

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра физики

**МЕХАНИКА. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА  
ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**

**Лабораторный практикум К-402.1**

по дисциплине «Физика»  
для технических специальностей и направлений  
подготовки всех форм обучения

Составитель И. С. Елкин

Утверждены на заседании кафедры  
Протокол № 4 от 27.11.2019  
Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
направления подготовки 20.03.01  
Протокол № 4 от 28.11.2019  
Электронная копия находится  
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2020

## Содержание

Введение.....	2
1. Измерение физических величин. Расчет погрешности измерений.....	3
2. Измерительные приборы.....	6
3. Построение графиков.....	9
<b>4. Лабораторная работа № 1</b> Определение момента инерции тела вращения и момента сил трения в опоре .....	10
<b>5. Лабораторная работа № 2</b> Измерение массы тела динамическим методом.....	14
<b>6. Лабораторная работа № 3</b> Определение начальной скорости пули с помощью баллистического маятника.....	20
<b>7. Лабораторная работа № 4</b> Изучение поступательного и вращательного движения с помощью маятника Обербека.....	22
<b>8. Лабораторная работа № 5</b> Изучение законов движения системы связанных тел.....	29
9. Вопросы для самоподготовки .....	34
10. Список литературы.....	35

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум К-402.1 представляет собой необходимый перечень лабораторных работ, предусмотренных образовательным стандартом и рабочей программой по разделу «Механика» дисциплины «Физика». Он включает в себя описание лабораторных установок, порядок измерений и алгоритм расчета физических величин.

Образовательным стандартом третьего поколения 40% от общего объема часов, отводимых на изучение дисциплины, приходится на самостоятельную работу, которая является необходимым компонентом процесса обучения. Целью самостоятельной работы является закрепление и углубление знаний и навыков, подготовка к лекциям, практическим и лабораторным занятиям, а также формирование у студентов самостоятельности в приобретении новых знаний, умений и компетенций.

Учебными планами для различных специальностей и направлений предусмотрено на самостоятельное изучение дисциплины «Физика» в течение семестра от 60 до 120 часов. Из них на лабораторные занятия приходится 20–40 часов, или 2–4 часа на одну работу. В течение этого времени студент должен: прочитать соответствующие параграфы в учебниках; выучить основные формулы и законы; ознакомиться с установкой и порядком измерений. Для допуска к выполнению работы на установке студент должен: знать устройство установки; уметь определять цену деления измерительного прибора; знать последовательность измерений; уметь обрабатывать результаты измерений; оценивать погрешность.

После всех расчетов, в конце отчета студент записывает вывод по проделанной работе. В выводе представляются основные результаты по исследованию физических закономерностей и соответствие их теоретическим представлениям, указывается примененный метод, его суть, приводятся основные полученные результаты по измеренным физическим величинам, указываются погрешности и соответствие их справочным данным и теоретическим представлениям.

## 1. ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Различают два вида измерений физических величин: прямые и косвенные.

Прямыми называются такие измерения, при которых производится сопоставление меры и исследуемого физического параметра объекта. Например, измеряют высоту и диаметр цилиндра с помощью штангенциркуля.

При косвенных измерениях физическая величина определяется на основании формулы, устанавливающей ее связь с величинами, найденными прямыми измерениями.

Измерение не может быть выполнено абсолютно точно. Его результат всегда содержит некоторую погрешность.

Погрешности измерений принято подразделять на систематические и случайные.

Систематические погрешности  $\Delta X_{\text{сист}}$  обусловлены факторами, действующими одинаковым образом при многократном повторении одних и тех же измерений.

Вклад в систематические погрешности вносит инструментальная или приборная погрешность  $\Delta X_{\text{пр}}$ , которая определяется классом точности или чувствительностью прибора. При отсутствии таких данных на приборе за приборную погрешность принимают цену или половину цены наименьшего деления шкалы прибора.

Случайные погрешности  $\Delta X_{\text{сл}}$  вызваны одновременным действием многих факторов, которые невозможно учесть. Большинству измерений сопутствуют случайные погрешности, отличающиеся тем, что при каждом повторном измерении они принимают другое, заранее не предсказуемое значение.

Абсолютная погрешность  $\Delta X$  включает в себя приборную (систематическую) и случайную погрешности:

$$\Delta X = \sqrt{\Delta X_{\text{пр}}^2 + \Delta X_{\text{сл}}^2}. \quad (1.1)$$

Истинное значение  $X_{\text{ист}}$  измеряемой величины  $X$  находится в интервале, который называют доверительным интервалом

$$\langle X \rangle - \Delta X < X_{\text{ист}} < \langle X \rangle + \Delta X,$$

где  $\langle X \rangle$  – среднее значение измеряемой величины.

Для определения случайной погрешности сначала рассчитывают среднее из всех величин, полученных при измерении:

$$\langle X \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (1.2)$$

где  $X_i$  – результат  $i$ -го измерения;  $n$  – число измерений.

Затем находят отклонения отдельных измерений от средней величины:

$$\Delta X_1 = |\langle X \rangle - X_1|; \Delta X_2 = |\langle X \rangle - X_2|; \dots; \Delta X_n = |\langle X \rangle - X_n|.$$

Далее находят среднеквадратичную погрешность по формуле

$$S_{\langle X \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\langle X \rangle - X_i)^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (1.3)$$

При обработке результатов измерений пользуются распределением Стьюдента. С учетом коэффициента Стьюдента  $t_{\alpha, n}$ , зависящего от числа измерений  $n$  и доверительной вероятности  $\alpha$ , случайная погрешность  $\Delta X_{\text{сл}}$  равна

$$\Delta X_{\text{сл}} = S_{\langle X \rangle} \cdot t_{\alpha, n}.$$

Таблица 1.1

Таблица коэффициентов Стьюдента  $t_{\alpha, n}$

$n$	$\alpha$				
	0,6	0,7	0,9	<b>0,95</b>	0,99
2	1,36	2,0	6,3	12,7	636,6
3	1,06	1,3	2,9	4,3	31,6
4	0,98	1,3	2,4	3,2	12,9
<b>5</b>	0,94	1,2	2,1	<b>2,8</b>	8,7
...	...	...	...	...	...
60	0,85	1,0	1,7	2,0	3,5
120	0,84	1,0	1,7	2,0	3,4

Коэффициент Стьюдента показывает отклонение среднего арифметического  $\langle X \rangle$  от истинного значения  $X_{\text{ист}}$ , выраженного в долях от средней квадратичной погрешности  $S_{\langle X \rangle}$ . Коэффициент Стьюдента зависит от числа измерений  $n$  и от выбранной надежности  $\alpha$  и указан в табл. 1.1.

Абсолютная погрешность  $\Delta X$  рассчитывается по формуле

$$\Delta X = \sqrt{\Delta X_{\text{пр}}^2 + \Delta X_{\text{сл}}^2}.$$

В ряде случаев большую роль играет не абсолютная  $\Delta X$ , а относительная погрешность  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{\langle X \rangle}, \text{ отн.ед.} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{\Delta X}{\langle X \rangle} \cdot 100\%. \quad (1.4)$$

Все результаты расчетов заносят в табл. 1.2. Для расчета  $\Delta X_{\text{сл}}$  и  $\Delta X$  необходимо производить не менее 5 измерений каждой величины.

*Таблица 1.2*  
*Результата расчета погрешности измерений*

№ п/ п	$X_i$	$\langle X \rangle$	$\Delta X_i$	$\Delta X_i^2$	$\sum \Delta X_i^2$	$S_{\langle X \rangle}$	$\Delta X_{\text{сл}}$	$t_{\alpha, n}$	$\Delta X_{\text{пр}}$	$X = \langle X \rangle \pm \Delta X$	$\varepsilon$
	мм	мм	мм	мм <sup>2</sup>	мм <sup>2</sup>	мм	мм		мм	мм	%
1											
2											
3											
4											
5											

При косвенных измерениях искомая величина определяется из результатов прямых измерений других величин, которые связаны с ней соответствующей функциональной зависимостью.

Пусть искомая величина  $y$  является функцией нескольких независимых переменных  $a, b, c$ . Например, в виде функции

$$y = a \cdot b^2 \cdot c^3.$$

Среднее арифметическое значение  $\langle y \rangle$  вычисляют, подставляя в формулу средние арифметические значения прямых измерений:

$$\langle y \rangle = \langle a \rangle \langle b \rangle^2 \langle c \rangle^3. \quad (1.5)$$

Относительную погрешность искомой величины вычисляют по формуле:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{\langle y \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(3\frac{\Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2} \quad \text{или} \quad \varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_a^2 + 4\varepsilon_b^2 + 9\varepsilon_c^2}, \quad (1.6)$$

где  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ ,  $\varepsilon_c$  – относительные погрешности соответствующих величин при прямых измерениях, взятые в долях единицы.

