ротаметра. Объёмный расход воздуха необходимо перевести в систему СИ ( $1 \text{ л/ч} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

### Результаты измерений

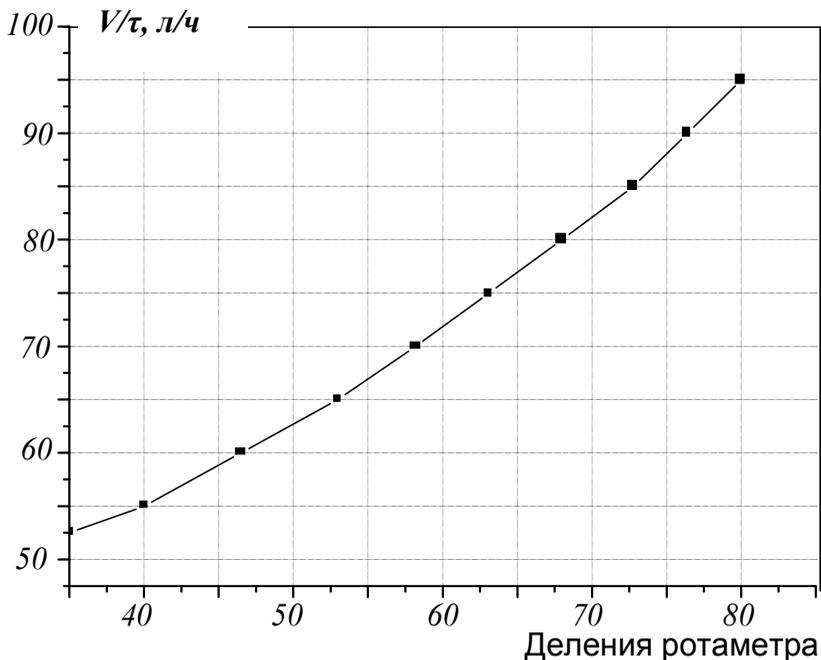
Длина и диаметр капилляра:  $L = 40 \text{ мм}$  и  $d = 1 \text{ мм}$ .

Таблица 1

№ п/п	$t$ , °C	$V/\tau$ , м <sup>3</sup> /с	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\eta$ , Па·с	$ \bar{\eta} - \eta_i $	$(\bar{\eta} - \eta_i)^2$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
						$\bar{\eta} =$		$\Sigma =$

7. Рассчитать значения коэффициента внутреннего трения газа при различных температурах по формуле (1).

Построить на миллиметровой бумаге график зависимости динамической вязкости воздуха от температуры  $\eta = f(t)$ .



### Расчет случайной погрешности измерений

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для  $\eta$ :

$$S_{\eta} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{\eta} - \eta_i)^2}{n(n-1)}}; \quad S_{\eta} =$$

Доверительная вероятность  $\alpha =$

Коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n} =$

Абсолютная погрешность  $\Delta\eta = t_{\alpha, n} \cdot S_{\eta}; \Delta\eta =$

Относительная погрешность

$$E = \frac{\Delta\eta}{\bar{\eta}} \cdot 100\% \quad E =$$

### Окончательный результат

$\eta =$

$\alpha =$

$E =$

**Лабораторная работа № 1.18**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ**  
**ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ**  
**ДАВЛЕНИИ И ПОСТОЯННОМ ОБЪЁМЕ**

**Цель работы:** определить экспериментальным путём значение показателя адиабаты  $\gamma = C_p/C_V$  для воздуха и сравнить с табличной величиной.

**Принадлежности:** компрессор, манометр, баллон.

**Теоретическое введение**

1. Удельная и молярная теплоемкость. Значения молярных теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении для идеального газа.

2. Первый закон термодинамики.

3. Формулы приращения внутренней энергии, теплоты и работы.

4. Уравнение Майера.

5. Уравнение Пуассона. Показатель адиабаты.

## Установка и методика измерений

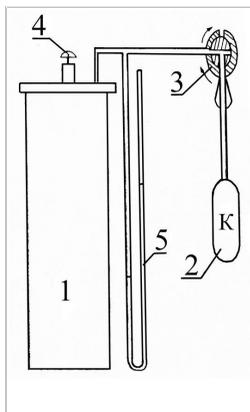


Рис.1

Схема установки представлена на рис. 1. В стеклянный баллон 1, соединенный с компрессором 2, через напускной кран 3 накачивается воздух. Клапан сброса воздуха 4, находящийся на верхней крышке установки, позволяет резко уменьшить давление в баллоне практически без теплообмена с окружающей средой.