Находят абсолютную погрешность и доверительный интервал при заданной надежности  $\alpha$ :

$$\Delta y = \langle y \rangle \cdot \varepsilon_y. \quad (1.7)$$

Результаты записываются в виде:

$$y = \langle y \rangle \pm \Delta y. \quad (1.8)$$

## 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

В лаборатории механики наиболее часто используемыми измерительными приборами являются штангенциркуль, микрометр, микроскоп, весы, секундомер.

### 2.1. Измерение штангенциркулем

Штангенциркуль представляет собой линейку 1 (масштаб), разделенную на сантиметры и миллиметры (рис. 2.1, а). Линейка снабжена двумя ножками 2 и 5. Ножка 2 неподвижна. Измеряемое тело зажимается между ними.

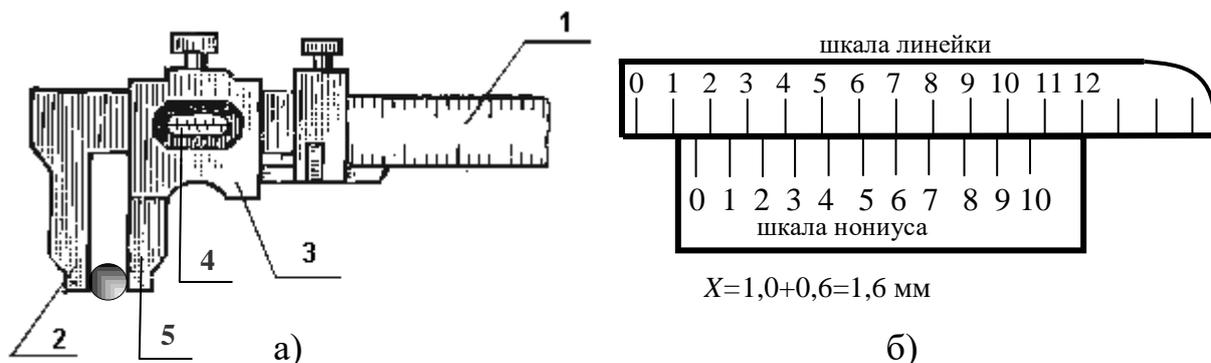


Рис. 2.1. Штангенциркуль

Для увеличения точности измерения штангенциркуль снабжен нониусом 3, который представляет собой короткую линейку 4, помещенную на подвижной ножке 5.

Расстояние между двумя соседними черточками нониуса не равно длине между двумя соседними черточками масштаба линейки. Иначе говоря, цена деления нониуса не равна цене деления основного масштаба.

Для измерения размера тела с помощью штангенциркуля необходимо:

1. Проверить установки штангенциркуля. Для этого следует сдвинуть ножки штангенциркуля до соприкосновения и посмотреть, совпадает ли нуль нониуса с нулем масштаба.

2. Измеряемый предмет зажимают между ножками штангенциркуля.

3. Берут отсчет по основной шкале и по нониусу (рис. 2.1. б). Результаты складывают, полученное значение и есть измеренное.

## **2.2. Измерение микрометром**

Более точные измерения (диаметр проволоки, толщину пластин) можно произвести микрометром (рис. 2.2). Микрометр состоит из скобы 1, на концах которой имеются цилиндрические отверстия с винтовыми нарезками. С левого конца рамки ввинчивается опорная пята 2, а с правого – микрометрический винт 3 с барабаном 6 и трещоткой 7.

Ход такого винта, т. е. расстояние по оси между двумя соседними делениями, равняется 0,5 мм за один оборот барабана 6. Поэтому винт при полном обороте перемещается поступательно на 0,5 мм. Винт 3 соединен с барабаном 6, вращающимся и перемещающимся вместе с винтом относительно неподвижного стебля 5, который закреплен на скобе 1. На барабан 6 по окружности нанесено 50 делений. Горизонтальная шкала стебля 5 представляет собой двойную шкалу, нанесенную по обе стороны продольной осевой черты-метки таким образом, что нижняя шкала сдвинута относительно верхней на 0,5 мм. Размер тела отсчитывают с точностью до 0,5 мм, а сотые доли миллиметра – по барабану 6 относительно осевой черты-метки. Для измерения размера тела с помощью микрометра нужно:

1. Определить цену деления линейной шкалы, т. е. установить, чему равняется расстояние между соседними черточками шкал, нанесенных вдоль продольной черты-метки стебля.

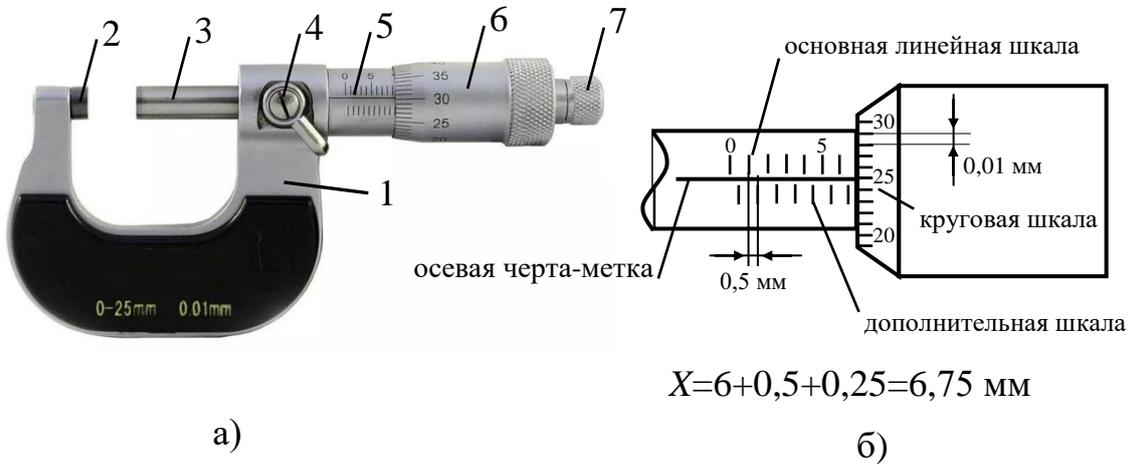


Рис. 2.2. Микрометр

2. Определить цену деления круговой шкалы барабана 6.

3. Проверить исправность микрометра. Для этого вращая головку 7 микрометра, привести конец винта 3 в соприкосновение с упором 2. При этом нулевое деление круговой шкалы (на барабане 6) должно совпадать с чертой-меткой неподвижной шкалы на стебле.

4. Измеряемый предмет зажать между концом винта 3 и упором 2. Как только конец винта 3 достигнет измеряемого предмета, вращение головки с трещоткой 7 будет вхолостую, винт не будет перемещаться. Это устраняет ошибку на измерительное усилие.

5. По положению края вращающегося барабана и в соответствии с найденной ценой деления линейной шкалы выразить сделанный отсчет в сотых долях миллиметра.

6. Сложить отсчеты по линейной и круговой шкалам (рис. 2.2. б). При необходимости проверить себя с помощью штангенциркуля.

### 3. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ

Построение графиков является важной частью представления результатов измерений физических величин и отображения их взаимосвязей.

При построении графиков необходимо пользоваться следующими правилами:

1. Построить координатные оси с учетом выбранного удобного масштаба. Если результаты измерений далеко за пределами нулевых отметок и если не требуется привязки к нулевой отметке по условиям задачи, то совсем необязательно, чтобы пересечение осей координат совпадало с началом отсчета по каждой оси (рис. 3.1).

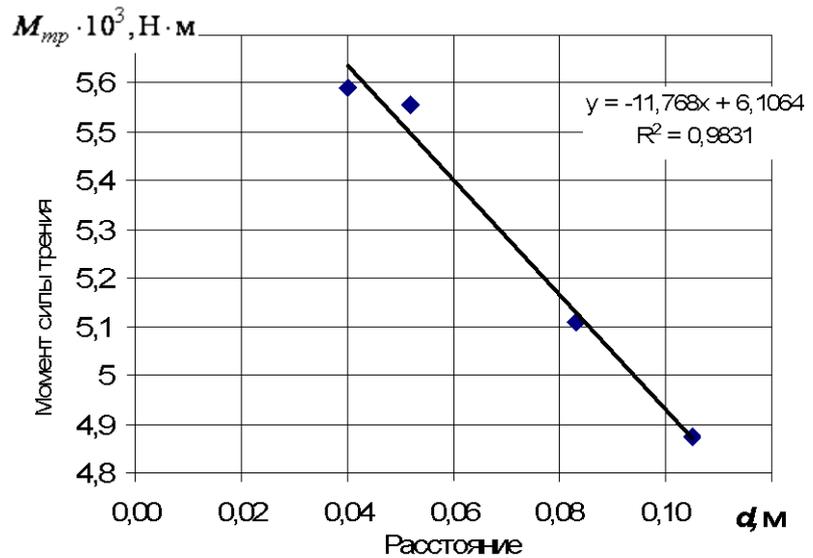


Рис. 3.1. График зависимости  $M_{тр} = f(d)$

2. Возле каждого конца осей координат указывается измеряемая физическая величина с множительным коэффициентом и единиц измерений, например  $M_{тр} \cdot 10^3$ , Н·м или  $M_{тр}$ ,  $10^{-3}$  Н·м – это эквивалентные формы записи обозначений осей, что соответствует тому, что число, соответствующее точке на оси координат, необходимо разделить на  $10^3$  – в первом варианте, чтобы получить измеренную величину  $M_{тр} = 5,6 \cdot 10^{-3}$  Н·м, а во втором – умножить на  $10^{-3}$  (рис. 3.1).

3. Через экспериментальные точки проводится линия таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений  $S_i$  экспериментальных точек от линии принимало минимальное значение

$\sum_{i=1}^n S_i^2 = \min$ . В программе Microsoft Excel этой линией является

линия тренда, для которой записывается уравнение и указывается коэффициент достоверности аппроксимации.

#### 4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ И МОМЕНТА СИЛ ТРЕНИЯ В ОПОРЕ

**1. Цель работы:** освоить экспериментальный метод определения момента инерции тела с массой, равномерно распределённой относительно оси вращения, и момента сил трения в опоре.

#### 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – §§ 3.4, 4.1–4.3; [2] – §§ 13, 16–18; [3] – §§ 35, 36. Для выполнения работы студент должен: а) знать законы динамики поступательного и вращательного движения твердого тела и закон изменения энергии; б) уметь пользоваться измерительными приборами; в) уметь рассчитывать погрешности измерений.

#### 3. Выполнение работы

##### 3.1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка представляет собой маховик 2 с валом 1, на котором подвязана нить с грузом 3 (рис. 4.1).

Нить наматывается на вал 1 до тех пор, пока нижнее основание груза 3 не поднимется до уровня, соответствующего координате  $y_0 = 0$ . Механическая энергия груза в этом состоянии (начальная скорость  $v = 0$ ) равна его потенциальной энергии  $U = mg(y_1 - y_0)$ , где  $y_1$  – максимальная координата, которую может достичь нижнее основание груза.

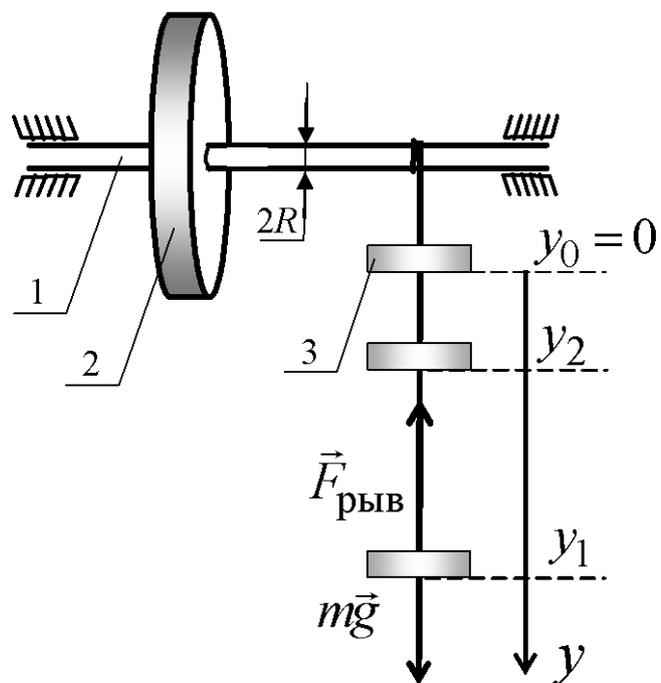


Рис. 4.1. Схема установки

Механическая энергия рассматриваемой системы равна

$$E_1 = mg(y_1 - y_0) + E_{\text{рм}} = mgy_1 + E_{\text{рм}},$$

где  $E_{\text{рм}}$  – потенциальная энергия маховика с валом;  $mgy_1$  – потенциальная энергия груза.

Предоставим грузу возможность опускаться под действием силы тяжести. Через время  $t_1$  нить полностью разматывается, нижнее основание груза достигает координаты  $y_1$ , скорость  $v$  груза и угловая скорость  $\omega$  махового колеса с валом радиусом  $R$  принимают свои максимальные значения

$$v = 2y_1 / t_1; \quad (4.1)$$

$$\omega = 2y_1 / (Rt_1). \quad (4.2)$$

В точке с координатой  $y_1$  груз на мгновение останавливается, а маховое колесо продолжает вращаться в ту же сторону. Причем линейная скорость его точек, лежащих на ободке, равна  $v$ . Поэтому происходит переброс нити на валу, и груз начинает подниматься вверх. Пренебрегая изменением угловой скорости за время, в течение которого маховое колесо поворачивается на угол, равный  $\pi$  (и направление скорости движения груза изменяется на противоположное), можно оценить время  $\Delta\tau$  переброса нити на валу (время «рывка» груза)

$$\Delta\tau = \pi R / v. \quad (4.3)$$

При движении груза вверх маховое колесо вращается замедленно, и через время  $t_2$  маховое колесо и груз останавливаются. Нижнее основание груза при этом имеет координату  $y_2$ , и механическая энергия системы при этом равна  $E_3$ :

$$E_3 = mg(y_1 - y_2) + E_{\text{рм}}. \quad (4.4)$$

## 3.2. Экспериментальное определение момента инерции маховика с валом

**3.2.1.** Измерьте координату  $y_1$ , радиус вала  $R$ ; массу груза, подвешенного на нити –  $m_1$ ; массу груза  $m_2 = m_1 + \Delta m_1$ , где  $\Delta m_1$  – масса первого дополнительного груза; масса груза  $m_3 = m_2 + \Delta m_2$ , где  $\Delta m_2$  – масса второго дополнительного груза. Значения  $y_1$ ,  $R$  и  $m$  занесите в табл. 4.1 и 4.2.

**3.2.2.** Для каждого груза произведите не менее пяти измерений времени  $t_1$  опускания груза и координаты  $y_2$  (измерения координаты  $y_2$  будут более точными, если маховик в момент остановки зафиксировать рукой); результаты измерений занесите в табл. 4.1; найдите средние значения  $\langle t_1 \rangle$  и  $\langle y_2 \rangle$ . Результаты занесите в табл. 4.2.

Таблица 4.1

*Результаты измерений времени  $t_1$  опускания грузов  
разной массы и координаты  $y_2$*

№ п/п	$m_1 =$ кг		$m_2 =$ кг		$m_3 =$ кг	
	$t_1$	$y_2$	$t_1$	$y_2$	$t_1$	$y_2$
	с	м	с	м	с	м
1						
2						
3						
4						
5						
среднее						
	$y_0 =$ м		$y_1 =$ м		$R =$ м	

**3.2.3.** По формуле

$$I = mR^2 \left[ gt_1^2 \frac{y_1 - y_2}{y_1(2y_1 - y_2)} - 1 \right]$$

вычислите момент инерции  $I$  маховика с валом; найдите среднее значение  $\langle I \rangle$ .

Таблица 4.2

*Результаты расчета момента силы трения*

№ п/п	$m$	$\langle t_1 \rangle$	$\langle y_2 \rangle$	$I$	$M_{\text{тр}}$
	кг	с	м	кг·м <sup>2</sup>	Н·м <sup>2</sup>
1					
2					
3					
$\langle I \rangle =$		кг·м <sup>2</sup>		$\langle M_{\text{тр}} \rangle =$	
				Н·м <sup>2</sup>	

**3.2.4.** Определите максимальную кинетическую энергию груза и максимальную кинетическую энергию маховика с валом; найдите потенциальную энергию груза  $mg(y_1 - y_0)$ . Сравните максимальную кинетическую энергию системы с потенциальной энергией груза.

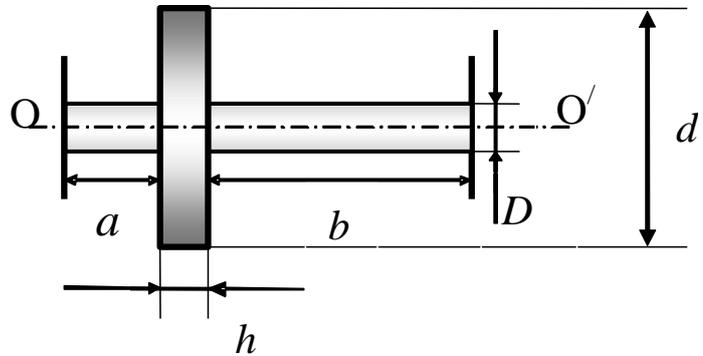


Рис. 4.2. Геометрические размеры маховика с валом

### 3.3. Определение момента силы трения в опоре

**3.3.1.** По результатам измерений, произведенных в первом задании, с помощью формулы  $M_{\text{тр}} = mgRy_2 / (2y_1 - y_2)$  вычислите момент силы трения относительно оси вращения. Результаты вычислений занесите в табл. 4.2.