На рис. 2 представлена передняя панель, на которой размещаются тумблер «СЕТЬ» 7, тумблер «КОМПРЕССОР» 8, водяной  $U$  - манометр 5, кран 3 напуска воздуха со следующими положениями:

**НАПУСК** – ручка крана в положении 9, на данной отметке открывает линию к компрессору 2.

**ЗАКРЫТ** – ручка крана в положении 10, на данной отметке прекрывает баллон 1.

**РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ** – ручка крана в положении 11, на данной отметке позволяет отрегулировать уровень воды в коленах манометра после заполнения баллона воздухом.

В баллон компрессором 2 накачивается воздух до определенного избыточного давления (разность уровней в коленах манометра 5 должна составлять:  $h = 20 - 25$  см). В каждой серии опытов эта разность должна быть одинаковой (регулируется краном 3). После выравнивания температур воздуха в баллоне и окружающей среды осуществляется быстрый сброс

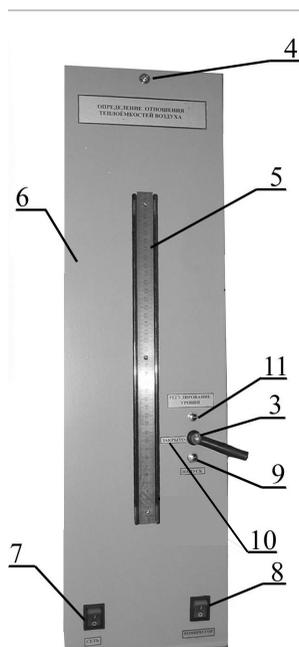
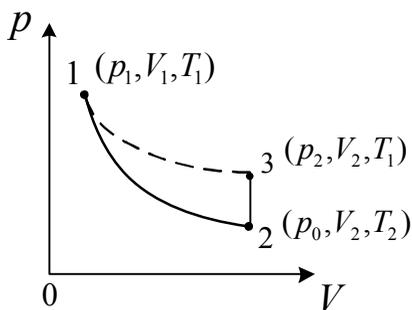


Рис.2



давления через выпускное отверстие с клапаном 4. При этих условиях процесс с достаточной точностью можно считать адиабатическим. После того, как клапан сброса закрылся, осуществляется изохорный процесс теплообмена с окружающей средой. Температура воздуха в баллоне приближается к температуре окружающей среды.

Состояние 1 воздуха в баллоне (после закачки) характеризуется параметрами

Состояние 2 после адиабатического расширения (открыт на короткое время кран 2) характеризуется параметрами

$$(p_0 + \rho g \Delta H), V_1, T_1,$$

где  $p_0$  – атмосферное давление,  $\rho g \Delta H$  – добавочное давление, определяемое разностью уровней жидкостей в манометре  $\Delta H$ ,  $\rho$  – плотность жидкости.

Состояние 3 после нагрева до температуры внешней среды) характеризуется параметрами  $p_0, V_2, T_2$ .

На основании уравнения Пуассона для адиабатного процесса можно записать

$$(p_0 + \rho g \Delta H) \cdot V_1^\gamma = p_0 V_2^\gamma, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты.

Состояние 3 (после нагрева до температуры внешней среды) характеризуется параметрами

$$(p_0 + \rho g \Delta h), V_2, T_1.$$

Применяя закон Бойля-Мариотта к процессу 1-3, получим

$$(p_0 + \rho g \Delta H) \cdot V_1 = (p_0 + \rho g \Delta h) \cdot V_2. \quad (2)$$

Решая систему уравнений (1) и (2), после преобразований и упрощений найдем расчетную формулу

$$\gamma = \frac{\Delta H}{\Delta H - \Delta h} \quad (3)$$

### Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером «СЕТЬ», включить тумблер «КОМПРЕССОР». Повернуть ручку крана 3 в положение **НАПУСК**. Установить разность уровней воды в манометре 20-25 см.

2. После этого перевести ручку крана 3 в положение **ЗАКРЫТ**.

3. Подождать 2-4 минуты до тех пор, пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре окружающей среды.

4. По нижнему уровню мениска определить уровни в коленах манометра и записать их разность  $\Delta H$  в таблицу.

5. Резко (**но не сильно!**) нажать и отпустить клапан сброса воздуха 4 (баллон соединяется с атмосферой). Через 2-4 минуты, после того как уровни воды в манометре стабилизируются, определить новые значения уровней и их разность  $\Delta h$  занести в таблицу.

6. Повторить все измерения не менее 5 раз. По формуле 3 рассчитать экспериментальные значения  $\gamma$  и определить среднюю величину. Результаты расчетов занести в таблицу.

7. Рассчитать теоретическое значение показателя адиабаты для воздуха по формуле  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$ , для воздуха  $i=5$ . Определить в процентах расхождение полученных результатов.

## Результаты измерений и вычислений

№ опыта	$\Delta H$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\gamma$	$ \bar{\gamma} - \gamma_i $	$(\bar{\gamma} - \gamma_i)^2$
1					
2					
3					
4					
5					
			$\bar{\gamma} =$		$\Sigma =$

### Расчет случайной погрешности измерений

Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического для  $\gamma$ :

$$S_\gamma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{\gamma} - \gamma_i)^2}{n(n-1)}} \quad S_\gamma =$$

Доверительная вероятность  $\alpha =$

Коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n} =$

Абсолютная погрешность  $\Delta\gamma = t_{\alpha, n} \cdot S_\gamma$ ;  $\Delta\gamma =$

Относительная погрешность

$$E = \frac{\Delta\gamma}{\bar{\gamma}} \cdot 100\%; \quad E =$$

### Окончательный результат

$\gamma =$                        $\alpha =$                        $E =$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст]: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. - 560 с.

2. Детлаф, А.А. Курс физики [Текст]: учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.

3. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]: в 5 кн.: учеб. пособие для втузов / И.В. Савельев. - М.: АСТ: Астрель, 2005.

4. Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов [Текст]: учеб. пособие / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. - М.: Оникс, 2006. – 1056 с.

5. Матовых Н.В. Механические колебания и волны [Электр] / Методические указания № 153-2016 / Н.В. Матовых, А.Г. Москаленко, М.Н. Гаршина, Е.П. Татьянаина.- ВГТУ, Воронеж, 2016. 43 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Лабораторная работа № 1.0.</b> Определение объема цилиндра	1
<b>Лабораторная работа № 1.1.</b> Определение ускорения свободного падения на машине Атвуда .....	4
<b>Лабораторная работа № 1.2.</b> Измерение упругого модуля сдвига стальной проволоки методом крутильных колебаний .....	9
<b>Лабораторная работа № 1.3.</b> Определение момента инерции методом трифилярного подвеса .....	14
<b>Лабораторная работа № 1.5.</b> Исследование основного уравнения динамики вращательного движения и определение момента инерции крестообразного маятника .....	19
<b>Лабораторная работа № 1.6.</b> Определение скорости пули с помощью баллистического маятника .....	24
<b>Лабораторная работа № 1.10.</b> Исследование движения ч тел в жидкости .....	28
<b>Лабораторная работа № 1.12.</b> Определение ускорения свободного падения с помощью математического и обратного маятника .....	32
<b>Лабораторная работа № 1.15 б.</b> Определение скорости звука методом сдвига фаз. ....	38
<b>Лабораторная работа № 1.16.</b> определение коэффициента внутреннего трения воздуха при различных температурах .....	42
<b>Лабораторная работа № 1.18.</b> Определение отношения удельных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме.....	46
<b>Библиографический список</b> .....	51

## РАБОЧАЯ ТЕТРАДЬ

для лабораторных работ по механике,  
молекулярной физике и термодинамике  
для студентов всех направлений  
очной формы обучения

Составители:

Матовых Николай Васильевич  
Москаленко Александр Георгиевич  
Татьянина Елена Павловна

Подписано к изданию 10.05.2018.  
Уч.- изд. л. 3,2. “С”

ФГБОУ ВО “Воронежский государственный технический  
университет”  
394026 Воронеж, Московский просп., 14