### 3.4. Теоретический расчёт момента инерции маховика с валом

**3.4.1.** Измерьте величины, указанные на рис. 4.2, где  $a$ ,  $b$  – отрезки длины вала;  $d$  – диаметр махового колеса;  $h$  – толщина махового колеса.

**3.4.2.** Используя формулу  $I = \frac{1}{2} mR^2$ , рассчитайте момент инерции маховика и вала  $I_{\text{теор}} = I_{\text{мах}} + I_{\text{вал}}$ . Плотность материала, из которого изготовлены вал и маховик,  $\rho = 7,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**3.4.3.** Найдите относительное расхождение между  $I_{\text{теор}}$  и  $\langle I \rangle$  по формуле

$$\varepsilon_I = \frac{|I_{\text{теор}} - \langle I \rangle|}{\langle I \rangle} \cdot 100\%,$$

где  $\langle I \rangle$  – среднее значение момента инерции из табл. 4.1.

### 3.5. Оценка погрешности произведённых вычислений момента инерции маховика с валом

3.5.1. Погрешности измерений связаны с измерением времени, расстояний  $y_1$  и  $y_2$ , а также геометрических размеров маховика с валом. Относительную погрешность определения момента инерции рассчитать по формуле

$$\varepsilon_I = \sqrt{\varepsilon_R^2 + (2\varepsilon_{t_1})^2 + 2\varepsilon_{y_1}^2 + 2\varepsilon_{y_2}^2}.$$

### 3.6. Сделайте вывод.

## 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.

### ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ ТЕЛА ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**1. Цель работы:** освоить экспериментальный метод определения массы тела, равномерно распределённой относительно оси вращения.

#### 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – §§ 4.1–4.3; [2] – §§ 12, 13, 16, 18; [3] – §§ 35, 36. Для выполнения работы студент должен: а) знать законы динамики поступательного и вращательного движения и закон изменения энергии; б) уметь пользоваться измерительными приборами; в) уметь рассчитывать погрешности измерений; г) знать устройство установки и порядок измерений.

#### 3. Выполнение работы

##### 3.1. Описание лабораторной установки

Лабораторный комплекс «Механика» выполнен в виде панели 1 (рис. 5.1), на которой размещены универсальная вращающаяся подвеска 2 для укрепления на ней сменных модулей и таймер 3. Вращающаяся подвеска представляет собой вал, имеющий форму конусной втулки 4, со шкивом 5 на подшипниках. В данной работе на конусную втулку надевается маховое колесо. Комплекс оснащен схемой автоматической регистрации измеряемых параметров (числа колебаний и времени колебаний). Время фиксируется электронным секундомером, измеряемые параметры вносятся в память программируемого микрокалькулятора МК-56

и высвечиваются на его табло. Для автоматического запуска таймера и счетчика числа импульсов (колебаний) в корпус вала вмонтирован магнит, а на неподвижной панели укреплен магнитоуправляемый контакт.

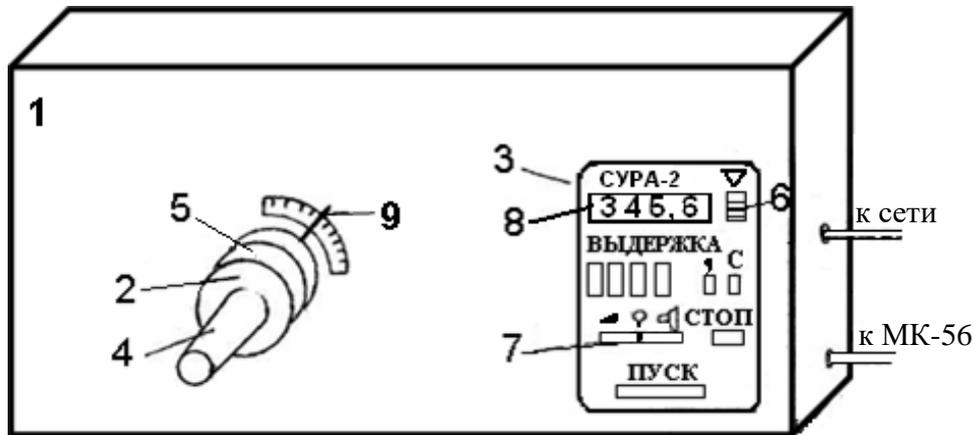


Рис. 5.1. Лабораторный измерительный комплекс «Комплекс»

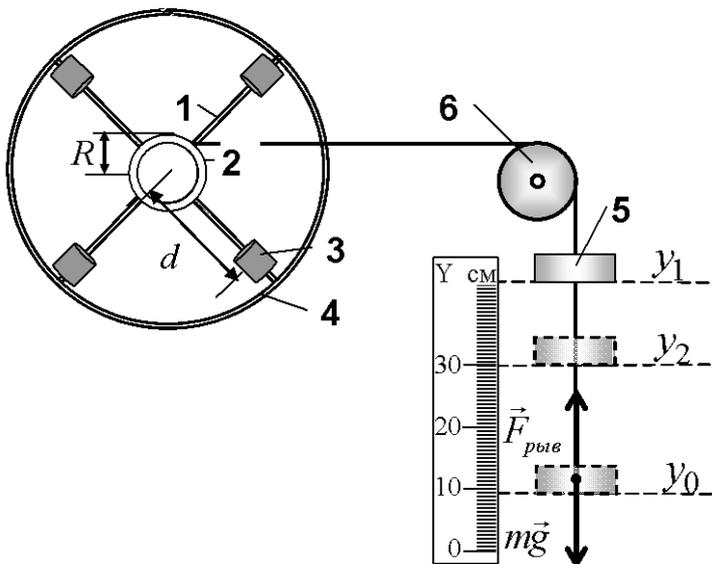


Рис. 5.2. Маховое колесо с грузом

дом 4. К шкиву, закрепленному соосно с втулкой 2, привязана нить, переброшенная через легко вращающийся невесомый ролик 6. К другому концу нити привязан груз 5. Под действием силы тяжести, действующей на груз 5, нить разматывается и приводит во вращательное движение маховое колесо.

Работа может выполняться и в ручном режиме (без МК-56).

Маховое колесо состоит из четырех взаимно перпендикулярных стержней 1, закрепленных на втулке 2 (рис. 5.2). На стержнях могут помещаться грузы одинаковой массы 3 (по одному на каждом стержне). Положение стержней дополнительно фиксируется обо-

### 3.2. Методика измерений и расчёта

Рассмотрим систему тел, состоящую из махового колеса 1, укрепленного на валу 2, и груза 5 массой  $m$ , закреплённого на нити, другой конец которой наматывается на вал радиуса  $R$  (рис. 5.2).

Для описания поступательного движения груза выбираем ось  $Y$ , направленную вертикально вверх (рис. 5.2). Перед началом измерений нить полностью раскручена, нижнее основание груза находится на уровне, соответствующем координате  $y_0$ . Потенциальная энергия махового колеса с валом  $U_M$  остаётся неизменной во всё время эксперимента и, поэтому ее не учитываем.

Нить наматывается на вал до тех пор, пока нижнее основание груза не поднимется до уровня, соответствующего координате  $y_1$ . Механическая энергия груза в этом состоянии (начальная скорость  $v = 0$ ) равна его потенциальной энергии  $U_r = mg(y_1 - y_0)$ , тогда механическая энергия рассматриваемой системы тел равна

$$E_1 = mg(y_1 - y_0). \quad (5.1)$$

Предоставим грузу возможность опускаться под действием силы тяжести. Тогда потенциальная энергия груза будет переходить в кинетическую энергию поступательного движения груза и кинетическую энергию вращательного движения махового колеса с валом. Через время  $t_1$  нить полностью разматывается, нижнее основание груза достигает координаты  $y_0$ , скорость  $v$  груза и угловая скорость  $\omega$  махового колеса с валом принимают при этом свои максимальные значения

$$v = \frac{2(y_1 - y_0)}{t_1}; \quad (5.2)$$

$$\omega = \frac{2(y_1 - y_0)}{Rt_1}. \quad (5.3)$$

В точке с координатой  $y_0$  груз на мгновение останавливается, а маховое колесо продолжает вращаться в ту же сторону по инерции. Это приводит к перебросу нити на валу, и груз начинает подниматься вверх. При движении груза вверх маховое колесо вращается замедленно, и через время  $t_2$  после переброса нити

маховое колесо и груз останавливаются. Нижнее основание груза при этом имеет координату  $y_2$ , а механическая энергия системы тогда равна  $E_3$

$$E_3 = mg(y_2 - y_0). \quad (5.4)$$

### **3.3. Подготовка лабораторного стенда к работе. Порядок работы с таймером СУРА-2**

**3.3.1.** Перед включением таймера в сеть выключатель питания 6 (рис. 5.1) должен находиться в нижнем положении, переключатель режимов 7 – в положении « $\cup$ ».

**3.3.2.** Подключив лабораторный комплекс к сети, установите переключатель 6 в положение « $\nabla$ ».

**3.3.3.** Для приведения таймера в исходное состояние нажмите первые три клавиши выдержки, затем клавишу «9» и четвертую клавишу выдержки. На табло высветятся четыре произвольно набранные Вами цифры, например, 345,6. При таком наборе время измеряется с точностью до десятых долей секунды. Перенесение запятой влево повышает точность измерений на порядок.

**3.3.4.** При запуске таймера с 345,6, отсчет времени начинается после нажатия клавиши «пуск». При этом на индикаторе 8 идет отсчет времени в обратном счете. При нажатии клавиши «стоп» счет времени прекращается. Пусть новое показание на табло будет 324,1. Тогда искомое время равно

$$\Delta t = 345,6 - 324,1 = 21,5 \text{ (с)}.$$

### **3.4. Определение массы грузиков на спицах махового колеса, находящихся на одинаковом расстоянии от оси вращения**

**3.4.1.** Измерьте координаты  $y_0$ ,  $y_1$ , радиус вала  $R$ , массу  $m$  груза, подвешенного на нити. Значения  $y_0$ ,  $y_1$ ,  $R$  и  $m$  занесите в табл. 5.1 (см. рис. 5.2).

**3.4.2.** Установите грузики на спицах на одинаковых расстояниях от оси вращения  $d_1$ . Изменяя расстояние  $d$  (одно из четырех положений), для каждого его значения, произведите не менее пяти измерений координаты  $y_2$  и времени  $t_1$  опускания груза от  $y_0$  до  $y_1$ . Измерения координаты  $y_2$  будут более точными, если маховик в момент остановки зафиксировать рукой. Результаты

измерений занесите в табл. 5.1; найдите средние значения  $\langle t_1 \rangle$  и  $\langle y_2 \rangle$ . Результаты занесите в табл. 5.2.

**3.4.3.** По формуле

$$I = mR^2 \left[ gt_1^2 \frac{(y_2 - y_0)}{(y_1 - y_0)(y_1 + y_2 - 2y_0)} - 1 \right]$$

вычислите момент инерции  $I$  махового колеса с грузиками.

Таблица 5.1

Результаты измерений времени опускания груза  $t_1$   
и координаты  $y_2$

№ п/п	$d_1 =$ м		$d_2 =$ м		$d_3 =$ м		$d_4 =$ м	
	$t_1$	$y_2$	$t_1$	$y_2$	$t_1$	$y_2$	$t_1$	$y_2$
	с	м	с	м	с	м	с	м
1								
2								
3								
4								
5								
среднее								
	$y_0 =$ м		$y_1 =$ м		$R =$ м		$m =$ кг	

Таблица 5.2

Результаты расчета массы грузиков на спицах махового колеса

№ п/п	$d$	$\langle t_1 \rangle$	$\langle y_2 \rangle$	$v$	$\omega$	$I$	$I_0$	$\text{tg} \alpha$	$m_1$
	м	с	м	м/с	рад/с	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>		кг
1									
2									
3									
4									

**3.4.4.** Построить график зависимости  $I = f(d^2)$ . Аппроксимируя экспериментальные точки прямой, найдите по графику  $I_0$  – момент инерции махового колеса без грузиков – пересечение

прямой с осью  $Y$ . По графику определите  $m_1 = \frac{1}{4} \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I}{4\Delta d^2}$ , где  $\Delta I = I - I_0$ . Результат сравните с расчетом массы одного грузика  $m_1$  по формуле  $m_1 = \rho V$ , где  $V$  – объем тела;  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$  – плотность материала.

### 3.5. Определение момента силы трения в опоре

**3.5.1.** По результатам измерений, произведенных в первом задании, с помощью формулы  $M_{\text{тр}} = \frac{mgR(y_1 - y_2)}{(y_1 + y_2 - 2y_0)}$  вычислите момент силы трения  $M_{\text{тр}}$  относительно оси вращения для каждого значения  $d$ . Результаты вычислений занесите в табл. 5.3. Постройте график зависимости  $M_{\text{тр}} = f(d)$ .

Таблица 5.3

*Результаты расчета момента силы трения  
и энергии системы тел*

№ П/П	$d$	$I$	$M_{\text{тр}}$	$A_{\text{тр}}$	$T_{\Gamma}$	$T_{\text{м}}$	$U$	$T_{\text{max}}$	$\varepsilon$
	м	кг·м <sup>2</sup>	Н·м	Дж	Дж	Дж	Дж	Дж	%
1									
2									
3									
4									

**3.5.2.** Определите работу сил трения  $A_{\text{тр}}$  в системе связанных тел по формуле  $A_{\text{тр}} = -M_{\text{тр}} \frac{(y_1 + y_2 - 2y_0)}{R}$ . Результаты вычислений занесите в табл. 5.3.

**3.5.3.** Определите максимальную кинетическую энергию груза  $T_{\Gamma}$  и максимальную кинетическую энергию  $T_{\text{м}} = \frac{J\omega^2}{2}$  махового колеса с валом; найдите потенциальную энергию груза  $U = mg(y_1 - y_0)$ . Сравните максимальную кинетическую энергию системы  $T_{\text{max}} = T_{\Gamma} + T_{\text{м}}$  с потенциальной энергией груза  $U$ .

**3.5.4.** Рассчитайте погрешность измерений момента инерции махового колеса.

**3.6.** Сделайте вывод о выполнении закона сохранения энергии в системе связанных тел.

## **6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПУЛИ С ПОМОЩЬЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА**

**1. Цель работы:** освоить метод определения скорости пули с помощью баллистического маятника.

### **2. Подготовка к работе**

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – §§ 5.1, 5.2; [2] – §§ 11–13, 15; [3] – §§ 24, 28. Для выполнения работы студент должен: а) знать законы сохранения энергии и импульса; б) уметь пользоваться измерительными приборами; в) уметь рассчитывать погрешности измерений; г) знать устройство установки и порядок измерений.

### **3. Выполнение работы**

#### **3.1. Описание лабораторной установки**

Баллистический маятник (рис. 6.1) представляет собой прикрепленный к подвесу 1 длинный жесткий стержень с массивным цилиндром 2, заполненным пластилином. В цилиндр в горизонтальном направлении производят выстрел пулей из пружинного пистолета 4, неподвижно закреплённого вблизи маятника. Пуля попадает в пластилин, застревает в нём и дальше продолжает двигаться вместе с маятником вдоль оси  $X$ . Максимальное отклонение маятника от положения равновесия фиксируется механизмом 3.

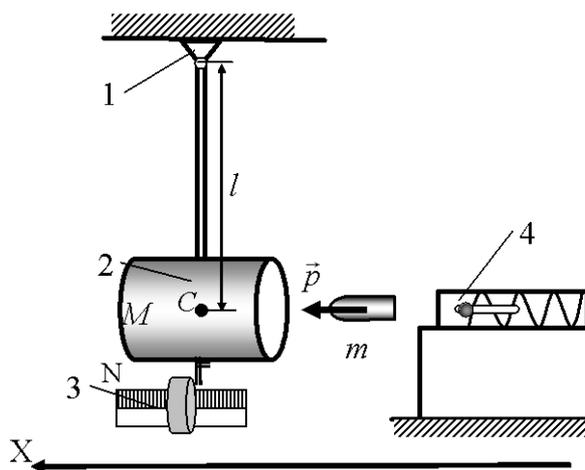


Рис. 6.1. Схема установки

### 3.2. Определение скорости полета пули

**3.2.1.** Произведите выстрел пуль из пружинного пистолета. Измерьте горизонтальное смещение  $x$  баллистического маятника при попадании в него пули массой  $m_1$ . Эксперимент повторите пять раз. Заполните табл. 6.1.

**3.2.2.** По известной массе пули и баллистического маятника рассчитайте постоянную установки  $C = \frac{m+M}{m} \sqrt{\frac{g}{l}}$ , затем среднее значение смещения  $\langle x \rangle$  и среднюю скорость  $\langle v \rangle = C \langle x \rangle$ .

Таблица 6.1

*Результаты определения скорости первой пули*

№ п/п	$m_1$	$x_i$	$\langle x \rangle$	$M$	$C_1$	$\langle v \rangle$
	кг	м	м	кг	1/с	м/с
1						
2						
3						
4						
5						

### 3.3. Исследование зависимости скорости пули от ее массы

**3.3.1.** Проведите трехкратные измерения горизонтального смещения  $x$  маятника для каждой из двух других пуль массами  $m_2$  и  $m_3$  и занесите данные в табл. 6.2 и табл. 6.3, составленные аналогично табл. 6.1. Найдите  $\langle x \rangle$  для каждой из этих пуль.

**3.3.2.** Вычислите скорости каждой из пуль. Результаты вычислений занесите в табл. 6.4.

**3.3.3.** По табл. 6.4 постройте график зависимости скорости пули  $v$  от величины  $\sqrt{\frac{1}{m}}$ , т. е.  $v = f\left(\sqrt{\frac{1}{m}}\right)$ .

**3.3.4.** Рассчитайте абсолютную погрешность (границы доверительного интервала) прямого измерения горизонтального смещения  $x_i$  при выстреле первой пули. Занесите в табл. 6.5, аналогичную табл. 1.2, составленную самостоятельно.

Рассчитайте относительную погрешность определения скорости пули.

### 3.4. Сделайте вывод.

Таблица 6.4

Результаты определения скорости пуль различной массой

№ п/п	$m_i$	$\frac{1}{\sqrt{m_i}}$	$\langle x_i \rangle$	$C_i$	$\langle v_i \rangle = C_i \langle x_i \rangle$
	кг	кг <sup>-1/2</sup>	м	1/с	м/с
1					
2					
3					

## 7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

**1. Цель работы:** освоить метод определения кинематических и динамических параметров поступательного и вращательного движений тел с помощью маятника Обербека.

#### 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – §§ 4.1–4.3; [2] – §§ 4, 18, 19; [3] – §§ 24–28. Для выполнения работы студент должен: а) знать законы динамики поступательного и вращательного движения; б) знать основные уравнения кинематики; в) уметь пользоваться измерительными приборами; г) знать порядок выполнения работы, методику проведения измерений на установке.

#### 3. Выполнение работы

##### 3.1. Описание лабораторной установки

Общий вид лабораторной установки изображен на рис. 7.1.

Маятник Обербека представляет собой двухступенчатый шкив 1 радиусами  $r_1$  и  $r_2$  с четырьмя стержнями, расположенными радиально и перпендикулярно друг другу. На стержнях закрепляются симметрично относительно оси вращения четыре цилиндрических груза 2 массой  $m_T$ . На шкив (малый или большой)

наматывается нить, к свободному концу нити подвешивается груз 4 массой  $m$ . Груз, двигаясь поступательно, разматывает нить, при этом крестообразный маятник совершает вращательное движение вокруг неподвижной оси. Время опускания груза с высоты  $h$  от планки 10 измеряется миллисекундомером 5, включение и выключение которого осуществляется посредством тумблера 6, кнопкой «стоп» 7 или датчиком тормозной площадки 9 при соприкосновении с грузом. Работа датчика согласована с работой тормозного электромагнита 3, который с помощью фрикционной муфты удерживает крестообразный маятник и груз в состоянии покоя.

### 3.2. Методика измерений и расчёта

Расчетная схема показана на рис. 7.2. Сила тяжести груза  $m\vec{g}$  должна быть достаточной для обеспечения его равноускоренного движения.

По измеренным значениям  $h$  и  $t$  рассчитывается ускорение груза

$$a = \frac{2h}{t^2} \quad (7.1)$$

и его скорость в конце движения

$$v = at = \frac{2h}{t}, \quad (7.2)$$

где  $t$  – время его движения.

Угловая скорость и угловое ускорение маятника Обербека находятся по формулам:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h}{rt}; \quad (7.3)$$

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{2h}{rt^2}. \quad (7.4)$$

Угол поворота маятника  $\varphi$  за время  $t$  движения груза равен

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{h}{r}, \quad (7.5)$$

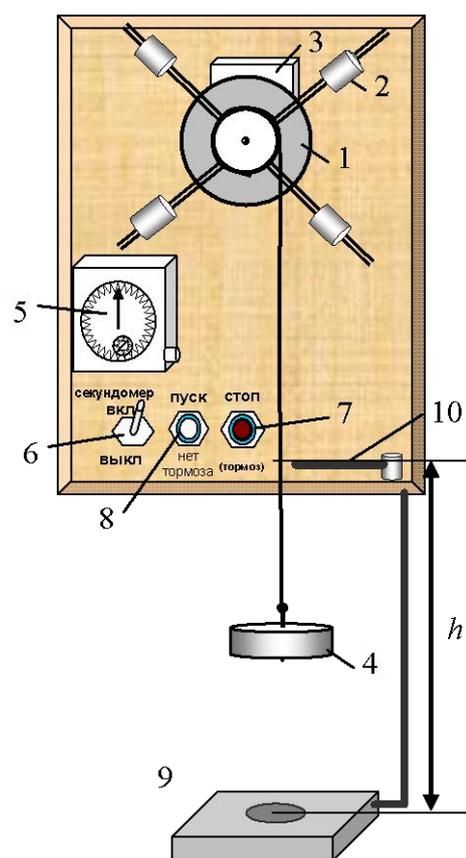


Рис. 7.1. Схема установки

где  $r$  – радиус шкива.

За это время маятник сделает  $N$  оборотов:

$$N = \varphi / 2\pi. \quad (7.6)$$

В проекции на ось  $OY$  уравнение динамики поступательно-го движения груза имеет вид (рис. 7.2)

$$ma = mg - F_H,$$

$$F_H = m(g - a). \quad (7.7)$$

Маятник Обербека находится под действием силы тяжести, силы натяжения нити  $\vec{F}_H$  (рис. 7.2) и силы трения  $\vec{F}_{тр}$  в подшипнике маятника. Уравнение динамики вращательного движения маятника относительно оси вращения:

$$M_H - M_{тр} = J\varepsilon, \quad (7.8)$$

где  $J$  – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс;  $\varepsilon$  – его угловое ускорение;  $M_H$ ,  $M_{тр}$  – момент силы натяжения нити и момент сил трения.

Моментом силы трения в данной работе предлагается пренебречь,  $M_{тр} = 0$ .

Модуль момента силы натяжения нити

$$M_H = r \cdot F_H \sin 90^\circ. \quad (7.9)$$

Из уравнения (7.8) выразим момент инерции маятника:

$$J = \frac{M_H}{\varepsilon} = \frac{r \cdot F_H}{\varepsilon}. \quad (7.10)$$

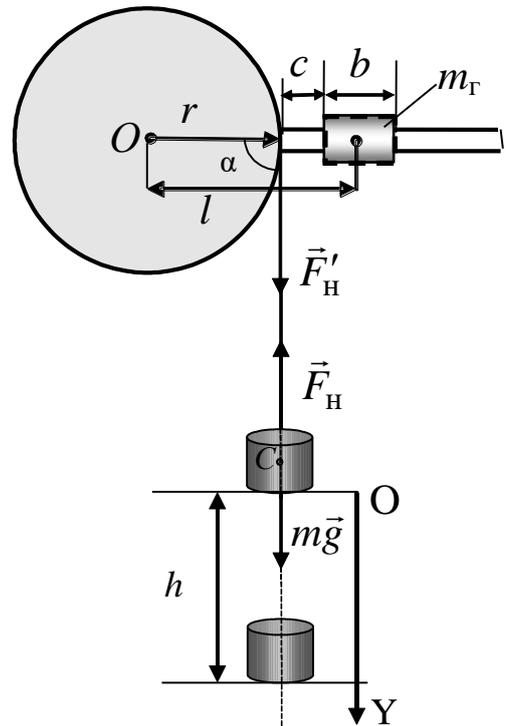


Рис. 7.2. Расчетная схема

### 3.3. Измерение кинематических характеристик

**3.3.1.** Включите сетевой шнур установки в сеть. Тумблер 6 (см. рис. 7.1) должен находиться в положении «секундомер выключен». Нажмите клавишу «сброс» на секундомере, при этом происходит обнуление показаний миллисекундомера.

**3.3.2.** Нажмите кнопку 8 «пуск – нет тормоза»! Закрепите нить с подвешенным грузом на одном из шкивов и, вращая маятник, намотайте нить на шкив, подняв груз на фиксированную высоту  $h$ .

**3.3.3.** Нажмите кнопку 7 «стоп» – тормоз включен. Тормозной электромагнит включается, удерживая груз в заданном положении. Установите тормозную площадку точно под грузом.

**3.3.4.** Переведите тумблер 6 в положение «секундомер включен». Нажмите кнопку 8 «пуск – нет тормоза». Тормозной электромагнит отключается, груз начинает опускаться, миллисекундомер отсчитывает время движения груза. Когда груз опустится на тормозную площадку, автоматически включится тормозной электромагнит и отсчет времени прекратится.

Переведите тумблер 6 в положение «секундомер выключен, уберите груз с тормозной площадки.

**3.3.5.** Далее повторяя последовательно пункты **3.3.1–3.3.4** проделайте опыт три раза с грузами массами  $m_1$  и  $m_2$  на шкивах радиусами  $r_1$  и  $r_2$ . Измеренные значения времени занесите в табл. 7.1.

**3.3.6.** Рассчитайте среднее значение времени  $\langle t \rangle$  в каждой серии опытов, а по ним – средние значения кинематических характеристик;  $\langle \varphi \rangle$  – угол поворота маятника, рассчитанный по

формуле  $\langle \varphi \rangle = \frac{\langle \varepsilon \rangle \langle t \rangle^2}{2}$  ;  $\langle N \rangle$  – число оборотов маятника за время движения груза:

$$\langle N \rangle = \langle \varphi \rangle / 2\pi.$$

**3.3.7.** Укрепите на спицах четыре цилиндрических груза массой  $m_T$  каждый вплотную к барабану маятника. Расстояние  $l$  от центра масс груза до оси вращения  $O$  равно (рис. 7.2):

$$l = r + \frac{b}{2} + c,$$

где  $r$  – радиус барабана маятника;  $b$  – высота груза;  $c$  – расстояние от барабана маятника до груза.

Таблица 7.1

*Результаты измерений времени  
и расчета кинематических величин*

$r$	$m$	№	$t$	$\langle t \rangle$	$\langle v \rangle$	$\langle a \rangle$	$\langle \varepsilon \rangle$	$\langle \omega \rangle$	$\langle \varphi \rangle$	$\langle N \rangle$
м	кг	П/П	с	с	м/с	м/с <sup>2</sup>	с <sup>-2</sup>	с <sup>-1</sup>	рад	об
$r_1 =$	$m_1$	1								
		2								
		3								
	$m_2$	1								
		2								
		3								
$r_2 =$	$m_1$	1								
		2								
		3								
	$m_2$	1								
		2								
		3								

**3.3.8.** Намотайте на шкив большего радиуса  $r_2$  нить с грузом массы  $m_2$ . Измерьте три раза время движения груза  $t$ . Результаты измерений времени занесите в табл. 7.2.

**3.3.9.** Повторите измерения по п. 3.3.8 для двух других разных значений  $l$  (среднее и крайнее положения грузов на спицах).

**3.3.10.** Рассчитайте указанные в табл. 7.2 кинематические характеристики груза и маятника по формулам (7.1)–(7.6).

### **3.4. Определение динамических характеристик маятника и грузов**

**3.4.1.** Внесите в табл. 7.3 значения массы грузов, радиусов шкивов, а результаты вычисления ускорения и скорости грузов возьмите из табл. 7.2.

Таблица 7.2

Результаты измерений времени, расстояний  $l$   
и расчета кинематических величин

$l$	№	$t$	$\langle t \rangle$	$\langle v \rangle$	$\langle a \rangle$	$\langle \omega \rangle$	$\langle \varepsilon \rangle$
м	п/п	с	с	м/с	м/с <sup>2</sup>	с <sup>-1</sup>	с <sup>-2</sup>
	1						
	2						
	3						
	1						
	2						
	3						
	1						
	2						
	3						

**3.4.2.** Рассчитайте силу натяжения  $F_n$  нити по (7.7), импульс  $P$  и кинетическую энергию  $E_{к1}$  груза во всех четырех сериях опытов по средним значениям  $\langle a \rangle$  и  $\langle v \rangle$ , а также потенциальную энергию грузов ( $E_{п} = mgh$ ). Результаты расчетов внесите в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Расчет характеристик поступательного движения

Радиус шкива	Масса	$\langle a \rangle$	$F_n$	$\langle v \rangle$	$P$	$E_{к1}$	$E_{п}$
м	кг	м/с <sup>2</sup>	Н	м/с	кг·м/с	Дж	Дж
$r_1 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						
$r_2 =$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						

**3.4.3.** Внесите в табл. 7.4 значения  $r$ ,  $m$ ,  $\langle \varepsilon \rangle$ ,  $\langle \omega \rangle$  из табл. 7.1.

**3.4.4.** Используя формулы (7.9)–(7.10) заполните табл. 7.4.

Таблица 7.4

## Расчет характеристик вращательного движения

Радиус шкива	Масса	$\langle \varepsilon \rangle$	$\langle \omega \rangle$	$M_H$	$J$	$L$	$E_{к2}$
м	кг	$c^{-2}$	$c^{-1}$	Н·м	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup> ·с <sup>-1</sup>	Дж
$r_1$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						
$r_2$	$m_1 =$						
	$m_2 =$						

**3.4.5.** Рассчитайте момент импульса  $L = J\omega$  и кинетическую энергию  $E_{к2} = \frac{J\omega^2}{2}$  маятника Обербека для всех четырех серий опытов. Результаты занесите в табл. 7.4.

**3.4.6.** Постройте график  $\varepsilon = f(M_H)$ .

**3.5. Исследование зависимости момента инерции маятника от его массы и ее распределения относительно оси вращения**

**3.5.1.** Рассчитайте момент инерции для трех разных положений грузов на спицах по формуле  $J = \frac{M_H}{\varepsilon}$  с использованием значений  $\langle \varepsilon \rangle$  из табл. 7.2.

**3.5.2.** Заполните табл. 7.5.

Таблица 7.5

## Расчет момента инерции маятника при разных положениях грузов до оси вращения

	$l$	$\langle \varepsilon \rangle$	$M_H$	$J$
	м	$c^{-2}$	Н·м	кг·м <sup>2</sup>
Без грузов на спицах (табл. 7.4)	—			
С грузами на спицах (табл. 7.2)	$l_1 =$			
	$l_2 =$			
	$l_3 =$			

**3.5.3.** Постройте график  $\varepsilon = f(J)$ .

**3.6. Сделайте вывод.**

## 8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5.

### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗАННЫХ ТЕЛ

**1. Цель работы:** освоить метод экспериментального определения кинематических и динамических параметров движения связанных тел.

#### 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – §§ 3.4, 4.1–4.3; [2] – §§ 11–13, 16–19. Для выполнения работы студент должен: а) знать законы динамики поступательного и вращательного движения и закон сохранения энергии; б) уметь пользоваться измерительными приборами; в) знать порядок выполнения работы, методику проведения измерений на установке; г) уметь рассчитывать погрешности измерений.

#### 3. Выполнение работы

##### 3.1. Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка состоит из стойки с укрепленным на ней с помощью подшипника шкива и столика, жестко связанного со шкивом.

Шкив и столик имеют общую ось вращения (рис. 8.1). На шкив наматывается нить. Ко второму концу нити, перекинутой через неподвижный блок, подвешивается груз массой  $m$ . Опускаясь с высоты  $h$ , груз приводит во вращательное движение шкив со столиком. В работе изучается движение системы связанных тел – груза и шкива со столиком.

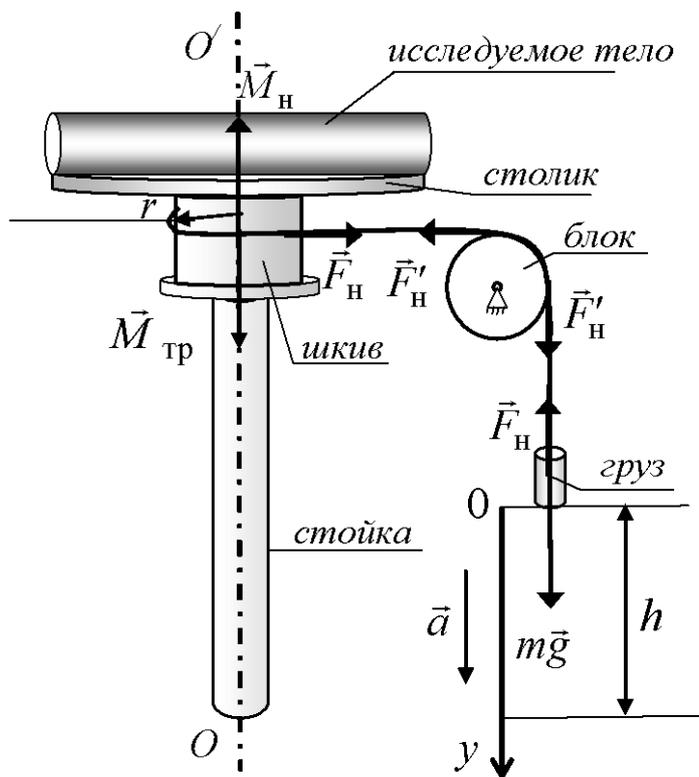


Рис. 8.1. Схема экспериментальной установки

### 3.2. Методика измерений и расчёта

При равноускоренном движении груза массой  $m$  уравнение для координаты  $y$  будет иметь вид

$$y = \frac{at^2}{2}, \quad (8.1)$$

где  $a$  – ускорение груза;  $t$  – время его движения с высоты  $h$  до пола.

Расчётные формулы для конечной скорости груза

$$v = \frac{2h}{t} \quad (8.2)$$

и его ускорения

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (8.3)$$

Расчётные формулы для кинематических характеристик вращательного движения столика со шкивом:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{2h}{rt}; \quad (8.4)$$

$$\varepsilon = \frac{a_{\tau}}{r} = \frac{2h}{rt^2}; \quad (8.5)$$

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{h}{r}, \quad (8.6)$$

где  $\omega$  – угловая скорость столика со шкивом в конце его ускоренного вращения;  $\varepsilon$  – угловое ускорение столика со шкивом;  $\varphi$  – угол поворота шкива радиуса  $r$  за время движения груза.

За время ускоренного движения груза массой  $m$  столик со шкивом сделает  $N$  оборотов:

$$N = \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (8.6)$$

Модуль силы натяжения нити, связывающей шкив с грузом массой  $m$ , равен

$$F_{\text{H}} = m(g - a). \quad (8.7)$$

В конце движения груз имеет скорость  $v$ , импульс  $P = mv$ ; кинетическую энергию  $E_{\text{кгр}} = mv^2/2$ ; начальная потенциальная энергия груза  $E_{\text{п}} = mgh$ .

Уравнение динамики вращательного движения столика со шкивом имеет вид:

$$\vec{M}_{\text{н}} + \vec{M}_{\text{тр}} = J\vec{\varepsilon}, \quad (8.8)$$

где  $\vec{M}_{\text{н}} = [\vec{r}\vec{F}_{\text{н}}]$  – момент силы натяжения нити;  $M_{\text{тр}}$  – момент силы трения;  $J$  – момент инерции шкива со столиком;  $\varepsilon$  – их угловое ускорение.

В проекции на ось вращения  $OO'$  уравнение (8.8) записывается в виде

$$M_{\text{н}} - M_{\text{тр}} = J\varepsilon, \quad (8.9)$$

откуда момент инерции  $J$  столика со шкивом равен

$$J = \frac{M_{\text{н}} - M_{\text{тр}}}{\varepsilon}. \quad (8.10)$$

Момент силы натяжения нити равен

$$M_{\text{н}} = mr(g - a), \quad (8.11)$$

где  $m$  – масса груза;  $a$  – его ускорение;  $r$  – радиус шкива.

Момент силы трения  $M_{\text{тр}}$  можно определить экспериментально подбором минимальной массы груза  $m_0$ , при которой его движение будет равномерным ( $a = 0$ ). Уравнение движения (8.7) груза для этого случая имеет вид  $F_{\text{НО}} = m_0g$ .

Момент этой силы равен

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{НО}} = m_0gr. \quad (8.12)$$

Кинетическая энергия вращения столика в конце ускоренного вращения равна

$$E_{\text{кст}} = \frac{J\omega^2}{2}. \quad (8.13)$$

Работа момента сил трения за время ускоренного вращения столика будет определяться

$$A_{\text{тр}} = M_{\text{тр}}\varphi. \quad (8.14)$$

Момент импульса столика в конце ускоренного вращения равен

$$L = J\omega. \quad (8.15)$$



### 3.4. Расчет динамических характеристик

**3.4.1.** Занесите результаты вычислений в табл. 8.3. Значения ускорения  $a$  и скорости  $v$  выпишите из табл. 8.1 и 8.2.

**3.4.2.** По формуле (8.12) рассчитайте момент силы трения  $M_{\text{тр}}$  для каждого опыта;

**3.4.3.** По формуле (8.10) рассчитайте момент инерции столика со шкивом  $J_1$  (значение углового ускорения  $\varepsilon_1$  возьмите из табл. 8.1) и системы столик со шкивом – тело  $J_2$ . Момент инерции исследуемого тела  $J_{\text{тела}}$  находится как разность  $J_2$  и  $J_1$ :

$$J_{\text{тела}} = J_2 - J_1.$$

Таблица 8.3

Результаты расчёта динамических характеристик  
поступательного движения груза

Условия опытов	Характеристики	$a$	$F_{\text{н}}$	$v$	$P$	$E_{\text{кгр}}$	$E_{\text{п}}$
		м/с <sup>2</sup>	Н	м/с	кг·м/с	Дж	Дж
Без тела на столике							
С телом на столике							

Рассчитайте теоретическое значение момента инерции тела:

$$\text{– для стержня } J_{\text{теор}} = \frac{1}{12} m_{\text{ст}} l^2, \quad (8.12)$$

где  $m_{\text{ст}}$  – масса стержня;  $l$  – его длина;

$$\text{– для диска } J_{\text{теор}} = \frac{1}{2} m_{\text{д}} R^2, \quad (8.13)$$

где  $m_{\text{д}}$  – масса диска;  $R$  – его радиус.

**3.4.4.** По формуле (8.13)–(8.15) рассчитайте приобретенную кинетическую энергию в конце вращения  $E_{\text{к}}$ , работу момента силы трения  $A_{\text{тр}}$ , момент импульса системы тел  $L$ . Занесите результаты вычислений в табл. 8.4.

### 3.5. Сделайте вывод.

Таблица 8.4

*Результаты расчета динамических характеристик  
вращательного движения столика*

Характеристики	$M_n$	$m_0$	$M_{тр}$	$J_1$	$J_2$	$J_{теор}$	$E_{кст}$	$A_{тр}$	$L$
Условия опытов	Н·м	кг	Н·м	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	кг·м <sup>2</sup>	Дж	Дж	$\frac{кг·м}{с}$
Без тела на столике					—				
С телом на столике				—					

## 9. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Назовите кинематические характеристики поступательного движения тела, дайте их определения. В чем их физический смысл?

2. Назовите кинематические характеристики вращательного движения. Дайте определение.

3. Какое движение называется равномерным? Равноускоренным?

4. Что называется моментом инерции твердого тела? Каков физический смысл момента инерции?

5. Сформулируйте второй закон Ньютона и укажите область его применения.

6. Дайте определение динамическим характеристикам вращательного движения тела относительно оси вращения: момент силы, момент инерции, момента импульса.

7. Сформулируйте основной закон динамики вращательного движения твердого тела.

8. Сформулируйте закон сохранения импульса и назовите условия его выполнения.

9. Сформулируйте закон сохранения механической энергии. Можно ли его применить для определения высоты подъема баллистического маятника после попадания в него пули.

10. Какое взаимодействие тел называется ударом? Какой удар называется упругим и неупругим?

11. Какие силы называются консервативными? Диссипативными?

12. Как рассчитать долю кинетической энергии пули, которая расходуется на неупругую деформацию при ударе в баллистический маятник?

13. Назовите виды механической энергии. Принимают ли кинетическая и потенциальная энергии абсолютное значение?

14. Сформулируйте законы сохранения импульса и механической энергии. Каковы условия выполнимости этих законов?

15. Какие законы сохранения выполняются для абсолютно упругого удара? Запишите эти законы для абсолютно упругого удара.

16. Назовите виды механической энергии. Принимают ли кинетическая и потенциальная энергии абсолютное значение?

17. Какое движение называют поступательным? Вращательным? Приведите кинематические уравнения этих движений.

18. Как связаны кинематические характеристики при поступательном и вращательном движении?

19. Как определяется момент импульса материальной точки относительно неподвижной точки и относительно оси?

20. Как определяется момент импульса твердого тела относительно оси вращения?

21. Как формулируется закон сохранения момента импульса для системы взаимодействующих тел?

## 10. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 5-е изд., стереотип. – Москва : Издат. центр «Академия», 2007. – 720 с.

2. Фирсов, А. В. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей [Электронный ресурс] : учебник для использования в учебном процессе образовательных учреждений СПО на базе основного общего образования с получением среднего общего образования / А. В. Фирсов ; под ред. Т. И. Трофимовой. – Москва : Издат. центр «Академия», 2017. – 352 с.

3. Трофимова, Т. И. Курс физики: учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов. – Изд. 12-е, испр. – Москва : Издат. центр «Академия», 2008. – 560 с.

4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учеб. пособие: для вузов: в 5 т. Т. 1. Механика. – 4-е изд., стереотип. – Москва : ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2005. – 560 с.

Составитель

Елкин Иван Сергеевич

**МЕХАНИКА. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА  
ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**

**Лабораторный практикум К-402.1**

по дисциплине «Физика»  
для технических специальностей и направлений  
подготовки всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 23.01.2020. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 2,0.

Тираж 24 экз. Заказ .

Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП Кузбасского государственного университета  
технического имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.